

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Anwendungsbeispiele</b> .....	xiii
<b>Hinweise zum Gebrauch des Buches</b> .....	xxi
<b>1 Einführung in die Modellierung und Analyse ereignisdiskreter Systeme</b> .....	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
<b>2 Diskrete Signale und Systeme</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Deterministische Automaten .....</b>	<b>57</b>
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	$\Sigma$ -Automaten .....	70
3.2.1	Definition .....	70
3.2.2	Verhalten .....	76
3.2.3	Modellierung ereignisdiskreter Systeme durch $\Sigma$ -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 $\Sigma$ -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

<b>4</b>	<b>Nichtdeterministische Automaten</b>	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 $\varepsilon$ -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 Automatengraphen	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
<b>5</b>	<b>Automatennetze</b>	213
5.1	Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme	213
5.2	Zusammenschaltung von $\Sigma$ -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 Kompositionsoperatoren	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

<b>6</b>	<b>Petrinetze</b>	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	Synchronisationsgraphen 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
<b>7</b>	<b>Markovketten und stochastische Automaten</b>	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

<b>8</b>	<b>Zeitbewertete Petrinetze</b>	397
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 Max-plus-Algebra	413
8.3.4	Verhalten zeitbewerteter Synchronisationsgraphen	419
8.3.5	Synchronisationsgraphen mit Eingang	424
8.3.6	Zusammenfassung	425
	Literaturhinweise	426
<b>9</b>	<b>Zeitbewertete Automaten</b>	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 $\Sigma$ -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
<b>10</b>	<b>Kontinuierliche Markovketten und Semi-Markovprozesse</b>	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
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>535</b>

## Anhänge

<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben .....</b>	<b>539</b>
<b>Anhang 2: Mengen, Relationen, Grafen .....</b>	<b>611</b>
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
<b>Anhang 3: Beschreibung kontinuierlicher Systeme .....</b>	<b>621</b>
A1.1 Zeitkontinuierliche Systeme .....	621
A1.2 Zeitdiskrete Systeme .....	625
<b>Anhang 4: Fachwörter deutsch – englisch .....</b>	<b>627</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>631</b>