

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	46
3.1 Lineare Reglerbausteine	46
3.2 Klassische Folgeregelung	48
3.2.1 Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	48
3.2.2 Regelstrecke 1. Ordnung mit P-, I- und PI-Regler	48

3.2.3 Regelstrecke 3. Ordnung mit P-Regler	54
3.3 Das Nyquist-Kriterium	57
3.3.1 Das spezielle Nyquist-Kriterium	57
3.3.2 Das allgemeine Nyquist-Kriterium	61
3.3.3 Nyquist-Kriterium für Mehrgrößen-Regelsysteme	63
3.4 Regelung mit Vorsteuerung	65
3.4.1 Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	65
3.4.2 Beispiel	67
3.5 Literatur zu Kapitel 3	69
3.6 Aufgaben zu Kapitel 3	70
4 Analyse linearer Systeme im Zeitbereich	72
4.1 Der Zustandsvektor und die Bewegungsgleichung	72
4.2 Übergang von einer Differentialgleichung höherer Ordnung auf eine Vektordifferentialgleichung erster Ordnung	77
4.2.1 Steuerbare Standardform	77
4.2.2 Beobachtbare Standardform	80
4.2.3 Zustandsraummodelle minimaler Ordnung	81
4.2.4 Koordinatentransformationen	82
4.3 Übergang von der Vektordifferentialgleichung 1. Ordnung auf die Übertragungsmatrix	84
4.4 Lösung der Bewegungsgleichung	85
4.4.1 Die homogene Bewegungsgleichung	85
4.4.2 Die spezielle inhomogene Bewegungsgleichung	87
4.4.3 Der allgemeine Fall	88
4.4.4 Beispiele	88
4.4.5 Eigenschaften der Transitionsmatrix	91
4.5 Stabilität	94
4.5.1 Lineares zeitvariables System	94
4.5.2 Lineares zeitinvariantes System	95
4.6 Steuerbarkeit und Stabilisierbarkeit	96
4.6.1 Fragestellung	96
4.6.2 Zeitvariable Systeme	97
4.6.3 Zeitinvariante Systeme	98
4.6.4 Stabilisierbarkeit und Polvorgabe	101
4.7 Beobachtbarkeit und Detektierbarkeit	103

4.7.1	Fragestellung	103
4.7.2	Zeitvariable Systeme	104
4.7.3	Zeitinvariante Systeme	105
4.7.4	Detektierbarkeit und Polvorgabe	106
4.8	Literatur zu Kapitel 4	108
4.9	Aufgaben zu Kapitel 4	108
5	Entwurf von Reglern mit linearer Zustandsrückführung	111
5.1	Warum lineare Zustandsrückführung?	111
5.2	Das zeitvariable LQ-Regulator-Problem	112
5.2.1	Problemstellung	112
5.2.2	Lösung des Regulatorproblems	113
5.2.3	Verifikation der Lösung und Kommentare	114
5.2.4	Beispiel: System 1. Ordnung	116
5.3	Das zeitinvariante LQ-Regulator-Problem	118
5.3.1	Konservative Problemstellung	119
5.3.2	Lösung des Regulatorproblems	120
5.3.3	Kommentare	121
5.3.4	Beispiel: System 3. Ordnung	126
5.4	Literatur zu Kapitel 5	130
5.5	Aufgaben zu Kapitel 5	130
6	Entwurf von Reglern mit linearer Ausgangsrückführung	132
6.1	Der Luenberger-Beobachter	133
6.2	Das Separations-Theorem	135
6.3	Mehrgrößen-Folgeregelung	137
6.3.1	Struktur des Folgeregelungssystems	137
6.3.2	LQG/LTR: eine Methode für den Entwurf robuster Regler	138
6.3.3	Kommentare	143
6.4	Fallstudie: Ottomotor	145
6.5	Literatur zu Kapitel 6	151
6.6	Aufgaben zu Kapitel 6	152
7	Systembetrachtungen zum Messen und Stellen	153
7.1	Literatur zu Kapitel 7	156
7.2	Aufgabe zu Kapitel 7	157

8 Beschreibung von Zufallsprozessen im Zeitbereich	158
8.1 Dynamische Messung	158
8.2 Zufallsprozesse und ihre Kennzeichnung im Zeitbereich	160
8.2.1 Der Zufallsprozeß als unendliche Familie von Zufallsvariablen	160
8.2.2 Der momentane Erwartungswert	160
8.2.3 Autokorrelationsfunktion, Autokovarianzfunktion, Autokovarianzmatrix	161
8.2.4 Stationäre Zufallsprozesse	164
8.2.5 Stationäre, ergodische Zufallsprozesse	165
8.3 Weißes Rauschen	166
8.4 Literatur zu Kapitel 8	172
8.5 Aufgaben zu Kapitel 8	172
9 Analyse stochastischer linearer dynamischer Systeme im Zeitbereich	173
9.1 Farbiges Rauschen als Eingangsvektor	173
9.2 Weißes Rauschen als Eingangsvektor	176
9.3 Stationäres weißes Rauschen als Eingangsvektor	179
9.4 Beispiele	180
9.4.1 System 1. Ordnung	180
9.4.2 Unterkritisch gedämpftes System 2. Ordnung	183
9.5 Das Kalman-Bucy Filter	187
9.5.1 Problemstellung	187
9.5.2 Lösung des Optimierungsproblems	189
9.5.3 Verifikation der Optimalität des Kalman-Bucy-Filters	190
9.5.4 Kommentare	192
9.6 Literatur zu Kapitel 9	193
9.7 Aufgaben zu Kapitel 9	194
10 Beschreibung stationärer Zufallsprozesse im Frequenzbereich	196
10.1 Spektrum oder spektrale Leistungsdichte eines stationären Zufallsprozesses	196
10.2 Interpretation des Spektrums	197
10.3 Beispiele	198
10.4 Behandlung des Erwartungswerts des Signals	205
10.5 Eigenschaften des Spektrums	206
10.6 Literatur zu Kapitel 10	207
10.7 Aufgaben zu Kapitel 10	207

11 Analyse stochastischer linearer zeitinvarianter dynamischer Systeme im Frequenzbereich	208
11.1 Problemstellung	208
11.2 Spektrum des Ausgangsvektors	209
11.3 Dezibel-Skala für Spektren	211
11.4 Beispiele	212
11.5 Literatur zu Kapitel 11	216
11.6 Aufgaben zu Kapitel 11	216
12 Digitale Regelung	217
12.1 Grundsätzliche Funktionsweise	218
12.2 Signalabtastung	220
12.2.1 Amplituden-Abtastung	220
12.2.2 Die \mathcal{Z} -Transformation	220
12.2.3 Das Abtasttheorem von Shannon	224
12.2.4 Der Impuls-Abtaster	225
12.3 Signalrekonstruktion	227
12.4 Analyse zeitdiskreter linearer Systeme	228
12.4.1 Analogie zur Differentialgleichung n-ter Ordnung	228
12.4.2 Übergang von einer diskreten Bewegungsgleichung höherer Ordnung zu einem Zustandsraummodell	232
12.4.3 Umsetzung eines zeitkontinuierlichen Zustandsraummodells in ein zeitdiskretes Zustandsraummodell	234
12.4.4 Zusammenhang zwischen der Laplace-Transformation und der \mathcal{Z} -Transformation	235
12.5 Stochastik	240
12.5.1 Zeitdiskrete Zufallsprozesse	240
12.5.2 Analyse stochastischer linearer Systeme	242
12.5.3 Das zeitdiskrete Kalman-Bucy Filter	243
12.5.4 Äquivalente weiße Rauschprozesse	245
12.6 Synthese zeitdiskreter Regler	246
12.6.1 Reglerentwurf im Zeitbereich	247
12.6.2 Reglerentwurf im Frequenzbereich	251
12.6.3 Wahl der Regelrate	252
12.7 Literatur zu Kapitel 12	254
12.8 Aufgaben zu Kapitel 12	254

Lösungen zu den Aufgaben	256
Anhang 1. Bode-Diagramm des Systems 1. Ordnung	271
Anhang 2. Bode-Diagramm des Systems 2. Ordnung	273
Anhang 3. Lineare Algebra	276
Anhang 4. Linearisierung eines nichtlinearen dynamischen Systems um eine Nominaltrajektorie herum	292
Anhang 5. Wahrscheinlichkeitslehre	294
Sachverzeichnis	307