

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Bezeichnungen	VII
Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einleitung	1
1.1 Medizinisch-Wissenschaftliche Übersicht	1
1.2 Stand der außerklinischen Gerätetechnik	2
1.3 Therapeutische Bedeutung der poststationären Behandlung	3
1.4 Sozioökonomische Tragweite der außerklinischen Therapie	4
1.5 Zielsetzung der Arbeit	5
1.6 Das <i>MoreGait</i> -Gerätekonzept	6
1.6.1 <i>Motiontherapy@Home</i> und <i>MoreGait</i>	6
1.6.2 Technischer Aufbau	6
1.6.3 Patientensicherheit	8
1.6.4 Bedienbarkeit	8
1.6.5 Therapeutische Funktionalität	8
1.6.6 Patentanmeldung	10
1.7 Aufbau der Arbeit	10
2 Medizinisch-technische Grundlagen	13
2.1 Medizinische Grundlagen	13
2.1.1 Querschnittlähmung	13
2.1.2 ASIA Impairment Scale	13
2.1.3 Lokomotionstherapie	14
2.1.4 Modified Ashworth Scale (MAS)	15
2.2 Assessmentskalen zur Therapieverlaufsbewertung	15
2.2.1 Walking Index for Spinal Cord Injury II (WISCI II)	16
2.2.2 Timed up and go (TUG)-Test	16
2.2.3 6 Minuten und 10 Meter Test	16
2.2.4 Spinal Cord Injury Functional Ambulation Inventory (SCI-FAI)	17
2.2.5 Münchner Lebenszufriedenheits-Dimensionen-Liste (MDL)	17
2.3 Sensorik und Aktorik	17
2.3.1 Der pneumatische Muskel	17
2.3.2 Mobile Druckluftversorgung	19
2.3.3 Winkelsensor <i>RSC2801-118-111-101</i>	20
2.3.4 Durchflusssensor <i>SFE1-LF-F200</i>	20
2.3.5 Drucksensor <i>SDET-22T-D10-F14-U-M12</i>	21
2.3.6 Kurzhubzylinder <i>AEVC-16-10-I-P</i>	21

2.3.7	Schnellschalt-Magnetventil <i>MHE2-MS1H-3/2G-M7-K</i>	22
2.3.8	Proportional-Wegeventil <i>MPYE-5-M5-010-B</i>	22
2.4	Mess- und Rechnersysteme	24
2.4.1	dSpace Controller Boards	24
2.4.2	RSscan Insole Footscan System	24
3	Modellbildung und Identifikation	25
3.1	Kinematik	25
3.1.1	Kinematik des Teilsystems Kniegelenk	25
3.1.2	Kinematik des Teilsystems Sprunggelenk	29
3.2	Modellbildung	29
3.2.1	Mechanischer Aufbau	30
3.2.2	Kraftmodell der pneumatischen Muskeln	39
3.2.3	Druckdynamik	44
3.2.4	Volumenmodell des abgeschlossenen Behälters nach dem Stellglied	47
3.2.5	Modell der Proportional - Wegeventile	48
3.2.6	Reibungsmodell	49
3.2.7	Kurzhubzylindermodell	52
3.2.8	Reaktionskraft der Fußsohle	54
3.2.9	Gesamtmodell	55
3.3	Identifikation	57
3.3.1	Quadratische Güternaßminimierung für kennwertlineare Fehler	57
3.3.2	Experimentelles Muskelkraftmodell	59
3.3.3	Muskelvolumenmodell	64
3.3.4	Proportionalventil	66
3.3.5	Reibungsmodell	68
3.3.6	Kurzhubzylinder	69
3.3.7	Massen, Abmessungen, sonstige Parameter	70
4	Nichtlinearer Reglerentwurf	73
4.1	Trajektorienplanung	73
4.1.1	Ganganalyse	74
4.1.2	Beschreibung durch kombinierte Polynome	75
4.1.3	Trajektoriangenerator	79
4.1.4	Sicherheitskritische Trajektorienplanung	80
4.1.5	Beschränkungen der Muskelinnendrucke	80
4.1.6	Beschränkungen der Luftmassenströme	82
4.2	Zeitableitung und Filterung	83
4.2.1	Idealer Differentiator	84
4.2.2	Differenzenquotient	85
4.2.3	Finite Differenzen	88
4.2.4	Differenzenquotient mit Tiefpassfilterung	89
4.2.5	Adaptiver Differentiator	91
4.2.6	Zustandsvariablenfilterung und Zustandsbeobachtung	92
4.2.7	Differentiation mittels Kalman-Filter	92
4.2.8	Algebraische Ableitungsschätzung (AAS)	93
4.3	Nichtlineare Reglerentwurfsverfahren - Eine Übersicht	96

4.4	Reglerentwurf am Kniegelenk	98
4.4.1	Zielsetzung	99
4.4.2	Steuerbarkeit	100
4.4.3	Exakte Linearisierung	100
4.4.4	Integrator - Backstepping als Reglerentwurf zur Trajektorienfolge .	103
4.4.5	Iterativ Lernende Regelung (ILR)	109
4.4.6	Adaptive Vorsteuerung	111
4.4.7	Störgrößenschätzung und Kompensation	112
4.5	Reafferter Reglerentwurf am Sprunggelenk	114
4.6	Reglerentwurf am Stimulativen Schuh	117
4.6.1	Luenbergerbeobachter zur Zylinderhubschätzung	117
4.6.2	Druckregelung zur Kraftvariation	118
4.7	Gesamtstruktur der Regelung	119
5	Trainingsfeedback	121
5.1	Biofeedback - vom Mythos zur anerkannten Behandlungsmethode	122
5.2	Biofeedback in der Gangtherapie	123
5.3	Trainingsfeedback am Rehabilitationsgerät <i>MoreGait</i>	125
5.4	Auswertung und Analyse der Messdaten	126
5.4.1	Wahl der Referenzgrößen	126
5.4.2	Einführung des Normabstandsmaßes	126
5.4.3	Herleitung des Trainingfeedbackwerts (TFW)	129
5.4.4	Zusammenfassung der TFW-Herleitung	131
5.5	Tendenzerkennung durch Clustering	132
5.6	Bewertung	136
5.6.1	Absolute und tendenzielle Bewertung	136
5.6.2	Erhöhung der Konsistenz und Ausgabequalität	136
5.7	Implementierung und Visualisierung	138
5.8	Validierung und Ergebnisse	142
5.9	Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick	144
6	Stimulativer Schuh	145
6.1	Aufbau und Funktionsprinzip	146
6.2	Implementierung	148
6.3	Ergebnisse	150
6.3.1	Physiologisches Belastungsprofil	150
6.3.2	Rüttelreiz	152
6.4	Schlussfolgerung und Diskussion	152
7	Datenverarbeitung und Implementierung	155
7.1	Software	155
7.1.1	Die grafische Entwicklungsumgebung <i>LabVIEW</i>	155
7.1.2	Simulation Interface Toolkit (SIT)	156
7.1.3	LabVIEW Real-Time Module	156
7.1.4	LabVIEW FPGA Module	156
7.1.5	<i>MATLAB/Simulink</i>	157
7.1.6	Automatisierte Codegenerierung	157

7.2	Mensch-Maschine-Schnittstelle	158
7.2.1	Implementierung	158
7.2.2	Datenverarbeitung und Speicherung	161
7.3	Echtzeitcontroller und Hardware	162
7.4	Fernwartungsfunktion	165
7.4.1	Fernwartung mit <i>TeamViewer</i>	165
7.4.2	Fernwartung mit <i>MoreGaitTrainingMonitor</i> (MGTM)	166
8	Ergebnisse	173
8.1	Auswertungsschema	174
8.2	Experimentelle, regelungstechnische Ergebnisse am Kniegelenksystem . . .	176
8.2.1	Leerfahrt ohne adaptive Vorsteuerung (15 DS/min.)	176
8.2.2	Leerfahrt mit adaptiver Vorsteuerung (15 DS/min.)	177
8.2.3	Leerfahrt mit adaptiver Vorsteuerung (20 DS/min.)	178
8.2.4	Probandentest mit adaptiver Vorsteuerung (15 DS/min.)	179
8.3	Experimentelle, regelungstechnische Ergebnisse am Sprunggelenksystem . .	180
8.3.1	Leerfahrt (15 DS/min.)	180
8.3.2	Leerfahrt (20 DS/min.)	181
8.3.3	Probandentest (15 DS/min.)	181
8.4	Klinische Studie	182
8.4.1	Studiendesign	182
8.4.2	Derzeitige Studienergebnisse	183
8.5	Zusammenfassung und Bewertung	186
9	Zusammenfassung und Ausblick	189
	Literaturverzeichnis	191
A	Sicherheitsvorkehrungen	205
B	Modellkoeffizienten	211
B.1	Kraftmodell der pneumatischen Muskeln	211
B.2	Volumenmodell der pneumatischen Muskeln	211
B.3	Reaktionskraft der Fußsohle	212
B.4	Druck-Kraft-Hub-Kennlinie der Kurzhubzylinder	212
C	Ergänzungen zu Zeitableitung und Filterung	213
C.1	Amplituden- und Phasengang des Differenzenquotienten	213
C.2	Herleitung des algebraischen Ableitungsschätzers	214
C.3	Zeitdiskrete Darstellung des algebraischen Ableitungsschätzers	216
C.4	Modell der numerischen Ableitung für das Kalman-Filter	217
D	Ergänzungen zum Nichtlinearen Reglerentwurf am Kniegelenk	221
D.1	Ergänzungen zum stabilitätsorientierten Reglerentwurf	221
D.1.1	Definitheit skalarer Funktionen	221
D.1.2	Mathematische Stabilitätsbegriffe	221
D.1.3	Direkte Methode nach Lyapunov	222
D.1.4	Control-Lyapunov-Functions	222

D.1.5 Robuste Stabilität	223
D.2 Lie-Ableitung	224
D.3 Nachweis der differentiellen Flachheit des Kniegelenksystems	224
Index	229