

# 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 .....	29
1.4.6 Regelung und Steuerung .....	30

---

1.4.7	Kombination von Automatisierungsfunktionen . . . . .	33
1.4.8	Automatisierungshierarchie . . . . .	33
1.5	Realisierung von Automatisierungseinrichtungen . . . . .	38
1.5.1	Methoden und Geräte . . . . .	38
1.5.2	Lösungsweg für Automatisierungsaufgaben . . . . .	39
1.5.3	Beziehungen zwischen der Automatisierungstechnik und angrenzenden Fachdisziplinen . . . . .	40
	Literaturhinweise . . . . .	41
2	<b>Grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme . . . . .</b>	43
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 Signalfussgraph . . . . .	52
2.2.1	Struktur dynamischer Systeme . . . . .	52
2.2.2	Blockschaltbild . . . . .	53
2.2.3	Signalfussgraph . . . . .	60
2.3	Dekomposition und Aggregation von Systemen . . . . .	61
2.4	Kopplungsanalyse . . . . .	63
2.5	Steuerungen in der offenen Wirkungskette und im geschlossenen Kreis . . . . .	68
	Literaturhinweise . . . . .	77

## Teil 2: Automatisierung kontinuierlicher Systeme

3	<b>Beschreibung kontinuierlicher Systeme . . . . .</b>	79
3.1	Modellbildungsaufgabe . . . . .	79
3.2	Systembeschreibung durch lineare Differentialgleichungen . . . . .	80
3.3	Zustandsraummodell linearer Systeme . . . . .	86
3.3.1	Zustandsgleichung und Ausgabegleichung . . . . .	86
3.3.2	Zustandsbegriff . . . . .	89
3.3.3	Normierung der Signale und Parameter . . . . .	91
3.3.4	Blockschaltbild und Signalfussgraph des Zustandsraummodells . . . . .	93
3.3.5	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen . . . . .	95
3.3.6	Gleichgewichtszustand linearer Systeme . . . . .	96
3.4	Zustandsraummodell nichtlinearer Systeme . . . . .	98
3.5	Linearisierung . . . . .	108
3.6	Kompositionale Modellbildung kontinuierlicher Systeme . . . . .	113
	Literaturhinweise . . . . .	118

---

<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	129
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	147
	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	160
5.3.3	Bestimmung des Anfangszustands mit Hilfe der grammischen Beobachtbarkeitsmatrix	162
5.4	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	164
5.4.1	Strukturgraph	164
5.4.2	Definition und Kriterien für die strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	165
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 . . . . .	203
6.5	Ausblick: Weitere Verfahren für die Stabilitätsprüfung . . . . .	204
	Literaturhinweise . . . . .	205
<b>7</b>	<b>Einschleif ge 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 . . . . .	224
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 von ZIEGLER und NICHOLS . . . . .	239
8.3	Robuste PI-Regelung . . . . .	247
8.3.1	Gegenkopplungsbedingung für I-Regler . . . . .	247
8.3.2	Reglereinstellung . . . . .	250
8.3.3	Erweiterung auf PI-Regler . . . . .	252
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 . . . . .	265
9.2.4	Verhalten des Beobachters bei Störungen und Modellunsicherheiten . . . . .	271
9.3	Beobachter für nichtlineare Systeme . . . . .	276
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 . . . . .	282

---

<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 . . . . .	303
10.3.3 Erweiterung . . . . .	312
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 . . . . .	327

### 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 . . . . .	340
11.2.1 Autonome deterministische Automaten . . . . .	340
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 . . . . .	369
11.4.1 Stochastische Prozesse . . . . .	369
11.4.2 Autonome stochastische Automaten . . . . .	372
11.4.3 Stochastische Automaten mit Eingang und Ausgang . . . . .	378
11.4.4 Markoveigenschaft dynamischer Systeme . . . . .	382
11.5 Petrinetze . . . . .	385
11.5.1 Autonome Petrinetze . . . . .	385
11.5.2 Petrinetze mit Eingang und Ausgang . . . . .	397
11.5.3 Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten . . . . .	401

---

11.6	Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme	403
11.6.1	Modellbildungsaufgabe	403
11.6.2	Synchronisation von Automaten	404
11.6.3	Reihenschaltung	409
11.6.4	Rückführautomat	413
	Literaturhinweise	421
<b>12</b>	<b>Verhalten diskreter Systeme</b>	423
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>	453
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>	471
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	Reglerentwurf 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 . . . . .	505
15.2.3	Anwendung des Beobachtungsalgorithmus auf deterministische Automaten . . . . .	507
15.2.4	Konsistenz von E/A-Paaren mit nichtdeterministischen Automaten . . . . .	509
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 . . . . .	526
16.2.4	Identifikation zeitabhängiger Fehler . . . . .	533
16.3	Diagnose stochastischer Automaten . . . . .	534
16.3.1	Beschreibung fehlerbehafteter Systeme durch stochastische Automaten	534
16.3.2	Grundidee der Diagnose stochastischer Systeme . . . . .	535
16.3.3	Diagnosealgorithmus . . . . .	541
	Literaturhinweise . . . . .	549
<b>17</b>	<b>Ausblick: Überwachung und Steuerung hybrider dynamischer Systeme . . . . .</b>	<b>551</b>
17.1	Automatisierung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme . . . . .	551
17.2	Hybride dynamische Systeme . . . . .	553
	Literaturhinweise . . . . .	559
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>561</b>
	<b>Anhänge</b>	
	<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben . . . . .</b>	<b>565</b>
	<b>Anhang 2: Fachwörter deutsch – englisch . . . . .</b>	<b>663</b>
	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>667</b>