

Inhaltsverzeichnis

I	Mehrgrößen-Regelssysteme	1
1	Zustandsdarstellung von Eingrößensystemen	3
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
2	Zustandsdarstellung von Mehrgrößensystemen	23
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
3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit, Normalformen	51
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

4	Reglerentwurf zur Polfestlegung	81
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
5	Optimale Zustandsregelung	107
5.1	Lineare quadratische optimale Regelung.....	107
5.2	Erzeugung eines vorgeschriebenen Stabilitätsgrades.....	120
6	Zustandsbeobachter/-schätzer	125
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
7	Führungs- und Störverhalten von Mehrgrößensystemen	147
7.1	Führungsgrößenaufschaltung	148
7.2	Integrale Ausgangsvektorrückführung	152
7.3	Modellfolgeregler – Servo-Kompensator	158
7.4	Störgrößenaufschaltung	167
II	Digitale Regelung	179
8	Grundlagen digitaler Regelsysteme	181
8.1	Aufbau digitaler Regelkreise	182
8.2	Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs	187

8.3	Standardform digitaler Regelkreise	192
9	Die z-Transformation	195
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
10	Diskrete Übertragungsfunktionen	217
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
11	Stabilität und Zeitverhalten diskreter Systeme	241
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
12	Quasikontinuierlicher Entwurf digitaler Regler	255
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
17	Fuzzy-logisches Schließen (Fuzzy-Inferenz)	357
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
18	Grundlagen der Fuzzy-Regelung (Fuzzy-Control)	381
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
19	Fuzzy-Regler im Regelkreis	401
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
A	Formeln zur Matrizenrechnung	415
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
	Literaturverzeichnis	435
	Namens- und Sachverzeichnis	441
	Glossar	447