

# Inhalt

<b>1 Einführung</b>	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Die Querschnittslähmung	3
1.3 Neuroprothesen	6
1.4 Prinzip und Probleme der FES	8
1.5 Stand der Forschung	10
1.6 Zielvorstellung	13
<b>2 Simulationsmodell</b>	14
2.1 Problemstellung	14
2.1.1 Wozu Simulationsmodelle in der Neuroprothetik	14
2.1.2 Komponenten beim Entwurf und Betrieb einer Neuroprothese auf der Basis von Modellbildung und Computersimulation	16
2.1.3 Konfigurationsmöglichkeiten zwischen Simulationsmodell und Realkomponenten	18
2.1.4 Realkomponenten beim Betrieb einer Neuroprothese	20
2.1.5 Simulationsmodell: Konfigurationsbeispiel	22
2.2 Muskelaktivierungsdynamik	24
2.2.1 Statisches Rekrutierungsmodell	26
2.2.2 Dynamisches Muskelaktivierungsmodell	29
2.3 Muskelkontraktionsdynamik	34
2.3.1 Das kontraktile Element	36
2.3.2 Das parallel-elastische und parallel-viskose Element	37
2.3.3 Die Sehne	38
2.3.4 Muskelskalierung und Sehnenkraftberechnung	39
2.4 Mehrkörperdynamik	40
2.4.1 Bewegungsgleichungen	40
2.4.2 Berechnung der Muskelhebelarme	42
2.4.3 Gelenkmodellierung	45
2.4.4 Vereinfachung des Muskel-Skelett-Modells durch Trennung der aktiven und passiven Muskelkomponenten	47
<b>3 Modellidentifikation und -verifikation am Beispiel der Kniestreckung</b>	51
3.1 Problemstellung und Methodik	51
3.1.1 Kniemodell	51
3.1.2 Modellparameter	52
3.1.3 Einfluß der Modellparameter auf das Modellverhalten	53

3.1.4 Versuchsaufbau und Durchführung .....	55
3.1.5 Parameterschätzung .....	55
3.2 Identifikation und Verifikation der Muskelaktivierungsdynamik .....	57
3.3 Identifikation und Verifikation der Kontraktions- und Mehrkörperdynamik .....	63
<b>4 Beispielhafte Modellanwendungen .....</b>	<b>68</b>
4.1 Reglerentwurf am Beispiel des Kniemodells .....	68
4.2 Modellbasierte Regelung am Beispiel des Kniegelenks .....	71
4.3 Optimale Wahl der zu stimulierenden Muskeln .....	75
4.4 Analyse neurophysiologischer Muskeleigenschaften bei der FES .....	76
4.5 Biomechanische Bewegungsanalyse .....	78
4.5.1 Bewegungsanalyse beim Aufstehen und Hinsetzen .....	79
4.5.2 Bewegungsanalyse bei Patienten mit Kleinhirnschädigungen .....	83
<b>5 Diskussion .....</b>	<b>85</b>
5.1 Nützlichkeit des gewählten Ansatzes .....	85
5.2 Allgemeingültigkeit des gewählten Ansatzes .....	86
5.3 Begründung der Modellkomplexität .....	87
5.4 Besonderheiten gegenüber anderer Modellansätze .....	89
5.5 Modellvereinfachungen .....	91
<b>6 Ausblick .....</b>	<b>95</b>
6.1 Interaktion dreier konkurrierender Systeme .....	95
6.2 Entwurf <i>situationsabhängiger</i> Regelungsstrategien .....	96
6.3 Künftige Fragestellungen .....	98
<b>Anhang .....</b>	<b>100</b>
A.1 Grundbegriffe .....	100
A.1.1 Körperebenen .....	100
A.1.2 Körperachsen .....	100
A.1.3 Richtungen im Raum .....	100
A.1.4 Bewegungsrichtungen .....	101
A.1.5 Versuchsbedingungen .....	101
A.2 Muskelanatomie .....	102
A.2.1 Der menschliche Bewegungsapparat .....	102
A.2.2 Bau der Skelettmuskulatur .....	102
A.3 Muskelphysiologie: Von der Erregungsausbreitung zur Muskelkontraktion ..	105
A.3.1 Aktionspotential, Nervenfaser, Motorische Einheit .....	105
A.3.2 Motorische Endplatte .....	105

A.3.3 Transversales System .....	105
A.3.4 Longitudinales System .....	106
A.3.5 Muskelkontraktion .....	106
A.4 Muskeleigenschaften .....	108
A.4.1 Alles-oder-Nichts-Gesetz .....	108
A.4.2 Zeitliche Summation der Muskelkraft .....	108
A.4.3 Räumliche Summation der Muskelkraft .....	109
A.4.4 Einfluß der Muskellänge und Kontraktionsgeschwindigkeit .....	109
A.4.5 Nichtlineare Summation (Doublet Effekt) .....	111
A.4.6 "Catch-like" Effekt .....	112
A.4.7 Muskelkraftpotenzierung .....	112
A.4.8 Muskelermüdung .....	112
A.4.9 Muskelfasertypen und ihre Eigenschaften .....	113
A.5 Charakteristiken zur Beschreibung der Muskelkontraktionsdynamik .....	115
A.5.1 Kraft-Längen-Charakteristik .....	115
A.5.2 Kraft-Geschwindigkeits-Charakteristik .....	116
A.5.3 Passiv-elastische Muskelkraft des PE Elements .....	117
A.5.4 Sehnenelastizität .....	118
A.6 Sensitivitätsanalyse .....	119
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>