

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	11
1.1	Systeme und Signale.....	11
1.2	Steuerung und Regelung.....	15
2	Lineare, kontinuierliche Systeme	20
2.1	Eigenschaften von linearen Systemen	20
2.2	Darstellungsformen von Systemen	21
2.2.1	Blockschaltbild (Strukturbild)	21
2.2.2	Signalflussbild (Wirkungsplan)	22
2.3	Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich	24
2.3.1	Differenzialgleichung	24
2.3.2	Systembeschreibung mit Hilfe von Testfunktionen	27
2.4	Beschreibung linearer Systeme im Bildbereich	30
2.4.1	Laplace-Transformation	30
2.4.2	Übertragungsfunktion	40
2.4.3	Frequenzgang	44
2.5	Grundlegende Eigenschaften ausgewählter Systeme	52
2.6	Zustandsraummodell	67
2.6.1	Definition	67
2.6.2	Regelungsnormalform für Eingrößensysteme	69
2.6.3	Beobachtungsnormalform für Eingrößensysteme.....	71
2.6.4	Diagonalform, Jordan'sche Normalform.....	71
2.6.5	Ähnlichkeitstransformation	73
2.6.6	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	76
2.6.7	Lösung der Zustandsgleichung im Laplace-Bereich	77

2.6.8	Zusammenhang von Zustandsraummodell und Übertragungsfunktion bei Eingrößensystemen	78
2.6.9	Zustandsraummodell gekoppelter Eingrößensysteme	78
2.7	Analyse von Systemeigenschaften.....	79
2.7.1	Stabilität.....	79
2.7.2	Steuerbarkeit.....	82
2.7.3	Beobachtbarkeit.....	83
3	Nichtlineare Systeme	84
3.1	Eigenschaften von nichtlinearen Systemen.....	84
3.2	Nichtlineares Zustandsraummodell.....	85
3.3	Linearisierung.....	86
3.3.1	Linearisierung statischer Nichtlinearitäten.....	86
3.3.2	Linearisierung nichtlinearer Differenzialgleichungen.....	87
3.3.3	Linearisierung nichtlinearer Zustandsraummodelle	87
3.3.4	Linearisierung durch Rückführung	89
3.3.5	Linearisierung mit inverser Kennlinie	89
3.3.6	Harmonische Linearisierung (Beschreibungsfunktion).....	90
4	Modellbildung	95
4.1	Definition und Einteilung von Modellen	95
4.2	Prozessanalyse (theoretischer Weg).....	99
4.2.1	Physikalische Analogien	99
4.2.2	Bilanzraummethode	105
4.3	Prozessidentifikation (experimenteller Weg).....	107
4.3.1	Methoden zur Auswertung der Sprungantwort	107
4.3.2	Parameterschätzung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate	122
4.3.3	Ermittlung der Frequenzantwort	126

8	Inhaltsverzeichnis	
5	Einschleifiger Regelkreis	129
5.1	Struktur und Übertragungsverhalten.....	129
5.2	Stabilität im geschlossenen Regelkreis.....	129
5.3	Definition und Bedeutung wichtiger Gütemaße	132
5.3.1	Zeitbereich, Sprungantwort	132
5.3.2	Gütfunktionale im Zeitbereich	133
5.3.3	Frequenzbereich	135
5.3.4	Zusammenhang der Kenngrößen im Zeit- und Frequenzbereich für Führungsverhalten	137
5.3.5	Kenngrößen für Störverhalten	140
5.4	Reglerentwurf.....	141
5.4.1	Entwurfsschritte.....	141
5.4.2	Anforderungen an die Regelung	141
5.4.3	Auswahl der Reglerstruktur.....	142
5.4.4	Reglerentwurf mit empirischen Einstellregeln.....	143
5.4.5	Reglerentwurf im Frequenzbereich	149
5.4.6	Polvorgabe.....	157
5.4.7	Parameteroptimierung	161
5.5	Praktische Aspekte bei der Reglerrealisierung	163
5.5.1	Modifikationen des PID-Algorithmus	163
5.5.2	Anti-Windup-Maßnahmen.....	164
5.5.3	Hand-Automatik-Umschaltung.....	166
5.6	Realisierung von Reglern mit analogen Bausteinen	167
5.7	Digitale Realisierung von Reglern.....	169
5.7.1	Diskretisierung des PID-Reglers	169
5.7.2	Wahl der Abtastzeit	174
5.7.3	Einstellregeln unter Berücksichtigung der Abtastzeit.....	175

	Inhaltsverzeichnis	9
6	Weiterführende Regelkonzepte	178
6.1	Behandlung von Störgrößen	178
6.2	Verwendung von Hilfsregelgrößen.....	180
6.3	Verwendung von Hilfsstellgrößen	182
6.4	Smith-Prädiktor	184
6.5	Mehrgrößenregelung.....	186
6.5.1	Mehrgrößenregelstrecke	186
6.5.2	Entkopplungsregler.....	189
7	Zustandsregelung	193
7.1	Entwurf von Zustandsreglern.....	193
7.1.1	Konzept der Zustandsregelung	193
7.1.2	Entwurf von Zustandsreglern durch Polvorgabe.....	193
7.1.3	Zustandsregler durch Optimierung (LQR).....	196
7.1.4	Zustandsrückführung mit Vorfilter	199
7.1.5	Zustandsrückführung mit zusätzlichem I-Regler	200
7.2	Zustandsbeobachtung kontinuierlicher Systeme	201
7.2.1	Mathematisches Modell des Beobachters nach Lueneberger	201
7.2.2	Stabilität und Eigenschaften des Beobachters.....	203
7.2.3	Dualität zwischen Zustandsregler und Beobachter	204
7.2.4	Beobachterentwurf.....	205
7.2.5	Entwurf eines reduzierten Beobachters.....	206
7.3	Regelung unter Verwendung beobachteter Zustandsgrößen.....	208

10	Inhaltsverzeichnis	
8	Nichtlineare Regelkreise	211
8.1	Regelkreise mit Zweipunktgliedern im Zeitbereich.....	211
8.1.1	Zweipunktregler ohne Hysterese an P-T ₁ -T _f -Strecke.....	211
8.1.2	Zweipunktregler mit Hysterese an P-T ₁ -Strecke.....	213
8.1.3	Zweipunktregler mit Hysterese an P-T ₁ -T _f -Strecke	214
8.1.4	Zweipunktregler mit Hysterese an I-T _f -Strecke	216
8.2	Regelkreise mit Dreipunktgliedern.....	218
8.3	Zwei- und Dreipunktregler mit Rückführung	218
8.3.1	Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung (PD-Verhalten).....	219
8.3.2	Zweipunktregler mit verzögert nachgebender Rückführung (PID-Verhalten).....	220
8.3.3	Dreipunktregler mit verzögerter Rückführung und integralem Stellglied (PI-Verhalten).....	221
8.4	Analyse von nichtlinearen Regelkreisen mittels Beschreibungsfunktion	222
8.4.1	Gleichung der harmonischen Balance	223
8.4.2	Stabilität von Grenzschwingungen	224
	Literaturverzeichnis	226
	Sachwortverzeichnis	227