

# Einsatz pneumatischer Muskeln als Aktoren in der Robotik

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
der Universität Rostock

vorgelegt von

**Dominik Schindele**

geboren in Krumbach (Schwaben)

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann  
Lehrstuhl für Mechatronik / Universität Rostock  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Woernle  
Lehrstuhl für technische Mechanik/Dynamik / Universität Rostock  
Drittgutachter: Prof. Dr.-Ing. Walter Schumacher  
Institut für Regelungstechnik / TU Braunschweig  
Tag der Verteidigung: 23. November 2012

Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock

2012



Berichte aus dem  
Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock

Band 1

**Dominik Schindele**

**Einsatz pneumatischer Muskeln  
als Aktoren in der Robotik**

Shaker Verlag  
Aachen 2013

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Rostock, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1722-9

ISSN 2195-9234

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Fakultät für Maschinenbau an der Universität Rostock.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann, Inhaber des Lehrstuhls für Mechatronik für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung der vorliegenden Arbeit. Die zahlreichen Diskussionen und Anregungen haben wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Woernle, Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik für die Erstellung des Zweitgutachtens und die vielen hilfreichen Anmerkungen danken. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Schumacher, Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig für die unkomplizierte Erstellung des externen Gutachtens danken.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Kollegen für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die konstruktive Zusammenarbeit. Für seine wertvollen Beiträge möchte ich außerdem Herrn Dipl.-Ing. René Schuh danken. Herzlich Danken möchte ich auch Johann Schindele, Carina Ruch und Luise Senkel für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskripts.

Ganz besonders Danke ich meiner Frau Sibylle, die mir stets Kraft für mein Promotionsvorhaben gegeben hat. Darüber hinaus Danke ich meinen Eltern Johann und Gabriele, die mich stets in meinem Werdegang unterstützt haben.

Ich widme diese Arbeit meiner Oma Maria Schindele, die mich in Ihren letzten Jahren aufgrund meiner Tätigkeit in Rostock leider viel zu selten gesehen hat.

Rostock, im Dezember 2012

Dominik Schindele



# Kurzfassung

Pneumatische Muskeln stellen innovative pneumatische Antriebskomponenten mit einem sehr hohen Kraft/Gewicht-Verhältnis dar. Sie bestehen aus einem Gummischlauch, der durch ein spezielles Fasergewebe verstärkt ist. An den Enden sind Anbindungsstücke zur Be- bzw. Entlüftung der Muskeln sowie zum Einbau in mechanische Konstruktionen vorhanden. Dieser einfache Aufbau führt dazu, dass pneumatische Muskeln sehr preisgünstig sind, keinem Stick-Slip-Effekt unterliegen und unempfindlich gegenüber schmutziger Arbeitsumgebung sind. Deren Elastizität kann außerdem Sicherheitsvorteile bei bestimmten Anwendungen bieten. Aufgrund der genannten Vorteile stellen pneumatische Muskeln für viele Anwendungen eine interessante Alternative zu herkömmlichen pneumatischen Antrieben und teilweise auch zu elektrischen Antrieben dar. Die Kraft- und die Volumencharakteristik dieser pneumatischen Aktoren ist jedoch durch starke nichtlineare Effekte geprägt, was durch geeignete Regelungskonzepte berücksichtigt werden muss. Da es sich bei diesen Aktoren um reine Zugaktoren handelt, muss außerdem eine Rückstellkraft, z.B. in Form eines zweiten Muskels, bereitgestellt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Ansätze zur Regelung und Störgrößenreduktion vorgestellt, mit denen sich ein gutes Folgeverhalten bei hoher Dynamik von Positioniersystemen mit pneumatischen Muskeln erzielen lässt. Die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Regelungskonzepte wird an zwei unterschiedlichen Prüfständen mit pneumatischen Muskeln aufgezeigt. Bei einer Linearachse mit pneumatischen Muskeln werden die Antriebskräfte der Muskeln über Flaschenzüge auf den Schlitten übertragen, wodurch sich ein größerer Arbeitsraum im Vergleich zu einer direkten Antriebskonfiguration ergibt. Der zweite Versuchsaufbau entspricht einer Parallelkinematik mit zwei Freiheitsgraden zur Positionierung eines Endeffektors in der Ebene. Die Zugkräfte der Muskeln werden hier über Zahnriemen und Umlenkrollen auf die aktiven Gelenke übertragen.

Basis für die eingesetzten modellgestützten Verfahren zur Regelung und Störgrößenkompensation sind regelungsorientierte Modelle der untersuchten Prüfstände. Zur Modellbildung werden die entsprechenden Systeme nach deren physikalischen Eigenschaften aufgeteilt und dynamische Modelle für das Verhalten der komprimierten Luft im Muskel sowie der einzelnen mechanischen Teilsysteme erstellt. Das nichtlineare Verhalten der Muskelkraft wird durch ein statisches Kraftmodell in Kombination mit einem dynamischen Hysterese-Modell wiedergegeben. Die Charakteristik des verwendeten Proportional-Wegeventils wird durch ein nichtlineares Kennfeld approximiert.

Damit die Modelle die Realität möglichst gut abbilden, ist eine genaue Kenntnis der Modellparameter erforderlich. Für die Identifikation der Parameter des Muskelmodells wurde ein weiterer Prüfstand aufgebaut. Dieser ermöglicht eine automatisierte Identifikation der benötigten Kennwerte. Über geeignete Optimierungsverfahren lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen am realen System und dem jeweiligen Modell erreichen.

Für die untersuchten Systeme werden jeweils kaskadierte Regelungsansätze verfolgt. In schnellen unterlagerten Regelkreisen werden die Muskeldrücke geregelt, während in einem äußeren Regelkreis jeweils die Ausgangsgrößen der mechanischen Teilsysteme geregelt werden. Alternativ zu den Muskeldrücken können auch die Muskelkräfte unterlagert geregelt werden. Dieser Fall wird separat behandelt. Zur modellbasierten Regelung wird das Backstepping-Verfahren verwendet, das auf der Stabilitätstheorie von Ljapunow basiert. Dabei kann die differentielle Flachheit der geregelten Teilsysteme zur Kompensation aller Nichtlinearitäten ausgenutzt werden. Die Reglerstruktur wird mit unterschiedlichen Methoden zur Störgrößenkompensation erweitert. Neben einer adaptiven Strategie zur Schätzung der Unsicherheiten kommt auch ein Störgrößenbeobachter sowie die rekursive quadratische Gütemaßminimierung zum Einsatz. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung des Regelverhaltens besteht in der Verwendung von iterativ lernenden Regelungen. In dieser Arbeit werden ein norm-optimaler Ansatz und ein proportionaler Ansatz zur iterativen Regelung der beiden Prüfstände eingesetzt.

Im wesentlichen Teil dieser Arbeit wird jeweils ein separates Proportionalventil zur Steuerung der einzelnen Muskeln verwendet. Um Kosten zu reduzieren, besteht aber auch die Möglichkeit, Aktor und Gegenaktor mit nur einem gemeinsamen Ventil anzusteuern. Auf diesen Fall wird gesondert eingegangen.

Das hohe Potential der vorgestellten Regelungskonzepte wird anhand zahlreicher experimenteller Ergebnisse belegt. Dabei liegt das Augenmerk sowohl auf dem Trajektorienfolgeverhalten als auch auf der stationären Genauigkeit.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XIII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Der pneumatische Muskel	1
1.2 Stand der Technik	3
1.2.1 Modellbildung	4
1.2.2 Regelung pneumatischer Antriebe	5
1.2.3 Behandlung von Störgrößen	6
1.3 Ziele dieser Arbeit	7
1.4 Gliederung der Arbeit	8
<b>2 Modellbildung</b>	<b>10</b>
2.1 Kraftcharakteristik des pneumatischen Muskels	10
2.1.1 Statisches Kraftkennfeld	11
2.1.2 Modellierung der Hysterese mit dem Bouc-Wen-Modell	12
2.2 Volumencharakteristik des pneumatischen Muskels	14
2.3 Dynamik des pneumatischen Muskels	15
2.4 Ventilcharakteristik	17
2.5 High-Speed-Linearachse mit Flaschenzug	21
2.5.1 Modellierung des mechanischen Teilsystems	24
2.5.2 Statisches Reibmodell	25
2.5.3 LuGre-Reibmodell	26
2.5.4 Modellierung des pneumatischen Teilsystems	27
2.6 Fünf gelenk-Parallelroboter	28
2.6.1 Modellierung des mechanischen Teilsystems	30
2.6.2 Modellierung des pneumatischen Teilsystems	38
<b>3 Identifikation der Modellparameter</b>	<b>39</b>
3.1 Parameteridentifikation durch quadratische Gütemaßminimierung	39
3.2 Parameteridentifikation durch nichtlineare Optimierung	41
3.3 Identifikation der Muskelcharakteristiken	41
3.3.1 Identifikation der Kraftcharakteristik	43
3.3.2 Identifikation des Volumen kennfelds	47
3.4 Identifikation der Ventilcharakteristik	50
3.5 Identifikation der Reibkennwerte	53

3.6	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	55
3.6.1	High-Speed-Linearachse . . . . .	55
3.6.2	Parallelroboter . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Reglersynthese</b> . . . . .	<b>59</b>
4.1	Differentiell flache Systeme . . . . .	62
4.2	Regelung des Muskeldrucks . . . . .	62
4.3	Backstepping-Regelung . . . . .	64
4.3.1	Stabilität nichtlinearer zeitinvarianter Systeme . . . . .	64
4.3.2	Control-Ljapunow-Funktionen . . . . .	66
4.3.3	Backstepping-Entwurf für die High-Speed-Linearachse . . . . .	66
4.3.4	Adaptives Backstepping für die High-Speed-Linearachse . . . . .	70
4.3.5	Backstepping-Entwurf für den Parallelroboter . . . . .	72
4.3.6	Adaptives Backstepping für den Parallelroboter . . . . .	74
4.4	Störgrößenbeobachter . . . . .	76
4.4.1	Nichtlinearer reduzierter Beobachter . . . . .	76
4.4.2	Störgrößenbeobachter für die High-Speed-Linearachse . . . . .	77
4.4.3	Störgrößenbeobachter für den Parallelroboter . . . . .	79
4.5	Rekursive Quadratische Gütemaßminimierung . . . . .	81
4.5.1	RLS für die High-Speed-Linearachse . . . . .	83
4.5.2	RLS für den Parallelroboter . . . . .	84
4.6	Implementierung der Reglerstruktur . . . . .	86
4.6.1	Differentiation und Filterung der Messsignale . . . . .	86
4.6.2	Differentiation der Sollgrößen der unterlagerten Regelkreise . . . . .	87
4.6.3	Zeitableitung der geschätzten Unsicherheiten . . . . .	88
4.6.4	Parallelmodell zur Kompensation der Hysterese . . . . .	89
4.7	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	90
4.7.1	High-Speed-Linearachse . . . . .	91
4.7.2	Parallelroboter . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Iterativ lernende Regelung</b> . . . . .	<b>103</b>
5.1	P-ILC mit Phasenkompensationsglied . . . . .	104
5.1.1	PID-ILC . . . . .	105
5.1.2	P-ILC für die Prüfstände mit pneumatischen Muskeln . . . . .	105
5.2	Norm-optimal iterativ lernende Regelung . . . . .	109
5.2.1	NOILC für die High-Speed-Linearachse . . . . .	114
5.2.2	NOILC für den Parallelroboter . . . . .	115
5.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	116
5.3.1	High-Speed-Linearachse . . . . .	116
5.3.2	Parallelroboter . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Alternative Aktor- und Sensorkonzepte</b> . . . . .	<b>124</b>
6.1	Ansteuerung von Aktor und Gegenaktor mit einem Ventil . . . . .	124
6.1.1	High-Speed-Linearachse mit nur einem Ventil . . . . .	124
6.1.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	128
6.2	Unterlagerte Regelung der Muskelkraft . . . . .	129
6.2.1	Unterlagerte Kraftregelung für die High-Speed-Linearachse . . . . .	129

6.2.2 Experimentelle Ergebnisse . . . . .	132
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Der pneumatische Muskel der <i>Festo AG &amp; Co. KG</i> . . . . .	2
1.2	Arbeitsprinzip des pneumatischen Muskels. . . . .	3
2.1	Pneumatischer Muskel im entspannten und im kontrahierten Zustand. . . . .	11
2.2	Identifiziertes Kraftkennfeld des pneumatischen Muskels . . . . .	12
2.3	Hysteresereform für das generalisierte Bouc-Wen-Modell und gemessene Hysteresere eines pneumatischen Muskels. . . . .	15
2.4	Identifiziertes Volumenkennfeld des pneumatischen Muskels. . . . .	16
2.5	Durchflussfunktion in Abhängigkeit vom Druckverhältnis. . . . .	18
2.6	Anschlussbelegung und Leitwerte des Proportionalwegeventils. . . . .	19
2.7	Identifizierter Leitwertverlauf in Abhängigkeit von der Ventilspannung. . . . .	20
2.8	Ventilkennfeld und entsprechendes inverses Ventilkennfeld. . . . .	21
2.9	Foto der High-Speed-Linearachse und schematischer Prüfstands Aufbau. . . . .	22
2.10	Direkte und indirekte Antriebskonfiguration einer Linearachse mit pneumatischen Muskeln. . . . .	23
2.11	Schematische Darstellung des linken Flaschenzugs. . . . .	24
2.12	Statisches Reibmodell in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. . . . .	26
2.13	Foto des Fünfgelenk-Parallelroboters. . . . .	29
2.14	Antriebskonfiguration des Parallelroboters sowie separate Proportionalventile zur Belüftung der einzelnen pneumatischen Muskeln. . . . .	30
2.15	Schematischer Aufbau des Parallelroboters. . . . .	30
2.16	Skizze zur direkten und zur inversen Kinematik. . . . .	32
3.1	Prüfstand zur Identifikation der Muskelcharakteristiken. . . . .	42
3.2	Gemessene Zugkraft in Abhängigkeit vom Druck sowie gemessene Zugkraft in Abhängigkeit von der Kontraktionslänge. . . . .	43
3.3	Vergleich zwischen Messung und Modell mit identifizierten Parametern sowie identifiziertes Kraftkennfeld. . . . .	45
3.4	Vergleich der gemessenen Kraft mit der modellierten Kraft in Abhängigkeit von der Kontraktionslänge. . . . .	47
3.5	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der gemessenen Kraft mit der modellierten Kraft für den Muskeltyp DMSP-20-1083N. . . . .	47
3.6	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der gemessenen Kraft mit der modellierten Kraft für den Muskeltyp DMSP-40-1145N. . . . .	48
3.7	Vergleich zwischen Messung und Modell mit identifizierten Parametern des Muskelvolumens sowie identifiziertes Volumenkennfeld. . . . .	49
3.8	Versuchsaufbau zur Identifikation der Ventilkennwerte. . . . .	50

3.9	Vergleich von gemessenem und identifiziertem Massenstrom und der sich ergebende relative Fehler . . . . .	51
3.10	Vergleich des gemessenen und des nach der <i>Additivitäts-Methode</i> berechneten Massenstroms und der sich ergebende relative Fehler. . . . .	52
3.11	Leitwert in Abhängigkeit der Ventilspannung für das einzelne Ventil und für das eingebaute Ventil in Reihenschaltung mit Schlauch und Verschraubungen. . . . .	52
3.12	Blockstruktur der Vorsteuerung zur Messwerterfassung für die Identifikation der Reibkraft. . . . .	53
3.13	Vergleich der aus Messungen bestimmten Reibkennlinie mit der Reibkennlinie, die sich aus dem statischen Modell ergibt. . . . .	54
3.14	Vergleich des Folgeverhaltens des gesteuerten Systems. . . . .	56
3.15	Vergleich der Antriebskräfte des gesteuerten Systems mit und ohne Berücksichtigung von Krafthysterese und Reibung. . . . .	56
3.16	Endeffektorposition in der $xz$ -Ebene für das gesteuerte System mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese. . . . .	57
3.17	Endeffektorposition in $x$ - und in $z$ -Richtung mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese sowie die korrespondierenden Folgefehler. . . . .	57
3.18	Vergleich der Antriebsmomente mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese. . . . .	58
4.1	Blockstruktur des kaskadierten Regelungskonzepts. . . . .	59
4.2	Vergleich der Reglerstrukturen für Backstepping, P-ILC und NOILC . . . . .	61
4.3	Blockstruktur der unterlagerten Regelung des Muskelinnendruckes. . . . .	63
4.4	Blockstruktur der Backstepping-Regelung für die High-Speed-Linearachse. . . . .	70
4.5	Blockstruktur der adaptiven Backstepping-Regelung für die Linearachse. . . . .	71
4.6	Blockstruktur der Backstepping-Regelung für den Parallelroboter. . . . .	74
4.7	Blockstruktur der adaptiven Backstepping-Regelung für den Parallelroboter. . . . .	75
4.8	Blockstruktur der Backstepping-Regelung für die High-Speed-Linearachse inklusive Störbeobachter. . . . .	78
4.9	Blockstruktur der Backstepping-Regelung für den Parallelroboter inklusive Störbeobachter. . . . .	80
4.10	Blockstruktur der Backstepping-Regelung für die High-Speed-Linearachse inkl. Störgrößenschätzung mittels rekursiver quadratischer Gütemaßminimierung. . . . .	84
4.11	Blockstruktur der Backstepping-Regelung für den Parallelroboter inkl. Störgrößenschätzung mittels rekursiver quadratischer Gütemaßminimierung. . . . .	85
4.12	Blockstruktur der adaptiven Backstepping-Regelung für die Linearachse inklusive Hysteresekompensation. . . . .	90
4.13	Blockstruktur der adaptiven Backstepping-Regelung für den Parallelroboter inklusive Hysteresekompensation. . . . .	91
4.14	Solltrajektorien für die Schlittenposition und die Schlittengeschwindigkeit. . . . .	92
4.15	Regelfehler für die Schlittenposition und den mittleren Muskeldruck. Regelung: Adaptives Backstepping. . . . .	92
4.16	Vergleich des Positionsfehlers für verschiedene Anteile zur Störgrößenkompensation in der Reglerstruktur sowie die geschätzte Störgröße. . . . .	93
4.17	Regelfehler für die Schlittenposition und die geschätzte Unsicherheit. Regelung: Backstepping mit Störgrößenbeobachter. . . . .	93

4.18	Regelfehler für die Schlittenposition und die geschätzte Unsicherheit. Regelung: Backstepping mit RLS. . . . .	94
4.19	Regelfehler für die Schlittenposition und die geschätzte Unsicherheit infolge einer Zusatzmasse. . . . .	95
4.20	Verlauf der Muskelinnendrucke für die High-Speed-Linearachse. . . . .	95
4.21	Solltrajektorien für den Parallelroboter im Arbeitsraum. . . . .	96
4.22	Trajektorienfolgefehler im Arbeitsraum sowie der Mitteldruckfehler. Regelung: Adaptives Backstepping. . . . .	97
4.23	Trajektorien im Gelenkraum sowie Trajektorienfolgefehler. Regelung: Adaptives Backstepping. . . . .	98
4.24	Einfluss der Hysteresekompensation: Regelfehler in $x$ - und in $z$ -Richtung. Regelung: Backstepping. . . . .	99
4.25	Einfluss der Hysteresekompensation: Geschätzte Störmomente. Regelung: Backstepping. . . . .	99
4.26	Trajektorienfolgefehler im Arbeitsraum. Regelung: Backstepping mit Störbeobachter. . . . .	100
4.27	Trajektorienfolgefehler im Arbeitsraum. Regelung: Backstepping mit rekursiver quadratischer Gütemaßminimierung. . . . .	100
4.28	Trajektorienfolgefehler im Arbeitsraum im Falle einer Zusatzmasse. . . . .	101
4.29	Verlauf der Muskelinnendrucke für den Parallelroboter. . . . .	102
5.1	Blockdiagramm für die P-ILC Regelungsstruktur. . . . .	106
5.2	Blockstruktur der P-ILC-Regelung für die High-Speed-Linearachse. . . . .	107
5.3	Nyquist-Ortskurven des geschlossenen Regelkreises für die Linearachse. . . . .	107
5.4	Blockstruktur der P-ILC-Regelung für den Parallelroboter. . . . .	108
5.5	Nyquist-Ortskurven des geschlossenen Regelkreises für den Parallelroboter. . . . .	108
5.6	Blockdiagramm für die NOILC-Regelungsstruktur. . . . .	113
5.7	Blockstruktur der NOILC-Regelung für die High-Speed-Linearachse. . . . .	115
5.8	Blockstruktur der NOILC-Regelung für den Parallelroboter. . . . .	116
5.9	RMS-Fehler für die High-Speed-Linearachse . . . . .	117
5.10	RMS-Fehler (NOILC) für unterschiedliche Initialisierungen sowie RMS-Fehler für mehr als hundert Iterationen. . . . .	118
5.11	Regelfehler während der 13. Iteration (High-Speed-Linearachse). . . . .	119
5.12	RMS-Fehler für den Parallelroboter . . . . .	120
5.13	RMS-Fehler der Gelenkwinkel $q_1$ und $q_2$ . . . . .	121
5.14	RMS-Fehler mit externer Störung. . . . .	121
5.15	RMS-Fehler für hundert Iterationen. . . . .	122
5.16	Regelfehler im Gelenkraum und im Arbeitsraum. . . . .	123
5.17	Vergleich des Regelfehlers für ILC und adaptivem Backstepping. . . . .	123
6.1	Blockstruktur der mittels Backstepping geregelten Linearachse für die Konfiguration mit nur einem Ventil. . . . .	127
6.2	Solltrajektorie für die Schlittenposition und korrespondierender Regelfehler für die Variante mit einem Ventil. . . . .	128
6.3	Blockstruktur der Backstepping-Regelung mit unterlagelter Kraftregelung. . . . .	131
6.4	Solltrajektorie für die Schlittenposition und der korrespondierende Regelfehler für die Variante mit unterlagelter Kraftregelung. . . . .	132



# Symbolverzeichnis

**Abkürzung**    **Bedeutung**

---

$a_M$	Anzahl der verwendeten pneumatischen Muskeln pro Flaschenzug
$b$	Kritisches Druckverhältnis
$b_v$	Parameter zur Beschreibung der viskosen Reibung
$C$	Ventilleitwert
$e_{RMS}$	Mittlerer quadratischer Fehler
$F_C$	Coulombreibung
$F_H$	Haftreibung
$F_{hys}$	Krafthysterese
$F_m$	Mittlere Muskelkraft
$F_M$	Gesamte Muskelkraft
$F_{M,st}$	Statischer Anteil der Muskelkraft
$F_{M,hys}$	Hysterese der Muskelkraft
$F_R$	Reibkraft
$F_U$	Kraft zur Repräsentation der Unsicherheiten
$g$	Erdbeschleunigung
$\mathbf{g}$	Gravitationsvektor
$\mathbf{G}$	Gravitationsterm
$\mathbf{h}$	Vektor der Beobacherverstärkungen
$\mathbf{H}$	Beobachter-Verstärkungsmatrix
IVC	Inverse Ventilcharakteristik
$J_{A,red}$	Reduziertes Massenträgheitsmoment der Oberarme des Parallelroboters
$J_{lj}, J_{rj}$	Massenträgheitsmomente der Rollen
$J_{P1}, J_{P2}$	Massenträgheitsmomente der Unterarme des Parallelroboters
$\dot{\mathbf{J}}_R$	Jakobimatrix der Rotation
$\mathbf{J}_T$	Jakobimatrix der Translation
$k$	Anzahl der Rollen
$\mathbf{k}$	Vektor der Zentrifugal- und Coriolisanteile
$k_1, k_2, k_3$	Konfigurationsparameter
$l_A$	Oberarmlänge des Parallelroboters
$l_P$	Unterarmlänge des Parallelroboters
$\Delta \ell_M$	Kontraktionslänge des pneumatischen Muskels
$\mathbf{M}$	Massenmatrix
$m$	Reduzierte Masse der High-Speed-Linearachse

## Abkürzung    Bedeutung

---

$m_A$	Masse der Oberarme des Parallelroboters
$m_E$	Endeffektormasse
$m_{P1}, m_{P2}$	Massen der Unterarme des Parallelroboters
$m_S$	Schlittenmasse
$m_{MFl}, m_{MFr}$	Massen der Anbindungsplatten
$\dot{m}_M$	Massenstrom
$\dot{m}_M$	Massenstrom in den Muskel bzw. aus dem Muskel
$n$	Polytrophenexponent
$p_1, p_2$	Vor- und Gegendruck an einem pneumatischen Widerstand
$p_m$	Mittlerer Muskeldruck
$p_M$	Muskeldruck
$p_V$	Versorgungsdruck
$q_1, q_2$	Gelenkwinkel
$Q_{nk}$	Vektor der nichtkonservativen Momente
$r$	Radius
$r_E$	Endeffektorposition in der $xz$ -Ebene
R.D.	Reale Differentiation
$R_L$	Gaskonstante von Luft
$T$	Kinetische Energie
$T_0$	Temperatur im technischen Normzustand
$T_M$	Temperatur der Luft im Muskel
$T_S$	Abtastzeit
$T_U$	Umgebungstemperatur
$U$	Potentielle Energie
$U_V$	Ventilspannung
$V(\cdot)$	Ljapunow-Funktion
VC	Ventilcharakteristik
$V_M$	Muskelvolumen
$v_S$	Stribeckgeschwindigkeit
$x_E$	Endeffektorposition in $x$ -Richtung
$z_E$	Endeffektorposition in $z$ -Richtung
$z_S$	Schlittenposition
$\kappa$	Isentropenexponent
$\rho$	Dichte
$\rho_0$	Dichte im technischen Normzustand
$\rho_M$	Dichte der Luft im Muskel
$\tau_1, \tau_2$	Antriebsmomente des Parallelroboters
$\tau_{U1}, \tau_{U2}$	Momente zur Repräsentation der Unsicherheiten des Parallelroboters
$\psi(\cdot, \cdot, \cdot)$	Formgebungsfunktion der Hysterese
$\Psi(\cdot, \cdot)$	Durchflussfunktion