

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Anwendungsbeispiele</b> .....	xvii
<b>Hinweise zum Gebrauch des Buches</b> .....	xxv

## Teil 1: Einführung

<b>1 Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik</b> .....	3
1.1 Ziele der Automatisierungstechnik .....	3
1.2 Anwendungsbeispiele .....	6
1.2.1 Prozessautomatisierung .....	6
1.2.2 Fertigungsautomatisierung .....	11
1.2.3 Gebäudeautomatisierung .....	12
1.2.4 Überwachung und Steuerung von Energiesystemen .....	13
1.2.5 Automatisierungstechnik in Fahrzeugen .....	14
1.2.6 Überwachung und Steuerung des Flugverkehrs .....	16
1.2.7 Automatisierungsaufgaben in der Informations- und Kommunikationstechnik .....	17
1.2.8 Zusammenfassung: Notwendigkeit der Automatisierung technischer Systeme .....	18
1.3 Grundstruktur automatisierter Systeme .....	19
1.3.1 Beziehungen zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem zu automatisierenden Prozess .....	19
1.3.2 Das Rückkopplungsprinzip .....	21
1.3.3 Die Rolle des Menschen in automatisierten Systemen .....	22
1.3.4 Spezielle Klassen automatisierter Systeme .....	23
1.4 Automatisierungsaufgaben .....	25
1.4.1 Modellbildung dynamischer Systeme .....	26
1.4.2 Vorhersage des Systemverhaltens .....	28
1.4.3 Planung von Steuereingriffen .....	29
1.4.4 Zustandsbeobachtung .....	30
1.4.5 Prozessdiagnose .....	31
1.4.6 Regelung und Steuerung .....	32

1.4.7	Kombination von Automatisierungsfunktionen.....	35
1.4.8	Automatisierungshierarchie.....	36
1.5	Realisierung von Automatisierungseinrichtungen.....	40
1.5.1	Methoden und Geräte.....	40
1.5.2	Lösungsweg für Automatisierungsaufgaben.....	41
1.5.3	Beziehungen zwischen der Automatisierungstechnik und angrenzenden Fachdisziplinen.....	42
	Literaturhinweise.....	43
<b>2</b>	<b>Grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme.....</b>	<b>45</b>
2.1	Grundbegriffe der Systemtheorie.....	45
2.1.1	Signal, Prozess, System.....	45
2.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale und Systeme.....	47
2.1.3	Statische und dynamische Systeme.....	50
2.1.4	Autonome und gesteuerte Systeme.....	52
2.1.5	Gemeinsamkeiten und Unterschiede kontinuierlicher und diskreter Systeme.....	53
2.2	Blockschaltbild und Signalflussgraph.....	54
2.2.1	Struktur dynamischer Systeme.....	54
2.2.2	Blockschaltbild.....	55
2.2.3	Signalflussgraph.....	62
2.3	Dekomposition und Aggregation von Systemen.....	64
2.4	Kopplungsanalyse.....	66
2.5	Steuerungen in der offenen Wirkungskette und im geschlossenen Kreis.....	72
	Literaturhinweise.....	80

## Teil 2: Automatisierung kontinuierlicher Systeme

<b>3</b>	<b>Beschreibung kontinuierlicher Systeme.....</b>	<b>83</b>
3.1	Modellbildungsaufgabe.....	83
3.2	Systembeschreibung durch lineare Differentialgleichungen.....	84
3.3	Zustandsraummodell linearer Systeme.....	90
3.3.1	Zustandsgleichung und Ausgabegleichung.....	90
3.3.2	Zustandsbegriff.....	93
3.3.3	Normierung der Signale und Parameter.....	95
3.3.4	Blockschaltbild und Signalflussgraph des Zustandsraummodells.....	97
3.3.5	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen.....	99
3.3.6	Gleichgewichtszustand linearer Systeme.....	100
3.4	Zustandsraummodell nichtlinearer Systeme.....	102
3.5	Linearisierung.....	111
3.6	Kompositionale Modellbildung kontinuierlicher Systeme.....	116
	Literaturhinweise.....	121

<b>4</b>	<b>Verhalten kontinuierlicher Systeme</b>	123
4.1	Vorhersage des Systemverhaltens	123
4.2	Verhalten linearer Systeme	124
4.2.1	Lösung der Zustandsgleichung	124
4.2.2	Berechnung der Ausgangsgröße	127
4.2.3	Anmerkungen zum Zustandsbegriff	133
4.2.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Form	136
4.2.5	Übergangsfunktion	141
4.2.6	Berechnung der Matrixexponentialfunktion	143
4.3	Verhalten nichtlinearer Systeme	144
4.3.1	Lösung der nichtlinearen Modellgleichungen	144
4.3.2	Rechnergestützte Analyse nichtlinearer Systeme	146
4.4	Kennwertermittlung	151
	Literaturhinweise	153
<b>5</b>	<b>Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit</b>	155
5.1	Definition der Steuerbarkeit und der Beobachtbarkeit	155
5.2	Steuerbarkeit linearer Systeme	157
5.2.1	Steuerbarkeitskriterium	157
5.2.2	Eigenschaften vollständig steuerbarer Systeme	158
5.3	Beobachtbarkeit linearer Systeme	163
5.3.1	Beobachtbarkeitskriterium	163
5.3.2	Berechnung des Anfangszustands aus $n$ Messwerten	164
5.3.3	Bestimmung des Anfangszustands mit Hilfe der gramscchen Beobachtbarkeitsmatrix	166
5.4	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	168
5.4.1	Strukturgraph	168
5.4.2	Definition und Kriterien für die strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	170
5.4.3	Strukturelle Analyse nichtlinearer Systeme	175
5.5	Systemzerlegung entsprechend den Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitseigenschaften	176
	Literaturhinweise	180
<b>6</b>	<b>Stabilität</b>	181
6.1	Stabilitätsdefinition	181
6.2	Stabilitätsanalyse linearer Systeme	184
6.2.1	Stabilitätsanalyse anhand der Eigenwerte der Systemmatrix	184
6.2.2	Hurwitzkriterium	187
6.3	Stabilitätsanalyse nichtlinearer Systeme	190
6.3.1	Lösungswege	190
6.3.2	Stabilitätsprüfung mit dem linearisierten Modell	192
6.3.3	Direkte Methode von Ljapunow	195
6.3.4	Anwendung der Direkten Methode auf lineare Systeme	201

6.4	Stabilität von Regelkreisen . . . . .	203
6.4.1	Stabilität der Regelstrecke und des Regelkreises . . . . .	203
6.4.2	Robuste Stabilität . . . . .	207
6.5	Ausblick: Weitere Verfahren für die Stabilitätsprüfung . . . . .	209
	Literaturhinweise . . . . .	209
<b>7</b>	<b>Einschleifige Regelkreise . . . . .</b>	<b>211</b>
7.1	Regelungsaufgabe für kontinuierliche Systeme . . . . .	211
7.2	Modell des Standardregelkreises . . . . .	214
7.2.1	Linearer Regelkreis . . . . .	214
7.2.2	Nichtlinearer Regelkreis . . . . .	217
7.3	Wichtige Eigenschaften von Regelkreisen . . . . .	219
7.3.1	Störkompensation und Sollwertfolge . . . . .	219
7.3.2	Erreichbare Regelgüte . . . . .	228
7.3.3	Robustheit . . . . .	230
7.4	Reglertypen . . . . .	234
7.4.1	PID-Regler . . . . .	234
7.4.2	Weitere Reglerkomponenten . . . . .	237
	Literaturhinweise . . . . .	239
<b>8</b>	<b>Einstellregeln für PID-Regler . . . . .</b>	<b>241</b>
8.1	Entwurfsschritte . . . . .	241
8.2	Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS . . . . .	243
8.3	Robuste PI-Regelung . . . . .	250
8.3.1	Gegenkopplungsbedingung für I-Regler . . . . .	250
8.3.2	Reglereinstellung . . . . .	253
8.3.3	Erweiterung auf PI-Regler . . . . .	255
8.4	Ausblick: Verfahren für den Reglerentwurf . . . . .	259
	Literaturhinweise . . . . .	260
<b>9</b>	<b>Zustandsbeobachtung kontinuierlicher Systeme . . . . .</b>	<b>261</b>
9.1	Beobachtungsaufgabe . . . . .	261
9.2	Luenbergerbeobachter . . . . .	263
9.2.1	Grundidee . . . . .	263
9.2.2	Beobachterstruktur . . . . .	265
9.2.3	Wahl der Beobachterrückführung . . . . .	267
9.2.4	Verhalten des Beobachters bei Störungen und Modellunsicherheiten . . . . .	273
9.3	Beobachter für nichtlineare Systeme . . . . .	278
9.4	Anwendungen der Zustandsbeobachtung . . . . .	280
9.4.1	Beobachtung eines Teilsystems . . . . .	280
9.4.2	Online-Vorhersage des Systemverhaltens . . . . .	281
9.4.3	Regelung unter Verwendung einer beobachteten Regelgröße . . . . .	283
	Literaturhinweise . . . . .	285

<b>10</b>	<b>Diagnose kontinuierlicher Systeme</b>	287
10.1	Diagnoseaufgabe und Lösungswege	287
10.1.1	Diagnoseaufgabe	287
10.1.2	Diagnoseschritte	290
10.1.3	Signalbasierte und modellbasierte Diagnose	290
10.1.4	Modelle des fehlerfreien und des fehlerhaften Systems	292
10.1.5	Diagnose mit statischen und dynamischen Modellen	295
10.1.6	Prinzip der konsistenzbasierten Diagnose	295
10.2	Fehlererkennung mit einem Zustandsbeobachter	298
10.3	Sensorüberwachung	305
10.3.1	Aufgabenstellung	305
10.3.2	Fehlerlokalisierung mit dedizierten Beobachtern	306
10.3.3	Erweiterung	314
10.4	Fehleridentifikation	316
10.4.1	Fehleridentifikation mit einer Beobachterbank	316
10.4.2	Fehleridentifikation unter Verwendung von Fehlermodellen	317
10.4.3	Entwurf beobachtergestützter Diagnosesysteme	319
10.5	Ausblick: Diagnose und fehlertolerante Steuerung	328
	Literaturhinweise	329

### Teil 3: Automatisierung ereignisdiskreter Systeme

<b>11</b>	<b>Beschreibung diskreter Systeme</b>	333
11.1	Modellbildungsaufgabe	333
11.1.1	Diskrete Signale und Ereignisse	333
11.1.2	Modellbildungsziel und Modellbildungsschritte	340
11.2	Deterministische Automaten	344
11.2.1	Autonome deterministische Automaten	344
11.2.2	Deterministische Automaten mit Eingang und Ausgang	349
11.3	Nichtdeterministische Automaten	355
11.3.1	Deterministische und nichtdeterministische Systeme	355
11.3.2	Autonome nichtdeterministische Automaten	357
11.3.3	Nichtdeterministische Automaten mit Eingang und Ausgang	367
11.4	Stochastische Automaten	372
11.4.1	Stochastische Prozesse	372
11.4.2	Autonome stochastische Automaten	376
11.4.3	Stochastische Automaten mit Eingang und Ausgang	382
11.4.4	Markoveigenschaft dynamischer Systeme	385
11.5	Petrinetze	389
11.5.1	Autonome Petrinetze	389
11.5.2	Petrinetze mit Eingang und Ausgang	400
11.5.3	Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten	405

11.6	Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme .....	407
11.6.1	Modellbildungsaufgabe .....	407
11.6.2	Synchronisation von Automaten .....	408
11.6.3	Reihenschaltung .....	413
11.6.4	Rückführautomat .....	417
	Literaturhinweise .....	425
<b>12</b>	<b>Verhalten diskreter Systeme .....</b>	<b>427</b>
12.1	Vorhersage des Systemverhaltens .....	427
12.2	Verhalten deterministischer Automaten .....	428
12.2.1	Berechnung der Zustands- und Ausgabefolge .....	428
12.2.2	Erreichbarkeitsanalyse des Automatengraphen .....	429
12.2.3	Strukturelle Analyse deterministischer Automaten .....	431
12.2.4	Steuerbarkeit deterministischer Automaten .....	433
12.3	Verhalten nichtdeterministischer Automaten .....	434
12.3.1	Berechnung der Zustands- und Ausgabefolgen .....	434
12.3.2	Strukturelle Analyse nichtdeterministischer Automaten .....	437
12.3.3	Steuerbarkeit nichtdeterministischer Automaten .....	438
12.4	Verhalten stochastischer Automaten .....	441
12.4.1	Berechnung der Zustandsfolgen autonomer stochastischer Automaten ..	441
12.4.2	Strukturelle Analyse stochastischer Automaten .....	444
12.4.3	Erweiterung auf Automaten mit Eingang und Ausgang .....	444
12.5	Verhalten von Petrinetzen .....	446
12.5.1	Berechnung der Markierungsfolgen .....	446
12.5.2	Strukturelle Analyse von Petrinetzen .....	447
12.5.3	Invarianten .....	448
	Literaturhinweise .....	455
<b>13</b>	<b>Steuerung diskreter Systeme .....</b>	<b>457</b>
13.1	Steuerungsaufgaben für diskrete Systeme .....	457
13.2	Verknüpfungssteuerungen .....	460
13.3	Ablaufsteuerungen .....	462
13.3.1	Reglergesetz .....	462
13.3.2	Zeitplansteuerungen .....	465
13.4	Speicherprogrammierbare Steuerungen .....	472
	Literaturhinweise .....	474
<b>14</b>	<b>Entwurf diskreter Steuerungen .....</b>	<b>475</b>
14.1	Entwurfsschritte .....	475
14.1.1	Systematischer Steuerungsentwurf .....	476
14.1.2	Heuristische Festlegung des Steuerungsgesetzes .....	477
14.2	Reglerentwurf für Automaten .....	480
14.2.1	Entwurfsproblem .....	480
14.2.2	Reglerentwurf für deterministische Automaten .....	480

14.2.3 Erweiterungen .....	483
14.2.4 Reglerentwurf für nichtdeterministische Automaten .....	487
14.3 Reglerentwurf für Petrinetze .....	488
14.3.1 Entwurf mit Hilfe des Erreichbarkeitsgraphen .....	488
14.3.2 Steuerungsentwurf unter Nutzung von S-Invarianten .....	490
14.4 Verifikation diskreter Steuerungen .....	497
Literaturhinweise .....	500
<b>15 Zustandsbeobachtung diskreter Systeme .....</b>	<b>501</b>
15.1 Beobachtungsaufgabe .....	501
15.2 Beobachtung deterministischer und nichtdeterministischer Automaten .....	502
15.2.1 Beobachtungsalgorithmus für nichtdeterministische Automaten .....	502
15.2.2 Darstellung des Beobachtungsalgorithmus als Automat .....	509
15.2.3 Anwendung des Beobachtungsalgorithmus auf deterministische Automaten .....	511
15.2.4 Konsistenz von E/A-Paaren mit nichtdeterministischen Automaten .....	513
15.3 Beobachtung stochastischer Automaten .....	515
Literaturhinweise .....	523
<b>16 Diagnose diskreter Systeme .....</b>	<b>525</b>
16.1 Diagnoseaufgabe .....	525
16.2 Diagnose nichtdeterministischer Automaten .....	526
16.2.1 Modellierung fehlerbehafteter Systeme .....	526
16.2.2 Detektion konstanter Fehler .....	528
16.2.3 Identifikation konstanter Fehler .....	529
16.2.4 Identifikation zeitabhängiger Fehler .....	536
16.3 Diagnose stochastischer Automaten .....	538
16.3.1 Beschreibung fehlerbehafteter Systeme durch stochastische Automaten .....	538
16.3.2 Grundidee der Diagnose stochastischer Systeme .....	539
16.3.3 Diagnosealgorithmus .....	545
Literaturhinweise .....	552
<b>17 Ausblick: Überwachung und Steuerung hybrider dynamischer Systeme .....</b>	<b>553</b>
17.1 Automatisierung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme .....	553
17.2 Hybride dynamische Systeme .....	555
Literaturhinweise .....	561
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>563</b>
<b>Anhänge</b>	
<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben .....</b>	<b>567</b>
<b>Anhang 2: Fachwörter deutsch – englisch .....</b>	<b>665</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>669</b>



# Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

## Prozessautomatisierung

Aufgaben der Prozessautomatisierung (Abschn. 1.2.1) .....	6
Batchreaktor und Paketlager (Beispiel 2.1) .....	49
Steuerung einer Screening-Anlage (Aufgabe 11.17) .....	406
Überwachung eines automatischen Qualitätskontrollsystems (Aufgabe 16.4) .....	544
<b>• Analyse und Steuerung einer Abfüllanlage</b>	
Steuerung einer Abfüllanlage (Aufgabe 2.5 mit Lösung) .....	79, 576
Blockschaltbild und Kopplungsstruktur (Beispiel 2.4) .....	59
Veränderung der Kopplungsstruktur (Beispiel 2.9) .....	67
Analyse der erweiterten Abfüllanlage (Aufgabe 2.3 mit Lösung) .....	70, 574
<b>• Modellierung und Analyse eines Wärmeübertragers</b>	
Zustandsraummodell eines Wärmeübertragers (Aufgabe 3.7 mit Lösung) .....	114, 590
Kennwertermittlung (Aufgabe 4.4 mit Lösung) .....	152, 594
Stabilitätsanalyse (Aufgabe 6.1 mit Lösung) .....	189, 604
<b>• Steuerung und Diagnose von Rührkesselreaktoren</b>	
Temperatur- und Füllstandsregelung eines Reaktors (Beispiel 1.2) .....	7
Temperaturverhalten eines Rührkesselreaktors (Aufgabe 4.2 mit Lösung) .....	140, 591
Stabilität des Temperaturregelkreises (Aufgabe 6.7 mit Lösung) .....	206, 610
Einstellung der Temperaturregelung (Beispiel 8.1) .....	246
Entwurf eines Beobachters für zwei gekoppelte Behälter (Aufgabe 9.1 mit Lösung) .....	272, 616
Fehlerdiagnose eines Reaktors mit Füllstandsregelung (Aufgabe 10.2 mit Lösung) .....	303, 617
Erprobung des Diagnosealgorithmus aus Aufgabe 10.2 (Aufgabe 10.3) .....	304
Diagnose zweier gekoppelter Reaktoren mit einem ereignisdiskreten Modell (Aufgabe 16.2 mit Lösung) .....	535, 663
<b>• Steuerung und Diagnose von Batchprozessen</b>	
Steuerung eines Batchprozesses (Beispiel 1.3) .....	8
Vergleich von Zeitplansteuerung und Ablaufsteuerung (Beispiel 2.11) .....	75

Kontinuierliches Modell eines Behältersystems (Aufgabe 3.4 mit Lösung) .....	111, 584
Verhalten eines Batchprozesses (Beispiel 12.5) .....	439
Rezeptsteuerung (Beispiel 14.1) .....	478
Wertefolgen und Ereignisse beim Füllen eines Reaktors (Beispiel 11.1) .....	337
Beschreibung eines Batchprozesses durch ein Petrinetz (Aufgabe 11.13 mit Lösung) .....	400, 632
Invarianten des Petrinetzes (Beispiel 12.9) .....	452
Kompositionale Modellbildung eines geregelten Vorratsbehälters (Aufgabe 11.24 mit Lösung) .....	424, 643
Steuerung eines Batchprozesses (Aufgabe 13.4 mit Lösung) .....	471, 651
Diagnose mit ereignisdiskretem Modell (Beispiel 16.1) .....	531
Modellierung eines Batchreaktors für die Fehlerdiagnose (Aufgabe 16.6 mit Lösung) .....	552, 663
Anwendung des Diagnosealgorithmus (Aufgabe 16.1) .....	534
Erweiterung der Diagnose unter Berücksichtigung der Fehlerwahrscheinlichkeit (Beispiel 16.5) .....	550
Darstellung eines Behältersystems als hybrider Automat (Aufgabe 17.1) .....	561
<b>• Diagnose von Servoventilen</b>	
Fehlerdiagnose eines Servoventils (Beispiel 10.4) .....	320
Diagnostizierbarkeitsanalyse (Aufgabe 10.5 mit Lösung) .....	327, 621
<b>• Überwachung von pH-Sensoren</b>	
Überwachung eines pH-Sensors (Beispiel 10.3) .....	308
Intelligenter pH-Sensor (Aufgabe 10.4 mit Lösung) .....	313, 620
<b>• Überwachung und Regelung eines Industrieofens</b>	
Steuerbarkeit eines Industrieofens (Beispiel 5.1) .....	158
Beobachtbarkeit (Beispiel 5.2) .....	166
Strukturelle Analyse (Beispiel 5.3) .....	172
Beobachterentwurf für den Industrieofen (Beispiel 9.2) .....	270
Verhalten des Beobachters bei Störungen (Beispiel 9.3) .....	275
Temperaturregelung des Industrieofens (Aufgabe 9.2) .....	284
<b>Fertigungsautomatisierung</b>	
Transportsysteme in der Schaltkreisfertigung (Beispiel 1.4) .....	11
<b>• Robotersteuerungen</b>	
Grundstruktur von Robotersteuerungen (Abschn. 1.2.2) .....	11
Steuerung eines elastischen Roboters (Beispiel 2.12) .....	78

## • Automatisierung von Fertigungszellen

Hierarchische Steuerung einer Fertigungszelle (Beispiel 1.10) .....	38
Modellierung der Fertigungszelle (Aufgabe 11.7 mit Lösung) .....	366, 627
Zustandsbeobachtung (Aufgabe 15.2 mit Lösung) .....	508, 658
Beschreibung der Zuverlässigkeit einer Werkzeugmaschine (Beispiel 11.10) .....	381
Kompositionale Modellbildung von drei Werkzeugmaschinen (Beispiel 11.14) .....	414
Beschreibung von vier Werkzeugmaschinen durch einen nichtdeterministischen Automaten (Beispiel 11.4) .....	363
Beschreibung durch ein Petrinetz (Beispiel 11.10) .....	397
Invarianten des Petrinetzes (Beispiel 12.8) .....	451
Beschreibung der vier Werkzeugmaschinen für die Materialflusssteuerung (Beispiel 11.11) .....	403
Analyse der vier Werkzeugmaschinen (Aufgabe 12.1) .....	438
Materialflusssteuerung für vier Werkzeugmaschinen (Aufgabe 14.4) .....	499
Zustandsbeobachtung der vier Werkzeugmaschinen (Aufgabe 15.3) .....	512

## • Modellierung einer Stanze

Ereignisdiskrete Beschreibung einer Stanze (Beispiel 11.2) .....	348
Modellerweiterung zur Berücksichtigung von Fehlermöglichkeiten (Beispiel 11.3) .....	360
Modellerweiterung zur Erfassung der Fehlerwahrscheinlichkeiten (Beispiel 11.7) .....	380
Verhaltensanalyse (Beispiel 12.6) .....	442
Analyse der gesteuerten Stanze (Aufgabe 14.3) .....	499

## Automatisierung von Kraftfahrzeugen

Automatische Automobile (Aufgabe 1.1) .....	6
Regelungsaufgaben bei Fahrzeugen (Abschn. 1.2.5) .....	14
Autofahren als Problem der Mehrebenensteuerung (Aufgabe 1.5 mit Lösung) .....	39, 569
Ereignisdiskrete Beschreibung des Autofahrens (Aufgabe 11.3 mit Lösung) .....	355, 625
Komfortverbesserung in Kraftfahrzeugen (Aufgabe 13.1) .....	469
Aktive Federung (Beispiel 1.9) .....	22

## • Modellierung der Längsbewegung

Blockschaltbild des Antriebsstrangs eines Kraftfahrzeugs (Aufgabe 2.1 mit Lösung) .....	61, 570
Längsbewegung eines Fahrzeugs (Beispiel 4.1) .....	129
Modellunbestimmtheiten und Störungen der Fahrzeugbewegung (Beispiel 7.5) .....	231

## • Antiblockiersystem

Bremsassistent und Antiblockiersystem (Beispiel 1.8) .....	15
Modell für den Abbremsvorgang eines Fahrzeugs (Beispiel 3.9) .....	107

Linearisierte Beschreibung des Abbremsvorgangs (Aufgabe 3.6 mit Lösung) .....	114, 587
Simulation des Abbremsvorgangs (Beispiel 4.2) .....	147
Strukturelle Analyse des Modells für den Abbremsvorgang (Aufgabe 5.6 mit Lösung) ....	178, 602
Stabilitätsanalyse des Schlupfverhaltens (Aufgabe 6.4 mit Lösung) .....	194, 606
Robustheit eines Antiblockiersystems (Aufgabe 6.8 mit Lösung) .....	207, 611
Realisierung eines Antiblockiersystems (Beispiel 7.7) .....	238
Diskrete Beschreibung eines Antiblockiersystems (Aufgabe 11.23) .....	423
<b>• Onboard-Diagnose</b>	
Diagnose von Kraftfahrzeugen (Beispiel 10.1) .....	288
Diagnose eines Motorkühlsystems (Beispiel 16.2) .....	542
Einklemmschutz für einen Fensterheber (Beispiel 10.2) .....	299
Strukturelle Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Fensterhebers (Aufgabe 5.7) .....	179
<b>• Motorsteuerung</b>	
Aufgaben der Motorsteuerung (Beispiel 1.7) .....	14
Blockschaltbild einer Motorsteuerung (Aufgabe 2.2 mit Lösung) .....	62, 574
Beschreibung der Arbeitsweise eines Verbrennungsmotors (Beispiel 11.16) .....	406
Ereignisdiskrete Beschreibung des Startvorgangs eines Fahrzeugs (Aufgabe 11.6) .....	365
<b>• Modellierung eines Regensors</b>	
Beschreibung eines Regensors durch einen nichtdeterministischen Automaten (Beispiel 11.5) .....	368
Modellerweiterung zum stochastischen Automaten (Aufgabe 11.12 mit Lösung) .....	385, 631
Verhaltensanalyse (Aufgabe 12.2 mit Lösung) .....	446, 645
<b>• Autarke Unterwasserfahrzeuge</b>	
Nichtlineares Zustandsraummodell eines Unterwasserfahrzeugs (Beispiel 3.8) .....	103
Linearisierung des Modells (Aufgabe 3.5 mit Lösung) .....	114, 586
Stabilität des Unterwasserfahrzeugs (Aufgabe 6.3 mit Lösung) .....	194, 605
<b>Verkehrsleittechnik</b>	
Steuerung einer Schiffsschleuse (Aufgabe 14.2 mit Lösung) .....	496, 655
<b>• Ampelsteuerung</b>	
Steuerung der Ampel an einer Garageneinfahrt (Beispiel 13.1) .....	461
Steuerung einer „Bremsampel“ (Aufgabe 13.3 mit Lösung) .....	470, 648

- **Automatisierung von U-Bahn, Eisenbahn und Flugzeug**

Aufgaben der Flugregelung (Abschn. 1.2.6) .....	16
Steuerung der vollautomatischen U-Bahn in Lille (Aufgabe 13.5) .....	471
Diskrete und kontinuierliche Elemente der U-Bahn-Steuerung (Beispiel 17.1) .....	555
Beschreibung eines Streckenabschnitts der Eisenbahn (Aufgabe 11.15 mit Lösung) .....	404, 636

## Automatisierungsaufgaben in der Energietechnik

- **Überwachung von Elektroenergienetzen**

Automatisierungsaufgaben in Energiesystemen (Abschn. 1.2.4) .....	13
Überwachung und Steuerung von Elektroenergienetzen (Beispiel 1.6) .....	13
Kopplungsanalyse eines Elektroenergieversorgungsnetzes (Aufgabe 2.4 mit Lösung) .....	70, 575

- **Modellierung und Analyse von Gleichstrommotoren**

Aufstellung der Differentialgleichung für einen Gleichstrommotor (Beispiel 3.1) .....	86
Zustandsraummodell (Beispiel 3.2) .....	90
Zustandstrajektorie (Beispiel 3.3) .....	94
Normierung des Zustandsraummodells (Beispiel 3.4) .....	96
Signalflussgraph (Beispiel 3.5) .....	98
Statisches Verhalten (Beispiel 3.6) .....	100
Verhalten bei Störungen und Modellunbestimmtheiten (Aufgabe 7.3 mit Lösung) .....	234, 613
Zustandsbeobachtung (Aufgabe 9.3) .....	284
Blockschaltbild eines drehzahleregelten Gleichstrommotors (Beispiel 2.3) .....	58
Hierarchische Modellbildung des drehzahleregelten Motors (Beispiel 2.7) .....	65
Zustandsraummodell des geregelten Motors (Beispiel 7.1) .....	215
Bleibende Regelabweichung beim drehzahleregelten Gleichstrommotor (Beispiel 7.3) ..	222
Verschlechterung der Regelgüte durch Messverzögerungen (Beispiel 7.4) .....	228

## Modellierung und Regelung mechanischer Systeme

Stabilitätsanalyse eines Pendels mit Hilfe des linearisierten Modells (Beispiel 6.2) .....	192
Fehlerdiagnose eines Pendels (Aufgabe 10.1) .....	303

- **Invertiertes Pendel**

Aufrichten eines invertierten Pendels (Beispiel 2.10) .....	73
Zustandsraummodell (Aufgabe 3.2 mit Lösung) .....	102, 582
Stabilitätsanalyse (Aufgabe 6.2) .....	193
Stabilitätsanalyse des geregelten Pendels (Aufgabe 6.6 mit Lösung) .....	206, 609

Robuste Stabilisierung des invertierten Pendels (Aufgabe 6.9) .....	208
Stabilisierung des invertierten Pendels (Beispiel 7.6) .....	236
<b>• Radioteleskop</b>	
Zustandsraummodell (Aufgabe 3.3 mit Lösung) .....	110, 583
Regelung (Beispiel 7.2) .....	218
<b>Automatisierung von Kommunikationsnetzen</b>	
Beschreibung einer Rechnerkommunikation (Beispiel 11.13) .....	411
Beobachtbarkeit eines Kommunikationssatelliten (Aufgabe 5.8 mit Lösung) .....	180, 603
<b>Gebäudeautomatisierung</b>	
Aufgaben der Gebäudeautomatisierung (Beispiel 1.2.3) .....	12
Wirkungsweise einer Raumtemperaturregelung (Beispiel 1.5) .....	12
Blockschaltbild einer Raumtemperaturregelung (Aufgabe 2.6 mit Lösung) .....	79, 577
Steuerung einer Sicherheitsschleuse (Beispiel 14.3) .....	493
<b>• Steuerung und Diagnose einer Raumbelichtung</b>	
Beschreibung der Funktion einer Raumbelichtung durch einen Automaten (Aufgabe 11.8 mit Lösung) .....	372, 628
Modellerweiterung zum stochastischen Automaten (Aufgabe 11.11 mit Lösung) .....	385, 630
Diagnose einer Raumbelichtung (Aufgabe 16.3) .....	536
Steuerung einer Treppenhausbeleuchtung (Aufgabe 13.2 mit Lösung) .....	470, 647
<b>• Steuerung von Rolltreppen</b>	
Modellierung einer Rolltreppe (Aufgabe 11.18 mit Lösung) .....	412, 637
Beschreibung der gesteuerten Rolltreppe durch einen Rückführautomaten (Beispiel 11.15)	418
Regelung der Rolltreppe (Beispiel 13.3) .....	466
<b>• Modellierung und Steuerung eines Personenaufzugs</b>	
Beschreibung eines Personenaufzugs durch gekoppelte Automaten und ein Petrinetz (Aufgabe 11.22 mit Lösung) .....	422, 640
Steuerung eines Personenaufzugs (Beispiel 14.2) .....	483
Verhinderung verbotener Zustände (Aufgabe 14.1 mit Lösung) .....	496, 653

**Automatisierungstechnik im täglichen Leben**

Automatisierungstechnik im täglichen Leben (Aufgabe 1.2 mit Lösung) .....	24, 567
Automatiktoaster und andere automatische Geräte (Aufgabe 1.3 mit Lösung) .....	24, 568
Waschautomat (Beispiel 1.1) .....	5
Beschreibung eines Kartentelefons (Aufgabe 11.9) .....	372
Steuerung einer Digitalkamera (Aufgabe 11.14 mit Lösung) .....	404, 633
Modell eines Getränkeautomaten (Aufgabe 11.1 mit Lösung) .....	354, 624
Steuerung eines Getränkeautomaten (Beispiel 13.2) .....	462
Beschreibung eines Bestellvorgangs (Aufgabe 11.4 mit Lösung) .....	355, 626
Analyse des Elbehochwassers (Beispiel 2.5) .....	59
Rezeptsteuerung in einer Bäckerei (Aufgabe 1.4) .....	25
Automatentheoretische Beschreibung der Fußball-Weltmeisterschaft (Aufgabe 11.5) .....	355