

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole	1
1 Einleitung	4
Literatur zu Kapitel 1	9
Aufgaben zu Kapitel 1	9
2 Analyse linearer zeitinvarianter Systeme im Frequenzbereich	10
2.1 Die Bewegungsgleichungen	10
2.2 Die Laplace-Transformation	12
2.3 Lösung der Bewegungsgleichungen	17
2.3.1 System 1. Ordnung	17
2.3.2 System 2. Ordnung	24
2.3.3 System n. Ordnung	32
2.4 Die Übertragungsfunktion	34
2.5 Stabilität	35
2.6 Der Frequenzgang	36
2.6.1 Dezibel-Skala für Frequenzgänge	38
2.6.2 Klassifizierung linearer Systeme	38
2.6.3 Stationäre Antwort auf periodisches Eingangssignal	44
2.7 Literatur zu Kapitel 2	44
2.8 Aufgaben zu Kapitel 2	45
3 Behandlung einfacher regelungstechnischer Probleme im Frequenzbereich	47
3.1 Lineare Reglerbausteine	47
3.2 Klassische Folgeregelung	49
3.2.1 Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	49
3.2.2 Regelstrecke 1. Ordnung mit P-, I- und PI-Regler	49

3.2.3 Regelstrecke 3. Ordnung mit P-Regler	55
3.3 Das Nyquist-Kriterium	58
3.3.1 Das spezielle Nyquist-Kriterium	58
3.3.2 Das allgemeine Nyquist-Kriterium	62
3.3.3 Nyquist-Kriterium für Mehrgrößen-Regelsysteme	64
3.4 Regelung mit Vorsteuerung	66
3.4.1 Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	66
3.4.2 Beispiel	68
3.5 Literatur zu Kapitel 3	70
3.6 Aufgaben zu Kapitel 3	71
4 Analyse linearer Systeme im Zeitbereich	74
4.1 Der Zustandsvektor und die Bewegungsgleichung	74
4.2 Übergang von einer Differentialgleichung höherer Ordnung auf eine Vektordifferentialgleichung erster Ordnung	79
4.2.1 Steuerbare Standardform	79
4.2.2 Beobachtbare Standardform	82
4.2.3 Zustandsraummodelle minimaler Ordnung	83
4.2.4 Koordinatentransformationen	84
4.3 Übergang von der Vektordifferentialgleichung 1. Ordnung auf die Übertragungsmatrix	86
4.4 Lösung der Bewegungsgleichung	87
4.4.1 Die homogene Bewegungsgleichung	87
4.4.2 Die spezielle inhomogene Bewegungsgleichung	89
4.4.3 Der allgemeine Fall	90
4.4.4 Beispiele	90
4.4.5 Eigenschaften der Transitionsmatrix	93
4.5 Stabilität	96
4.5.1 Lineares zeitvariables System	96
4.5.2 Lineares zeitinvariantes System	97
4.6 Steuerbarkeit und Stabilisierbarkeit	98
4.6.1 Fragestellung	98
4.6.2 Zeitvariable Systeme	99
4.6.3 Zeitinvariante Systeme	100
4.6.4 Stabilisierbarkeit und Polvorgabe	103
4.7 Beobachtbarkeit und Detektierbarkeit	105

4.7.1 Fragestellung	105
4.7.2 Zeitvariable Systeme	106
4.7.3 Zeitinvariante Systeme	107
4.7.4 Detektierbarkeit und Polvorgabe	108
4.8 Literatur zu Kapitel 4	110
4.9 Aufgaben zu Kapitel 4	110
5 Entwurf von Reglern mit linearer Zustandsrückführung . . .	114
5.1 Warum lineare Zustandsrückführung?	114
5.2 Das zeitvariable LQ-Regulator-Problem	115
5.2.1 Problemstellung	115
5.2.2 Lösung des Regulatorproblems	116
5.2.3 Verifikation der Lösung und Kommentare	117
5.2.4 Beispiel: System 1. Ordnung	119
5.3 Das zeitinvariante LQ-Regulator-Problem	121
5.3.1 Konservative Problemstellung	122
5.3.2 Lösung des Regulatorproblems	123
5.3.3 Kommentare	124
5.3.4 Beispiel: System 3. Ordnung	129
5.4 Literatur zu Kapitel 5	132
5.5 Aufgaben zu Kapitel 5	133
6 Entwurf von Reglern mit linearer Ausgangsrückführung . .	135
6.1 Der Luenberger-Beobachter	136
6.2 Das Separations-Theorem	138
6.3 Mehrgrößen-Folgeregelung	138
6.3.1 Struktur des Folgeregelungssystems	138
6.3.2 LQG/LTR: eine Methode für den Entwurf robuster Regler	141
6.3.3 Kommentare	146
6.4 Fallstudie: Ottomotor	147
6.5 Literatur zu Kapitel 6	153
6.6 Aufgaben zu Kapitel 6	155
7 Systembetrachtungen zum Messen und Stellen	156
7.1 Literatur zu Kapitel 7	159
7.2 Aufgabe zu Kapitel 7	160

8	Beschreibung von Zufallsprozessen im Zeitbereich	161
8.1	Dynamische Messung	161
8.2	Zufallsprozesse und ihre Kennzeichnung im Zeitbereich	163
8.2.1	Der Zufallsprozeß als unendliche Familie von Zufallsvariablen	163
8.2.2	Der momentane Erwartungswert	163
8.2.3	Autokorrelationsfunktion, Autokovarianzfunktion, Autokovarianzmatrix	164
8.2.4	Stationäre Zufallsprozesse	167
8.2.5	Stationäre, ergodische Zufallsprozesse	168
8.3	Weißes Rauschen	169
8.4	Literatur zu Kapitel 8	175
8.5	Aufgaben zu Kapitel 8	175
9	Analyse stochastischer linearer dynamischer Systeme im Zeitbereich	176
9.1	Farbiges Rauschen als Eingangsvektor	176
9.2	Weißes Rauschen als Eingangsvektor	179
9.3	Stationäres weißes Rauschen als Eingangsvektor	182
9.4	Beispiele	183
9.4.1	System 1. Ordnung	183
9.4.2	Unterkritisch gedämpftes System 2. Ordnung	186
9.5	Das Kalman-Bucy Filter	190
9.5.1	Problemstellung	190
9.5.2	Lösung des Optimierungsproblems	192
9.5.3	Verifikation der Optimalität des Kalman-Bucy-Filters	193
9.5.4	Kommentare	195
9.6	Literatur zu Kapitel 9	196
9.7	Aufgaben zu Kapitel 9	197
10	Beschreibung stationärer Zufallsprozesse im Frequenzbereich	199
10.1	Spektrum oder spektrale Leistungsdichte eines stationären Zufallsprozesses	199
10.2	Interpretation des Spektrums	200
10.3	Beispiele	201
10.4	Behandlung des Erwartungswerts des Signals	208
10.5	Eigenschaften des Spektrums	209
10.6	Literatur zu Kapitel 10	210
10.7	Aufgaben zu Kapitel 10	210

11 Analyse stochastischer linearer zeitinvarianter dynamischer Systeme im Frequenzbereich	211
11.1 Problemstellung	211
11.2 Spektrum des Ausgangsvektors	212
11.3 Dezibel-Skala für Spektren	214
11.4 Beispiele	215
11.5 Literatur zu Kapitel 11	219
11.6 Aufgaben zu Kapitel 11	219
12 Digitale Regelung	220
12.1 Grundsätzliche Funktionsweise	221
12.2 Signalabtastung	223
12.2.1 Amplituden-Abtastung	223
12.2.2 Die Z -Transformation	223
12.2.3 Das Abtasttheorem von Shannon	227
12.2.4 Der Impuls-Abtaster	228
12.3 Signalrekonstruktion	230
12.4 Analyse zeitdiskreter linearer Systeme	231
12.4.1 Analogie zur Differentialgleichung n -ter Ordnung	231
12.4.2 Übergang von einer diskreten Bewegungsgleichung höherer Ordnung zu einem Zustandsraummodell	235
12.4.3 Umsetzung eines zeitkontinuierlichen Zustandsraummodells in ein zeitdiskretes Zustandsraummodell	237
12.4.4 Zusammenhang zwischen der Laplace-Transformation und der Z -Transformation	238
12.5 Stochastik	243
12.5.1 Zeitdiskrete Zufallsprozesse	243
12.5.2 Analyse stochastischer linearer Systeme	245
12.5.3 Das zeitdiskrete Kalman-Bucy Filter	246
12.5.4 Äquivalente weiße Rauschprozesse	248
12.6 Synthese zeitdiskreter Regler	249
12.6.1 Reglerentwurf im Zeitbereich	250
12.6.2 Reglerentwurf im Frequenzbereich	254
12.6.3 Wahl der Regelrate	255
12.7 Literatur zu Kapitel 12	257
12.8 Aufgaben zu Kapitel 12	257

Lösungen zu den Aufgaben	259
Anhang 1. Komplexe Zahlen	277
Anhang 2. Bode-Diagramme	281
Anhang 3. Lineare Algebra	286
Anhang 4. Linearisierung eines nichtlinearen dynamischen Systems um eine Nominaltrajektorie herum	302
Anhang 5. Wahrscheinlichkeitslehre	304
Sachverzeichnis	317