

# Inhaltsverzeichnis

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

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

## Teil 1: Einführung

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik</b> .....  | <b>3</b> |
| 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<br>Kommunikationstechnik .....                   | 17       |
| 1.2.8    | Zusammenfassung: Notwendigkeit der Automatisierung technischer<br>Systeme .....                    | 18       |
| 1.3      | Grundstruktur automatisierter Systeme .....  | 19       |
| 1.3.1    | Beziehungen zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem zu<br>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<br>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<br>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 Ausgangsgleichung . . . . .                      | 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<br>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<br>strukturelle Beobachtbarkeit ..... | 170 |
| 5.4.3    | Strukturelle Analyse nichtlinearer Systeme .....  | 175 |
| 5.5      | Systemzerlegung entsprechend den Steuerbarkeits- und<br>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</b> | <b>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</b> | <b>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</b> | <b>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> |

## Anhänge

|  |            |
|--|------------|
| <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> |