

# 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> .....	1
1.1 Ziele der Automatisierungstechnik .....	1
1.2 Anwendungsbeispiele .....	4
1.2.1 Prozessautomatisierung .....	4
1.2.2 Fertigungsautomatisierung .....	9
1.2.3 Gebäudeautomatisierung .....	10
1.2.4 Überwachung und Steuerung von Energiesystemen .....	11
1.2.5 Automatisierungstechnik in Fahrzeugen .....	12
1.2.6 Überwachung und Steuerung des Flugverkehrs .....	14
1.2.7 Automatisierungsaufgaben in der Informations- und Kommunikationstechnik .....	15
1.2.8 Zusammenfassung: Notwendigkeit der Automatisierung technischer Systeme .....	16
1.3 Grundstruktur automatisierter Systeme .....	18
1.3.1 Beziehungen zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem zu automatisierenden Prozess .....	18
1.3.2 Das Rückkopplungsprinzip .....	19
1.3.3 Die Rolle des Menschen in automatisierten Systemen .....	20
1.3.4 Spezielle Klassen automatisierter Systeme .....	21
1.4 Automatisierungsaufgaben .....	23
1.4.1 Modellbildung dynamischer Systeme .....	23
1.4.2 Vorhersage des Systemverhaltens .....	26
1.4.3 Planung von Steuereingriffen .....	27
1.4.4 Zustandsbeobachtung .....	28
1.4.5 Prozessdiagnose .....	28
1.4.6 Regelung und Steuerung .....	29
1.4.7 Kombination von Automatisierungsfunktionen .....	32

1.4.8	Automatisierungshierarchie .....	34
1.5	Realisierung von Automatisierungseinrichtungen .....	37
1.5.1	Methoden und Geräte .....	37
1.5.2	Lösungsweg für Automatisierungsaufgaben .....	39
1.5.3	Beziehungen zwischen der Automatisierungstechnik und angrenzenden Fachdisziplinen .....	40
	Literaturhinweise .....	41
<b>2</b>	<b>Grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme .....</b>	<b>43</b>
2.1	Grundbegriffe der Systemtheorie .....	43
2.1.1	Signal, Prozess, System .....	43
2.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale und Systeme .....	45
2.1.3	Statische und dynamische Systeme .....	48
2.1.4	Autonome und gesteuerte Systeme .....	50
2.1.5	Gemeinsamkeiten und Unterschiede kontinuierlicher und diskreter Systeme .....	50
2.2	Blockschaltbild und Signalflussgraf .....	52
2.2.1	Struktur dynamischer Systeme .....	52
2.2.2	Blockschaltbild .....	53
2.2.3	Signalflussgraf .....	60
2.3	Dekomposition und Aggregation von Systemen .....	61
2.4	Kopplungsanalyse .....	63
2.5	Steuerungen in der offenen Wirkungskette und im geschlossenen Kreis .....	69
	Literaturhinweise .....	77

## Teil 2: Automatisierung kontinuierlicher Systeme

<b>3</b>	<b>Beschreibung kontinuierlicher Systeme .....</b>	<b>79</b>
3.1	Modellbildungsaufgabe .....	79
3.2	Systembeschreibung durch lineare Differenzialgleichungen .....	80
3.3	Zustandsraummodell linearer Systeme .....	85
3.3.1	Zustandsgleichung und Ausgabegleichung .....	85
3.3.2	Zustandsbegriff .....	88
3.3.3	Normierung der Signale und Parameter .....	90
3.3.4	Blockschaltbild und Signalflussgraf des Zustandsraummodells .....	93
3.3.5	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen .....	94
3.3.6	Gleichgewichtszustand linearer Systeme .....	95
3.4	Zustandsraummodell nichtlinearer Systeme .....	97
3.5	Linearisierung .....	108
3.6	Kompositionale Modellbildung kontinuierlicher Systeme .....	112
	Literaturhinweise .....	117

<b>4</b>	<b>Verhalten kontinuierlicher Systeme</b>	119
4.1	Vorhersage des Systemverhaltens	119
4.2	Verhalten linearer Systeme	120
4.2.1	Lösung der Zustandsgleichung	120
4.2.2	Berechnung der Ausgangsgröße	123
4.2.3	Anmerkungen zum Zustandsbegriff	128
4.2.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Form	132
4.2.5	Übergangsfunktion	137
4.2.6	Berechnung der Matrixexponentialfunktion	139
4.3	Verhalten nichtlinearer Systeme	140
4.3.1	Lösung der nichtlinearen Modellgleichungen	140
4.3.2	Rechnergestützte Analyse nichtlinearer Systeme	142
4.4	Kennwertermittlung	146
	Literaturhinweise	149
<b>5</b>	<b>Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit</b>	151
5.1	Definition der Steuerbarkeit und der Beobachtbarkeit	151
5.2	Steuerbarkeit linearer Systeme	153
5.2.1	Steuerbarkeitskriterium	153
5.2.2	Eigenschaften vollständig steuerbarer Systeme	154
5.3	Beobachtbarkeit linearer Systeme	159
5.3.1	Beobachtbarkeitskriterium	159
5.3.2	Berechnung des Anfangszustands aus $n$ Messwerten	161
5.3.3	Bestimmung des Anfangszustands mit Hilfe der gramscen Beobachtbarkeitsmatrix	162
5.4	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	165
5.4.1	Strukturgraf	165
5.4.2	Definition und Kriterien für die strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	166
5.4.3	Strukturelle Analyse nichtlinearer Systeme	171
5.5	Systemzerlegung entsprechend den Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitseigenschaften	172
	Literaturhinweise	176
<b>6</b>	<b>Stabilität</b>	177
6.1	Stabilitätsdefinition	177
6.2	Stabilitätsanalyse linearer Systeme	180
6.2.1	Stabilitätsanalyse anhand der Eigenwerte der Systemmatrix	180
6.2.2	Hurwitzkriterium	183
6.3	Stabilitätsanalyse nichtlinearer Systeme	186
6.3.1	Lösungswege	186
6.3.2	Stabilitätsprüfung mit dem linearisierten Modell	188
6.3.3	Direkte Methode von Ljapunow	191
6.3.4	Anwendung der Direkten Methode auf lineare Systeme	196
6.4	Stabilität von Regelkreisen	199

6.4.1	Stabilität der Regelstrecke und des Regelkreises	199
6.4.2	Robuste Stabilität	202
6.5	Ausblick: Weitere Verfahren für die Stabilitätsprüfung	204
	Literaturhinweise	205
<b>7</b>	<b>Einschleifige Regelkreise</b>	<b>207</b>
7.1	Regelungsaufgabe für kontinuierliche Systeme	207
7.2	Modell des Standardregelkreises	210
7.2.1	Linearer Regelkreis	210
7.2.2	Nichtlinearer Regelkreis	213
7.3	Wichtige Eigenschaften von Regelkreisen	215
7.3.1	Störkompensation und Sollwertfolge	215
7.3.2	Erreichbare Regelgüte	223
7.3.3	Robustheit	226
7.4	Reglertypen	230
7.4.1	PID-Regler	230
7.4.2	Weitere Reglerkomponenten	233
	Literaturhinweise	235
<b>8</b>	<b>Einstellregeln für PID-Regler</b>	<b>237</b>
8.1	Entwurfsschritte	237
8.2	Einstellregeln für PID-Regler	239
8.3	Robuste PI-Regelung	246
8.3.1	Gegenkopplungsbedingung für I-Regler	246
8.3.2	Reglereinstellung	249
8.3.3	Erweiterung auf PI-Regler	251
8.4	Ausblick: Verfahren für den Reglerentwurf	256
	Literaturhinweise	257
<b>9</b>	<b>Zustandsbeobachtung kontinuierlicher Systeme</b>	<b>259</b>
9.1	Beobachtungsaufgabe	259
9.2	Luenbergerbeobachter	261
9.2.1	Grundidee	261
9.2.2	Beobachterstruktur	263
9.2.3	Wahl der Beobachterrückführung	264
9.2.4	Verhalten des Beobachters bei Störungen und Modellunsicherheiten	270
9.3	Beobachter für nichtlineare Systeme	277
9.4	Anwendungen der Zustandsbeobachtung	278
9.4.1	Beobachtung eines Teilsystems	278
9.4.2	Online-Vorhersage des Systemverhaltens	279
9.4.3	Regelung unter Verwendung einer beobachteten Regelgröße	281
	Literaturhinweise	283

<b>10 Diagnose kontinuierlicher Systeme</b>	285
10.1 Diagnoseaufgabe und Lösungswege	285
10.1.1 Diagnoseaufgabe	285
10.1.2 Diagnoseschritte	287
10.1.3 Signalbasierte und modellbasierte Diagnose	288
10.1.4 Modelle des fehlerfreien und des fehlerhaften Systems	290
10.1.5 Diagnose mit statischen und dynamischen Modellen	292
10.1.6 Prinzip der konsistenzbasierten Diagnose	293
10.2 Fehlererkennung mit einem Zustandsbeobachter	295
10.3 Sensorüberwachung	303
10.3.1 Aufgabenstellung	303
10.3.2 Fehlerlokalisierung mit dedizierten Beobachtern	304
10.3.3 Erweiterung	313
10.4 Fehleridentifikation	313
10.4.1 Fehleridentifikation mit einer Beobachterbank	313
10.4.2 Fehleridentifikation unter Verwendung von Fehlermodellen	315
10.4.3 Entwurf beobachtergestützter Diagnosesysteme	317
10.5 Ausblick: Diagnose und fehlertolerante Steuerung	325
Literaturhinweise	326

### Teil 3: Automatisierung ereignisdiskreter Systeme

<b>11 Beschreibung diskreter Systeme</b>	329
11.1 Modellbildungsaufgabe	329
11.1.1 Diskrete Signale und Ereignisse	329
11.1.2 Modellbildungsziel und Modellbildungsschritte	336
11.2 Deterministische Automaten	339
11.2.1 Autonome deterministische Automaten	339
11.2.2 Deterministische Automaten mit Eingang und Ausgang	345
11.3 Nichtdeterministische Automaten	351
11.3.1 Deterministische und nichtdeterministische Systeme	351
11.3.2 Autonome nichtdeterministische Automaten	353
11.3.3 Nichtdeterministische Automaten mit Eingang und Ausgang	363
11.4 Stochastische Automaten	368
11.4.1 Stochastische Prozesse	368
11.4.2 Autonome stochastische Automaten	372
11.4.3 Stochastische Automaten mit Eingang und Ausgang	378
11.4.4 Markoveigenschaft dynamischer Systeme	381
11.5 Petrinetze	384
11.5.1 Autonome Petrinetze	384
11.5.2 Petrinetze mit Eingang und Ausgang	397
11.5.3 Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten	400

11.6	Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme .....	403
11.6.1	Modellbildungsaufgabe .....	403
11.6.2	Synchronisation von Automaten .....	404
11.6.3	Reihenschaltung .....	408
11.6.4	Rückführautomat .....	411
	Literaturhinweise .....	420
<b>12</b>	<b>Verhalten diskreter Systeme .....</b>	<b>423</b>
12.1	Vorhersage des Systemverhaltens .....	423
12.2	Verhalten deterministischer Automaten .....	424
12.2.1	Berechnung der Zustands- und Ausgabefolge .....	424
12.2.2	Erreichbarkeitsanalyse des Automatengraphen .....	425
12.2.3	Strukturelle Analyse deterministischer Automaten .....	427
12.2.4	Steuerbarkeit deterministischer Automaten .....	429
12.3	Verhalten nichtdeterministischer Automaten .....	430
12.3.1	Berechnung der Zustands- und Ausgabefolgen .....	430
12.3.2	Strukturelle Analyse nichtdeterministischer Automaten .....	433
12.3.3	Steuerbarkeit nichtdeterministischer Automaten .....	434
12.4	Verhalten stochastischer Automaten .....	437
12.4.1	Berechnung der Zustandsfolgen autonomer stochastischer Automaten .....	437
12.4.2	Strukturelle Analyse stochastischer Automaten .....	440
12.4.3	Erweiterung auf Automaten mit Eingang und Ausgang .....	440
12.5	Verhalten von Petrinetzen .....	442
12.5.1	Berechnung der Markierungsfolgen .....	442
12.5.2	Strukturelle Analyse von Petrinetzen .....	443
12.5.3	Invarianten .....	444
	Literaturhinweise .....	451
<b>13</b>	<b>Steuerung diskreter Systeme .....</b>	<b>453</b>
13.1	Steuerungsaufgaben für diskrete Systeme .....	453
13.2	Verknüpfungssteuerungen .....	456
13.3	Ablaufsteuerungen .....	458
13.3.1	Reglergesetz .....	458
13.3.2	Zeitplansteuerungen .....	461
13.4	Speicherprogrammierbare Steuerungen .....	468
	Literaturhinweise .....	470
<b>14</b>	<b>Entwurf diskreter Steuerungen .....</b>	<b>471</b>
14.1	Entwurfsschritte .....	471
14.1.1	Systematischer Steuerungsentwurf .....	472
14.1.2	Heuristische Festlegung des Steuerungsgesetzes .....	473
14.2	Reglerentwurf für Automaten .....	476
14.2.1	Entwurfsproblem .....	476
14.2.2	Reglerentwurf für deterministische Automaten .....	476
14.2.3	Erweiterungen .....	479

14.2.4	Reglerentwurf für nichtdeterministische Automaten	483
14.3	Steuerungsentwurf für Petrinetze	484
14.3.1	Entwurf mit Hilfe des Erreichbarkeitsgraphen	484
14.3.2	Steuerungsentwurf unter Nutzung von S-Invarianten	486
14.4	Verifikation diskreter Steuerungen	493
	Literaturhinweise	495
<b>15</b>	<b>Zustandsbeobachtung diskreter Systeme</b>	<b>497</b>
15.1	Beobachtungsaufgabe	497
15.2	Beobachtung deterministischer und nichtdeterministischer Automaten	498
15.2.1	Beobachtungsalgorithmus für nichtdeterministische Automaten	498
15.2.2	Darstellung des Beobachtungsalgorithmus als Automat	504
15.2.3	Anwendung des Beobachtungsalgorithmus auf deterministische Automaten	506
15.2.4	Konsistenz von E/A-Paaren mit nichtdeterministischen Automaten	508
15.3	Beobachtung stochastischer Automaten	511
	Literaturhinweise	519
<b>16</b>	<b>Diagnose diskreter Systeme</b>	<b>521</b>
16.1	Diagnoseaufgabe	521
16.2	Diagnose nichtdeterministischer Automaten	522
16.2.1	Modellierung fehlerbehafteter Systeme	522
16.2.2	Detektion konstanter Fehler	524
16.2.3	Identifikation konstanter Fehler	525
16.2.4	Identifikation zeitabhängiger Fehler	532
16.3	Diagnose stochastischer Automaten	533
16.3.1	Beschreibung fehlerbehafteter Systeme durch stochastische Automaten	533
16.3.2	Grundidee der Diagnose stochastischer Systeme	534
16.3.3	Diagnosealgorithmus	540
	Literaturhinweise	548
<b>17</b>	<b>Ausblick: Überwachung und Steuerung hybrider dynamischer Systeme</b>	<b>549</b>
17.1	Automatisierung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme	549
17.2	Hybride dynamische Systeme	551
	Literaturhinweise	556
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>557</b>

## Anhänge

<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben</b>	<b>561</b>
<b>Anhang 2: Fachwörter deutsch – englisch</b>	<b>657</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>661</b>