

Die wichtigsten Modelle und Methoden für ereignisdiskrete Systeme

- ★ **Grundlegende Eigenschaften ereignisdiskreter Systeme:** Systeme mit diskreten Signalen unterscheiden sich weitgehend von wertkontinuierlichen Systemen, auch wenn strukturelle Beschreibungen wie Blockschaltbilder und Signalflussgraphen wichtige Parallelen der Modellierung und Analyse beider Systemklassen zeigen (Kap. 1 und 2).
- ★ **Deterministische und nichtdeterministische Automaten:** Die Grundform der Modelle ereignisdiskreter Systeme sind Automaten, deren Zustand sich in einem diskreten Wertebereich bewegt. Je nach Anwendungsgebiet kann diese Bewegung durch Ereignisse oder Eingangsgrößen beeinflusst werden (Kap. 3 und 4).
- ★ **Automatennetze:** Für die kompositionale Modellbildung ereignisdiskreter Systeme stehen unterschiedliche Verknüpfungsoperatoren für Automaten zur Verfügung, die zu Automatennetzen führen (Kap. 5).
- ★ **Petrinetze:** Parallele Prozesse werden effizient durch Petrinetze repräsentiert, deren Markenfluss auf die unterschiedlichen zeitlichen Relationen der Teilprozesse Rücksicht nimmt (Kap. 6).
- ★ **Erreichbarkeitsanalyse:** Wichtige Analyseaufgaben beziehen sich auf die Menge der Zustände, in die ein System gesteuert werden kann. Mit Hilfe der graphentheoretischen Interpretation von Automaten und Petrinetzen wird diese Zustandsmenge durch eine Erreichbarkeitsanalyse bestimmt (Kap. 3, 4 und 6).
- ★ **Markovketten und stochastische Automaten:** Um die Häufigkeit darstellen und analysieren zu können, mit denen ereignisdiskrete Systeme bestimmte Zustandsfolgen durchlaufen, werden nichtdeterministische Automaten durch wahrscheinlichkeitstheoretische Parameter zu stochastischen Automaten erweitert. Die dabei entwickelten Modelle gelten, wenn das System die Markoveigenschaft besitzt (Kap. 7).
- ★ **Viterbi-Algorithmus und Markov-Entscheidungsprobleme:** Für wichtige Analyse- und Entscheidungsprobleme werden Lösungsverfahren angegeben, die die Markoveigenschaft der Modelle ausnutzen und auf rekursive Algorithmen führen (Kap. 7).

- ★ **Zeitbewertete Petrinetze und zeitbewertete Automaten:** Um die zeitlichen Abstände zwischen Ereignissen bzw. die Zeitpunkte der Zustandswechsel angeben und analysieren zu können, werden die behandelten Modellformen um Zeitbewertungen erweitert (Kap. 8 und 9).
- ★ **Wartesysteme:** Eine wichtige Klasse ereignisdiskreter Systeme, deren Analyse deterministische oder stochastische Angaben über die Verweilzeit in den Zuständen verwendet, sind Wartesysteme, die in vielfältiger Weise in unterschiedlichen Anwendungsgebieten vorkommen (Kap. 9).
- ★ **Kontinuierliche Markovketten und Semi-Markovprozesse:** Die Kombination der wahrscheinlichkeitstheoretischen Beschreibung der Zustandshäufigkeit mit der Zeitbewertung führt auf Markovketten in kontinuierlicher Zeit und auf Semi-Markovprozesse. Diese Modelle verfügen über die große Ausdruckskraft aller hier behandelten Modelle. Allerdings führt ihre Analyse auf komplexe methodische Probleme (Kap. 10).

Inhaltsverzeichnis

Die wichtigsten Modelle und Methoden für ereignisdiskrete Systeme	VII
Verzeichnis der Anwendungsbeispiele	XV
Hinweise zum Gebrauch des Buches	XXIII
1 Einführung in die Modellierung und Analyse ereignisdiskreter Systeme	1
1.1 Ereignisdiskrete Systeme	1
1.2 Anwendungsgebiete der Theorie ereignisdiskreter System	5
1.2.1 Verarbeitung formaler und natürlicher Sprachen	5
1.2.2 Beschreibung eingebetteter Systeme	6
1.2.3 Entwurf digitaler Schaltungen und Schaltkreise	7
1.2.4 Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen	8
1.2.5 Automatisierung diskreter Prozesse	9
1.2.6 Modellierung und Analyse von Kommunikations- und Rechnernetzen .	13
1.2.7 Modellierung und Analyse von Wartesystemen	15
1.2.8 Zusammenfassung: Charakteristika ereignisdiskreter Systeme	16
1.3 Überblick über die Modellformen und Analysemethoden	17
Literaturhinweise	22
2 Diskrete Signale und Systeme	23
2.1 Grundbegriffe der Systemtheorie	23
2.2 Blockschaltbilder	27
2.2.1 Elemente	27
2.2.2 Kompositionale Modellbildung	28
2.2.3 Hierarchische Modellbildung	30
2.3 Diskrete Signale	31
2.3.1 Klassifikation von Signalen	31
2.3.2 Diskrete Signale und Ereignisse	33
2.3.3 Logische und zeitbewertete Werte- und Ereignisfolgen	37
2.3.4 Vektorielle Eingangs- und Ausgangssignale	39
2.4 Diskrete Systeme	40
2.4.1 Grundidee der ereignisdiskreten Modellbildung	40
2.4.2 Zustandsraumdarstellung	42
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	50
2.5.4	Nichtdeterminismus	51
2.5.5	Komplexität.....	53
2.6	Unterschiede und Gemeinsamkeiten diskreter und kontinuierlicher Systeme ..	54
	Literaturhinweise.....	56
3	Deterministische Automaten	57
3.1	Autonome deterministische Automaten	57
3.1.1	Definition	57
3.1.2	Automatengraph	60
3.1.3	Matrixdarstellung	61
3.1.4	Verhalten	63
3.1.5	Weitere Eigenschaften	64
3.1.6	Zustand deterministischer Automaten	66
3.2	Σ -Automaten	69
3.2.1	Definition	69
3.2.2	Verhalten	74
3.2.3	Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Σ -Automaten	77
3.3	Deterministische Automaten und reguläre Sprachen	82
3.3.1	Automaten als Akzeptoren oder Sprachgeneratoren	82
3.3.2	Formale Sprachen	84
3.3.3	Verallgemeinerte Zustandsübergangsfunktion.....	85
3.3.4	Sprache deterministischer Automaten	87
3.4	Deterministische E/A-Automaten	91
3.4.1	Definition	91
3.4.2	Verhalten	97
3.4.3	Automatenabbildung	100
3.4.4	Mealy-Automaten und Moore-Automaten.....	101
3.4.5	Echtzeitautomaten	103
3.5	Analyse deterministischer Automaten.....	108
3.5.1	Erreichbarkeitsanalyse	108
3.5.2	Strukturelle Analyse	112
3.5.3	Verifikation	115
3.6	Beziehungen zwischen Automaten	117
3.6.1	Äquivalenz von Σ -Automaten	117
3.6.2	Homomorphie und Isomorphie	118
3.6.3	Automaten mit äquivalenten Zuständen	122
3.6.4	Zerlegung der Zustandsmenge anhand der Automatentabelle	128
3.6.5	Minimierung deterministischer Automaten	130
3.6.6	Erweiterung der Methoden auf E/A-Automaten	136
3.7	Erweiterungen	140
	Literaturhinweise.....	141

4	Nichtdeterministische Automaten	145
4.1	Erweiterung deterministischer Automaten zu nichtdeterministischen Automaten	145
4.1.1	Zustandsübergangsrelation nichtdeterministischer Automaten	145
4.1.2	Verhalten nichtdeterministischer Automaten	150
4.2	Nichtdeterministische Automaten und reguläre Sprachen	154
4.2.1	Nichtdeterministische Automaten als Akzeptoren	154
4.2.2	Nichtdeterministische Automaten mit ε -Übergängen	157
4.2.3	Reguläre Sprachen	160
4.2.4	Akzeptoren für reguläre Sprachen	165
4.2.5	Pumping-Lemma	169
4.2.6	Vergleich der Sprachen von deterministischen und nichtdeterministischen Automaten	173
4.2.7	Ableitung des regulären Ausdrucks aus dem Automatengraphen	180
4.3	Nichtdeterministische E/A-Automaten	186
4.4	Analyse nichtdeterministischer Automaten	193
4.4.1	Erreichbarkeitsanalyse	193
4.4.2	Homomorphie und Isomorphie	194
4.4.3	Minimierung	196
4.5	Formale Sprachen und Grammatiken	198
4.5.1	Zielstellung	198
4.5.2	Darstellung regulärer Sprachen durch Typ-3-Grammatiken	198
4.5.3	Chomsky-Hierarchie formaler Sprachen	203
4.5.4	Kontextfreie Sprachen	206
4.5.5	Turingmaschinen	209
	Literaturhinweise	213
5	Automatennetze	215
5.1	Kompositionale Modellbildung ereignisdiskreter Systeme	215
5.2	Zusammenschaltung von Σ -Automaten	217
5.2.1	Modellierungsziel	217
5.2.2	Produkt von Automaten	218
5.2.3	Parallele Komposition	226
5.2.4	Eigenschaften der Kompositionsoperatoren	234
5.3	Zusammenschaltung von E/A-Automaten	239
5.3.1	Modellierungsziel	239
5.3.2	Reihenschaltung	240
5.3.3	Rückführautomat	243
5.3.4	Allgemeine Automatennetze	251
5.3.5	Asynchrone Automatennetze	253
	Literaturhinweise	257

6	Petrinetze	259
6.1	Autonome Petrinetze	259
6.1.1	Grundidee	259
6.1.2	Definition	260
6.1.3	Verhalten	263
6.1.4	Matrixdarstellung	268
6.1.5	Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Petrinetze	273
6.1.6	Synchronisationsgraphen und Zustandsmaschinen	278
6.1.7	Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten	282
6.2	Analyse von Petrinetzen	285
6.2.1	Erreichbarkeitsanalyse	285
6.2.2	Invarianten	293
6.3	Interpretierte Petrinetze	299
6.3.1	Sprache von Petrinetzen	299
6.3.2	Steuerungstechnisch interpretierte Petrinetze	300
6.4	Erweiterungen	305
6.4.1	Petrinetze mit Test- und Inhibitorkanten	305
6.4.2	Petrinetze mit Stellen- und Kantenbewertungen	308
6.4.3	Hierarchische Petrinetze	313
	Literaturhinweise	315
7	Markovketten und stochastische Automaten	317
7.1	Modellierungsziel	317
7.2	Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung	318
7.2.1	Zufallsvariablen	319
7.2.2	Erwartungswert	324
7.2.3	Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilungen	324
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit mehr als zwei Zufallsgrößen	328
7.2.5	Unabhängigkeit von Zufallsvariablen	330
7.3	Markovketten	332
7.3.1	Stochastische Prozesse	333
7.3.2	Nichtdeterministische Automaten mit Wahrscheinlichkeitsbewertung	335
7.3.3	Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeitsverteilungen	340
7.3.4	Markoveigenschaft	352
7.3.5	Verhalten von Markovketten	359
7.3.6	Strukturelle Eigenschaften	363
7.3.7	Verweilzeit von Markovketten in einem Zustand	364
7.3.8	Stationäre Wahrscheinlichkeitsverteilung	367
7.4	Stochastische Automaten	378
7.4.1	Definition	378
7.4.2	Verhalten	382
7.4.3	Stochastischer Operator	387
7.4.4	Stochastische Mealy-Automaten, gesteuerte Markovketten und verdeckte Markovmodelle	388

7.5	Viterbi-Algorithmus zur Lösung von Detektionsproblemen	394
7.5.1	Das Detektionsproblem und seine direkte Lösung	394
7.5.2	Entfaltung des Automatengraphen und Grundidee des Algorithmus . . .	398
7.5.3	Zusammenfassung des Viterbi-Algorithmus	401
7.5.4	Anwendungsgebiete	405
7.6	Markov-Entscheidungsprobleme	410
7.6.1	Steuerungsproblem für stochastische E/A-Automaten	410
7.6.2	Bellman-Gleichung und Strategiebewertung	411
7.6.3	Lösung von Markov-Entscheidungsproblemen	418
	Literaturhinweise	425
8	Zeitbewertete Petrinetze	427
8.1	Ziele der Modellerweiterung	427
8.2	Petrinetze mit zeitbewerteten Transitionen	428
8.3	Zeitbewertete Synchronisationsgraphen	431
8.3.1	Zeitbewertete Synchronisationsgraphen ohne Eingang	431
8.3.2	Grundlagen der Max-plus-Algebra	435
8.3.3	Darstellung zeitbewerteter Synchronisationsgraphen mit Hilfe der Max-plus-Algebra	442
8.3.4	Verhalten zeitbewerteter Synchronisationsgraphen	448
8.3.5	Synchronisationsgraphen mit Eingang	451
8.3.6	Zusammenfassung	452
	Literaturhinweise	455
9	Zeitbewertete Automaten	457
9.1	Modellierungsziel	457
9.2	Zeitbewertete Automaten mit deterministischen Verweilzeiten	459
9.2.1	Autonome zeitbewertete Automaten	459
9.2.2	Erweiterung der Zeitbewertung auf Σ -Automaten und E/A-Automaten	464
9.2.3	Zeitbewertete Beschreibung paralleler Prozesse	469
9.2.4	Ereignisse mit veränderlicher Lebensdauer	476
9.2.5	Hybride Automaten	480
9.3	Zeitbewertete Automaten mit stochastischen Verweilzeiten	487
9.3.1	Punktprozesse	487
9.3.2	Definition des Poissonprozesses	490
9.3.3	Verhalten des Poissonprozesses	493
9.3.4	Markoveigenschaft des Poissonprozesses	499
9.3.5	Punktprozesse mit zustandsabhängigen Übergangsraten	504
9.3.6	Punktprozesse mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Verweilzeiten	506
9.4	Wartesysteme	521
9.4.1	Grundgleichungen	521
9.4.2	Wartesysteme mit deterministischen Ankunfts- und Bedienzeiten	525
9.4.3	Wartesysteme mit stochastischen Ankunfts- und Bedienzeiten	528
9.4.4	Gesetz von LITTLE	531

9.4.5	Klassifikation von Wartesystemen	534
9.4.6	Poissonsche Wartesysteme	535
	Literaturhinweise	541
10	Kontinuierliche Markovketten und Semi-Markovprozesse	543
10.1	Modellierungsziel	543
10.2	Kontinuierliche Markovketten	545
10.2.1	Definition	545
10.2.2	Verhalten	552
10.2.3	Markoveigenschaft	555
10.2.4	Eingebettete diskrete Markovketten	556
10.3	Semi-Markovprozesse	561
10.3.1	Definition	561
10.3.2	Zustandsraumdarstellung	564
10.3.3	Interpretation von Semi-Markovprozessen	571
10.3.4	Spezielle Semi-Markovprozesse	573
10.4	Strukturelle Eigenschaften von Markov- und Semi-Markovprozessen	575
	Literaturhinweise	575
	Literaturverzeichnis	577

Anhänge

Anhang 1: Lösungen von Übungsaufgaben	581
Anhang 2: Mengen, Relationen, Graphen	657
A2.1 Mengen	657
A2.2 Relationen	658
A2.3 Graphen	659
A2.4 Grundbegriffe der Komplexitätstheorie	664
Anhang 3: Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung	667
A3.1 Zufällige Ereignisse	667
A3.2 Wahrscheinlichkeit	671
A3.3 Bedingte Wahrscheinlichkeit	673
A3.4 Stochastische Matrizen	676
Anhang 4: Beschreibung wertkontinuierlicher Systeme	679
A4.1 Zeitkontinuierliche Systeme	679
A4.2 Zeitdiskrete Systeme	682
Anhang 5: Fachwörter deutsch – englisch	683
Sachwortverzeichnis	687

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

Prozessautomatisierung

Modellierung einer Zweipunkt-Füllstandsregelung durch einen rückgekoppelten Automaten (Beispiel 5.9)	248
Beschreibung einer Füllstandsregelung durch ein Petrinetz mit Testkanten (Beispiel 6.8) ..	307
Überwachung des Leistungsbedarfes einer verfahrenstechnischen Anlage (Aufgabe 6.12) .	314
Verhalten eines Bioprozesses (Aufgabe 7.25 mit Lösung)	406, 630

• Modellierung und Analyse von Batchprozessen

Ereignisdiskrete Beschreibung eines Batchprozesses (Beispiel 1.3)	10
Modellierung eines Batchprozesses durch Moore- und Mealy-Automaten (Beispiel 3.11) .	102
Darstellung eines Batchprozesses als nichtdeterministischer Automat (Beispiel 4.1)	147
Darstellung eines Batchprozesses als Markovkette (Beispiel 7.2)	339
Beschreibung eines Apparates durch einen stochastischen Automaten (Aufgabe 7.20)	393
Beschreibung eines Batchprozesses durch ein Petrinetz (Beispiel 6.3)	279
Erreichbarkeitsanalyse eines Batchprozesses (Beispiel 6.5)	291
Modellierung eines Batchprozesses als zeitbewertetes Petrinetz (Aufgabe 8.2 mit Lösung)	453, 638
Beschreibung eines Batchprozesses als Semi-Markovprozess (Beispiel 10.5)	566
Hybride Dynamik eines Batchprozesses (Aufgabe 9.9)	486

• Steuerung von Batchprozessen

Verhinderung gefährlicher Zustände in einem Batchprozess (Beispiel 5.2)	222
Spezifikation eines Batchprozesses (Aufgabe 5.5 mit Lösung)	237, 608
Steuerung eines Batchprozesses durch ein Petrinetz (Beispiel 6.6)	303

Computer- und Softwaretechnik

Steuerung eines CD-Laufwerks (Aufgabe 5.3)	235
Ladegerät eines Laptops (Aufgabe 7.3 mit Lösung)	332, 621
Beschreibung eines Neuronennetzes (Aufgabe 3.17 mit Lösung)	106, 593

• Analyse von Zeichenketten

Paritätsprüfer (Beispiel 2.1)	25
Beschreibung eines Paritätsprüfers durch einen E/A-Automaten (Beispiel 3.9)	97
Fließkommaakzeptor (Aufgabe 3.7 mit Lösung)	90, 588
Programmierung eines Spam-Filters (Aufgabe 4.9)	184

• Programmiersprachen und Programmanalyse

Sprache der korrekten arithmetischen Klammersausdrücke (Beispiel 4.15)	207
Ableitung korrekter Klammersausdrücke (Aufgabe 4.19)	212
Syntaxprüfung eines Programms (Aufgabe 4.20)	212
Beschreibung einer Programmiersprache in Backus-Naur-Form (Aufgabe 4.21)	212
Lexikalische Analyse von Programmen (Aufgabe 4.4)	183
UNIX-Kommando für die Suche von Zeichenketten (Aufgabe 4.6 mit Lösung)	183, 602

• Suchsteuerung bei Google

Sortieren der Suchergebnisse (Beispiel 7.13)	371
Erweiterung des Modells zur Suchsteuerung (Aufgabe 7.15 mit Lösung)	376, 628

• Beschreibung von Rechenprozessen

Beschreibung eines Addierers (Aufgabe 3.15 mit Lösung)	106, 591
Bestimmung des Restes bei der Division durch drei (Aufgabe 3.3 mit Lösung)	81, 585
Petrinetz für den Datenfluss in einem Programm (Aufgabe 6.11 mit Lösung)	314, 619

• Parallelrechner

Parallelrechner als nichtdeterministischer Automat (Beispiel 3.5)	79
Beschreibung eines Parallelrechners durch ein Petrinetz (Beispiel 6.1)	261
Verhalten eines Parallelrechners (Beispiel 6.2)	266
Erreichbarkeitsanalyse des Parallelrechners (Aufgabe 6.6 mit Lösung)	296, 614
Zeitbewertete Beschreibung eines Parallelrechners (Aufgabe 9.5 mit Lösung)	485, 644

• Eingebettete Systeme

Ereignisdiskrete Beschreibung eingebetteter Systeme (Abschn. 1.2.2)	6
Modellierung eines eingebetteten Systems (Beispiel 5.10)	254
Buszuteilung bei der Übertragung von Messwerten (Aufgabe 6.8 mit Lösung)	297, 616

Sprachverarbeitung

Verarbeitung formaler und natürlicher Sprachen (Abschn. 1.2.1)	5
Darstellung von Elementen der natürlichen Sprache (Beispiel 4.7)	164
Kompilieren eines Lexikons (Aufgabe 3.25)	139
Akzeptor für Wörter mit der Endung „heit“ (Beispiel 4.3)	155
Deterministischer Akzeptor für Wörter mit der Endung „heit“ (Beispiel 4.9)	173
Sprache der Palindrome (Aufgabe 4.12)	185
Akzeptor für Zeichenketten mit geradzahlgiger Buchstabenanzahl und der Endung „11“ (Aufgabe 5.6 mit Lösung)	237, 609

Fertigungstechnik

Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen (Abschn. 1.2.4)	8
• Stanze	
Modellierung einer Stanze (Aufgabe 3.1)	68
Modellerweiterung um nichtdeterministische Zustandsübergänge (Aufgabe 4.1)	154
Zeitverhalten einer Stanze (Aufgabe 10.7)	574
• Roboter	
Handlungsplanung von Robotern (Beispiel 1.2)	9
Sortieren von Werkstücken durch einen Roboter (Beispiel 3.3)	71
Erweiterung des Robotermodells (Aufgabe 3.4 mit Lösung)	81, 586
Sprache eines Roboters (Beispiel 3.8)	88
Sprache des ungesteuerten Roboters (Aufgabe 3.8 mit Lösung)	90, 588
Minimierung des Robotermodells (Beispiel 3.16)	132
Spezifikation der Roboterbewegung durch einen regulären Ausdruck (Aufgabe 4.10 mit Lösung)	184, 603
Beschreibung der Roboterbewegung durch einen regulären Ausdruck (Aufgabe 4.15 mit Lösung)	185, 605
Entwurf einer Robotersteuerung (Aufgabe 5.1)	234
Steuerung eines Schweißroboters (Aufgabe 5.14)	257
• Werkzeugmaschinen mit Warteschlange	
Beschreibung einer Warteschlange als deterministischer Automat (Aufgabe 3.21 mit Lösung)	108, 597
Darstellung der Warteschlange als Markovkette (Beispiel 7.5)	347
Verhalten der Warteschlange (Aufgabe 7.6)	373

Verbesserung des Warteschlangenmodells (Aufgabe 7.7 mit Lösung)	373, 622
Verhalten zweier Werkzeugmaschinen mit Warteschlangen (Aufgabe 5.8 mit Lösung)	238, 611
Analyse des Durchsatzes einer Werkzeugmaschine (Aufgabe 7.14 mit Lösung)	376, 628
Bewertung der Arbeitsweise einer Werkzeugmaschine (Beispiel 7.20)	414
• Optimale Steuerung von Fertigungsprozessen	
Optimale Steuerung einer Werkzeugmaschine (Beispiel 7.22)	423
Optimale Steuerung eines sequenziellen Fertigungsprozesses (Beispiel 7.21)	419
Optimale Steuerung für das erweiterte Modell des Fertigungsprozesses (Aufgabe 7.28) ...	424
Optimale Steuerung eines zyklischen Fertigungsprozesses (Aufgabe 7.29)	424
• Fertigungszellen	
Darstellung der Ressourcenzuteilung als Automatenetz (Beispiel 5.5)	231
Darstellung der Ressourcenzuteilung durch ein Petrinetz (Aufgabe 6.5)	285
Zeitbewertete Beschreibung einer Fertigungszelle (Beispiel 9.1)	461
Erweiterung des Modells der Fertigungszelle (Aufgabe 9.1)	484
Eine Fertigungszelle als verallgemeinerter zeitbewerteter Automat (Beispiel 9.3)	471
Verhalten der Fertigungszelle (Aufgabe 9.4)	485
Kommunikationstechnik	
Modellierung und Analyse von Kommunikationsnetzen (Abschn. 1.2.6)	13
Schreiben eines SMS-Textes (Aufgabe 7.23 mit Lösung)	394, 629
Dekodierung einer mit Störungen übertragenen Zeichenkette (Aufgabe 7.26 mit Lösung) .	407, 633
• Telefonnetz	
Handhabung eines Kartentelefons (Aufgabe 1.5 mit Lösung)	22, 584
Sperrung der Vorwahl 0190 (Aufgabe 3.9 mit Lösung)	90, 589
Vermittlung von Telefongesprächen (Aufgabe 7.17 mit Lösung)	377, 629
• Netzwerkprotokolle	
Ereignisdiskrete Beschreibung einer Rechnerkommunikation (Beispiel 1.4)	14
Spezifikation eines Netzwerkprotokolls mit Hilfe eines deterministischen Automaten (Beispiel 3.4)	78
Modellierung eines einfachen Kommunikationsprotokolls (Aufgabe 9.2)	484

• Datenübertragung in Rechnernetzen

Kommunikation zwischen Rechnern über ein gemeinsames Netz (Beispiel 3.2)	67
Beschreibung des Übertragungsverhaltens eines Rechnernetzes als Bernoulliprozess (Beispiel 7.3)	340
Verhalten des Bernoulliprozesses (Beispiel 7.6)	349
Stationäres Verhalten der Datenübertragung (Aufgabe 7.11 mit Lösung)	374, 625
Mittlere Anzahl von Übertragungsversuchen beim WLAN (Beispiel 7.10)	365
Übertragungszeit für Datenpakete im WLAN (Beispiel 9.8)	513
Verhalten eines digitalen Übertragungsnetzes (Aufgabe 9.12)	520

Zuverlässigkeit technischer Systeme

Zuverlässigkeit eines Prozessrechners (Aufgabe 7.16)	377
Zuverlässigkeit eines Gerätes (Aufgabe 10.1 mit Lösung)	560, 651
Zeitverhalten der Zuverlässigkeit eines Gerätes (Aufgabe 10.9)	575
Ausfallverhalten eines Rechners (Aufgabe 10.2 mit Lösung)	560, 652

Fahrzeug- und Verkehrstechnik

Beschreibung eines Flugplatzes durch ein Petrinetz (Aufgabe 6.10)	298
Automatisches Garagentor (Aufgabe 3.2 mit Lösung)	80, 584
Modellierung einer Autowaschanlage (Aufgabe 6.13 mit Lösung)	315, 619
Modellbildung eines Verbrennungsmotors (Aufgabe 5.4 mit Lösung)	236, 607
Stau auf der Autobahn (Aufgabe A3.5)	676
Routenplanung in Manhattan (Beispiel 7.8)	358

• Fahrerassistenzsysteme

Ampel rot – Motor aus (Aufgabe 1.3 mit Lösung)	21, 582
Ereignisdiskrete Beschreibung eines <i>Tempomaten</i> (Aufgabe 3.16 mit Lösung)	106, 592

• Einrichtungen im Straßenverkehr

Mautstation <i>RUBCollect</i> (Aufgabe 4.2 mit Lösung)	154, 601
Auslegung einer Mautstation (Beispiel 9.11)	539
Modellierung einer Tankstelle (Aufgabe 6.3)	285
Wann müssen Sie tanken? (Aufgabe 10.8)	574
Verkehrszählung (Aufgabe 9.15)	520

• Steuerung einer Verkehrsampel

Beschreibung einer Verkehrsampel durch einen deterministischen Automaten (Beispiel 3.1)	62
Zeitbewertete Beschreibung einer Ampel (Aufgabe 9.7)	485
Entwurf einer Ampelsteuerung (Aufgabe 5.2)	235
Analyse einer Ampelsteuerung (Aufgabe 6.7)	296

• Modellierung des Schienenverkehrs

Fahrgastinformationssystem (Aufgabe 1.4)	21
Ereignisdiskrete Beschreibung einer Eisenbahnverbindung (Aufgabe 1.6)	22
Eisenbahnverkehr auf der Strecke Dortmund–Köln (Aufgabe 6.1 mit Lösung)	284, 613
Fahrplan für die Bochumer Straßenbahn (Aufgabe 8.3 mit Lösung)	454, 640

Elektronische Schaltungen

• Schaltungsentwurf und -analyse

Entwurf digitaler Schaltungen und Schaltkreise (Abschn. 1.2.3)	7
Beschreibung einer sequentiellen Schaltung durch einen E/A-Automaten (Beispiel 2.2)	44
Modellierung eines Schieberegisters (Beispiel 5.6)	241
Beschreibung eines RS-Flipflops (Aufgabe 3.18 mit Lösung)	106, 593
Beschreibung eines JK-Flipflops (Aufgabe 3.19 mit Lösung)	107, 594
Ereignisdiskrete Beschreibung eines Gleichspannungswandlers (Aufgabe 4.17 mit Lösung)	192, 606
Chaotisches Verhalten von Rückstellozillatoren (Aufgabe 9.10 mit Lösung)	486, 647

• Leiterkartenfertigung

Qualitätskontrolle einer Leiterkartenfertigung (Beispiel 7.1)	322
Erweiterte Qualitätskontrolle der Leiterkartenfertigung (Aufgabe 7.2 mit Lösung)	331, 620

Büroautomatisierung

Auswertung einer Bibliotheksdatenbank (Aufgabe 7.4 mit Lösung)	332, 622
Beschreibung von Verwaltungsvorgängen durch Σ -Automaten (Aufgabe 3.5 mit Lösung)	81, 587
Überprüfung der Rechtschreibung (Aufgabe 3.10 mit Lösung)	90, 590
Wissenschaftliche Texte in $\text{\LaTeX}$ (Aufgabe 4.22)	212

Beispiele aus dem täglichen Leben

Ereignisdiskrete Betrachtung technischer und nichttechnischer Systeme (Aufgabe 1.2 mit Lösung)	20, 581
Ereignisdiskrete Prozesse im täglichen Leben (Aufgabe 2.1)	46
Wettervorhersage (Aufgabe 7.18)	377
Verbesserte Wettervorhersage (Aufgabe 7.27 mit Lösung)	409, 635
Friseurbesuch (Aufgabe 9.19 mit Lösung)	540, 650
Kofferrückgabe am Flughafen (Aufgabe 5.9 mit Lösung)	238, 612
Zeitbewertete Beschreibung des Kofferbandes (Aufgabe 9.6 mit Lösung)	485, 645
Innenausbau eines Hauses (Aufgabe 6.2 mit Lösung)	285, 614
Kollisionsverhütung bei Kränen (Aufgabe 6.9 mit Lösung)	298, 617
Verhalten eines springenden Balls (Beispiel 9.5)	482
Sprache des Fußballschiedsrichters (Aufgabe 4.11)	184
Vereinfachung der Einkommensteuererklärung (Aufgabe 7.12 mit Lösung)	375, 625
• Würfelspiele	
„Mensch ärgere dich nicht!“ (Aufgabe 7.8)	374
Markoveigenschaft von drei Würfeln (Beispiel 7.7)	354
Würfelspiel mit vielen Personen (Beispiel 7.11)	367
Beschreibung eines Würfelspiels als Semi-Markovprozess (Aufgabe 10.5)	573
• Fahrkartenautomat	
Arbeitsweise eines Fahrkartenautomaten (Aufgabe 1.1)	20
Modellierung eines Fahrkartenautomaten (Aufgabe 5.15)	257
Beschreibung von <i>Quick Check-In</i> durch einen E/A-Automaten (Aufgabe 3.14)	105
• Fahrstuhl	
Sprache eines Fahrstuhls (Aufgabe 3.11 mit Lösung)	91, 590
Regulärer Ausdruck für die Sprache eines Fahrstuhls (Beispiel 4.10)	182
Grammatik der Fahrstuhlbewegung (Aufgabe 4.23)	213
Stochastisches Verhalten eines Fahrstuhls (Aufgabe 7.19)	378
Beschreibung einer gesteuerten Rolltreppe durch einen Rückführautomaten (Aufgabe 5.13)	256
• Waschmaschine	
Steuerung einer Waschmaschine (Beispiel 3.12)	104
Zeitbewertete Beschreibung einer Waschmaschine (Aufgabe 9.3)	484

- **Selbstbedienungsrestaurant**

Zubereitung von Currywurst (Aufgabe 6.4)	285
Fastfood-Restaurant <i>RUBfood</i> (Aufgabe 9.18 mit Lösung)	540, 650
Ereignisdiskrete Arbeitsweise eines Getränkeautomaten (Beispiel 1.1)	4
Modellierung eines Getränkeautomaten (Aufgabe 3.13)	105