

Heinz Mann † • Horst Schiffelgen † • Rainer Froriep • Klaus Webers

Einführung in die Regelungstechnik

Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler,
Regler-Realisierung, Software

12., neu bearbeitete Auflage

Mit 270 Bildern

HANSER

Inhalt

Vorwort	5
1 Einleitung	15
1.1 Erste Orientierung	15
1.2 Steuerung	17
1.3 Regelung	24
1.4 Weitere Beispiele für Steuerungen und Regelungen	32
1.5 Zur Lösung regelungstechnischer Aufgabenstellungen	37
1. Aufgabenstellung (Spezifikationen) für Regelung bzw. Regler formulieren	37
2. Varianten für geeignetes Reglerverfahren ausarbeiten	39
3. Bestes Reglerverhalten technisch realisieren	40
2 Analoge Übertragungsglieder	43
2.1 Lineare zeitinvariante Übertragungsglieder (LZI-Glieder)	44
2.2 Wirkungsplan und grafische Simulationsprogramme	50
2.3 Mathematische Modellbildung	54
2.3.1 Theoretische Modellbildung (mit Linearisierung)	55
2.3.2 Experimentelle Modellbildung (Identifikation)	66
2.3.3 Normierung von mathematischen Modellen	72
2.4 Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	74
2.4.1 Sprungantwort und Einheitssprungantwort	75
2.4.2 Impulsantwort und Einheitsimpulsantwort	78
2.4.3 Anstiegsantwort und Einheitsanstiegsantwort	80
2.5 Frequenzgang	82
2.5.1 Berechnung des Frequenzganges	82
2.5.2 Bode-Diagramm (Frequenzkennlinien) und Ortskurve	85

2.6	Übertragungsfunktion	88
2.6.1	Übertragungsfunktion und Differenzialgleichung	88
2.6.2	Verknüpfung von LZI-Gliedern	90
2.6.3	Übertragungsfunktion und andere Kennfunktionen	97
2.6.4	Pole und Nullstellen (<i>P-N</i> -Plan)	99
2.7	Stabilität	102
2.7.1	Zum Begriff der Stabilität	102
2.7.2	Grundlegendes Stabilitätskriterium für LZI-Glieder	104
2.7.3	Hurwitz-Kriterium	109
2.8	Einfache LZI-Glieder	111
2.8.1	P-Glied	111
2.8.2	P-T ₁ -Glied	113
2.8.3	P-T ₂ -Glied	116
2.8.4	T ₁ -Glied	122
2.8.5	I- und I-T ₁ -Glied	123
2.8.6	D- und D-T ₁ -Glied	126
2.8.7	Übersicht	129
3	Regelstrecken	130
3.1	Einteilung der Regelstrecken	132
3.2	Regelstrecken mit Ausgleich	134
3.2.1	Regelstrecken mit Ausgleich und ohne Verzögerung	135
3.2.2	Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung erster Ordnung	135
3.2.3	Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung höherer Ordnung ..	140
3.3	Regelstrecken ohne Ausgleich	146
3.3.1	Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung	146
3.3.2	Regelstrecken ohne Ausgleich und mit Verzögerung	148
3.4	Regelstrecken mit Totzeit	150
3.5	Regelbarkeit von Strecken	153
4	Analoge Regler	155
4.1	Einteilung der Regler	155
4.2	Stetige Regler	157
4.2.1	P-Regler	159
4.2.2	I-Regler	164
4.2.3	PI-Regler	168
4.2.4	PD-Regler	170
4.2.5	PID-Regler	173
4.2.6	Bleibende Regeldifferenzen, Genauigkeit	175

4.3	Unstetige Regler	176
4.3.1	Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich	178
4.3.2	Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich	184
5	Analoger Regelkreis	186
5.1	Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten	187
5.2	Standard-Konfigurationen von Strecke und Regler	191
5.3	Frequenzgang des offenen Regelkreises	191
5.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve	192
5.3.2	Stabilitätsanalyse anhand der Frequenzkennlinien	200
5.3.3	Frequenzkennlinien als Entwurfswerkzeug (FKL-Verfahren)	204
5.4	Wurzelortskurven (WOK-Verfahren)	215
5.5	Einstellverfahren	225
5.5.1	Optimierung der Reglerparameter	225
5.5.2	Einstellregeln	229
5.6	Vermaschte Regelkreise	233
5.6.1	Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung	233
5.6.2	Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung)	237
5.6.3	Regelkreis mit Störgrößenregelung	239
5.6.4	Mehrgrößenregelungen	239
5.7	Regeleinrichtung mit Strukturumschaltung („Anfahren“ von Regelkreisen)	240
5.8	Selbsteinstellende (adaptive) Regelkreise	241
5.9	Nichtlineare Regelkreise	242
6	Digitale Reglerrealisierung (DDC)	247
6.1	Überblick	247
6.2	Funktionseinheiten einer digitalen Regeleinrichtung	249
6.2.1	Analog-Digital-Umsetzung	250
6.2.2	Digitaler Regler	253
6.2.3	Digital-Analog-Umsetzung	254
6.2.4	Annahmen beim Berechnungsmodell des digitalen Reglers	255
6.3	Digitaler PID-Regler	255
6.3.1	P-Anteil	256
6.3.2	I-Anteil	256
6.3.3	D-Anteil	259
6.3.4	Stellungs- und Geschwindigkeitsalgorithmus	259
6.4	Berechnung weiterer Regelalgorithmen	264

7	Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke	269
7.1	Einführung	269
7.2	Digital-Analog-Umsetzung und z -Transformation	271
7.3	Diskretisierungsverfahren	276
7.4	Diskretisierungsbeispiele	279
7.4.1	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	279
7.4.2	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 2. Ordnung	281
7.4.3	Strecke ohne Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	286
8	Digitale Übertragungsglieder	288
8.1	Digitale LZI-Glieder	288
8.2	Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	290
8.3	z -Übertragungsfunktion	295
8.4	Wirkungsplan und grafische Programmierung	302
8.5	Stabilität	304
9	Digitaler Regelkreis	309
9.1	Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern	310
9.2	Einstellverfahren, Einstellregeln	312
10	Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller)	315
10.1	Einordnung	315
10.2	Regelbasis, linguistische Größe und Fuzzy-Menge	317
10.3	Fuzzy-logische Operationen	323
10.4	Informationsverarbeitung im Fuzzy-Regler	324
10.4.1	Fuzzifizierung der Regeldifferenz	326
10.4.2	Bestimmung des Erfüllungsgrades jeder Regel	327
10.4.3	Ermittlung der Stellgrößen-Fuzzy-Menge jeder Regel	328
10.4.4	Bestimmung der resultierenden Stellgrößen-Fuzzy-Menge	329
10.4.5	Defuzzifizierung der Stellgröße	330
10.5	Kennlinien von Fuzzy-Reglern	332
10.6	Fuzzy-PID-Regler	336
11	Rapid Control Prototyping	340
11.1	Einordnung	340
11.2	Low-Cost-RCP-System	342
11.2.1	Echtzeitbetrieb und Abtastzeit	344

11.2.2 Reglermodell und Diskretisierung	345
11.2.3 Datenaustausch Zielrechner/Entwicklungsrechner	348
Anhang	350
A.1 Einstieg in Matlab/Simulink	350
A.2 Anwendungen der komplexen Rechnung	357
A.3 Anwendungen der Laplace-Transformation	362
A.4 Anwendungen der z-Transformation	371
A.5 Skizzieren von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm)	380
Ergänzende und weiterführende Literatur	388
Literatur zu Matlab/Simulink	391
Normen und Richtlinien	392
Formelzeichen	394
Glossar	399
Index	407