

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 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 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 Blockschaltbild	27
2.2.1 Elemente des Blockschaltbildes	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	38
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	49

2.5.3	Kausalität	50
2.5.4	Nichtdeterminismus	51
2.5.5	Komplexität	54
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	Automatengraf	60
3.1.3	Matrixdarstellung	61
3.1.4	Verhalten	63
3.1.5	Weitere Eigenschaften	65
3.1.6	Zustand deterministischer Automaten	67
3.2	Σ -Automaten	70
3.2.1	Definition	70
3.2.2	Verhalten	76
3.2.3	Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Σ -Automaten	78
3.3	Deterministische Automaten und reguläre Sprachen	83
3.3.1	Automaten als Akzeptoren und Sprachgeneratoren	83
3.3.2	Formale Sprachen	85
3.3.3	Verallgemeinerte Zustandsübergangsfunktion	87
3.3.4	Sprache deterministischer Automaten	89
3.4	Deterministische E/A-Automaten	93
3.4.1	Definition	93
3.4.2	Verhalten	101
3.4.3	Automatenabbildung	103
3.4.4	Mealy-Automat und Moore-Automat	104
3.4.5	Echtzeitautomaten	108
3.5	Analyse deterministischer Automaten	111
3.5.1	Erreichbarkeitsanalyse	111
3.5.2	Strukturelle Analyse deterministischer Automaten	115
3.5.3	Verifikation	118
3.6	Beziehungen zwischen Automaten	119
3.6.1	Äquivalenz von Σ -Automaten	120
3.6.2	Homomorphie und Isomorphie	120
3.6.3	Automaten mit äquivalenten Zuständen	125
3.6.4	Minimierung deterministischer Automaten	133
3.6.5	Erweiterung der Methoden auf E/A-Automaten	139
3.7	Erweiterungen	142
	Literaturhinweise	143

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	159
4.2.4	Akzeptoren für reguläre Sprachen	167
4.2.5	Pumping-Lemma	171
4.2.6	Vergleich der Sprachen von deterministischen und nichtdeterministischen Automaten	175
4.2.7	Ableitung des regulären Ausdrucks aus dem Automatengrafen	182
4.3	Nichtdeterministische E/A-Automaten	186
4.4	Analyse nichtdeterministischer Automaten	192
4.4.1	Erreichbarkeitsanalyse	192
4.4.2	Homomorphie und Isomorphie nichtdeterministischer Automaten	193
4.4.3	Minimierung nichtdeterministischer Automaten	196
4.5	Formale Sprachen und Grammatiken	197
4.5.1	Zielstellung	197
4.5.2	Darstellung regulärer Sprachen durch Typ-3-Grammatiken	198
4.5.3	Chomsky-Hierarchie formaler Sprachen	202
4.5.4	Kontextfreie Sprachen	206
4.5.5	Turingmaschinen	210
	Literaturhinweise	212
5	Automatennetze	213
5.1	Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme	213
5.2	Zusammenschaltung von Σ -Automaten	215
5.2.1	Modellierungsziel	215
5.2.2	Produkt von Automaten	216
5.2.3	Parallele Komposition	225
5.2.4	Eigenschaften der Kompositionsoptoren	234
5.3	Zusammenschaltung von E/A-Automaten	234
5.3.1	Modellierungsziel	234
5.3.2	Reihenschaltung	235
5.3.3	Rückführautomat	239
5.3.4	Allgemeine Automatennetze	248
5.3.5	Asynchrone Automatennetze	250
	Literaturhinweise	253

6 Petrinetze	255
6.1 Autonome Petrinetze	255
6.1.1 Grundidee	255
6.1.2 Definition	256
6.1.3 Verhalten	259
6.1.4 Matrixdarstellung	264
6.1.5 Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch Petrinetze	269
6.1.6 Synchronisationsgrafen und Zustandsmaschinen	275
6.1.7 Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten	279
6.2 Analyse von Petrinetzen	282
6.2.1 Erreichbarkeitsanalyse	282
6.2.2 Invarianten	290
6.3 Interpretierte Petrinetze	296
6.3.1 Sprache von Petrinetzen	296
6.3.2 Steuerungstechnisch interpretierte Petrinetze	297
6.4 Erweiterungen	301
6.4.1 Petrinetze mit Test- und Inhibitorkanten	301
6.4.2 Petrinetze mit Stellen- und Kantenbewertungen	305
6.4.3 Hierarchische Petrinetze	310
Literaturhinweise	311
7 Markovketten und stochastische Automaten	313
7.1 Modellierungsziel	313
7.2 Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung	314
7.2.1 Zufallsvariable	314
7.2.2 Erwartungswert	320
7.2.3 Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung	320
7.2.4 Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit mehr als zwei Zufallsgrößen	324
7.2.5 Unabhängigkeit von Zufallsgrößen	326
7.3 Markovketten	328
7.3.1 Nichtdeterministische Automaten mit Wahrscheinlichkeitsbewertung	329
7.3.2 Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeitsverteilung	336
7.3.3 Markoveigenschaft	343
7.3.4 Verhalten von Markovketten	352
7.3.5 Strukturelle Eigenschaften	355
7.3.6 Verweilzeit der Markovkette in einem Zustand	357
7.3.7 Stationäre Wahrscheinlichkeitsverteilung	360
7.4 Stochastische Automaten	366
7.4.1 Definition	366
7.4.2 Verhalten	370
7.4.3 Stochastischer Operator	375
7.4.4 Spezielle stochastische Automaten	376
7.4.5 Viterbi-Algorithmus zur Lösung von Detektionsproblemen	382
Literaturhinweise	396

8 Zeitbewertete Petrinetze	397
8.1 Ziele der Modellerweiterung	397
8.2 Petrinetze mit zeitbewerteten Transitionen	398
8.3 Zeitbewertete Synchronisationsgrafen	401
8.3.1 Zeitbewertete Synchronisationsgrafen ohne Eingang	401
8.3.2 Grundlagen der Max-plus-Algebra	405
8.3.3 Darstellung zeitbewerteter Synchronisationsgrafen mit Hilfe der Max-plus-Algebra	413
8.3.4 Verhalten zeitbewerteter Synchronisationsgrafen	419
8.3.5 Synchronisationsgrafen mit Eingang	424
8.3.6 Zusammenfassung	425
Literaturhinweise	426
9 Zeitbewertete Automaten	427
9.1 Modellierungsziel	427
9.2 Zeitbewertete Automaten mit deterministischen Verweilzeiten	429
9.2.1 Autonome zeitbewertete Automaten	429
9.2.2 Erweiterung auf Σ -Automaten und E/A-Automaten	435
9.2.3 Zeitbewertete Beschreibung paralleler Prozesse	439
9.2.4 Ereignisse mit veränderlicher Lebensdauer	447
9.3 Zeitbewertete Automaten mit stochastischen Verweilzeiten	450
9.3.1 Punktprozesse	450
9.3.2 Definition und Verhalten des Poissonprozesses	452
9.3.3 Markoveigenschaft des Poissonprozesses	462
9.3.4 Punktprozesse mit zustandsabhängigen Übergangsraten	466
9.3.5 Punktprozesse mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Verweilzeiten	469
9.4 Wartesysteme	483
9.4.1 Grundgleichungen	483
9.4.2 Wartesysteme mit deterministischen Ankunfts- und Bedienzeiten	487
9.4.3 Wartesysteme mit stochastischen Ankunfts- und Bedienzeiten	490
9.4.4 Gesetz von LITTLE	493
9.4.5 Klassifikation von Wartesystemen	496
9.4.6 Poissonsche Wartesysteme	497
Literaturhinweise	502
10 Kontinuierliche Markovketten und Semi-Markovprozesse	503
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
Literaturverzeichnis	535

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	539
Anhang 2: Mengen, Relationen, Grafen	611
A1.1 Mengen	611
A1.2 Relationen	612
A1.3 Grafen	613
A1.3.1 Gerichtete Grafen	613
A1.3.2 Erreichbarkeitanalyse	616
A1.3.3 Bipartite Grafen	619
A1.4 Stochastische Matrizen	619
A1.5 Grundbegriffe der Komplexitätstheorie	620
Anhang 3: Beschreibung kontinuierlicher Systeme	621
A1.1 Zeitkontinuierliche Systeme	621
A1.2 Zeitdiskrete Systeme	625
Anhang 4: Fachwörter deutsch – englisch	627
Sachwortverzeichnis	631