

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Dynamik linearer Systeme</b>	<b>11</b>
1.1	Grundlegendes	11
1.2	Die Laplace-Transformation	14
1.2.1	Beschreibung von Systemen mit Differenzialgleichungen	14
1.2.2	Sprungfunktion, Stoßfunktion	17
1.2.3	Definitionsgleichung der Laplace-Transformation	19
1.2.4	Linearität	22
1.2.5	Ableitungs- und Integralsatz	23
1.2.6	Dämpfungssatz	25
1.2.7	Zeitverschiebungssatz	25
1.2.8	Anfangs- und Endwerttheorem	26
1.2.9	Verständnisfragen	28
1.2.10	Übungsaufgaben	28
1.3	Lösung von Differenzialgleichungen	29
1.3.1	Die Übertragungsfunktion	29
1.3.2	Rücktransformation	31
1.3.3	Methoden der Partialbruchzerlegung	34
1.3.4	Rücktransformation bei konjugiert komplexen Polstellen	36
1.3.5	Verständnisfragen	39
1.3.6	Übungsaufgaben	39
1.4	Der Frequenzgang	40
1.4.1	Ortskurven	43
1.4.2	Bodediagramme	44
1.4.3	Bodediagramme zusammengesetzter Frequenzgänge	47
1.4.4	Phasenminimumsysteme	51
1.4.5	Verständnisfragen	51
1.4.6	Übungsaufgaben	52
<b>2</b>	<b>Was ist <i>Regeln</i>?</b>	<b>53</b>
2.1	Darstellung von Regelsystemen	55
2.1.1	Geräteplan	55
2.1.2	Blockschaltbild	56
2.1.3	Verfahrensfließbild	57
2.1.4	Algebra von Blockschaltbildern	59
2.1.5	Vereinfachung von Blockschaltbildern	61
2.1.6	Verständnisfragen	63

2.1.7	Übungsaufgaben . . . . .	63
2.2	Der Standardregelkreis . . . . .	65
2.2.1	Elemente . . . . .	65
2.2.2	Blockschaltbild . . . . .	65
2.2.3	Analyse . . . . .	66
2.2.4	Verständnisfragen . . . . .	68
2.2.5	Übungsaufgaben . . . . .	68
<b>3</b>	<b>Regelungstechnische Werkzeuge</b>	<b>70</b>
3.1	Simulation mit Scilab/Xcos . . . . .	70
3.1.1	Erste Schritte mit Scilab . . . . .	71
3.1.2	Simulation mit Xcos . . . . .	76
3.2	Computeralgebra mit Maxima . . . . .	81
3.2.1	Benutzeroberfläche wxMaxima . . . . .	82
3.2.2	Erste Schritte mit Maxima . . . . .	83
3.2.3	Das Regelungstechnik-Paket COMA . . . . .	91
<b>4</b>	<b>Elemente des Regelkreises</b>	<b>99</b>
4.1	Regelungstechnische Grundglieder . . . . .	99
4.1.1	Proportionalglied (P-Element) . . . . .	99
4.1.2	Integrierglied (I-Element, Integrator) . . . . .	100
4.1.3	Differenzierglied (D-Element, Differenzierer) . . . . .	101
4.1.4	Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1-Element) . . . . .	102
4.1.5	Vorhalteglied (DT1-Element) . . . . .	103
4.1.6	PI-Element . . . . .	105
4.1.7	PD-Element . . . . .	106
4.1.8	PDT1-Element . . . . .	106
4.1.9	IT1-Element . . . . .	108
4.1.10	Totzeitglied (Tt-Element) . . . . .	109
4.1.11	Allpass . . . . .	111
4.1.12	Verzögerungsglied zweiter Ordnung (PT2-Element) . . . . .	113
4.1.13	Verständnisfragen . . . . .	117
4.1.14	Übungsaufgaben . . . . .	118
4.2	Regelstrecken . . . . .	121
4.2.1	Theoretische Modellbildung . . . . .	121
4.2.2	Gleichstrommaschine . . . . .	123
4.2.3	Identifikation . . . . .	125
4.2.4	Verständnisfragen . . . . .	126
4.2.5	Übungsaufgaben . . . . .	126
4.3	Regler . . . . .	129
4.3.1	Grundtypen von Reglern . . . . .	129
4.3.2	Der PID-Regler . . . . .	131
4.3.3	Analogregler . . . . .	133
4.3.4	Digitalregler, Grundlagen . . . . .	138
4.3.5	Digitalregler, Realisierung mit Mikrocontroller . . . . .	144
4.3.6	Windup bei begrenzter Stellgröße . . . . .	149

4.3.7	Pneumatische Regler . . . . .	150
4.3.8	Hydraulische Regler . . . . .	152
4.3.9	Regler ohne Hilfsenergie . . . . .	154
4.3.10	Verständnisfragen . . . . .	156
4.3.11	Übungsaufgaben . . . . .	156
<b>5</b>	<b>Der geschlossene Regelkreis</b>	<b>158</b>
5.1	Kennwerte einer Regelung im Zeitbereich . . . . .	159
5.1.1	Aus der Sprungantwort ablesbare Kennwerte . . . . .	159
5.1.2	Integrale Gütemaße . . . . .	160
5.1.3	Verständnisfragen . . . . .	162
5.1.4	Übungsaufgaben . . . . .	162
5.2	Stabilität von Regelkreisen . . . . .	163
5.2.1	Grundlegende Stabilitätsüberlegungen . . . . .	163
5.2.2	Ein einfaches notwendiges Kriterium für Stabilität . . . . .	166
5.2.3	Das Hurwitz-Kriterium . . . . .	167
5.2.4	Das Nyquist-Kriterium . . . . .	168
5.2.5	Anschauliche Deutung des Nyquist-Kriteriums . . . . .	173
5.2.6	Stabilitätsgüte . . . . .	173
5.2.7	Stabilität von Totzeitsystemen . . . . .	175
5.2.8	Verständnisfragen . . . . .	176
5.2.9	Übungsaufgaben . . . . .	177
5.3	Entwurfsverfahren für Regelungen . . . . .	179
5.3.1	Reglerentwurf im Bodediagramm . . . . .	179
5.3.2	Betragsoptimum . . . . .	181
5.3.3	Symmetrisches Optimum . . . . .	184
5.3.4	Reglereinstellung nach Ziegler und Nichols . . . . .	190
5.3.5	Reglereinstellung nach den Doppelverhältnissen . . . . .	191
5.3.6	Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick . . . . .	192
5.3.7	Verständnisfragen . . . . .	193
5.3.8	Übungsaufgaben . . . . .	193
5.4	Erweiterte Regelkreisstrukturen . . . . .	196
5.4.1	Störgrößenaufschaltung . . . . .	196
5.4.2	Sollwertaufschaltung (Vorsteuerung) . . . . .	197
5.4.3	Kaskadenregelung . . . . .	199
5.4.4	Smith-Prädiktor für Totzeitsysteme . . . . .	201
5.4.5	Verständnisfragen . . . . .	204
5.4.6	Übungsaufgaben . . . . .	204
5.5	Unstetige Regelungen . . . . .	206
5.5.1	Unstetige Regler . . . . .	206
5.5.2	PT1-Strecke und Zweipunktregler mit Hysterese . . . . .	207
5.5.3	Schaltregler mit interner Rückführung . . . . .	209
5.5.4	Verständnisfragen . . . . .	212
5.5.5	Übungsaufgaben . . . . .	212

<b>6 Zustandsraumdarstellung dynamischer Systeme</b>	<b>213</b>
6.1 Grundlagen	213
6.1.1 Zustandsgrößen	213
6.1.2 Zustandsgleichungen	214
6.1.3 Vektorielle Form der Zustandsgleichungen	216
6.1.4 Der Zustandsraum	216
6.1.5 Blockschaltbild	218
6.1.6 Ermittlung der Zustandsgleichungen	219
6.1.7 Verständnisfragen	222
6.1.8 Übungsaufgaben	223
6.2 Simulation dynamischer Systeme	224
6.2.1 Befehlsorientierte Simulationsprogramme	224
6.2.2 Blockorientierte Simulation	226
6.2.3 Komponentenorientierte Simulation	227
6.2.4 Simulation mit dem Euler-Verfahren	228
6.2.5 Simulation mit dem Runge-Kutta-Verfahren	229
6.2.6 Verständnisfragen	231
6.2.7 Übungsaufgaben	232
6.3 Lineare Systeme	233
6.3.1 Zustandsmatrizen	233
6.3.2 Eingrößensystem	234
6.3.3 Berechnung der Übertragungsfunktion eines Eingrößensystems	235
6.3.4 Berechnung der Übertragungsmatrix eines Mehrgrößensystems	236
6.3.5 Ermittlung der Zustandsmatrizen aus der Übertragungsfunktion	237
6.3.6 Verständnisfragen	239
6.3.7 Übungsaufgaben	240
6.4 Linearisierung	242
6.4.1 Grundlegendes	242
6.4.2 Anwendung auf die Zustandsraumdarstellung	243
6.4.3 Verständnisfragen	245
6.4.4 Übungsaufgaben	245
6.5 Stabilität im Zustandsraum	246
6.5.1 Eigenwerte und Eigenvektoren	246
6.5.2 Stabilität linearer Systeme	246
6.5.3 Stabilität nichtlinearer Systeme	248
6.5.4 Verständnisfragen	249
6.5.5 Übungsaufgaben	250
6.6 Zustandsregelungen	251
6.6.1 Struktur	251
6.6.2 Steuerbarkeit	252
6.6.3 Zustandsreglerentwurf durch Polvorgabe	253
6.6.4 Regelung eines Magnetschwebesystems	256
6.6.5 Pendeldämpfung eines Brückenkrans	258
6.6.6 Verständnisfragen	262
6.6.7 Übungsaufgaben	262