

# 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
Literaturhinweise .....	19
<b>2 Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben .....</b>	<b>21</b>
2.1 Gebäudeautomatisierung .....	21
2.2 Prozessregelung .....	23
2.3 Regelungsaufgaben in Energiesystemen .....	26
2.4 Robotersteuerungen .....	29
2.5 Regelung von Fahrzeugen .....	31
2.6 Mechatronik .....	32
2.7 Flugregelung .....	32
2.8 Der Mensch als Regler .....	34
2.9 Biologische Regelkreise .....	35
2.10 Gemeinsamkeiten von Regelungen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten .....	37
Literaturhinweise .....	40

## Teil 2: Modellbildung und Systemanalyse

<b>3</b>	<b>Strukturelle Beschreibung dynamischer Systeme</b>	<b>41</b>
3.1	Ziele und wichtige Schritte der Modellbildung	41
3.2	Blockschaltbild	43
3.3	Signalflussgraf	54
	Literaturhinweise	56
<b>4</b>	<b>Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich</b>	<b>57</b>
4.1	Modellbildungsaufgabe	57
4.2	Beschreibung linearer Systeme durch Differenzialgleichungen	59
4.2.1	Lineare Differenzialgleichung $n$ -ter Ordnung	59
4.2.2	Aufstellung der Differenzialgleichung	60
4.2.3	Linearität dynamischer Systeme	67
4.2.4	Kausalität	69
4.2.5	Zeitinvarianz	72
4.3	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	72
4.3.1	Einführung des Zustandsraummodells	72
4.3.2	Zustand und Zustandsraum	76
4.3.3	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	80
4.4	Aufstellung des Zustandsraummodells	83
4.4.1	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzialgleichung	83
4.4.2	Aufstellung des Zustandsraummodells aus den physikalischen Grundbeziehungen	92
4.4.3	Zustandsraummodell gekoppelter Systeme	98
4.4.4	Gültigkeitsbereich der Modelle und Normierung	103
4.5	Erweiterungen	109
4.5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	109
4.5.2	Totzeitsysteme	116
4.5.3	Zeitvariable Systeme	117
4.6	MATLAB-Funktionen für die Beschreibung dynamischer Systeme	118
	Literaturhinweise	119
<b>5</b>	<b>Verhalten linearer Systeme</b>	<b>121</b>
5.1	Vorhersage des Systemverhaltens	121
5.2	Lösung der Zustandsgleichung	122
5.2.1	Lösung einer linearen Differenzialgleichung erster Ordnung	122
5.2.2	Lösung eines Differenzialgleichungssystems erster Ordnung	127
5.2.3	Verhalten linearer Systeme	130
5.2.4	Eigenschaften und Berechnungsmethoden für die Übergangsmatrix	135
5.3	Normalformen des Zustandsraummodells	137
5.3.1	Transformation der Zustandsgleichung	138
5.3.2	Kanonische Normalform	139

5.3.3	Erweiterung der kanonischen Normalform für nichtdiagonalähnliche Systemmatrizen .....	147
5.3.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung .....	150
5.3.5	Regelungsnormalfom .....	155
5.3.6	Beobachtungsnormalfom .....	160
5.3.7	E/A-Normalfom .....	162
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften .....	169
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens .....	169
5.4.1	Übergangsfunktion .....	170
5.4.2	Gewichtsfunktion .....	171
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion .....	175
5.5	E/A-Verhalten .....	177
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion .....	177
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten .....	180
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten ..	186
5.5.4	Nullodynamik .....	189
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich .....	193
5.6.1	Proportionalglieder .....	194
5.6.2	Integrierglieder .....	199
5.6.3	Differenzierglieder .....	201
5.6.4	Totzeitglieder .....	204
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung .....	207
5.7.1	Modellvereinfachung .....	207
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch PT <sub>1</sub> -Glieder ...	211
5.7.3	Kennwertermittlung für PT <sub>2</sub> -Glieder .....	215
5.7.4	Kennwertermittlung für PT <sub>1</sub> T <sub>t</sub> -Glieder .....	217
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens .....	218
	Literaturhinweise .....	224
<b>6</b>	<b>Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich .....</b>	<b>227</b>
6.1	Zielstellung .....	227
6.2	Fouriertransformation .....	229
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale .....	229
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale .....	235
6.3	Frequenzgang .....	239
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen .....	239
6.3.2	Berechnung des Frequenzganges .....	244
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung .....	245
6.4	Laplace transformation .....	248
6.4.1	Definition .....	248
6.4.2	Wichtige Eigenschaften .....	254
6.5	Übertragungsfunktion .....	257
6.5.1	Definition .....	257

6.5.2	Berechnung .....	262
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung .....	267
6.5.4	Pole und Nullstellen .....	269
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens .....	277
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme .....	284
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen .....	289
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	291
6.7.1	Proportionalglieder .....	291
6.7.2	Integrierglieder .....	307
6.7.3	Differenzierglieder .....	308
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen .....	309
6.7.5	Übertragungsglieder mit gebrochen rationaler Übertragungsfunktion .....	312
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme .....	319
6.7.7	Totzeitglieder .....	331
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	335
	Literaturhinweise .....	342
<b>7</b>	<b>Der Regelkreis .....</b>	<b>343</b>
7.1	Reglerentwurfsaufgabe .....	343
7.2	Modell des Standardregelkreises .....	349
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich .....	349
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich .....	353
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen .....	355
7.3.1	Stör- und Führungssignale .....	355
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung .....	358
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung .....	359
7.3.4	Stationäres Verhalten bei weiteren Signalklassen .....	361
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters .....	365
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises .....	366
7.4.1	Perfekte Regelung .....	366
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung .....	367
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen .....	371
7.4.4	Gleichgewichtstheorem .....	371
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen .....	378
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf .....	382
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen .....	384
7.5.1	Aufgaben der Folgeregung .....	384
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf .....	385
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel .....	390
7.5.4	Vorsteuerung im stationären Zustand .....	394
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur .....	396
	Literaturhinweise .....	403

<b>8</b>	<b>Stabilität rückgekoppelter Systeme</b>	<b>405</b>
8.1	Zustandsstabilität	405
8.1.1	Definition der Zustandsstabilität	406
8.1.2	Kriterien für die Zustandsstabilität	408
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	412
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	412
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	413
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	415
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	416
8.3.1	Vorgehensweise	416
8.3.2	Hurwitzkriterium	416
8.3.3	Routhkriterium	419
8.4	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	422
8.4.1	E/A-Stabilität von Regelkreisen	422
8.4.2	Innere Stabilität von Regelkreisen	425
8.5	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzganges der offenen Kette	428
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	428
8.5.2	Nyquistkriterium	433
8.5.3	Beispiele	435
8.5.4	Erweiterungen	439
8.5.5	Phasenrandkriterium	445
8.6	Robuste Stabilität	449
8.6.1	Zielsetzung	449
8.6.2	Beschreibung der Modellunbestimmtheiten	450
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	453
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	459
	Literaturhinweise	461

### Teil 3: Entwurf einschleifiger Regelkreise

<b>9</b>	<b>Entwurf einschleifiger Regelkreise</b>	<b>463</b>
9.1	Allgemeines Vorgehen beim Reglerentwurf	463
9.2	Übersicht über die Entwurfsverfahren	465
9.3	Rechnergestützter Entwurf	467
9.4	Einstellregeln für PID-Regler	468
	Literaturhinweise	472
<b>10</b>	<b>Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises</b>	<b>475</b>
10.1	Beziehungen zwischen dem PN-Bild und den Güteforderungen	475
10.1.1	Regelkreise mit dominierendem Polpaar	475
10.1.2	Regelkreise mit einem dominierenden Pol	483
10.2	Wurzelortskurve	484
10.2.1	Definition	484

10.2.2	Eigenschaften und Konstruktionsvorschriften .....	485
10.3	Reglerentwurf unter Verwendung der Wurzelortskurve .....	495
10.3.1	Entwurfsverfahren .....	495
10.3.2	Regelung mit hoher Kreisverstärkung .....	501
10.3.3	Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens ....	502
10.4	MATLAB-Funktionen zum Reglerentwurf anhand des PN-Bildes ..	507
	Literaturhinweise .....	511
<b>11</b>	<b>Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette .....</b>	<b>513</b>
11.1	Frequenzkennlinie und Regelgüte .....	513
11.1.1	Näherung des Regelkreises durch ein $PT_2$ -Glied .....	513
11.1.2	Statisches Verhalten des Regelkreises .....	514
11.1.3	Führungsverhalten des Regelkreises .....	516
11.1.4	Störverhalten des Regelkreises .....	521
11.2	Reglerentwurf unter Beachtung des Führungsverhaltens .....	527
11.2.1	Entwurfsverfahren .....	527
11.2.2	Entwurfsdurchführung .....	528
11.3	Reglerentwurf unter Beachtung des Störverhaltens .....	538
11.4	MATLAB-Programm zum Frequenzkennlinienentwurf .....	541
	Literaturhinweise .....	542
<b>12</b>	<b>Weitere Entwurfsverfahren .....</b>	<b>545</b>
12.1	Kompensationsregler .....	545
12.2	Modellbasierte Regelung ( <i>Internal Model Control</i> ) .....	551
12.2.1	Grundidee des Verfahrens .....	551
12.2.2	Entwurf von IMC-Reglern durch $H_2$ -Optimierung .....	555
12.2.3	Entwurf robuster IMC-Regler .....	558
12.2.4	Beziehung zwischen klassischen Reglern und IMC-Reglern ..	561
12.3	Smithprädiktor .....	563
	Literaturhinweise .....	570
<b>13</b>	<b>Erweiterungen der Regelungsstruktur .....</b>	<b>573</b>
13.1	Vermaschte Regelungen .....	573
13.1.1	Störgrößenaufschaltung .....	574
13.1.2	Regelkreis mit Hilfsregelgröße .....	577
13.1.3	Kaskadenregelung .....	579
13.1.4	Regelkreis mit Hilfsstellgröße .....	581
13.2	Mehrgrößenregelungen .....	582
13.3	Robuste, adaptive, nichtlineare und fehlertolerante Regelungen ....	584
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>587</b>

## **Anhänge**

<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben</b> .....	591
<b>Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB</b> .....	687
<b>Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung</b> .....	697
<b>Anhang 4: Projektaufgaben</b> .....	701
<b>Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen</b> .....	709
<b>Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation</b> .....	711
<b>Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch</b> .....	713
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	717