

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole	1
1 Einleitung	4
Literatur zu Kapitel 1	9
Aufgaben zu Kapitel 1	10
2 Analyse linearer zeitinvarianter Systeme im Frequenzbereich	11
2.1 Die Bewegungsgleichungen	11
2.2 Die Laplace-Transformation	13
2.3 Lösung der Bewegungsgleichungen	17
2.3.1 System 1. Ordnung	17
2.3.2 System 2. Ordnung	25
2.3.3 System n. Ordnung	34
2.3.4 Vektorfall	37
2.4 Der Frequenzgang	37
2.5 Literatur zu Kapitel 2	45
2.6 Aufgaben zu Kapitel 2	46
3 Behandlung einfacher regelungstechnischer Probleme im Frequenzbereich	48
3.1 Lineare Reglerbausteine	48
3.2 Fallstudien	50
3.2.1 Allgemeine Gleichungen des Regelsystems	50
3.2.2 System 1. Ordnung	50
3.2.3 System 3. Ordnung mit P-Regler	56
3.3 Das Nyquist-Kriterium	59
3.3.1 Das spezielle Nyquist-Kriterium	59
3.3.2 Das allgemeine Nyquist-Kriterium	63

3.3.3	Nyquist-Kriterium für Mehrgrößen-Regelsysteme	65
3.4	Literatur zu Kapitel 3	67
3.5	Aufgaben zu Kapitel 3	67
4	Analyse linearer Systeme im Zeitbereich	70
4.1	Der Zustandsvektor und die Bewegungsgleichung	70
4.2	Übergang von einer Differentialgleichung höherer Ordnung auf eine Vektordifferentialgleichung erster Ordnung	75
4.2.1	Steuerbare Standardform	75
4.2.2	Beobachtbare Standardform	78
4.2.3	Bemerkungen	79
4.3	Lösung der Bewegungsgleichung	80
4.3.1	Die homogene Bewegungsgleichung	81
4.3.2	Die spezielle inhomogene Bewegungsgleichung	82
4.3.3	Der allgemeine Fall	83
4.3.4	Beispiele	83
4.4	Eigenschaften der Transitionsmatrix	86
4.4.1	... eines zeitvariablen Systems	87
4.4.2	... eines zeitinvarianten Systems	90
4.4.3	Weitere Eigenschaften	92
4.5	Übergang von der Vektordifferentialgleichung 1. Ordnung auf die Übertragungsmatrix	96
4.6	Lineare Matrizen-Differentialgleichungen	97
4.7	Literatur zu Kapitel 4	98
4.8	Aufgaben zu Kapitel 4	99
5	Behandlung regelungstechnischer Probleme im Zeitbereich	101
5.1	Problem 1: Das Regulatorproblem	101
5.1.1	Problemstellung	101
5.1.2	Lösung des Regulatorproblems	102
5.1.3	Verifikation der Lösung und Kommentare	103
5.1.4	Spezialfall: zeitinvariantes System	105
5.1.5	Beispiel: System 3. Ordnung	107
5.2	Problem 2: Das Folgeregelungsproblem	111
5.2.1	Problemstellung	111
5.2.2	Lösung des Folgeregelungsproblems	112

5.2.3 Spezialfall: zeitinvariantes System	113
5.2.4 Beispiel: Servosteuerung	115
5.3 Literatur zu Kapitel 5	116
5.4 Aufgaben zu Kapitel 5	117
6 Struktureigenschaften linearer Systeme	119
6.1 Steuerbarkeit	119
6.1.1 Fragestellung	119
6.1.2 Zeitvariable Systeme	120
6.1.3 Zeitinvariante Systeme	122
6.2 Stabilisierbarkeit und Polvorgabe	125
6.3 Beobachtbarkeit	127
6.3.1 Fragestellung	127
6.3.2 Zeitvariable Systeme	128
6.3.3 Zeitinvariante Systeme	128
6.4 Bemerkungen	131
6.5 Der Luenberger-Beobachter	133
6.6 Literatur zu Kapitel 6	136
6.7 Aufgaben zu Kapitel 6	136
7 Systembetrachtungen zum Messen und Stellen	138
7.1 Literatur zu Kapitel 7	141
7.2 Aufgabe zu Kapitel 7	142
8 Beschreibung von Zufallsprozessen im Zeitbereich	143
8.1 Dynamische Messung	143
8.2 Zufallsprozesse und ihre Kennzeichnung im Zeitbereich	145
8.2.1 Der Zufallsprozeß als unendliche Familie von Zufallsvariablen	145
8.2.2 Der momentane Erwartungswert	146
8.2.3 Autokorrelationsfunktion, Autokovarianzfunktion, Autokovarianzmatrix	147
8.2.4 Stationäre Zufallsprozesse	149
8.2.5 Stationäre, ergodische Zufallsprozesse	150
8.3 Weißes Rauschen	152
8.4 Literatur zu Kapitel 8	157
8.5 Aufgaben zu Kapitel 8	158

9 Analyse stochastischer linearer dynamischer Systeme im Zeitbereich	159
9.1 Farbiges Rauschen als Eingangsvektor	159
9.2 Weißes Rauschen als Eingangsvektor	162
9.3 Stationäres weißes Rauschen als Eingangsvektor	165
9.4 Beispiele	166
9.4.1 System 1. Ordnung	166
9.4.2 Unterkritisch gedämpftes System 2. Ordnung	169
9.5 Das Kalman-Bucy Filter	173
9.6 Literatur zu Kapitel 9	178
9.7 Aufgaben zu Kapitel 9	178
10 Beschreibung stationärer Zufallsprozesse im Frequenzbereich	180
10.1 Spektrum oder spektrale Leistungsdichte eines stationären Zufallsprozesses	180
10.2 Interpretation des Spektrums	181
10.3 Beispiele	182
10.4 Behandlung des Erwartungswerts des Signals	189
10.5 Eigenschaften des Spektrums	190
10.6 Literatur zu Kapitel 10	191
10.7 Aufgaben zu Kapitel 10	191
11 Analyse stochastischer linearer zeitinvarianter dynamischer Systeme im Frequenzbereich	192
11.1 Problemstellung	192
11.2 Spektrum des Ausgangsvektors	193
11.3 Dezibel-Skala	195
11.4 Beispiele	196
11.5 Kreuzspektrum von Eingangs- und Ausgangssignal	200
11.6 Literatur zu Kapitel 11	202
11.7 Aufgaben zu Kapitel 11	203
12 Digitale Regelung	204
12.1 Grundsätzliche Funktionsweise	205
12.2 Signalabtastung	207
12.2.1 Amplituden-Abtastung	207
12.2.2 Die Z -Transformation	207

12.2.3	Das Abtasttheorem von Shannon	211
12.2.4	Der Impuls-Abtaster	212
12.3	Signalrekonstruktion	214
12.4	Analyse zeitdiskreter linearer Systeme	215
12.4.1	Analogie zur Differentialgleichung n-ter Ordnung	215
12.4.2	Übergang von einer diskreten Bewegungsgleichung höherer Ordnung zu einem Zustandsraummodell	219
12.4.3	Umsetzung eines zeitkontinuierlichen Zustandsraum- modells in ein zeitdiskretes Zustandsraummodell	221
12.4.4	Zusammenhang zwischen der Laplace-Transformation und der Z -Transformation	222
12.5	Stochastik	227
12.5.1	Zeitdiskrete Zufallsprozesse	227
12.5.2	Analyse stochastischer linearer Systeme	229
12.5.3	Das zeitdiskrete Kalman-Bucy Filter	230
12.5.4	Äquivalente weiße Rauschprozesse	233
12.6	Synthese zeitdiskreter Regler	234
12.6.1	Reglerentwurf im Zeitbereich	234
12.6.2	Reglerentwurf im Frequenzbereich	237
12.6.3	Wahl der Regelrate	238
12.7	Literatur zu Kapitel 12	239
12.8	Aufgaben zu Kapitel 12	240
	Lösungen zu den Aufgaben	241
	Anhang 1 Bode-Diagramm des Systems 1. Ordnung	259
	Anhang 2 Bode-Diagramm des Systems 2. Ordnung	261
	Anhang 3 Lineare Algebra	264
	Anhang 4 Linearisierung eines nichtlinearen dynamischen Systems um eine Nominaltrajektorie herum	277
	Anhang 5 Wahrscheinlichkeitslehre	279
	Sachverzeichnis	292