

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele	xiii
Hinweise zum Gebrauch des Buches	xxi
1 Einführung in die Modellierung und Analyse ereignisdiskreter Systeme	1
1.1 Ereignisdiskrete Systeme	1
1.2 Anwendungsgebiete der Theorie ereignisdiskreter Systeme	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	7
1.2.4 Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen	9
1.2.5 Automatisierung diskreter Prozesse	10
1.2.6 Modellierung und Analyse von Kommunikations- und Rechnernetzen ..	14
1.2.7 Analyse von Wartesystemen	16
1.2.8 Zusammenfassung: Charakteristika ereignisdiskreter Systeme	17
1.3 Überblick über die Modellformen und Analysemethoden	18
Literaturhinweise	23
2 Diskrete Signale und Systeme	25
2.1 Grundbegriffe der Systemtheorie	25
2.2 Blockschaltbild	29
2.2.1 Elemente des Blockschaltbildes	29
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	41
2.4 Diskrete Systeme	42
2.4.1 Grundidee der ereignisdiskreten Modellbildung	42
2.4.2 Zustandsraumdarstellung	44
2.5 Eigenschaften diskreter Systeme	49
2.5.1 Asynchrone und getaktete Arbeitsweise	49
2.5.2 Kommunikation und Synchronisation	52

2.5.3	Kausalität	53
2.5.4	Nichtdeterminismus	53
2.5.5	Komplexität	56
2.6	Unterschiede und Gemeinsamkeiten diskreter und kontinuierlicher Systeme ..	57
	Literaturhinweise	59
3	Deterministische Automaten	61
3.1	Autonome deterministische Automaten	61
3.1.1	Definition	61
3.1.2	Automatengraph	64
3.1.3	Matrixdarstellung	65
3.1.4	Verhalten	67
3.1.5	Weitere Eigenschaften	69
3.1.6	Zustand deterministischer Automaten	71
3.2	Σ -Automaten	74
3.2.1	Definition	74
3.2.2	Verhalten	80
3.2.3	Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Σ -Automaten	83
3.3	Deterministische Automaten und reguläre Sprachen	88
3.3.1	Automaten als Akzeptoren und Sprachgeneratoren	88
3.3.2	Formale Sprachen	90
3.3.3	Verallgemeinerte Zustandsübergangsfunktion	92
3.3.4	Sprache deterministischer Automaten	94
3.4	Deterministische E/A-Automaten	98
3.4.1	Definition	98
3.4.2	Verhalten	106
3.4.3	Automatenabbildung	108
3.4.4	Mealy-Automat und Moore-Automat	110
3.4.5	Echtzeitautomaten	114
3.5	Analyse deterministischer Automaten	116
3.5.1	Erreichbarkeitsanalyse	116
3.5.2	Strukturelle Analyse deterministischer Automaten	120
3.5.3	Verifikation	124
3.6	Beziehungen zwischen Automaten	125
3.6.1	Äquivalenz von Σ -Automaten	125
3.6.2	Homomorphie und Isomorphie	126
3.6.3	Automaten mit äquivalenten Zuständen	130
3.6.4	Minimierung deterministischer Automaten	138
3.6.5	Erweiterung der Methoden auf E/A-Automaten	144
3.7	Erweiterungen	148
	Literaturhinweise	149

4	Nichtdeterministische Automaten	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 ϵ -Übergängen	164
4.2.3	Reguläre Sprachen	166
4.2.4	Akzeptoren für reguläre Sprachen	173
4.2.5	Pumping-Lemma	178
4.2.6	Vergleich der Sprachen von deterministischen und nichtdeterministischen Automaten	181
4.2.7	Ableitung des regulären Ausdrucks aus dem Automatengraphen	189
4.3	Nichtdeterministische E/A-Automaten	193
4.4	Analyse nichtdeterministischer Automaten	199
4.4.1	Erreichbarkeitsanalyse	199
4.4.2	Homomorphie und Isomorphie nichtdeterministischer Automaten	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	205
4.5.3	Chomsky-Hierarchie formaler Sprachen	209
4.5.4	Kontextfreie Sprachen	213
4.5.5	Turingmaschinen	217
	Literaturhinweise	219
5	Automatennetze	221
5.1	Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme	221
5.2	Zusammenschaltung von Σ -Automaten	223
5.2.1	Modellierungsziel	223
5.2.2	Produkt von Automaten	224
5.2.3	Parallele Komposition	235
5.2.4	Eigenschaften der Kompositionsoperatoren	244
5.3	Zusammenschaltung von E/A-Automaten	245
5.3.1	Modellierungsziel	245
5.3.2	Reihenschaltung	246
5.3.3	Rückführautomat	250
5.3.4	Allgemeine Automatennetze	260
5.3.5	Asynchrone Automatennetze	261
	Literaturhinweise	264

6	Petrinetze	267
6.1	Autonome Petrinetze	267
6.1.1	Grundidee	267
6.1.2	Definition	268
6.1.3	Verhalten	271
6.1.4	Matrixdarstellung	276
6.1.5	Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Petrinetze	281
6.1.6	Synchronisationsgraphen und Zustandsmaschinen	287
6.1.7	Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten	292
6.2	Analyse von Petrinetzen	294
6.2.1	Erreichbarkeitsanalyse	294
6.2.2	Invarianten	302
6.3	Interpretierte Petrinetze	308
6.3.1	Sprache von Petrinetzen	308
6.3.2	Steuerungstechnisch interpretierte Petrinetze	309
6.4	Erweiterungen	314
6.4.1	Petrinetze mit Test- und Inhibitorkanten	314
6.4.2	Petrinetze mit Stellen- und Kantenbewertungen	317
6.4.3	Hierarchische Petrinetze	322
	Literaturhinweise	324
7	Markovketten und stochastische Automaten	325
7.1	Modellierungsziel	325
7.2	Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung	326
7.2.1	Zufallsvariable	326
7.2.2	Erwartungswert	332
7.2.3	Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung	332
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit mehr als zwei Zufallsgrößen	337
7.2.5	Unabhängigkeit von Zufallsgrößen	338
7.3	Markovketten	341
7.3.1	Nichtdeterministische Automaten mit Wahrscheinlichkeitsbewertung	341
7.3.2	Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeitsverteilung	349
7.3.3	Markoveigenschaft	360
7.3.4	Verhalten von Markovketten	369
7.3.5	Strukturelle Eigenschaften	372
7.3.6	Verweilzeit der Markovkette in einem Zustand	374
7.3.7	Stationäre Wahrscheinlichkeitsverteilung	377
7.4	Stochastische Automaten	387
7.4.1	Definition	387
7.4.2	Verhalten	391
7.4.3	Stochastischer Operator	396
7.4.4	Spezielle stochastische Automaten	397
7.4.5	Viterbi-Algorithmus zur Lösung von Detektionsproblemen	403
	Literaturhinweise	419

8	Zeitbewertete Petrinetze	421
8.1	Ziele der Modellerweiterung	421
8.2	Petrinetze mit zeitbewerteten Transitionen	422
8.3	Zeitbewertete Synchronisationsgraphen	425
8.3.1	Zeitbewertete Synchronisationsgraphen ohne Eingang	425
8.3.2	Grundlagen der Max-plus-Algebra	429
8.3.3	Darstellung zeitbewerteter Synchronisationsgraphen mit Hilfe der Max-plus-Algebra	437
8.3.4	Verhalten zeitbewerteter Synchronisationsgraphen	443
8.3.5	Synchronisationsgraphen mit Eingang	448
8.3.6	Zusammenfassung	449
	Literaturhinweise	450
9	Zeitbewertete Automaten	451
9.1	Modellierungsziel	451
9.2	Zeitbewertete Automaten mit deterministischen Verweilzeiten	453
9.2.1	Autonome zeitbewertete Automaten	453
9.2.2	Erweiterung auf Σ -Automaten und E/A-Automaten	459
9.2.3	Zeitbewertete Beschreibung paralleler Prozesse	463
9.2.4	Ereignisse mit veränderlicher Lebensdauer	471
9.3	Zeitbewertete Automaten mit stochastischen Verweilzeiten	475
9.3.1	Punktprozesse	475
9.3.2	Definition und Verhalten des Poissonprozesses	477
9.3.3	Markoveigenschaft des Poissonprozesses	487
9.3.4	Punktprozesse mit zustandsabhängigen Übergangsraten	491
9.3.5	Punktprozesse mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Verweilzeiten	494
9.4	Wartesysteme	508
9.4.1	Grundgleichungen	508
9.4.2	Wartesysteme mit deterministischen Ankunfts- und Bedienzeiten	513
9.4.3	Wartesysteme mit stochastischen Ankunfts- und Bedienzeiten	516
9.4.4	Gesetz von LITTLE	519
9.4.5	Klassifikation von Wartesystemen	522
9.4.6	Poissonsche Wartesysteme	523
	Literaturhinweise	529
10	Kontinuierliche Markovketten und Semi-Markovprozesse	531
10.1	Modellierungsziel	531
10.2	Kontinuierliche Markovketten	534
10.2.1	Definition	534
10.2.2	Verhalten	539
10.2.3	Markoveigenschaft	543
10.2.4	Eingebettete diskrete Markovkette	544

10.3	Semi-Markovprozesse	549
10.3.1	Definition	549
10.3.2	Zustandsraumdarstellung	550
10.3.3	Interpretation von Semi-Markovprozessen	558
10.4	Strukturelle Eigenschaften von Markov- und Semi-Markovprozessen	561
	Literaturhinweise	562
Literaturverzeichnis		563

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	567
Anhang 2: Mengen, Relationen, Graphen, Matrizen	653
A2.1 Mengen	653
A2.2 Relationen	654
A2.3 Graphen	655
A2.3.1 Gerichtete Graphen	655
A2.3.2 Erreichbarkeitanalyse	658
A2.3.3 Bipartite Graphen	661
A2.4 Stochastische Matrizen	662
A2.5 Grundbegriffe der Komplexitätstheorie	663
Anhang 3: Beschreibung kontinuierlicher Systeme	665
A3.1 Zeitkontinuierliche Systeme	665
A3.2 Zeitdiskrete Systeme	669
Anhang 4: Fachwörter deutsch – englisch	671
Sachwortverzeichnis	675