

Dipl.-Ing. Ralph Berstecher, Kirchheim

# **Entwurf eines adaptiven „Fuzzy sliding-mode“- Reglers**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik Nr. **684**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Notation</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einführung und Problemstellung</b>	<b>1</b>
<b>2 „Sliding-mode“-Regler</b>	<b>5</b>
2.1 „Sliding-mode“-Regler für Eingrößensysteme . . . . .	6
2.1.1 Allgemeine Bemerkungen zu „Sliding-mode“-Reglern . . . . .	6
2.1.2 Entwurf der Schaltfunktion $s$ . . . . .	11
2.1.3 Ermittlung der Dynamik im geschlossenen Regelkreis und Regler- entwurf . . . . .	12
2.1.4 Stabilitätsuntersuchung für den Gleitzustand am Beispiel eines Doppelintegrators . . . . .	16
2.1.5 Spezielle Wahl der Schaltfunktion und Einführung des Grenz- schicht-Konzeptes . . . . .	22
2.2 „Sliding-mode“-Regler für Mehrgrößensysteme . . . . .	33
2.2.1 Definitionen für den Mehrgrößenfall . . . . .	33
2.2.2 Ermittlung der Systemdarstellung im Gleitzustand . . . . .	35
2.2.3 Entwurf strukturvariabler Regler . . . . .	40
2.2.4 Transformationen nichtlinearer Mehrgrößensysteme . . . . .	46
<b>3 Fuzzy-Control</b>	<b>47</b>
3.1 Grundbegriffe der Fuzzy-Logik . . . . .	48
3.1.1 Scharfe und unscharfe Mengen . . . . .	48
3.1.2 Konzept der linguistischen Variablen . . . . .	48
3.1.3 Linguistische Aussagen . . . . .	49
3.1.4 Elementare Fuzzy-Mengenoperationen . . . . .	50

3.1.5	Linguistische Regeln . . . . .	52
3.1.6	Fuzzy-Regelbasis . . . . .	53
3.2	Fuzzy-Regler . . . . .	54
3.2.1	Aufbau eines Fuzzy-Reglers . . . . .	54
3.2.2	Anschauliche Darstellung der Arbeitsweise . . . . .	57
3.2.3	Kennlinie eines Fuzzy-Eingrößenreglers . . . . .	58
3.2.4	Monotoner Kennlinienverlauf des Fuzzy-Reglers . . . . .	63
3.2.5	Glatte Kennlinie des Fuzzy-Reglers . . . . .	63
<b>4</b>	<b>„Fuzzy sliding-mode“-Regler</b>	<b>66</b>
4.1	Fuzzy-Regler . . . . .	66
4.2	Regelung mit „Fuzzy sliding-mode“-Reglern . . . . .	69
4.2.1	„Fuzzy sliding-mode“-Regler für Regelstrecken 2. Ordnung . . . . .	69
4.2.2	„Fuzzy sliding-mode“-Regler für Regelstrecken höherer Ordnung . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Adaption von Fuzzy-Reglern</b>	<b>76</b>
5.1	Adaptive Fuzzy-Regler . . . . .	77
5.2	Merkmale adaptiver Fuzzy-Regler . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Linguistische Adaption</b>	<b>82</b>
6.1	Adaptiver „Fuzzy sliding-mode“-Regler . . . . .	83
6.2	Linguistisch definierter Adaptionsalgorithmus . . . . .	84
6.2.1	Motivation für eine linguistische Adaptionsstrategie . . . . .	84
6.2.2	Beschreibung des linguistisch definierten Adaptionsalgorithmus' mit Methoden der klassischen Regelungstechnik . . . . .	88
6.3	Stabilitätsanalyse und Parameterkonvergenz . . . . .	96
6.3.1	Stabilitätsverhalten des „Fuzzy sliding-mode“-Reglers im geschlossenen Regelkreis . . . . .	97
6.3.2	Untersuchung der Konvergenz der Adaptionsparameter . . . . .	98
6.4	Anmerkungen zum Adaptionsalgorithmus . . . . .	104
6.4.1	„Parameterzittern“ und Einsatz eines „Fuzzy sliding-mode“-Reglers im Adaptionskreis . . . . .	104
6.4.2	Quasi-kontinuierliche Adaptionsrate . . . . .	105
6.4.3	Anmerkungen zum Gütekriterium . . . . .	105

6.4.4	Anmerkungen zur Stellgröße $u$ . . . . .	106
6.5	Verrauschter Prozeß . . . . .	106
6.6	Äquivalenter „Sliding-mode“-Regler . . . . .	107
6.7	Anleitung zur Implementierung . . . . .	110
6.7.1	Entwurfsschritte für den Regler und den Adaptionalgorithmus . . .	110
<b>7</b>	<b>Erprobung des adaptiven Fuzzy-Reglers</b>	<b>113</b>
7.1	Echtzeit-„Multitasking“-Betriebssysteme . . . . .	113
7.2	Invertiertes Pendel mit beweglicher Masse . . . . .	116
7.2.1	Pendelaufbau . . . . .	116
7.2.2	Aufschwingstrategie . . . . .	117
7.2.3	Stabilisierung im oberen Umkehrpunkt . . . . .	121
7.3	Dreiarmiger Roboter . . . . .	129
7.3.1	Aufbau des Roboters . . . . .	129
7.3.2	Vorgabe der Referenztrajektorien . . . . .	131
7.3.3	Regelung des Prototyps des Roboterarmes mit der Methode der äquivalenten Regelung . . . . .	135
7.3.4	Graphische Benutzeroberfläche . . . . .	136
7.3.5	Überlegungen zur Wahl der Entwurfparameter . . . . .	138
7.3.6	Echtzeitversuche . . . . .	139
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>148</b>
<b>A</b>	<b>Nichtlineare Systemtransformationen</b>	<b>151</b>
A.1	Eingrößenregelstrecken . . . . .	151
A.2	Mehrgrößenregelstrecken . . . . .	154
<b>B</b>	<b>Gleichungen des invertierten Pendels</b>	<b>158</b>
B.1	Geometrische Beziehungen . . . . .	158
B.2	Herleitung nach der synthetischen Methode . . . . .	159
B.2.1	Herleitung der Kräftebilanz mittels Newtonscher Axiome . . . . .	159
B.2.2	Herleitung der Momentenbilanz mittels Drallsatz . . . . .	161
B.2.3	Ermittlung der Pendelgleichungen . . . . .	162
B.3	Herleitung mit der Methode nach Lagrange . . . . .	164

B.3.1	Berechnung der Energie des Gesamtsystems . . . . .	164
B.3.2	Anwendung der Lagrangeschen Gleichungen . . . . .	165
B.4	Linearisierung des invertierten Pendels . . . . .	166
B.5	Vergleich mit dem einfach invertierten Pendel . . . . .	168
B.5.1	Zustandsraumdarstellung des linearisierten, einfach invertierten Pendels . . . . .	168
B.5.2	Betrachtungen im Frequenzbereich . . . . .	169
<b>C</b>	<b>Gleichungen des dreiarmligen Roboters</b>	<b>170</b>
C.1	Geometrische Beziehungen . . . . .	170
C.2	Anwendung der Lagrangeschen Gleichungen . . . . .	172
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>