

# Inhaltsverzeichnis

**Verzeichnis der Anwendungsbeispiele** ..... xvii

**Hinweise zum Gebrauch des Buches** ..... xxv

## Teil 1: Einführung

**1 Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik** ..... 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
<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 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

<b>3</b>	<b>Beschreibung kontinuierlicher Systeme .....</b>	<b>79</b>
3.1	Modellbildungsaufgabe .....	79
3.2	Systembeschreibung durch lineare Differentialgleichungen .....	80
3.3	Zustandsraummodell linearer Systeme .....	86
3.3.1	Zustandsgleichung und Ausgangsgleichung .....	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

- 4 Verhalten kontinuierlicher Systeme ..... 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
- 5 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit ..... 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 gramschen 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
- 6 Stabilität ..... 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

**10 Diagnose kontinuierlicher Systeme** ..... 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**

**11 Beschreibung diskreter Systeme** ..... 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>	<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	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>

## Anhänge

<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>