

Dipl.-Ing. Alexander Verl, Gilching

**Methoden und  
Realisierungen zur  
nichtlinearen  
Gelenkregelung des  
DLR-Leichtbauroboters**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **671**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Historischer Hintergrund	1
1.2 Motivation und Ziel der Arbeit	3
1.3 Literaturübersicht	4
1.4 Überblick	5
<b>2. Gelenkmodell</b>	<b>6</b>
2.1 Antrieb	6
2.2 Leistungselektronik	13
2.3 Getriebe	16
2.4 Lose	27
2.5 Drehmomentsensor	28
2.6 Positionssensor	30
2.7 Das Gelenkmodell in DYMOLA	31
<b>3. Grundlagen zur Antriebsregelung</b>	<b>35</b>
3.1 Ausgangslage	35
3.1.1 Reglerstruktur	37
3.1.2 Schwingungsdämpfung	39
3.2 Linearisierungsverfahren für den Antrieb	41
3.2.1 Direkte Kompensation	41
3.2.2 Die D/Q-Transformation	45
3.2.3 Externe Linearisierung	50
3.2.4 Zustandslinearisierung	53
3.2.5 Diskussion	60
3.3 Nichtlinearer Beobachter	61
3.4 Ansätze zur Robusten Regelung	64
3.4.1 Sliding Mode Control	64
3.4.2 Strukturvariable Regelung ohne Gleitzustände	69

<b>4. Linearisierungsverfahren für das Gesamtgelenk</b>	<b>72</b>
4.1 Zustandslinearisierung	72
4.1.1 Gelenkmodell für den Reglerentwurf	73
4.1.2 Zustandslinearisierung des Gelenks	75
4.1.3 Implementierungsgerechte Zerlegung der Zustandslinearisierung	79
4.2 D/Q-Transformation	83
<b>5. Identifikation der Streckenparameter</b>	<b>86</b>
5.1 Identifikationsmethodik	88
5.2 Versuchsaufbau	92
5.3 Identifikationsgüte	95
5.4 Diskussion	99
<b>6. Entwurf einer Gelenkregelung</b>	<b>101</b>
6.1 Drehmomentmaximierung	102
6.1.1 Maximierung ohne Berücksichtigung der Strombegrenzung	103
6.1.2 Maximierung ohne Berücksichtigung der Spannungsbegrenzung	106
6.1.3 Berücksichtigung von Spannungs- und Strombegrenzung	107
6.1.4 Grenzdrehzahlen der verschiedenen Betriebsbereiche	108
6.2 Nichtlinearer Beobachter	114
6.2.1 Schätzung des elektrisch erzeugten Drehmomentes	114
6.2.2 Zustandsbeobachter	116
6.3 Entwurf des Zustandsreglers	119
6.4 Strukturvariable Regelung ohne Gleitzustände	125
6.5 Implementierung	128
6.5.1 Vergleich mit der ursprünglichen Reglerstruktur	128
6.5.2 Zielkontrolle	130
<b>7. Zusammenfassung</b>	<b>134</b>

## Anhang

<b>A. Grundbegriffe aus der nichtlinearen Regelung .....</b>	<b>138</b>
A.1 Differentialoperatoren .....	139
A.2 Einige Sätze und Definitionen .....	143
A.3 Einführung zur exakten Linearisierung .....	152
A.3.1 Grundidee der Linearisierung .....	152
A.3.2 Grundidee der Zustandslinearisierung .....	154
A.3.3 Grundidee der externen Linearisierung .....	156
A.4 Einführung zur strukturvariablen Regelung .....	158
A.4.1 Sliding Mode Control .....	158
A.4.2 Strukturvariable Regelung ohne Gleitzustände .....	162
<b>B. Abkürzungen .....</b>	<b>166</b>
<b>C. Streckenparameter .....</b>	<b>168</b>
C.1 Antrieb .....	168
C.2 Getriebe .....	169
C.3 Sensorik .....	171
C.4 Allgemeine Gelenkdaten .....	172
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>173</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>179</b>