

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	19
2.3.1 System 1. Ordnung	19
2.3.2 System 2. Ordnung	26
2.3.3 System n. Ordnung	34
2.4 Die Übertragungsfunktion	36
2.5 Stabilität	37
2.6 Der Frequenzgang	38
2.6.1 Dezibel-Skala für Frequenzgänge	40
2.6.2 Klassifizierung linearer Systeme	40
2.6.3 Stationäre Antwort auf periodisches Eingangssignal	46
2.7 Literatur zu Kapitel 2	46
2.8 Aufgaben zu Kapitel 2	47
3 Behandlung einfacher regelungstechnischer Probleme im Frequenzbereich	49
3.1 Lineare Reglerbausteine	49
3.2 Klassische Folgeregelung	51
3.2.1 Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	51
3.2.2 Regelstrecke 1. Ordnung mit P-, I- und PI-Regler	51
3.2.3 Regelstrecke 3. Ordnung mit P-Regler	57

3.3	Das Nyquist-Kriterium	60
3.3.1	Das spezielle Nyquist-Kriterium	60
3.3.2	Reale PD- und PID-Regler	64
3.3.3	Loop-shaping	65
3.3.4	Das allgemeine Nyquist-Kriterium	68
3.3.5	Nyquist-Kriterium für Mehrgrößen-Regelssysteme	70
3.4	Regelung mit Vorsteuerung	71
3.4.1	Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	72
3.4.2	Beispiel	73
3.5	Literatur zu Kapitel 3	75
3.6	Aufgaben zu Kapitel 3	76
4	Analyse linearer Systeme im Zeitbereich	80
4.1	Der Zustandsvektor und die Bewegungsgleichung	80
4.2	Übergang von einer Differentialgleichung höherer Ordnung auf eine Vektordifferentialgleichung erster Ordnung	85
4.2.1	Steuerbare Standardform	85
4.2.2	Beobachtbare Standardform	88
4.2.3	Zustandsraummodelle minimaler Ordnung	89
4.2.4	Koordinatentransformationen	90
4.3	Übergang von der Vektordifferentialgleichung 1. Ordnung auf die Übertragungsmatrix	92
4.4	Lösung der Bewegungsgleichung	93
4.4.1	Die homogene Bewegungsgleichung	93
4.4.2	Die spezielle inhomogene Bewegungsgleichung	95
4.4.3	Der allgemeine Fall	96
4.4.4	Beispiele	96
4.4.5	Eigenschaften der Transitionsmatrix	99
4.5	Stabilität	102
4.5.1	Lineares zeitvariables System	102
4.5.2	Lineares zeitinvariantes System	103
4.6	Steuerbarkeit und Stabilisierbarkeit	104
4.6.1	Fragestellung	104
4.6.2	Zeitvariable Systeme	105
4.6.3	Zeitinvariante Systeme	106
4.6.4	Stabilisierbarkeit und Polvorgabe	109

<i>Inhalt</i>	IX
4.7 Beobachtbarkeit und Detektierbarkeit	111
4.7.1 Fragestellung	111
4.7.2 Zeitvariable Systeme	112
4.7.3 Zeitinvariante Systeme	113
4.7.4 Detektierbarkeit und Polvorgabe	114
4.8 Lineare Matrizen-Differentialgleichungen	116
4.9 Literatur zu Kapitel 4	117
4.10 Aufgaben zu Kapitel 4	117
5 Entwurf von Reglern mit linearer Zustandsrückführung . . .	121
5.1 Warum lineare Zustandsrückführung?	121
5.2 Das zeitvariable LQ-Regulator-Problem	122
5.2.1 Problemstellung	122
5.2.2 Lösung des Regulatorproblems	123
5.2.3 Verifikation der Lösung und Kommentare	124
5.2.4 Beispiel: System 1. Ordnung	126
5.3 Das zeitinvariante LQ-Regulator-Problem	128
5.3.1 Konservative Problemstellung	129
5.3.2 Lösung des Regulatorproblems	130
5.3.3 Kommentare	131
5.3.4 Beispiel: System 3. Ordnung	136
5.4 LQ-Folgeregelungs-Probleme	139
5.4.1 LQ-Folgeregelung mit Zustandsvektor-Führung	139
5.4.2 LQ-Folgeregelung mit Ausgangsvektor-Führung	140
5.4.3 LQ Model Predictive Control	140
5.4.3.1 Das zeitvariable LQ MPC Problem	141
5.4.3.2 Das zeitinvariante LQ MPC Problem	143
5.4.3.3 Beispiel: Servosteuerung	144
5.5 Literatur zu Kapitel 5	146
5.6 Aufgaben zu Kapitel 5	147
6 Entwurf von Reglern mit linearer Ausgangsrückführung . .	149
6.1 Der Luenberger-Beobachter	150
6.2 Das Separations-Theorem	152

6.3	Mehrgrößen-Folgeregelung	152
6.3.1	Struktur des Folgeregelungssystems	152
6.3.2	LQG/LTR: eine Methode für den Entwurf robuster Regler	155
6.3.3	Kommentare	160
6.4	Fallstudie: Ottomotor	161
6.5	Literatur zu Kapitel 6	167
6.6	Aufgaben zu Kapitel 6	169
7	Systembetrachtungen zum Messen und Stellen	170
7.1	Literatur zu Kapitel 7	173
7.2	Aufgabe zu Kapitel 7	174
8	Beschreibung von Zufallsprozessen im Zeitbereich	175
8.1	Dynamische Messung	175
8.2	Zufallsprozesse und ihre Kennzeichnung im Zeitbereich	177
8.2.1	Der Zufallsprozeß als unendliche Familie von Zufallsvariablen	177
8.2.2	Der momentane Erwartungswert	177
8.2.3	Autokorrelationsfunktion, Autokovarianzfunktion, Autokovarianzmatrix	178
8.2.4	Stationäre Zufallsprozesse	181
8.2.5	Stationäre, ergodische Zufallsprozesse	182
8.3	Weißes Rauschen	183
8.4	Literatur zu Kapitel 8	189
8.5	Aufgaben zu Kapitel 8	189
9	Analyse stochastischer linearer dynamischer Systeme im Zeitbereich	190
9.1	Farbiges Rauschen als Eingangsvektor	190
9.2	Weißes Rauschen als Eingangsvektor	193
9.3	Stationäres weißes Rauschen als Eingangsvektor	196
9.4	Beispiele	197
9.4.1	System 1. Ordnung	197
9.4.2	Unterkritisch gedämpftes System 2. Ordnung	198
9.5	Das Kalman-Bucy Filter	201
9.5.1	Problemstellung	201
9.5.2	Lösung des Optimierungsproblems	203
9.5.3	Verifikation der Optimalität des Kalman-Bucy-Filters	204
9.5.4	Kommentare	205

<i>Inhalt</i>	XI
9.6 Literatur zu Kapitel 9	207
9.7 Aufgaben zu Kapitel 9	207
10 Beschreibung stationärer Zufallsprozesse im Frequenzbereich	210
10.1 Spektrum oder spektrale Leistungsdichte eines stationären Zufallsprozesses	210
10.2 Interpretation des Spektrums	211
10.3 Beispiele	212
10.4 Behandlung des Erwartungswerts des Signals	218
10.5 Eigenschaften des Spektrums	219
10.6 Literatur zu Kapitel 10	220
10.7 Aufgaben zu Kapitel 10	220
11 Analyse stochastischer linearer zeitinvarianter dynamischer Systeme im Frequenzbereich	221
11.1 Problemstellung	221
11.2 Spektrum des Ausgangsvektors	222
11.3 Dezibel-Skala für Spektren	224
11.4 Beispiele	225
11.5 Literatur zu Kapitel 11	227
11.6 Aufgaben zu Kapitel 11	227
12 Digitale Regelung	229
12.1 Grundsätzliche Funktionsweise	230
12.2 Signalabtastung	232
12.2.1 Amplituden-Abtastung	232
12.2.2 Die \mathcal{Z} -Transformation	232
12.2.3 Das Abtasttheorem von Shannon	236
12.2.4 Der Impuls-Abtaster	237
12.3 Signalrekonstruktion	239
12.4 Analyse zeitdiskreter linearer Systeme	240
12.4.1 Analogie zur Differentialgleichung n-ter Ordnung	240
12.4.2 Übergang von einer diskreten Bewegungsgleichung höherer Ordnung zu einem Zustandsraummodell	244
12.4.3 Umsetzung eines zeitkontinuierlichen Zustandsraum- modells in ein zeitdiskretes Zustandsraummodell	246
12.4.4 Zusammenhang zwischen der Laplace-Transformation und der \mathcal{Z} -Transformation	247

12.5 Stochastik	256
12.5.1 Zeitdiskrete Zufallsprozesse	256
12.5.2 Analyse stochastischer linearer Systeme	257
12.5.3 Das zeitdiskrete Kalman-Bucy Filter	258
12.5.4 Äquivalente weiße Rauschprozesse	260
12.6 Synthese zeitdiskreter Regler	261
12.6.1 Reglerentwurf im Zeitbereich	262
12.6.2 Reglerentwurf im Frequenzbereich	266
12.6.3 Wahl der Regelrate	267
12.7 Literatur zu Kapitel 12	269
12.8 Aufgaben zu Kapitel 12	269
Lösungen zu den Aufgaben	271
Anhang 1. Komplexe Zahlen	291
Anhang 2. Bode-Diagramme	295
Anhang 3. Lineare Algebra	300
Anhang 4. Linearisierung eines nichtlinearen dynamischen Systems um eine Nominaltrajektorie herum	319
Anhang 5. Wahrscheinlichkeitslehre	321
Sachverzeichnis	334