

Inhaltsverzeichnis

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

Teil 1: Einführung

1 Zielstellung und theoretische Grundlagen der Regelungstechnik	1
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	18
2 Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben	21
2.1 Gebäudeautomatisierung	21
2.2 Prozessregelung	24
2.3 Regelungsaufgaben in Energiesystemen	26
2.4 Robotersteuerungen	29
2.5 Regelung von Fahrzeugen	31
2.6 Mechatronik	32
2.7 Flugregelung	33
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

3	Strukturelle Beschreibung dynamischer Systeme	41
3.1	Ziele und wichtige Schritte der Modellbildung	41
3.2	Blockschaltbild	43
3.3	Signalflussgraph	55
	Literaturhinweise	57
4	Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich	59
4.1	Modellbildungsaufgabe	59
4.2	Beschreibung linearer Systeme durch Differentialgleichungen	61
4.2.1	Lineare Differentialgleichung n -ter Ordnung	61
4.2.2	Aufstellung der Differentialgleichung	62
4.2.3	Linearität dynamischer Systeme	69
4.2.4	Kausalität	71
4.2.5	Zeitinvarianz	74
4.3	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	74
4.3.1	Einführung des Zustandsraummodells	74
4.3.2	Zustand und Zustandsraum	78
4.3.3	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	82
4.4	Aufstellung des Zustandsraummodells	85
4.4.1	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differentialgleichung	85
4.4.2	Aufstellung des Zustandsraummodells aus den physikalischen Grundbeziehungen	93
4.4.3	Zustandsraummodell gekoppelter Systeme	100
4.4.4	Gültigkeitsbereich der Modelle und Normierung	105
4.5	Erweiterungen	110
4.5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	110
4.5.2	Totzeitsysteme	118
4.5.3	Zeitvariable Systeme	119
4.6	MATLAB-Funktionen für die Beschreibung dynamischer Systeme .	120
	Literaturhinweise	121
5	Verhalten linearer Systeme	123
5.1	Vorhersage des Systemverhaltens	123
5.2	Lösung der Zustandsgleichung	124
5.2.1	Lösung einer linearen Differentialgleichung erster Ordnung .	124
5.2.2	Lösung eines Differentialgleichungssystems erster Ordnung	129
5.2.3	Verhalten linearer Systeme	132
5.2.4	Eigenschaften und Berechnungsmethoden für die Übergangsmatrix	138
5.3	Normalformen des Zustandsraummodells	140
5.3.1	Transformation der Zustandsgleichung	140
5.3.2	Kanonische Normalform	142

5.3.3	Erweiterung der kanonischen Normalform für nichtdiagonalähnliche Systemmatrizen	149
5.3.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	153
5.3.5	Regelungsnormform	158
5.3.6	Beobachtungsnormform	163
5.3.7	E/A-Normalform	165
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften	173
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens	175
5.4.1	Übergangsfunktion	175
5.4.2	Gewichtsfunktion	176
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion	180
5.5	E/A-Verhalten	182
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion	182
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	185
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten	191
5.5.4	Nulldynamik	195
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich	200
5.6.1	Proportionalglieder	200
5.6.2	Integrierglieder	207
5.6.3	Differenzierglieder	209
5.6.4	Totzeitglieder	211
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung	214
5.7.1	Modellvereinfachung	215
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch PT_1 -Glieder	219
5.7.3	Kennwertermittlung für PT_2 -Glieder	223
5.7.4	Kennwertermittlung für PT_1T_t -Glieder	224
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens	226
	Literaturhinweise	232
6	Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich	235
6.1	Zielstellung	235
6.2	Fouriertransformation	237
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale	237
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale	243
6.3	Frequenzgang	247
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen	247
6.3.2	Berechnung des Frequenzgangs	252
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	253
6.4	Laplacetransformation	257
6.4.1	Definition	257
6.4.2	Wichtige Eigenschaften	263

6.5	Übertragungsfunktion	266
6.5.1	Definition	266
6.5.2	Berechnung	270
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	275
6.5.4	Pole und Nullstellen	278
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens	286
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme	293
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen	298
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	300
6.7.1	Proportionalglieder	300
6.7.2	Integrierglieder	317
6.7.3	Differenzierglieder	319
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen	319
6.7.5	Weitere Übertragungsglieder	321
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme	329
6.7.7	Totzeitglieder	343
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	347
	Literaturhinweise	355
7	Der Regelkreis	357
7.1	Reglerentwurfsaufgabe	357
7.2	Modell des Standardregelkreises	363
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich	363
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich	368
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	369
7.3.1	Stör- und Führungssignale	369
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung	372
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung	373
7.3.4	Stationäres Verhalten bei weiteren Signalklassen	375
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters	379
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises	380
7.4.1	Perfekte Regelung	380
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung	381
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen	384
7.4.4	Gleichgewichtstheorem	385
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen	392
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf	396
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen	398
7.5.1	Aufgaben der Folgeregung	398
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf	399
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel	405
7.5.4	Vorsteuerung in den stationären Zustand	409
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur	412
	Literaturhinweise	418

8	Stabilität rückgekoppelter Systeme	421
8.1	Zustandsstabilität	421
8.1.1	Stabilitätsbegriff	421
8.1.2	Definition der Zustandsstabilität	422
8.1.3	Kriterien für die Zustandsstabilität	424
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	428
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	428
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	429
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	431
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	432
8.3.1	Vorgehensweise	432
8.3.2	Hurwitzkriterium	433
8.4	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	436
8.4.1	E/A-Stabilität von Regelkreisen	436
8.4.2	Innere Stabilität von Regelkreisen	439
8.5	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzgangs der offenen Kette	442
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	442
8.5.2	Nyquistkriterium	446
8.5.3	Beispiele	448
8.5.4	Erweiterungen	453
8.5.5	Phasenrandkriterium	459
8.6	Robuste Stabilität	463
8.6.1	Zielsetzung	463
8.6.2	Beschreibung der Modellunbestimmtheiten	463
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	467
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	472
	Literaturhinweise	475

Teil 3: Entwurf einschleifiger Regelkreise

9	Entwurf einschleifiger Regelkreise	477
9.1	Allgemeines Vorgehen beim Reglerentwurf	477
9.2	Übersicht über die Entwurfsverfahren	479
9.3	Rechnergestützter Entwurf	481
9.4	Einstellregeln für PID-Regler	482
	Literaturhinweise	486
10	Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	489
10.1	Beziehungen zwischen dem PN-Bild und den Güteforderungen	489
10.1.1	Regelkreise mit dominierendem Polpaar	489
10.1.2	Regelkreise mit einem dominierenden Pol	497
10.1.3	Einschwingverhalten von Regelkreisen zweiter Ordnung	497

10.2	Wurzelortskurve	501
10.2.1	Definition	501
10.2.2	Eigenschaften und Konstruktionsvorschriften	503
10.3	Reglerentwurf unter Verwendung der Wurzelortskurve	513
10.3.1	Entwurfsverfahren	513
10.3.2	Regelung mit hoher Kreisverstärkung	519
10.3.3	Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens	520
10.4	MATLAB-Funktionen zum Reglerentwurf anhand des PN-Bildes ..	525
	Literaturhinweise	529
11	Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette	531
11.1	Frequenzkennlinie und Regelgüte	531
11.1.1	Näherung des Regelkreises durch ein PT_2 -Glied	531
11.1.2	Statisches Verhalten des Regelkreises	532
11.1.3	Führungsverhalten des Regelkreises	534
11.1.4	Störverhalten des Regelkreises	539
11.2	Reglerentwurf unter Beachtung des Führungsverhaltens	545
11.2.1	Entwurfsverfahren	545
11.2.2	Entwurfsdurchführung	546
11.2.3	Vergleich von Reglerentwurf und Reglereinstellung	555
11.3	Reglerentwurf unter Beachtung des Störverhaltens	560
11.4	MATLAB-Programm zum Frequenzkennlinienentwurf	563
	Literaturhinweise	565
12	Weitere Entwurfsverfahren	567
12.1	Kompensationsregler	567
12.2	Modellbasierte Regelung (<i>Internal Model Control</i>)	573
12.2.1	Grundidee des Verfahrens	573
12.2.2	Entwurf von IMC-Reglern durch H_2 -Optimierung	576
12.2.3	Entwurf robuster IMC-Regler	580
12.2.4	Beziehung zwischen klassischen Reglern und IMC-Reglern ..	584
12.3	Smithprädiktor	585
	Literaturhinweise	593
13	Erweiterungen der Regelungsstruktur	595
13.1	Vermaschte Regelungen	595
13.1.1	Störgrößenaufschaltung	596
13.1.2	Regelkreis mit Hilfsregelgröße	599
13.1.3	Kaskadenregelung	602
13.1.4	Regelkreis mit Hilfsstellgröße	604
13.2	Mehrgrößenregelungen	605
13.3	Robuste, adaptive, nichtlineare und fehlertolerante Regelungen	606
	Literaturverzeichnis	609

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	615
Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB	723
Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	733
Anhang 4: Projektaufgaben	737
Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	747
Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation	749
Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch	751
Sachwortverzeichnis	757

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

Regelung von Elektroenergieversorgungssystemen

Regelungsaufgaben für Elektroenergienetze (Abschn. 2.3)	26
• Regelung von Kraftwerken	
Nichtminimalphasenverhalten eines Dampferzeugers (Beispiel 6.9)	336
Nichtminimalphasenverhalten von Wasserkraftwerken (Beispiel 6.8)	334
Stabilitätsprüfung eines Kraftwerksblocks (Aufgabe 8.5)	436
• Netzregelung	
Frequenzregelung im Inselnetz (Aufgabe 7.4 mit Lösung)	376, 675
Entwurf der Knotenspannungsregelung (Beispiel 11.1)	551
Kaskadenstruktur der Knotenspannungsregelung (Aufgabe 13.5)	603

Flugregelungen

Lageregelung von Raumflugkörpern (Aufgabe 8.13 mit Lösung)	462, 686
Aufgaben der Flugregelung (Abschn. 2.7)	33
Nichtminimalphasiges Verhalten von Flugzeugen (Aufgabe 6.33)	342
• Regelung der Rollbewegung von Flugzeugen	
Zustandsraummodell für die Rollbewegung eines Flugzeugs (Beispiel 5.6) ...	156
Dynamik der Rollbewegung (Aufgabe 6.30)	328
Dämpfung der Rollbewegung (Aufgabe 11.7 mit Lösung)	559, 706
Stabilität einer Flugregelung (Projektaufgabe A4.2)	739
• Regelung von Ruderstellsystemen	
Übertragungsfunktion eines hydraulischen Ruderstellsystems (Aufgabe 6.25 mit Lösung)	326, 662
Lageregelung hydraulischer Ruderstellsysteme (Aufgabe 10.10 mit Lösung) ..	522, 695

Prozessregelung

Regelungsaufgaben in der Verfahrenstechnik (Abschn. 2.2)	24
Füllstandsregelung mit Vorsteuerung (Beispiel 1.5)	12
Temperaturregelung eines Wärmeübertragers (Projektaufgabe A4.3)	739
• Verhalten verfahrenstechnischer Prozesse	
Dynamisches Verhalten einer Stufenreaktion (Aufgabe 5.28)	212
Zustandsraummodell eines Behältersystems mit zwei Eingängen und zwei Ausgängen (Beispiel 4.7)	82
Linearisierung des nichtlinearen Rührkesselreaktormodells (Beispiel 4.15) ...	117
Zustandsraummodell zur Berechnung der Füllstände in drei gekoppelten Behältern (Aufgabe 4.9 mit Lösung)	110, 627
Pole und Nullstellen eines Behältersystems (Beispiel 6.5)	281
Eigenbewegung gekoppelter Behälter (Aufgabe 5.1 mit Lösung)	128, 630
Blockschaltbild der Regelung eines UASB-Reaktors (Beispiel 3.2)	47
• Temperaturregelung von Rührkesselreaktoren	
Modell für das thermische Verhalten eines Rührkesselreaktors (Beispiel 4.3) .	66
Beschreibung des thermischen Verhaltens bei veränderlicher Heizleistung (Aufgabe 4.2)	69
Trajektorienplanung für den Arbeitspunktwechsel (Beispiel 7.4)	406
Arbeitspunktwechsel mit stetiger Stellgröße (Aufgabe 7.10)	411
Einstellung der Temperaturregelung nach ZIEGLER und NICHOLS (Beispiel 9.1)	483
Entwurf der Temperaturregelung und Vergleich mit der Reglereinstellung (Beispiel 11.2)	556
Entwurf der Temperaturregelung mit dem Frequenzkennlinienverfahren (Aufgabe 11.6)	559
Temperaturregelung mit einem Kompensationsregler (Beispiel 12.1)	571
Störgrößenaufschaltung zur Verbesserung der Temperaturregelung (Aufgabe 13.2)	599
• Konzentrationsregelung von Rührkesselreaktoren	
Verhalten zweier Rührkessel (Aufgabe 5.5 mit Lösung)	137, 639
Exakte Berechnung und Approximation der Gewichtsfunktion (Aufgabe 5.12 mit Lösung)	181, 646
Analyse des Übergangsverhaltens gekoppelter Behälter (Aufgabe 5.35)	231
Reaktormodell im Frequenzbereich (Aufgabe 6.38)	347
Reaktor mit minimalphasigem und nichtminimalphasigem Verhalten (Beispiel 6.10)	338
Konzentrationsregelung mit Smithprädiktor (Beispiel 12.2)	587

• Temperaturregelung eines Klinkerkühlers

Strukturelle Modellierung von Drehrohren und Klinkerkühler (Beispiel 3.1)	45
MATLAB-Programm A.1 zur Analyse der Stabilitätseigenschaften von Drehrohren und Klinkerkühler (Aufgabe 8.19 mit Lösung)	473, 688

Gebäudeautomatisierung

Regelungsaufgaben in der Gebäudeautomatisierung (Abschn. 2.1)	21
Schwingungstilgung am Hochhaus „Taipeh 101“ (Aufgabe 6.41 mit Lösung)	353, 671

• Raumtemperaturregelung

Blockschaltbild einer Raumtemperaturregelung (Aufgabe 2.1)	23
Heizungspumpenregelung (Aufgabe 2.6)	40
Analyse des Zeitverhaltens einer Raumtemperaturregelung: MATLAB-Programm 5.1 (Beispiel 5.14)	228
Analyse einer Raumtemperaturregelung im Frequenzbereich: MATLAB-Programm 6.1 (Beispiel 6.11)	350
Raumtemperaturregelung mit einem Thermostatventil (Aufgabe 7.9)	380
Robustheit von Thermostatventilen (Aufgabe 8.18)	472
Störgrößenaufschaltung in einer außentemperaturgeführten Vorlauftemperaturregelung (Aufgabe 13.1)	599

Steuerung von Fahrzeugen

Beispiele für Regelkreise in Fahrzeugen (Aufgabe 2.5)	31
Regelung der Leerlaufdrehzahl eines Verbrennungsmotors (Aufgabe 11.10 mit Lösung)	564, 712
Der Chauffeur als Regler (Abschn. 2.8)	34
Rückwärtseinparken von Fahrzeugen (Aufgabe 6.34 mit Lösung)	342, 667
Abbremsen eines Fahrzeugs (Aufgabe 7.11 mit Lösung)	411, 680
Wirkung einer aktiven Fahrzeugdämpfung (Beispiel 7.3)	390
Stabilisierung eines Fahrrades (Aufgabe 10.12 mit Lösung)	523, 696
Robustheitsprobleme beim Autofahren (Aufgabe 8.16)	472
Entwurf der Kompensationsrückführung im Airbag-Sensor (Projektaufgabe A4.5 mit Lösung)	741, 716
Entwurf eines Geschwindigkeitsreglers (Aufgabe A4.8)	744

• Modellierung der Fahrzeugbewegung

Blockschaltbild des Antriebsstranges eines Kraftfahrzeugs (Aufgabe 3.2 mit Lösung)	53, 616
Linearisierung eines Fahrzeugmodells (Beispiel 4.14)	115

Bewegungsgleichung eines Fahrzeugs (Aufgabe 5.3 mit Lösung)	136, 634
Berechnung der Bewegung einer Eisenbahn (Aufgabe 5.4 mit Lösung)	136, 637
• Abstandsregelung von Kraftfahrzeugen	
Struktur des Abstandsreglers bei Fahrzeugen (Aufgabe 7.7 mit Lösung)	377, 676
Entwurf einer Abstandsregelung (Aufgabe 11.8 mit Lösung)	560, 709
Kaskadenstruktur der Abstandsregelung von Fahrzeugen (Aufgabe 13.6 mit Lösung)	603, 715
• Regelung von Schiffen	
Dämpfung der Rollbewegung eines Schiffes: MATLAB-Programm A.3 (Aufgabe 10.17 mit Lösung)	528, 701
Steuerung eines Schiffes (Aufgabe 10.9)	521
Biologische Regelkreise	
Herzschrittmacher (Beispiel 1.4)	9
Beispiele für biologische Regelkreise (Beispiel 2.9)	35
Regelungsaufgaben in der Medizintechnik (Abschn. 2.9)	37
Künstliche Beatmung (Aufgabe 3.3 mit Lösung)	54, 617
Wirkstoffkonzentrationsverlauf im Blut (Aufgabe 5.23 mit Lösung)	206, 651
Körpertemperaturregelung (Beispiel 13.1)	598
Regelung mechanischer Systeme	
• Analyse und Regelung einer Verladebrücke	
Positionierung einer Last mit einem Portalkran (Beispiel 1.2)	7
Verhalten der Verladebrücke (Beispiel 5.1)	133
Übertragungsfunktion der Verladebrücke (Aufgabe 6.11 mit Lösung)	285, 656
Bodediagramm der Verladebrücke (Aufgabe 6.28 mit Lösung)	328, 666
Wurzelortskurve der geregelten Verladebrücke (Aufgabe 10.5 mit Lösung) ...	512, 691
Regelung einer Verladebrücke (Projektaufgabe A4.4)	741
• Stabilisierung eines invertierten Pendels	
Analyse der Stabilisierbarkeit (Aufgabe 8.4 mit Lösung)	436, 682
Entwurf eines stabilisierenden Reglers: MATLAB-Programm 10.1 (Beispiel 10.5)	516

Drehzahleregelter Gleichstrommotor

Zustandsraummodell des Gleichstrommotors (Beispiel 5.2)	144
Modellvereinfachung (Beispiel 5.12)	217
Blockschaltbild und Übertragungsfunktion des Gleichstrommotors (Aufgabe 6.35 mit Lösung)	343, 668
Analyse des Übertragungsverhaltens (Aufgabe 6.39)	353
Wurzelortskurve des geregelten Gleichstrommotors (Aufgabe 10.5 mit Lösung)	512, 691
Entwurf der Drehzahlregelung mit dem Frequenzkennlinienverfahren (Beispiel 11.3)	560
Entwurf der Drehzahlregelung (MATLAB-Programm 11.1)	564
Berechnung der Störübergangsfunktion (Aufgabe 11.9)	564
Modellunbestimmtheiten eines drehzahleregelten Gleichstrommotors (Beispiel 8.10)	465
Robustheitsanalyse der Drehzahlregelung (Beispiel 8.11)	470
Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors (Projektaufgabe A4.1)	738

Weitere Regelungsaufgaben

Regelkreise bei der Lagerhaltung (Beispiel 3.4)	51
Budgetverteilung in einem Unternehmen (Beispiel 6.10)	338
Bestellstrategien bei der Lagerhaltung (Aufgabe 3.1)	53
Robotersteuerung (Abschn. 2.4)	29
Strukturelle Modellierung des Flussgebietes der Werra (Beispiel 3.3)	50
Füllstandsregelung einer Talsperre (Aufgabe 7.6 mit Lösung)	377, 675
Regelung einer Dampfmaschine (Beispiel 1.3)	8
Analyse des Fliehkraftreglers von Dampfmaschinen (Aufgabe 7.8 mit Lösung)	378, 679
Positionierung eines Radioteleskops (Projektaufgabe A4.6 mit Lösung)	743, 721
Steuerung einer Schachtförderung im Steinkohlebergbau (Projektaufgabe A4.7)	744
Elektrische Schaltungen mit positiv reeller Übertragungsfunktion (Aufgabe 6.29 mit Lösung)	328, 666

• Regelkreise im täglichen Leben

Temperaturregelung einer Dusche (Beispiel 1.1)	7
Verhalten einer Badewanne (Aufgabe 5.26)	212
Modellierung der Flugbahn eines Golfballs (Aufgabe 4.5 mit Lösung)	84, 620
Lautstärkeregler (Aufgabe 2.4 mit Lösung)	35, 615
Thermostat im Backofen (Aufgabe 2.7)	40
Steuerung eines Abfüllautomaten (Aufgabe 2.2)	35

Rückkopplung in Lautsprecher-Mikrofon-Anordnungen (Aufgabe 8.11 mit Lösung)	457, 684
Klassifikation alltäglicher Vorgänge nach ihrem dynamischen Verhalten (Aufgabe 5.29 mit Lösung)	213, 652
• Technische Realisierung von Reglern	
Frequenzgang einer Operationsverstärkerschaltung (Aufgabe 6.20 mit Lösung)	297, 660
Technische Realisierung von Reglern (Aufgabe 7.13)	417
Technische Realisierung von Nullstellen im Regler (Aufgabe 7.14)	418
Technische Realisierung einer Differentiation (Beispiel 4.4)	72
Stabilitätsprüfung digital vernetzter Regelungssysteme (Beispiel 8.8)	456