

# Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole . . . . .	1
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>4</b>
Literatur zu Kapitel 1 . . . . .	9
Aufgaben zu Kapitel 1 . . . . .	9
<b>2 Analyse linearer zeitinvarianter Systeme im Frequenzbereich</b>	<b>10</b>
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
<b>3 Behandlung einfacher regelungstechnischer Probleme im Frequenzbereich . . . . .</b>	<b>49</b>
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

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
<b>5</b>	<b>Entwurf von Reglern mit linearer Zustandsrückführung . . . . .</b>	<b>121</b>
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
<b>6</b>	<b>Entwurf von Reglern mit linearer Ausgangsrückführung . . . . .</b>	<b>149</b>
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
<b>7</b>	<b>Systembetrachtungen zum Messen und Stellen . . . . .</b>	<b>170</b>
7.1	Literatur zu Kapitel 7 . . . . .	173
7.2	Aufgabe zu Kapitel 7 . . . . .	174
<b>8</b>	<b>Beschreibung von Zufallsprozessen im Zeitbereich . . . . .</b>	<b>175</b>
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
<b>9</b>	<b>Analyse stochastischer linearer dynamischer Systeme im Zeitbereich . . . . .</b>	<b>190</b>
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
<b>10 Beschreibung stationärer Zufallsprozesse im Frequenzbereich</b>	<b>210</b>
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
<b>11 Analyse stochastischer linearer zeitinvarianter dynamischer Systeme im Frequenzbereich</b> . . . . .	<b>221</b>
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
<b>12 Digitale Regelung</b> . . . . .	<b>229</b>
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
<b>Lösungen zu den Aufgaben . . . . .</b>	<b>271</b>
<b>Anhang 1. Komplexe Zahlen . . . . .</b>	<b>291</b>
<b>Anhang 2. Bode-Diagramme . . . . .</b>	<b>295</b>
<b>Anhang 3. Lineare Algebra . . . . .</b>	<b>300</b>
<b>Anhang 4. Linearisierung eines nichtlinearen dynamischen     Systems um eine Nominaltrajektorie herum . . . . .</b>	<b>319</b>
<b>Anhang 5. Wahrscheinlichkeitslehre . . . . .</b>	<b>321</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>334</b>