

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele .....	XVII
Inhaltsübersicht des zweiten Bandes .....	XXIII
Hinweise zum Gebrauch des Buches .....	XXV

## Teil 1: Einführung

<b>1 Zielstellung und theoretische Grundlagen der Regelungstechnik .....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgaben der Regelungstechnik .....	1
1.2 Prinzipielle Funktionsweise von Regelungen .....	5
1.3 Lösungsweg für Regelungsaufgaben .....	14
1.4 Übersicht über die theoretischen Grundlagen der Regelungstechnik .....	17
<b>2 Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben .....</b>	<b>19</b>
2.1 Gebäudeautomatisierung .....	19
2.2 Prozessregelung .....	21
2.3 Regelungsaufgaben in Energiesystemen .....	24
2.4 Robotersteuerungen .....	27
2.5 Regelung von Fahrzeugen .....	29
2.6 Mechatronik .....	30
2.7 Flugregelung .....	30
2.8 Der Mensch als Regler .....	31
2.9 Biologische Regelkreise .....	33
2.10 Gemeinsamkeiten von Regelungen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten .....	34
Literaturhinweise .....	37

## Teil 2: Modellbildung und Systemanalyse

<b>3</b>	<b>Strukturelle Beschreibung dynamischer Systeme</b>	<b>39</b>
3.1	Ziele und wichtige Schritte der Modellbildung	39
3.2	Blockschaltbild	41
3.3	Signalflussgraf	51
	Literaturhinweise	53
<b>4</b>	<b>Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich</b>	<b>55</b>
4.1	Modellbildungsaufgabe	55
4.2	Beschreibung linearer Systeme durch Differenzialgleichungen	57
4.2.1	Lineare Differenzialgleichung $n$ -ter Ordnung	57
4.2.2	Aufstellung der Differenzialgleichung	58
4.2.3	Linearität dynamischer Systeme	65
4.2.4	Kausalität	67
4.2.5	Zeitinvarianz	70
4.3	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	70
4.3.1	Einführung des Zustandsraummodells	70
4.3.2	Zustand und Zustandsraum	74
4.3.3	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	78
4.4	Aufstellung des Zustandsraummodells	80
4.4.1	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzialgleichung	80
4.4.2	Aufstellung des Zustandsraummodells aus den physikalischen Grundbeziehungen	89
4.4.3	Zustandsraummodell gekoppelter Systeme	95
4.4.4	Gültigkeitsbereich der Modelle und Normierung	100
4.5	Erweiterungen	106
4.5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	106
4.5.2	Totzeitsysteme	113
4.5.3	Zeitvariable Systeme	114
4.6	MATLAB-Funktionen für die Beschreibung dynamischer Systeme	115
	Literaturhinweise	116
<b>5</b>	<b>Verhalten linearer Systeme</b>	<b>119</b>
5.1	Vorhersage des Systemverhaltens	119
5.2	Lösung der Zustandsgleichung	120
5.2.1	Lösung einer linearen Differenzialgleichung erster Ordnung	120
5.2.2	Lösung eines Differenzialgleichungssystems erster Ordnung	125
5.2.3	Verhalten linearer Systeme	128
5.2.4	Eigenschaften und Berechnungsmethoden für die Übergangsmatrix	133
5.3	Normalformen des Zustandsraummodells	135
5.3.1	Transformation der Zustandsgleichung	135
5.3.2	Kanonische Normalform	137

5.3.3	Erweiterung der kanonischen Normalform für nichtdiagonalähnliche Systemmatrizen .....	145
5.3.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung .....	148
5.3.5	Regelungsnormform .....	153
5.3.6	Beobachtungsnormform .....	157
5.3.7	E/A-Normform .....	160
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften .....	166
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens .....	167
5.4.1	Übergangsfunktion .....	167
5.4.2	Gewichtsfunktion .....	169
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion .....	172
5.5	E/A-Verhalten .....	174
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion .....	174
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten .....	177
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten .....	183
5.5.4	Nulldynamik .....	186
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich .....	190
5.6.1	Proportionalglieder .....	191
5.6.2	Integrierglieder .....	196
5.6.3	Differenzierglieder .....	198
5.6.4	Totzeitglieder .....	201
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung .....	204
5.7.1	Modellvereinfachung .....	204
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch $PT_1$ -Glieder .....	208
5.7.3	Kennwertermittlung für $PT_2$ -Glieder .....	212
5.7.4	Kennwertermittlung für $PT_1 T_t$ -Glieder .....	214
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens .....	215
	Literaturhinweise .....	222
<b>6</b>	<b>Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich .....</b>	<b>223</b>
6.1	Zielstellung .....	223
6.2	Fouriertransformation .....	225
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale .....	225
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale .....	230
6.3	Frequenzgang .....	234
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen .....	234
6.3.2	Berechnung des Frequenzganges .....	239
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung .....	240
6.4	Laplace-Transformation .....	244
6.4.1	Definition .....	244
6.4.2	Wichtige Eigenschaften .....	250
6.5	Übertragungsfunktion .....	253
6.5.1	Definition .....	253

6.5.2	Berechnung .....	257
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung .....	262
6.5.4	Pole und Nullstellen .....	264
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens .....	272
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme .....	279
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen .....	284
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	286
6.7.1	Proportionalglieder .....	286
6.7.2	Integrierglieder .....	302
6.7.3	Differenzierglieder .....	304
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen .....	304
6.7.5	Übertragungsglieder mit gebrochen rationaler Übertragungsfunktion .....	306
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme .....	314
6.7.7	Totzeitglieder .....	326
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	330
	Literaturhinweise .....	337
<b>7</b>	<b>Der Regelkreis .....</b>	<b>339</b>
7.1	Reglerentwurfsaufgabe .....	339
7.2	Modell des Standardregelkreises .....	345
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich .....	345
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich .....	349
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen .....	351
7.3.1	Stör- und Führungssignale .....	351
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung .....	354
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung .....	355
7.3.4	Stationäres Verhalten bei rampenförmiger Erregung .....	357
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters .....	359
7.3.6	Inneres-Modell-Prinzip .....	360
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises .....	365
7.4.1	Perfekte Regelung .....	365
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung .....	365
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen .....	369
7.4.4	Gleichgewichtstheorem .....	369
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen .....	377
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf .....	381
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen .....	382
7.5.1	Aufgaben der Folgeregung .....	382
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf .....	384
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel .....	389
7.5.4	Vorsteuerung im stationären Zustand .....	392
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur .....	394
	Literaturhinweise .....	400

<b>8</b>	<b>Stabilität rückgekoppelter Systeme</b>	<b>401</b>
8.1	Zustandsstabilität	401
8.1.1	Definition der Zustandsstabilität	402
8.1.2	Kriterien für die Zustandsstabilität	404
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	408
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	408
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	408
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	411
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	411
8.3.1	Vorgehensweise	411
8.3.2	Hurwitzkriterium	412
8.3.3	Routhkriterium	415
8.4	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	418
8.4.1	E/A-Stabilität von Regelkreisen	418
8.4.2	Innere Stabilität von Regelkreisen	421
8.5	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzganges der offenen Kette	424
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	424
8.5.2	Nyquistkriterium	428
8.5.3	Beispiele	430
8.5.4	Erweiterungen	435
8.5.5	Phasenrandkriterium	441
8.6	Robuste Stabilität	445
8.6.1	Zielsetzung	445
8.6.2	Beschreibung der Modellunsicherheiten	445
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	448
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	454
	Literaturhinweise	456

### Teil 3: Entwurf einschleifiger Regelkreise

<b>9</b>	<b>Entwurf einschleifiger Regelkreise</b>	<b>457</b>
9.1	Allgemeines Vorgehen beim Reglerentwurf	457
9.2	Übersicht über die Entwurfsverfahren	459
9.3	Rechnergestützter Entwurf	461
9.4	Einstellregeln für PID-Regler	462
	Literaturhinweise	466
<b>10</b>	<b>Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises</b>	<b>467</b>
10.1	Beziehungen zwischen dem PN-Bild und den Güteforderungen	467
10.1.1	Regelkreise mit dominierendem Polpaar	467
10.1.2	Regelkreise mit einem dominierenden Pol	475
10.2	Wurzelortskurve	475
10.2.1	Definition	475

10.2.2	Eigenschaften und Konstruktionsvorschriften . . . . .	477
10.3	Reglerentwurf unter Verwendung der Wurzelortskurve . . . . .	487
10.3.1	Entwurfsverfahren . . . . .	487
10.3.2	Regelung mit hoher Kreisverstärkung . . . . .	493
10.3.3	Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens . . . .	494
10.4	MATLAB-Funktionen zum Reglerentwurf anhand des PN-Bildes . .	498
	Literaturhinweise . . . . .	502
<b>11</b>	<b>Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette . . . .</b>	<b>503</b>
11.1	Frequenzkennlinie und Regelgüte . . . . .	503
11.1.1	Näherung des Regelkreises durch ein $PT_2$ -Glied . . . . .	503
11.1.2	Statisches Verhalten des Regelkreises . . . . .	504
11.1.3	Führungsverhalten des Regelkreises . . . . .	505
11.1.4	Störverhalten des Regelkreises . . . . .	511
11.2	Reglerentwurf unter Beachtung des Führungsverhaltens . . . . .	516
11.2.1	Entwurfsverfahren . . . . .	516
11.2.2	Entwurfsdurchführung . . . . .	518
11.3	Reglerentwurf unter Beachtung des Störverhaltens . . . . .	528
11.4	MATLAB-Programm zum Frequenzkennlinienentwurf . . . . .	531
	Literaturhinweise . . . . .	531
<b>12</b>	<b>Weitere Entwurfsverfahren . . . . .</b>	<b>533</b>
12.1	Kompensationsregler . . . . .	533
12.2	Modellbasierte Regelung ( <i>Internal Model Control</i> ) . . . . .	539
12.2.1	Grundidee des Verfahrens . . . . .	539
12.2.2	Entwurf von IMC-Reglern durch $H_2$ -Optimierung . . . . .	542
12.2.3	Entwurf robuster IMC-Regler . . . . .	546
12.2.4	Beziehung zwischen klassischen Reglern und IMC-Reglern . .	549
12.3	Smithprädiktor . . . . .	551
	Literaturhinweise . . . . .	558
<b>13</b>	<b>Erweiterungen der Regelungsstruktur . . . . .</b>	<b>561</b>
13.1	Vermaschte Regelungen . . . . .	561
13.1.1	Störgrößenaufschaltung . . . . .	562
13.1.2	Regelkreis mit Hilfsregelgröße . . . . .	565
13.1.3	Kaskadenregelung . . . . .	567
13.1.4	Regelkreis mit Hilfsstellgröße . . . . .	569
13.2	Mehrgrößenregelungen . . . . .	570
13.3	Robuste, adaptive, nichtlineare und fehlertolerante Regelungen . .	571
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>575</b>

## **Anhänge**

<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben</b> .....	579
<b>Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB</b> .....	673
<b>Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung</b> .....	683
<b>Anhang 4: Projektaufgaben</b> .....	687
<b>Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen</b> .....	695
<b>Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation</b> .....	697
<b>Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch</b> .....	699
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	703