

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Mehrgrößen-Regelssysteme</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Zustandsdarstellung von Eingrößensystemen</b>	<b>3</b>
1.1	Klassische Eingrößenregelung .....	3
1.2	Zustandsgleichungen von Eingrößensystemen .....	7
1.2.1	Ermittlung aus der Differentialgleichung, Normalformen .....	7
1.2.2	Ermittlung aus den Systemgleichungen .....	17
1.3	Ermittlung der Übertragungsfunktion .....	19
<b>2</b>	<b>Zustandsdarstellung von Mehrgrößensystemen</b>	<b>23</b>
2.1	Mehrgrößensysteme .....	23
2.1.1	Einführung .....	23
2.1.2	Beispiele von Mehrgrößensystemen .....	25
2.2	Zustandsgleichungen von Mehrgrößensystemen .....	28
2.2.1	Herleitung aus den Systemgleichungen .....	28
2.3	Lösung der Zustandsvektor-Differentialgleichung.....	35
2.4	Ermittlung der Übertragungsmatrix .....	41
2.5	Stabilität von Mehrgrößensystemen .....	43
2.6	Verknüpfung von Mehrgrößensystemen .....	46
<b>3</b>	<b>Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit, Normalformen</b>	<b>51</b>
3.1	Steuerbarkeit .....	51
3.2	Beobachtbarkeit .....	56
3.3	Transformation auf Normalform .....	63
3.3.1	Normalformen von Eingrößensystemen .....	64
3.3.2	Steuerbarkeitsnormalformen für Mehrgrößensysteme .....	67
3.3.3	Regelungsnormalformen für Mehrgrößensysteme .....	72
3.3.4	Weitere Normalformen .....	79

<b>4</b>	<b>Reglerentwurf zur Polfestlegung</b>	<b>81</b>
4.1	Polfestlegung für Eingrößensysteme .....	82
4.2	Polfestlegung für Mehrgrößensysteme .....	86
4.2.1	Systeme in Brunovsky-Form .....	87
4.2.2	Robuste Polfestlegung .....	90
4.3	Auswahl der gewünschten Pollagen.....	94
4.3.1	Dominierendes Polpaar .....	94
4.3.2	Prototypen-Entwurf .....	96
4.3.3	Symmetrischer Wurzelort .....	100
4.3.4	Pol-/Nullstellenkompensation .....	105
4.3.5	Resümee .....	106
<b>5</b>	<b>Optimale Zustandsregelung</b>	<b>107</b>
5.1	Lineare quadratische optimale Regelung.....	107
5.2	Erzeugung eines vorgeschriebenen Stabilitätsgrades.....	120
<b>6</b>	<b>Zustandsbeobachter/-schätzer</b>	<b>125</b>
6.1	Entwurf des Einheitsbeobachters mittels Polfestlegung.....	126
6.1.1	Eingrößensysteme.....	126
6.1.2	Mehrgrößensysteme .....	131
6.2	Entwurf des Einheitsbeobachters unter Verwendung quadratischer Güteindizes.....	133
6.3	Entwurf eines Beobachters reduzierter Ordnung .....	137
6.3.1	Messung von $s$ Zuständen.....	137
6.3.2	Allgemeiner Fall des reduzierten Beobachters.....	142
6.4	Das Separationstheorem .....	143
<b>7</b>	<b>Führungs- und Störverhalten von Mehrgrößensystemen</b>	<b>147</b>
7.1	Führungsgrößenaufschaltung .....	148
7.2	Integrale Ausgangsvektorrückführung .....	152
7.3	Modellfolgeregler – Servo-Kompensator .....	158
7.4	Störgrößenaufschaltung .....	167
<b>II</b>	<b>Digitale Regelung</b>	<b>179</b>
<b>8</b>	<b>Grundlagen digitaler Regelsysteme</b>	<b>181</b>
8.1	Aufbau digitaler Regelkreise .....	182
8.2	Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs .....	187

8.3	Standardform digitaler Regelkreise .....	192
<b>9</b>	<b>Die z-Transformation</b>	<b>195</b>
9.1	Definition .....	195
9.2	Rechenregeln der z-Transformation .....	201
9.2.1	Überlagerungssätze .....	201
9.2.2	Ähnlichkeitssatz (Dämpfungssatz) .....	202
9.2.3	Verschiebungssätze .....	203
9.2.4	Faltungssatz .....	205
9.2.5	Grenzwertsätze .....	206
9.3	Die inverse z-Transformation .....	207
9.3.1	Rücktransformation durch Polynomdivision .....	208
9.3.2	Partialbruchzerlegung .....	209
9.3.3	Auswertung des Umkehrintegrals (Residuensatz) .....	210
9.4	Anwendung der z-Transformation bei der Lösung von Differenzgleichungen .....	213
<b>10</b>	<b>Diskrete Übertragungsfunktionen</b>	<b>217</b>
10.1	Die z-Übertragungsfunktion .....	217
10.1.1	Definition .....	217
10.1.2	Die Gewichtsfolge .....	220
10.1.3	Anwendung des Faltungssatzes .....	221
10.2	Z-Übertragungsfunktion der Regelstrecke .....	221
10.2.1	Grundlegende Berechnungsmethode .....	222
10.2.2	Berechnung mittels Partialbruchzerlegung .....	226
10.2.3	Berechnung mittels der Residuenmethode .....	228
10.3	Z-Übertragungsfunktion des Reglers .....	229
10.3.1	Das Halteglied-Äquivalent .....	229
10.4	Rechenregeln für diskrete Übertragungsfunktionen .....	231
10.5	Kanonische Realisierungen von z-Übertragungsfunktionen .....	235
<b>11</b>	<b>Stabilität und Zeitverhalten diskreter Systeme</b>	<b>241</b>
11.1	Stabilitätsbedingungen .....	241
11.2	Das Jury-Stabilitätskriterium .....	245
11.3	Vergleich der Lage der Pole in der s-Ebene und der z-Ebene .....	247
<b>12</b>	<b>Quasikontinuierlicher Entwurf digitaler Regler</b>	<b>255</b>
12.1	Digitale Realisierung analoger Regler .....	255
12.1.1	Das Euler-Verfahren .....	255
12.1.2	Die bilineare Transformation .....	258

12.1.3	Der PID-Regelalgorithmus .....	260
12.1.4	Das diskrete Äquivalent .....	262
12.1.5	Das Halteglied-Äquivalent .....	266
12.1.6	„Direkte z-Transformation“ .....	267
12.1.7	Vergleich der entworfenen Regler .....	269
12.2	Der digitale Regler nach Takahashi .....	274
12.3	„Reglerüberlauf“ (Controller Wind-Up) .....	277

### **13 Ortskurvenverfahren 285**

13.1	Das Wurzelortskurvenverfahren .....	285
13.1.1	Grundlagen des Entwurfsverfahrens .....	285
13.1.2	Stabilitätsgebiete in der z-Ebene .....	286
13.1.3	Entwurf eines Reglers .....	288
13.2	Der Entwurf mithilfe des Bode-Diagramms .....	291
13.2.1	Das „diskrete“ Bode-Diagramm .....	291
13.2.2	Die w-Transformation .....	293
13.2.3	Entwurf eines Reglers .....	296

### **14 Entwurf digitaler Kompensationsregler 301**

14.1	Der direkte Entwurf nach Ragazzini .....	301
14.2	Der Entwurf auf endliche Einstellzeit .....	311
14.3	Reglerentwurf mittels Polvorgabe .....	317
14.4	Entwurf von Kompensationsreglern für das Störverhalten .....	321

### **15 Adaptive und selbsteinstellende Regler 323**

15.1	Autotuning von Reglern .....	324
15.2	Gain-Scheduling .....	327
15.3	Selbsteinstellende Regler .....	328
15.3.1	Parameterschätzung .....	329
15.3.2	Reglerentwurf .....	335
15.4	Modell-Referenz-Adaptive Systeme (MRAS) .....	337
15.4.1	Die MIT-Regel .....	337
15.4.2	Anwendung der MIT-Regel .....	338

## **III Fuzzy-Regelung 343**

### **16 Grundlagen „unscharfer“ Mengen (Fuzzy-Mengen) 345**

16.1	Unschärfe Informationen und Fuzzy-Mengen .....	345
------	--	-----

16.2	Operatoren für Fuzzy-Mengen .....	349
16.3	Linguistische Variablen und Terme — Fuzzifizierung.....	353
<b>17</b>	<b>Fuzzy-logisches Schließen (Fuzzy-Inferenz)</b>	<b>357</b>
17.1	Regeln für Fuzzy-logisches Schließen .....	357
17.2	Fuzzy-Relationen .....	358
17.3	Fuzzy-Inferenz .....	362
17.3.1	WENN-DANN-Regeln mit einer Prämisse .....	362
17.3.2	WENN-DANN-Regel mit mehreren Teilprämissen .....	365
17.3.3	Mehrere WENN-DANN-Regeln .....	366
17.3.4	Zusammenfassung des MAX-MIN-Inferenzschemas .....	370
17.3.5	Andere Inferenzschemata .....	373
17.4	Defuzzifizierung .....	374
17.4.1	Schwerpunktmethode .....	375
17.4.2	Singletons als Ausgangs-Fuzzy-Mengen .....	376
<b>18</b>	<b>Grundlagen der Fuzzy-Regelung (Fuzzy-Control)</b>	<b>381</b>
18.1	Struktur eines Fuzzy-Reglers .....	381
18.2	Entwurf eines Fuzzy-Reglers .....	384
18.2.1	Festlegung der Ein- und Ausgangsgrößen .....	384
18.2.2	Wertebereich der Ein- und Ausgangssignale .....	384
18.2.3	Definition der linguistischen Terme.....	385
18.2.4	Aufstellen der WENN-DANN-Regeln.....	386
18.2.5	Fuzzy-Mengen der Ausgangsgröße .....	387
18.3	Kenmlinien von Fuzzy-Reglern .....	387
18.4	Fuzzy-PD-Regler .....	392
18.5	Fuzzy-PI-Regler .....	398
18.6	Fuzzy-PID-Regler.....	399
<b>19</b>	<b>Fuzzy-Regler im Regelkreis</b>	<b>401</b>
19.1	Einsatz von Fuzzy-Reglern .....	401
19.2	Regelung einer Verzögerungsstrecke mit einem Fuzzy-Regler .....	402
19.2.1	Fuzzy-PI-Regler mit MAX-PROD-Inferenz und Singletons als Ausgangs-Fuzzy-Mengen.....	402
19.2.2	Fuzzy-PI-Regler mit MAX-MIN-Inferenz und Defuzzifizierung mittels der Schwerpunkt-Methode .....	404
19.2.3	Eingangs-Fuzzy-Mengen nur teilweise überlappend, MAX-PROD- Inferenzmethode und Singletons als Ausgangs-Fuzzy-Mengen .....	405
19.3	Regelung einer integrierenden Regelstrecke mit einem Fuzzy-Regler .....	407

19.4	Stabilität von Fuzzy-Regelungssystemen.....	413
<b>A</b>	<b>Formeln zur Matrizenrechnung</b>	<b>415</b>
A.1	Grundlagen.....	415
A.2	Determinanten, Minoren und Kofaktoren.....	421
A.3	Adjungierte und inverse Matrizen .....	424
A.4	Lineare Unabhängigkeit, Rang einer Matrix .....	427
A.5	Eigenwerte und Eigenvektoren. ....	429
A.6	Das Caley-Hamilton-Theorem. ....	432
A.7	Definite und semidefinite Matrizen, Normen von Vektoren und Matrizen, Orthogonalität .....	432
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>435</b>
	<b>Namens- und Sachverzeichnis</b>	<b>441</b>
	<b>Glossar</b>	<b>447</b>