

# Inhaltsverzeichnis

|   |      |
|---|------|
| <b>Verzeichnis der Anwendungsbeispiele</b> .....                                    | xi   |
| <b>Hinweise zum Gebrauch des Buches</b> .....                                       | xvii |
| <b>1 Einführung in die Modellierung und Analyse ereignisdiskreter Systeme</b> ..... | 1    |
| 1.1 Ereignisdiskrete Systeme .....  | 1    |
| 1.2 Anwendungsgebiete der diskreten Systemtheorie .....                             | 5    |
| 1.2.1 Verarbeitung formaler und natürlicher Sprachen .....                          | 5    |
| 1.2.2 Beschreibung eingebetteter Systeme .....                                      | 7    |
| 1.2.3 Entwurf digitaler Schaltungen und Schaltkreise .....                          | 8    |
| 1.2.4 Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen .....                         | 9    |
| 1.2.5 Automatisierung diskreter Prozesse .....                                      | 10   |
| 1.2.6 Modellierung und Analyse von Kommunikationsnetzen .....                       | 14   |
| 1.2.7 Analyse von Wartesystemen .....   | 16   |
| 1.2.8 Zusammenfassung: Charakteristika ereignisdiskreter Systeme .....              | 18   |
| 1.3 Überblick über die Modellformen und Analysemethoden .....                       | 19   |
| Literaturhinweise .....   | 23   |
| <b>2 Diskrete Signale und Systeme</b> .....   | 25   |
| 2.1 Grundbegriffe der Systemtheorie .....   | 25   |
| 2.2 Blockschaltbild .....   | 28   |
| 2.2.1 Elemente des Blockschaltbildes .....  | 28   |
| 2.2.2 Kompositionale Modellbildung .....  | 30   |
| 2.2.3 Hierarchische Modellbildung .....   | 32   |
| 2.3 Diskrete Signale .....  | 33   |
| 2.3.1 Klassifikation von Signalen .....   | 33   |
| 2.3.2 Diskrete Signale und Ereignisse .....   | 35   |
| 2.3.3 Logische und zeitbewertete Werte- und Ereignisfolgen .....                    | 39   |
| 2.3.4 Vektorielle Eingangs- und Ausgangssignale .....                               | 40   |
| 2.4 Diskrete Systeme .....  | 42   |
| 2.4.1 Grundidee der ereignisdiskreten Modellbildung .....                           | 42   |
| 2.4.2 Zustandsraumdarstellung .....   | 44   |
| 2.5 Eigenschaften diskreter Systeme .....   | 47   |
| 2.5.1 Asynchrone und getaktete Arbeitsweise .....                                   | 47   |
| 2.5.2 Kommunikation und Synchronisation .....                                       | 50   |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.5.3    | Kausalität .....   | 51        |
| 2.5.4    | Nichtdeterminismus .....   | 51        |
| 2.5.5    | Komplexität .....  | 54        |
| 2.6      | Unterschiede und Gemeinsamkeiten diskreter und kontinuierlicher Systeme ..           | 55        |
|          | Literaturhinweise .....  | 57        |
| <b>3</b> | <b>Deterministische Automaten .....</b>  | <b>59</b> |
| 3.1      | Autonome deterministische Automaten .....  | 59        |
| 3.1.1    | Definition .....   | 59        |
| 3.1.2    | Automatengraf .....  | 62        |
| 3.1.3    | Matrixdarstellung .....  | 63        |
| 3.1.4    | Verhalten .....  | 65        |
| 3.1.5    | Weitere Eigenschaften .....  | 67        |
| 3.1.6    | Zustand deterministischer Automaten .....  | 69        |
| 3.2      | Standardautomaten .....  | 72        |
| 3.2.1    | Definition .....   | 72        |
| 3.2.2    | Verhalten .....  | 78        |
| 3.2.3    | Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Standardautomaten ....                  | 80        |
| 3.3      | Deterministische Automaten und reguläre Sprachen .....                               | 85        |
| 3.3.1    | Automaten als Akzeptoren und Sprachgeneratoren .....                                 | 85        |
| 3.3.2    | Formale Sprachen .....   | 87        |
| 3.3.3    | Verallgemeinerte Zustandsübergangsfunktion .....                                     | 89        |
| 3.3.4    | Sprache deterministischer Automaten .....  | 91        |
| 3.4      | Deterministische E/A-Automaten .....   | 95        |
| 3.4.1    | Definition .....   | 95        |
| 3.4.2    | Verhalten .....  | 102       |
| 3.4.3    | Automatenabbildung .....   | 104       |
| 3.4.4    | Mealy-Automat und Moore-Automat .....  | 106       |
| 3.4.5    | Weitere Eigenschaften .....  | 109       |
| 3.4.6    | Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch deterministische<br>E/A-Automaten ..... | 114       |
| 3.5      | Analyse deterministischer Automaten .....  | 115       |
| 3.5.1    | Erreichbarkeitsanalyse .....   | 115       |
| 3.5.2    | Strukturelle Analyse deterministischer Automaten .....                               | 120       |
| 3.5.3    | Verifikation .....   | 124       |
| 3.6      | Beziehungen zwischen Automaten .....   | 125       |
| 3.6.1    | Äquivalenz von Standardautomaten .....   | 125       |
| 3.6.2    | Homomorphismus und Isomorphismus .....   | 126       |
| 3.6.3    | Automaten mit äquivalenten Zuständen .....   | 130       |
| 3.6.4    | Minimierung deterministischer Automaten .....  | 138       |
| 3.6.5    | Erweiterung auf E/A-Automaten .....  | 143       |
| 3.7      | Erweiterungen .....  | 147       |
|          | Literaturhinweise .....  | 149       |

---

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>4</b> | <b>Nichtdeterministische Automaten</b> .....  | 151 |
| 4.1      | Erweiterung deterministischer Automaten zu nichtdeterministischen Automaten             | 151 |
| 4.1.1    | Zustandsübergangsrelation nichtdeterministischer Automaten .....                        | 151 |
| 4.1.2    | Verhalten nichtdeterministischer Automaten .....  | 156 |
| 4.2      | Nichtdeterministische Automaten und reguläre Sprachen .....                             | 160 |
| 4.2.1    | Nichtdeterministische Automaten als Akzeptoren .....                                    | 160 |
| 4.2.2    | Nichtdeterministische Automaten mit $\varepsilon$ -Übergängen .....                     | 163 |
| 4.2.3    | Reguläre Sprachen .....   | 165 |
| 4.2.4    | Akzeptoren für reguläre Sprachen .....  | 173 |
| 4.2.5    | Pumping-Lemma .....   | 177 |
| 4.2.6    | Vergleich der Sprachen von deterministischen und nichtdeterministischen Automaten ..... | 181 |
| 4.2.7    | Ableitung des regulären Ausdrucks aus dem Automatengrafen .....                         | 189 |
| 4.3      | Nichtdeterministische E/A-Automaten .....   | 192 |
| 4.4      | Analyse nichtdeterministischer Automaten .....  | 199 |
| 4.4.1    | Erreichbarkeitsanalyse .....  | 199 |
| 4.4.2    | Homomorphismus und Isomorphismus .....  | 200 |
| 4.4.3    | Minimierung nichtdeterministischer Automaten .....                                      | 203 |
| 4.5      | Formale Sprachen und Grammatiken .....  | 204 |
| 4.5.1    | Zielstellung .....  | 204 |
| 4.5.2    | Darstellung regulärer Sprachen durch Typ-3-Grammatiken .....                            | 204 |
| 4.5.3    | Chomsky-Hierarchie formaler Sprachen .....  | 209 |
| 4.5.4    | Kontextfreie Sprachen .....   | 212 |
| 4.5.5    | Turingmaschinen .....   | 216 |
|          | Literaturhinweise .....   | 219 |
| <b>5</b> | <b>Automatennetze</b> .....   | 221 |
| 5.1      | Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme .....                                    | 221 |
| 5.2      | Zusammenschaltung von Standardautomaten .....   | 222 |
| 5.2.1    | Modellierungsziel .....   | 222 |
| 5.2.2    | Produkt von Automaten .....   | 223 |
| 5.2.3    | Parallele Komposition .....   | 233 |
| 5.2.4    | Eigenschaften der Kompositionsoperatoren .....  | 242 |
| 5.3      | Zusammenschaltung von E/A-Automaten .....   | 242 |
| 5.3.1    | Modellierungsziel .....   | 242 |
| 5.3.2    | Reihenschaltung .....   | 243 |
| 5.3.3    | Rückführautomat .....   | 247 |
| 5.3.4    | Asynchrone Automatennetze .....   | 256 |
|          | Literaturhinweise .....   | 260 |
| <b>6</b> | <b>Petrinetze</b> .....   | 261 |
| 6.1      | Autonome Petrinetze .....   | 261 |
| 6.1.1    | Grundidee .....   | 261 |
| 6.1.2    | Definition .....  | 262 |
| 6.1.3    | Verhalten .....   | 265 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.1.4    | Matrixdarstellung  | 270        |
| 6.1.5    | Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Petrinetze          | 275        |
| 6.1.6    | Synchronisationsgraphen und Zustandsmaschinen                    | 281        |
| 6.1.7    | Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten                   | 285        |
| 6.2      | Analyse von Petrinetzen  | 287        |
| 6.2.1    | Erreichbarkeitsanalyse   | 287        |
| 6.2.2    | Invarianten  | 295        |
| 6.3      | Interpretierte Petrinetze  | 301        |
| 6.3.1    | Sprache von Petrinetzen  | 301        |
| 6.3.2    | Steuerungstechnisch interpretierte Petrinetze                    | 302        |
| 6.4      | Erweiterungen  | 307        |
| 6.4.1    | Petrinetze mit Test- und Inhibitorkanten                         | 307        |
| 6.4.2    | Petrinetze mit Stellen- und Kantenbewertungen                    | 310        |
| 6.4.3    | Hierarchische Petrinetze   | 315        |
|          | Literaturhinweise  | 316        |
| <b>7</b> | <b>Markovketten und stochastische Automaten</b>                  | <b>317</b> |
| 7.1      | Modellierungsziel  | 317        |
| 7.2      | Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung                         | 318        |
| 7.2.1    | Zufallsvariable  | 318        |
| 7.2.2    | Erwartungswert   | 324        |
| 7.2.3    | Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung                           | 324        |
| 7.2.4    | Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit mehr als zwei Zufallsgrößen  | 329        |
| 7.2.5    | Unabhängigkeit von Zufallsgrößen                                 | 331        |
| 7.3      | Markovketten   | 333        |
| 7.3.1    | Nichtdeterministische Automaten mit Wahrscheinlichkeitsbewertung | 333        |
| 7.3.2    | Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeitsverteilung             | 339        |
| 7.3.3    | Markoveigenschaft  | 345        |
| 7.3.4    | Verhalten von Markovketten                                       | 354        |
| 7.3.5    | Strukturelle Eigenschaften                                       | 357        |
| 7.3.6    | Verweilzeit der Markovkette in einem Zustand                     | 358        |
| 7.3.7    | Stationäre Wahrscheinlichkeitsverteilung                         | 361        |
| 7.4      | Stochastische Automaten  | 365        |
| 7.4.1    | Definition   | 365        |
| 7.4.2    | Verhalten  | 370        |
| 7.4.3    | Stochastischer Operator  | 374        |
| 7.4.4    | Spezielle stochastische Automaten                                | 375        |
| 7.4.5    | Viterbi-Algorithmus zur Lösung des Detektionsproblems            | 382        |
|          | Literaturhinweise  | 395        |
| <b>8</b> | <b>Zeitbewertete Petrinetze</b>                                  | <b>397</b> |
| 8.1      | Ziele der Modellerweiterung                                      | 397        |
| 8.2      | Petrinetze mit zeitbewerteten Transitionen                       | 398        |
| 8.3      | Zeitbewertete Synchronisationsgraphen                            | 401        |
| 8.3.1    | Zeitbewertete Synchronisationsgraphen ohne Eingang               | 401        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 8.3.2     | Grundlagen der Max-plus-Algebra .....  | 405        |
| 8.3.3     | Darstellung zeitbewerteter Synchronisationsgraphen mit Hilfe der<br>Max-plus-Algebra ..... | 413        |
| 8.3.4     | Verhalten zeitbewerteter Synchronisationsgraphen .....                                     | 419        |
| 8.3.5     | Synchronisationsgraphen mit Eingang .....  | 422        |
| 8.3.6     | Zusammenfassung .....  | 425        |
|           | Literaturhinweise .....  | 425        |
| <b>9</b>  | <b>Zeitbewertete Automaten</b> .....   | <b>427</b> |
| 9.1       | Modellierungsziel .....  | 427        |
| 9.2       | Zeitbewertete Automaten mit deterministischen Verweilzeiten .....                          | 429        |
| 9.2.1     | Autonome zeitbewertete Automaten .....   | 429        |
| 9.2.2     | Erweiterung auf Standardautomaten und E/A-Automaten .....                                  | 435        |
| 9.2.3     | Zeitbewertete Beschreibung paralleler Prozesse .....                                       | 439        |
| 9.2.4     | Ereignisse mit veränderlicher Lebensdauer .....  | 446        |
| 9.3       | Zeitbewertete Automaten mit stochastischen Verweilzeiten .....                             | 449        |
| 9.3.1     | Punktprozesse .....  | 449        |
| 9.3.2     | Definition und Verhalten des Poissonprozesses .....  | 452        |
| 9.3.3     | Markoveigenschaft des Poissonprozesses .....   | 461        |
| 9.3.4     | Punktprozesse mit zustandsabhängigen Übergangsraten .....                                  | 465        |
| 9.3.5     | Punktprozesse mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der<br>Verweilzeiten .....    | 468        |
| 9.4       | Wartesysteme .....   | 482        |
| 9.4.1     | Grundgleichungen .....   | 482        |
| 9.4.2     | Wartesysteme mit deterministischen Ankunfts- und Bedienzeiten .....                        | 486        |
| 9.4.3     | Wartesysteme mit stochastischen Ankunfts- und Bedienzeiten .....                           | 489        |
| 9.4.4     | Gesetz von LITTLE .....  | 491        |
| 9.4.5     | Klassifikation von Wartesystemen .....   | 496        |
| 9.4.6     | Poissonsche Wartesysteme .....   | 496        |
|           | Literaturhinweise .....  | 501        |
| <b>10</b> | <b>Kontinuierliche Markovketten und Semi-Markovprozesse</b> .....                          | <b>503</b> |
| 10.1      | Modellierungsziel .....  | 503        |
| 10.2      | Kontinuierliche Markovketten .....   | 506        |
| 10.2.1    | Definition .....   | 506        |
| 10.2.2    | Verhalten .....  | 511        |
| 10.2.3    | Markoveigenschaft .....  | 515        |
| 10.2.4    | Eingebettete diskrete Markovkette .....  | 516        |
| 10.3      | Semi-Markovprozesse .....  | 521        |
| 10.3.1    | Definition .....   | 521        |
| 10.3.2    | Zustandsraumdarstellung .....  | 522        |
| 10.3.3    | Interpretation von Semi-Markovprozessen .....  | 529        |
| 10.4      | Strukturelle Eigenschaften von Markov- und Semi-Markovprozessen .....                      | 533        |
|           | Literaturhinweise .....  | 533        |

---

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>Literaturverzeichnis</b> ..... | 535 |
|-----------------------------------|-----|

## **Anhänge**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben</b> .....             | 539 |
| <b>Anhang 2: Mengen, Relationen, Grafen</b> .....            | 615 |
| A2.1 Mengen .....  | 615 |
| A2.2 Relationen .....  | 616 |
| A2.3 Grafen .....  | 617 |
| A2.3.1 Gerichtete Grafen .....                               | 617 |
| A2.3.2 Erreichbarkeitanalyse .....                           | 620 |
| A2.3.3 Bipartite Grafen .....                                | 623 |
| A2.4 Grundbegriffe der Komplexitätstheorie .....             | 623 |
| <b>Anhang 3: Beschreibung kontinuierlicher Systeme</b> ..... | 625 |
| A3.1 Zeitkontinuierliche Systeme .....                       | 625 |
| A3.2 Zeitdiskrete Systeme .....                              | 629 |
| <b>Anhang 4: Fachwörter deutsch – englisch</b> .....         | 631 |
| <b>Sachwortverzeichnis</b> .....                             | 635 |

# Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

## Prozessautomatisierung

|  |     |
|--|-----|
| Modellierung einer Zweipunkt-Füllstandsregelung durch einen rückgekoppelten Automaten (Beispiel 5.9) ..... | 252 |
| Beschreibung einer Füllstandsregelung durch ein Petrinetz mit Testkanten (Beispiel 6.7) ..                 | 308 |
| Überwachung des Leistungsbedarfes einer verfahrenstechnischen Anlage (Aufgabe 6.12) .                      | 314 |
| Verhalten eines Bioprozesses (Aufgabe 7.19) .....  | 393 |

### • Modellierung und Analyse von Batchprozessen

|  |          |
|--|----------|
| Ereignisdiskrete Beschreibung eines Batchprozesses (Beispiel 1.4) .....                                | 11       |
| Modellierung eines Batchprozesses durch Moore- und Mealy-Automaten (Beispiel 3.11) .                   | 107      |
| Modellierung eines Batchprozesses als nichtdeterministischer Automat (Beispiel 4.1) ....               | 153      |
| Modellierung eines Batchprozesses als Markovkette (Beispiel 7.2) .....                                 | 339      |
| Beschreibung eines Apparates im Batchprozess durch einen stochastischen Automaten (Aufgabe 7.14) ..... | 369      |
| Beschreibung eines Batchprozesses durch ein Petrinetz (Beispiel 6.2) .....                             | 282      |
| Erreichbarkeitsanalyse eines Batchprozesses (Beispiel 6.4) .....                                       | 293      |
| Modellierung eines Batchprozesses als zeitbewertetes Petrinetz (Aufgabe 8.2 mit Lösung)                | 423, 599 |
| Beschreibung eines Batchprozesses als Semi-Markovprozess (Beispiel 10.5) .....                         | 525      |

### • Steuerung von Batchprozessen

|   |          |
|---|----------|
| Verhinderung gefährlicher Zustände in einem Batchprozess (Beispiel 5.2) ..... | 228      |
| Spezifikation eines Batchprozesses (Aufgabe 5.4 mit Lösung) .....             | 232, 569 |
| Steuerung eines Batchprozesses durch ein Petrinetz (Beispiel 6.5) .....       | 305      |

## Computer- und Softwaretechnik

|  |          |
|--|----------|
| Steuerung eines CD-Laufwerkes (Aufgabe 5.3) .....      | 231      |
| Ladegerät eines Laptops (Aufgabe 7.3 mit Lösung) ..... | 332, 585 |

### • Analyse von Zeichenketten

|   |    |
|---|----|
| Funktionsweise eines Paritätsprüfers (Beispiel 1.2) .....   | 6  |
| Paritätsprüfung als dynamisches System (Beispiel 2.1) ..... | 27 |

---

|   |          |
|---|----------|
| Beschreibung eines Paritätsprüfers durch einen E/A-Automaten (Beispiel 3.9) .....                               | 101      |
| Fließkommaakzeptor (Aufgabe 3.7 mit Lösung) .....   | 93, 545  |
| Akzeptor für Zeichenketten mit geradzahlgiger Buchstabenanzahl und der Endung 11 (Aufgabe 5.5 mit Lösung) ..... | 233, 570 |
| Programmierung eines Spam-Filters (Aufgabe 4.9) .....   | 172      |
| <b>• Programmiersprachen und Programmanalyse</b>  |          |
| Sprache der korrekten arithmetischen Klammersausdrücke (Beispiel 4.15) .....                                    | 213      |
| Ableitung korrekter Klammersausdrücke (Aufgabe 4.18) .....  | 215      |
| Syntaxprüfung eines Programms (Aufgabe 4.19) .....  | 215      |
| Beschreibung einer Programmiersprache in Backus-Naur-Form (Aufgabe 4.20) .....                                  | 216      |
| Lexikalische Analyse von Programmen (Aufgabe 4.4) .....   | 171      |
| UNIX-Kommando für die Suche von Zeichenketten (Aufgabe 4.6 mit Lösung) .....                                    | 172, 564 |
| <b>• Beschreibung von Rechenprozessen</b>   |          |
| Beschreibung eines Addierers als deterministischer Automat (Aufgabe 3.21 mit Lösung) .                          | 113, 558 |
| Bestimmung des Restes bei der Division durch drei (Aufgabe 3.3 mit Lösung) .....                                | 83, 543  |
| Beschreibung des Datenflusses in einem Programm durch ein Petrinetz (Aufgabe 6.11 mit Lösung) .....             | 310, 581 |
| <b>• Parallelrechner</b>  |          |
| Beschreibung eines Parallelrechners durch einen nichtdeterministischen Automaten (Beispiel 3.5) .....           | 83       |
| Verhalten eines Parallelrechners (Beispiel 6.1) .....   | 268      |
| Erreichbarkeitsanalyse des Parallelrechners (Aufgabe 6.6 mit Lösung) .....                                      | 295, 576 |
| Zeitbewertete Beschreibung eines Parallelrechners (Aufgabe 9.6 mit Lösung) .....                                | 446, 606 |
| <b>• Eingebettete Systeme</b>   |          |
| Ereignisdiskrete Beschreibung eingebetteter Systeme (Abschn. 1.2.2) .....                                       | 7        |
| Modellierung eines eingebetteten Systems (Beispiel 5.10) .....  | 258      |
| Buszuteilung bei der Übertragung von Messwerten (Aufgabe 6.8 mit Lösung) .....                                  | 299, 576 |
| <b>Sprachverarbeitung</b>   |          |
| Verarbeitung formaler und natürlicher Sprachen (Abschn. 1.2.1) .....  | 5        |
| Darstellung von Elementen der natürlichen Sprache (Beispiel 4.7) .....  | 170      |
| Überprüfung der Rechtschreibung (Aufgabe 3.10 mit Lösung) .....   | 94, 548  |
| Kompilieren eines Lexikons (Aufgabe 3.25) .....   | 143      |
| Akzeptor für Wörter mit der Endung „heit“ (Beispiel 4.3) .....  | 160      |
| Deterministischer Akzeptor für Wörter mit der Endung „heit“ (Beispiel 4.9) .....                                | 181      |



|   |     |
|---|-----|
| Wissenschaftliche Texte in $\text{\LaTeX}$ (Aufgabe 4.21) ..... | 216 |
|---|-----|

## Fertigungstechnik

|   |          |
|---|----------|
| Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen (Abschn. 1.2.4) .....   | 9        |
| • <b>Stanze</b>   |          |
| Modellierung einer Stanze (Aufgabe 3.1) .....   | 72       |
| Erweiterung des Modells einer Stanze um nichtdeterministische Zustandsübergänge (Aufgabe 4.1) .....                       | 155      |
| Zeitverhalten einer Stanze (Aufgabe 10.7) .....   | 532      |
| • <b>Roboter</b>  |          |
| Handlungsplanung von Robotern (Beispiel 1.3) .....  | 9        |
| Sortieren von Werkstücken durch einen Roboter (Beispiel 3.3) .....  | 75       |
| Erweiterung des Robotermodells (Aufgabe 3.4 mit Lösung) .....   | 84, 544  |
| „Sprache“ eines Roboters (Beispiel 3.8) .....   | 92       |
| „Sprache“ des ungesteuerten Roboters (Aufgabe 3.8 mit Lösung) .....   | 94, 547  |
| Minimierung des Robotermodells (Beispiel 3.17) .....  | 139      |
| Spezifikation der Roboterbewegung durch einen regulären Ausdruck (Aufgabe 4.10 mit Lösung) .....                          | 177, 565 |
| Beschreibung der Roboterbewegung durch einen regulären Ausdruck (Aufgabe 4.15 mit Lösung) .....                           | 192, 567 |
| Entwurf einer Robotersteuerung (Aufgabe 5.1) .....  | 231      |
| Steuerung eines Schweißroboters (Aufgabe 5.11) .....  | 255      |
| • <b>Werkzeugmaschinen mit Warteschlange</b>  |          |
| Beschreibung einer Warteschlange vor einer Werkzeugmaschine als deterministischer Automat (Aufgabe 3.20 mit Lösung) ..... | 113, 557 |
| Verhalten zweier Werkzeugmaschinen mit Warteschlangen (Aufgabe 5.7 mit Lösung) ....                                       | 241, 572 |
| Modellierung der Warteschlange vor einer Werkzeugmaschine als Markovkette (Beispiel 7.3) .....                            | 343      |
| Verbesserung des Warteschlangenmodells aus dem Beispiel 7.3 (Aufgabe 7.6 mit Lösung) .....                                | 353, 586 |
| Analyse des Durchsatzes einer Werkzeugmaschine (Aufgabe 7.10 mit Lösung) .....  | 364, 591 |
| • <b>Fertigungszelle</b>  |          |
| Darstellung der Ressourcenzuteilung in einer Fertigungszelle durch ein Automatenetz (Beispiel 5.5) .....                  | 238      |
| Darstellung der Ressourcenzuteilung durch ein Petrinetz (Aufgabe 6.5) .....   | 287      |
| Zeitbewertete Beschreibung einer Fertigungszelle (Beispiel 9.1) .....   | 431      |
| Erweiterung des Modells der Fertigungszelle (Aufgabe 9.1) .....   | 434      |

|  |     |
|--|-----|
| Modellierung der Fertigungszelle als verallgemeinerter zeitbewerteter Automat (Beispiel 9.3) ..... | 441 |
| Verhalten der Fertigungszelle (Aufgabe 9.5) .....  | 445 |

## **Kommunikationstechnik**

|  |          |
|--|----------|
| Modellierung und Analyse von Kommunikationsnetzen (Abschn. 1.2.6) .....                                | 14       |
| Schreiben eines SMS-Textes (Aufgabe 7.17 mit Lösung) .....   | 381, 593 |
| Dekodierung einer über einen gestörten Kanal übertragenen Zeichenkette (Aufgabe 7.20 mit Lösung) ..... | 394, 594 |

### **• Telefonnetz**

|   |          |
|---|----------|
| Handhabung eines Kartentelefon (Aufgabe 1.4 mit Lösung) .....     | 23, 541  |
| Sperrung der Vorwahl 0190 (Aufgabe 3.9 mit Lösung) .....          | 94, 548  |
| Vermittlung von Telefongesprächen (Aufgabe 7.12 mit Lösung) ..... | 365, 592 |

### **• Netzwerkprotokoll**

|   |     |
|---|-----|
| Ereignisdiskrete Beschreibung einer Rechnerkommunikation (Beispiel 1.5) .....                           | 15  |
| Spezifikation eines Netzwerkprotokolls mit Hilfe eines deterministischen Automaten (Beispiel 3.4) ..... | 81  |
| Modellierung eines einfachen Kommunikationsprotokolls (Aufgabe 9.2) .....                               | 438 |

### **• Datenübertragung in Rechnernetzen**

|   |     |
|---|-----|
| Kommunikation zwischen Rechnern über ein gemeinsames Netz (Beispiel 3.2) .....      | 70  |
| Datenübertragung zwischen zwei Rechnern (Beispiel 7.5) .....                        | 352 |
| Mittlere Übertragungszeit für Datenpakete in einem Rechnernetz (Beispiel 7.7) ..... | 360 |
| Verhalten eines digitalen Übertragungsnetzes (Aufgabe 9.8) .....                    | 461 |

## **Zuverlässigkeit technischer Systeme**

|  |          |
|--|----------|
| Zuverlässigkeit eines Prozessrechners (Aufgabe 7.11) .....           | 364      |
| Zuverlässigkeit eines Gerätes (Aufgabe 10.1 mit Lösung) .....        | 514, 608 |
| Zeitverhalten der Zuverlässigkeit eines Gerätes (Aufgabe 10.9) ..... | 532      |
| Ausfallverhalten eines Rechners (Aufgabe 10.2 mit Lösung) .....      | 515, 610 |

## **Verkehrstechnik**

|   |          |
|---|----------|
| Beschreibung eines Flugplatzes durch ein Petrinetz (Aufgabe 6.10) ..... | 301      |
| Automatisches Garagentor (Aufgabe 3.2 mit Lösung) .....                 | 83, 542  |
| Modellierung einer Autowaschanlage (Aufgabe 6.13 mit Lösung) .....      | 316, 582 |

### • Einrichtungen im Straßenverkehr

|  |          |
|--|----------|
| Beschreibung einer Parkuhr (Aufgabe 3.18 mit Lösung) .....   | 112, 554 |
| Zeitbewertete Beschreibung der Parkuhr (Aufgabe 9.3) .....   | 439      |
| Mautstation <i>RUBCollect</i> (Aufgabe 4.2 mit Lösung) ..... | 156, 562 |
| Auslegung einer Mautstation (Beispiel 9.10) .....            | 500      |
| Modellierung einer Tankstelle (Aufgabe 6.3) .....            | 285      |
| Wann müssen Sie tanken? (Aufgabe 10.8) .....                 | 532      |
| Verkehrszählung (Aufgabe 9.11) .....                         | 481      |

### • Steuerung einer Verkehrsampel

|   |     |
|---|-----|
| Beschreibung einer Verkehrsampel durch einen deterministischen Automaten (Beispiel 3.1) ..... | 64  |
| Entwurf einer Ampelsteuerung (Aufgabe 5.2) .....  | 231 |
| Analyse einer Ampelsteuerung (Aufgabe 6.7) .....  | 298 |

### • Modellierung des Schienenverkehrs

|   |          |
|---|----------|
| Fahrgastinformationssystem (Aufgabe 1.3) .....                                | 23       |
| Ereignisdiskrete Beschreibung einer Eisenbahnverbindung (Aufgabe 1.5) .....   | 23       |
| Eisenbahnverkehr auf der Strecke Dortmund-Köln (Aufgabe 6.1 mit Lösung) ..... | 283, 574 |
| Fahrplan für die Bochumer Straßenbahn (Aufgabe 8.4 mit Lösung) .....          | 424, 601 |

## Elektronische Schaltungen

### • Schaltungsentwurf und -analyse

|  |          |
|--|----------|
| Entwurf digitaler Schaltungen und Schaltkreise (Abschn. 1.2.3) .....                     | 8        |
| Beschreibung einer sequenziellen Schaltung durch einen E/A-Automaten (Beispiel 3.13) ..  | 114      |
| Modellierung eines Schieberegisters (Beispiel 5.6) .....                                 | 245      |
| Beschreibung eines JK-Flipflops durch einen Automaten (Aufgabe 3.17 mit Lösung) .....    | 109, 553 |
| Beschreibung eines RS-Flipflops (Aufgabe 3.16 mit Lösung) .....                          | 109, 551 |
| Ereignisdiskrete Beschreibung eines Gleichspannungswandlers (Aufgabe 4.16 mit Lösung) .. | 198, 567 |

### • Leiterkartenfertigung

|  |          |
|--|----------|
| Qualitätskontrolle einer Leiterkartenfertigung (Beispiel 7.1) .....                    | 321      |
| Erweiterte Qualitätskontrolle der Leiterkartenfertigung (Aufgabe 7.1 mit Lösung) ..... | 328, 583 |

## Büroautomatisierung

|  |          |
|--|----------|
| Auswertung einer Bibliotheksdatenbank (Aufgabe 7.4 mit Lösung) .....                               | 333, 586 |
| Beschreibung von Verwaltungsvorgängen durch einen Standardautomaten (Aufgabe 3.5 mit Lösung) ..... | 84, 545  |

## Beispiele aus dem täglichen Leben

|  |          |
|--|----------|
| Ereignisdiskrete Betrachtung technischer und nichttechnischer Systeme (Aufgabe 1.2 mit Lösung) ..... | 22, 539  |
| Ereignisdiskrete Prozesse im täglichen Leben (Aufgabe 2.1) .....                                     | 44       |
| „Mensch ärgere dich nicht!“ (Aufgabe 7.7) .....  | 353      |
| Wettervorhersage (Aufgabe 7.13) .....  | 365      |
| Friseurbesuch (Aufgabe 9.14 mit Lösung) .....  | 495, 608 |
| Innenausbau eines Hauses (Aufgabe 6.2 mit Lösung) .....  | 285, 576 |
| Kollisionsverhütung bei Kränen (Aufgabe 6.9 mit Lösung) .....  | 299, 579 |
| Beschreibung einer gesteuerten Rolltreppe durch einen Rückführautomaten (Aufgabe 5.10)               | 255      |
| Sprache des Fußballschiedsrichters (Aufgabe 4.11) .....  | 177      |
| <br>   |          |
| • <b>Fahrkartenautomat</b>   |          |
| Arbeitsweise eines Fahrkartenautomaten (Aufgabe 1.1) .....   | 8        |
| Modellierung eines Fahrkartenautomaten (Aufgabe 5.12) .....  | 256      |
| Beschreibung von <i>Quick Check-In</i> durch einen E/A-Automaten (Aufgabe 3.14) .....                | 102      |
| <br>   |          |
| • <b>Fahrstuhl</b>   |          |
| „Sprache“ eines Fahrstuhls (Aufgabe 3.11 mit Lösung) .....   | 94, 549  |
| „Sprache“ eines Fahrstuhls (Beispiel 4.10) .....   | 191      |
| Grammatik der Fahrstuhlbewegung (Aufgabe 4.22) .....   | 216      |
| <br>   |          |
| • <b>Waschmaschine</b>   |          |
| Steuerung einer Waschmaschine (Beispiel 3.12) .....  | 110      |
| Zeitbewertete Beschreibung einer Waschmaschine (Aufgabe 9.4) .....                                   | 439      |
| <br>   |          |
| • <b>Selbstbedienungsrestaurant</b>  |          |
| Zubereitung von Currywurst (Aufgabe 6.4) .....   | 285      |
| Fastfood-Restaurant <i>RUBfood</i> (Aufgabe 9.15) .....  | 501      |
| Ereignisdiskrete Arbeitsweise eines Getränkeautomaten (Beispiel 1.1) .....                           | 2        |
| Modellierung eines Getränkeautomaten (Aufgabe 3.13) .....  | 101      |