

# Regelungssysteme im Zustandsraum I

## Struktur und Analyse

von Prof. Dr.-Ing. **Eckhard Freund**

Lehrstuhl für Automatisierung und  
Robotertechnologie, Leiter des Instituts für  
Roboterforschung, Universität Dortmund

unter Mitwirkung von  
Dr.-Ing. **Helmut Hoyer**  
Institut für Roboterforschung,  
Universität Dortmund

Mit 33 Bildern, 30 Beispielen und  
12 Übungsaufgaben mit ausführlicher Lösung

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1987

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b>	9
<b>EINFÜHRUNG</b>	11
<b>INHALTSÜBERSICHT</b>	15
<b>1. DARSTELLUNG IM ZUSTANDSRAUM</b>	17
1.1 Der Begriff des Zustandes eines Systems	17
1.2 Die Systembeschreibung mit Zustandsvariablen	18
1.3 Umwandlung einer allgemeinen skalaren Differentialgleichung	23
1.4 Modell eines Gleichstrommotors in der Zustandsraumdarstellung	25
1.5 Allgemeine Systemdarstellung mit Zustandsvariablen	28
1.6 Die Zustandsgleichungen	31
1.7 Beispiel für die Zustandsgleichungen	35
1.8 Zusammenhang zwischen Zustandsgleichungen und Übertragungsmatrix	37
Übungsaufgaben	40
<b>2. DIE ÄQUIVALENTE TRANSFORMATION VON SYSTEMEN IM ZUSTANDSRAUM</b>	43
2.1 Einführendes Beispiel	43
2.2 Die allgemeinen Transformationsgleichungen	45
2.3 Zusammenhang mit der Übertragungsmatrix	48
2.4 Beispiel für die Systemtransformation	49
2.5 Matrizen: Eigenwerte und Eigenvektoren	51
2.5.1 Eigenwerte	51
2.5.2 Cayley-Hamilton-Theorem	53
2.5.3 Eigenvektoren	54
2.5.4 Linear unabhängige Eigenvektoren	57
2.5.5 Eigenschaften bei der Transformation	58

2.6	Transformation der Zustandsgleichungen auf die Jordan-Normalform	59
2.7	Über den Aufbau der Jordan-Normalform	62
2.8	Beispiele für die Jordan-Normalform	66
	Übungsaufgaben	73
<b>3.</b>	<b>DIE LÖSUNG DER ZUSTANDSGLEICHUNGEN</b>	<b>75</b>
3.1	Einführung: Die homogene Differentialgleichung 1. Ordnung	75
3.2	Die Lösung der homogenen Zustandsdifferentialgleichung	76
3.3	Die Bestimmung der Transitionsmatrix für lineare zeitinvariante Systeme	79
3.4	Beispiel: Die homogene Lösung für ein Feder-Masse-System	83
3.5	Eigenschaften von $e^{\frac{A(t-t_0)}{}}$ und Verhalten bei der Systemtransformation	87
3.6	Die Transitionsmatrix und die homogene Lösung bei der Jordan-Normalform	89
3.7	Beispiel für die Berechnung der Transitionsmatrix	92
3.8	Die Lösung der Zustandsgleichungen	96
3.9	Beispiele für die Lösung der Zustandsgleichungen	100
	Übungsaufgaben	107
<b>4.</b>	<b>STEUERBARKEIT UND BEOBACHTBARKEIT</b>	<b>111</b>
4.1	Einführung: Steuerbarkeit bei der Jordan-Normalform	111
4.2	Steuerbarkeitsbedingung	115
4.3	Ausgangssteuerbarkeit	119
4.4	Beispiele für die Steuerbarkeit	120
4.5	Einführung: Beobachtbarkeit bei der Jordan-Normalform	128
4.6	Beobachtbarkeitsbedingung	132
4.7	Beispiele für die Beobachtbarkeit	136
4.8	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit bei äquivalenter Transformation	143
	Anhang zu Kapitel 4	147
	A 1.1 Modifikation des Cayley-Hamilton-Theorems	147

A 1.2	Endliche Reihe für $e^{\frac{A(t-t_0)}{}}$	148
A 1.3	Bestimmung der Koeffizientenwerte	149
	Übungsaufgaben	150
<b>5.</b>	<b>STEUERUNGS- UND BEOBACHTUNGS-NORMALFORMEN</b>	
		155
5.1	Grundsätzliches über die Normalformen	155
5.2	Direkte Ableitung der Beobachtungs-Normalform 1. Art	156
5.3	Die Beobachtungs-Normalform 2. Art	162
5.4	Beispiele zu den Beobachtungs-Normalformen	166
5.5	Die Steuerungs-Normalform 1. Art	180
5.6	Die Steuerungs-Normalform 2. Art	182
5.7	Beispiele für die Steuerungs-Normalformen	184
5.8	Übertragungsfunktion und Normalformen	192
5.9	Beispiel	196
5.10	Normalformen bei Mehrgrößensystemen	200
	Übungsaufgaben	216
	<b>LÖSUNGEN DER ÜBUNGSAUFGABEN</b>	219
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	271
	<b>SACHWORTVERZEICHNIS</b>	273