

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	13
1.1 Erste Orientierung	13
1.2 Steuerung	14
1.3 Regelung	21
1.4 Weitere Beispiele für Steuerungen und Regelungen	29
1.5 Zur Lösung regelungstechnischer Aufgabenstellungen	35
2 Analoge Übertragungsglieder	41
2.1 Lineare zeitinvariante Übertragungsglieder (LZI-Glieder)	41
2.2 Wirkungsplan und grafische Simulationsprogramme	47
2.3 Mathematische Modellbildung	51
2.3.1 Theoretische Modellbildung (mit Linearisierung)	51
2.3.2 Experimentelle Modellbildung (Identifikation)	61
2.3.3 Normierung von mathematischen Modellen	67
2.4 Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	68
2.4.1 Sprungantwort und Einheitssprungantwort	69
2.4.2 Impulsantwort und Einheitsimpulsantwort	71
2.4.3 Anstiegsantwort und Einheitsanstiegsantwort	73
2.5 Frequenzgang	75
2.5.1 Berechnung des Frequenzgangs	75
2.5.2 Bode-Diagramm (Frequenzkennlinien) und Ortskurve	77
2.6 Übertragungsfunktion	80
2.6.1 Übertragungsfunktion und Differenzialgleichung	81
2.6.2 Verknüpfung von LZI-Gliedern	82
2.6.3 Übertragungsfunktion und andere Kennfunktionen	87
2.6.4 Pole und Nullstellen (P-N-Plan)	89
2.7 Stabilität	91
2.7.1 Zum Begriff der Stabilität	92
2.7.2 Grundlegendes Stabilitätskriterium für LZI-Glieder	93
2.7.3 Hurwitz-Kriterium	98
2.8 Einfache LZI-Glieder	99
2.8.1 P-Glied	99
2.8.2 P-T ₁ -Glied	101
2.8.3 P-T ₂ -Glied	104
2.8.4 T _r -Glied	108
2.8.5 I- und I-T ₁ -Glied	110
2.8.6 D- und D-T ₁ -Glied	112
2.8.7 Übersicht	114

3 Regelstrecken	116
3.1 Einteilung der Regelstrecken	118
3.2 Regelstrecken mit Ausgleich	120
3.2.1 Regelstrecken mit Ausgleich und ohne Verzögerung	120
3.2.2 Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	121
3.2.3 Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung höherer Ordnung	124
3.3 Regelstrecken ohne Ausgleich	130
3.3.1 Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung	130
3.3.2 Regelstrecken ohne Ausgleich und mit Verzögerung	132
3.4 Regelstrecken mit Totzeit	134
3.5 Regelbarkeit von Strecken	136
4 Analoge Regler	138
4.1 Einteilung der Regler	138
4.2 Stetige Regler	140
4.2.1 P-Regler	141
4.2.2 I-Regler	147
4.2.3 PI-Regler	150
4.2.4 PD-Regler	153
4.2.5 PID-Regler	156
4.2.6 Bleibende Regeldifferenzen, Genauigkeit	158
4.2.7 Unempfindliche Reglerrealisierung	159
4.3 Unstetige Regler	161
4.3.1 Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich	163
4.3.2 Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich	168
4.3.3 Zweipunktregler mit stetiger Rückführung	170
4.3.4 Dreipunktregler mit stetiger Rückführung	172
5 Analoger Regelkreis	175
5.1 Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten	176
5.2 Standard-Konfigurationen von Strecke und Regler	179
5.3 Frequenzgang des offenen Regelkreises	180
5.3.1 Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve	180
5.3.2 Stabilitätsanalyse anhand der Frequenzkennlinien	187
5.3.3 Frequenzkennlinien als Entwurfswerkzeug (FKL-Verfahren)	191
5.4 Wurzelortskurven (WOK-Verfahren)	201
5.5 Einstellverfahren	209
5.5.1 Optimierung der Reglerparameter	210
5.5.2 Einstellregeln	214
5.6 Vermaschte Regelkreise	218
5.6.1 Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung	218
5.6.2 Regelkreis mit Hilfsregelgrößen-Aufschaltung	221

5.6.3	Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung)	224
5.6.4	Regelkreis mit Störgrößenregelung	225
5.6.5	Mehrgrößenregelungen	226
5.7	Regeleinrichtung mit Strukturumschaltung („Anfahren“ von Regelkreisen)	227
5.8	Selbsteinstellende (adaptive) Regelkreise	228
5.9	Nichtlineare Regelkreise	229
6	Digitale Reglerrealisierung (DDC)	234
6.1	Überblick	234
6.2	Funktionseinheiten einer digitalen Regeleinrichtung	236
6.2.1	Analog-Digital-Umsetzung	236
6.2.2	Digitaler Regler	239
6.2.3	Digital-Analog-Umsetzung	240
6.2.4	Annahmen beim Berechnungsmodell des digitalen Reglers	241
6.3	Digitaler PID-Regler.	241
6.3.1	P-Anteil	242
6.3.2	I-Anteil	243
6.3.3	D-Anteil	245
6.3.4	Stellungs- und Geschwindigkeitsalgorithmus	245
6.4	Berechnung weiterer Regelalgorithmen	249
7	Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke.	254
7.1	Einführung	254
7.2	Digital-Analog-Umsetzung und z-Transformation	255
7.3	Diskretisierungsverfahren	260
7.4	Diskretisierungsbeispiele	262
7.4.1	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	263
7.4.2	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 2. Ordnung	264
7.4.3	Strecke ohne Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	268
8	Digitale Übertragungsglieder	271
8.1	Digitale LZI-Glieder	271
8.2	Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	272
8.3	z-Übertragungsfunktion	277
8.4	Wirkungsplan und grafische Programmierung	282
8.5	Stabilität	283
9	Digitaler Regelkreis	288
9.1	Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern	289
9.2	Einstellverfahren, Einstellregeln	295

- 10 Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller) 298**
 - 10.1 Einordnung 298
 - 10.2 Regelbasis, linguistische Größe und Fuzzy-Menge 299
 - 10.3 Fuzzy-logische Operationen 305
 - 10.4 Informationsverarbeitung im Fuzzy-Regler 306
 - 10.4.1 Fuzzifizierung der Regeldifferenz 307
 - 10.4.2 Bestimmung des Erfüllungsgrades jeder Regel 308
 - 10.4.3 Ermittlung der Stellgrößen-Fuzzy-Menge jeder Regel 310
 - 10.4.4 Bestimmung der resultierenden Stellgrößen-Fuzzy-Menge 311
 - 10.4.5 Defuzzifizierung der Stellgröße 312
 - 10.5 Kennlinien von Fuzzy-Reglern 313
 - 10.6 Fuzzy-PID-Regler 317

- 11 Regelungstechnische Baueinheiten 320**
 - 11.1 Mess- und Übertragungseinrichtungen 320
 - 11.1.1 Sensoren 320
 - 11.1.2 Umformer, Wandler 322
 - 11.1.3 Signalübertragung 325
 - 11.2 Verstärker und analoge Regler 328
 - 11.2.1 Elektrische Verstärker und Regler 328
 - 11.2.1.1 Elektrische Verstärker 328
 - 11.2.1.2 Elektrische Regler 336
 - 11.2.1.3 Rechenglieder 338
 - 11.2.2 Pneumatische Verstärker und Regler 342
 - 11.2.2.1 Pneumatische Verstärker 343
 - 11.2.2.2 Pneumatische Regler 345
 - 11.2.3 Hydraulische Verstärker und Regler 349
 - 11.2.3.1 Hydraulische Verstärker 350
 - 11.2.3.2 Hydraulische Regler 351
 - 11.3 Einrichtungen zur direkten digitalen Regelung (DDC). 353
 - 11.3.1 Analog-Digital-Umsetzung 353
 - 11.3.2 Prozessrechner 357
 - 11.3.2.1 Hardware 357
 - 11.3.2.2 Software, Programmierung 360
 - 11.3.3 Digital-Analog-Umsetzung 364
 - 11.4 Stellglieder und Stellantriebe 365
 - 11.4.1 Stellglieder 365
 - 11.4.1.1 Elektrische Stellglieder 365
 - 11.4.1.2 Stellventile 365
 - 11.4.1.3 Drosselklappen 370
 - 11.4.2 Stellantriebe 370
 - 11.4.2.1 Elektrische Stellmotoren 370
 - 11.4.2.2 Pneumatische Stellmotoren 377

11.4.2.3 Hydraulische Stellmotoren 378
 11.4.2.4 Kombinierte Stellmotoren 381

Anhang

A.1 Einstieg in Matlab/Simulink 384
 A.2 Anwendungen der komplexen Rechnung 391
 A.3 Anwendungen der Laplace-Transformation 395
 A.4 Anwendungen der z-Transformation 402
 A.5 Skizzieren von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm) 410

Ergänzende und weiterführende Literatur 418

Literatur zu Matlab/Simulink 420

Normen und Richtlinien 421

Formelzeichen 423

Glossar 427

Sachwortverzeichnis 433