
Inhaltsverzeichnis

Teil I Methoden und Anwendungen

1	Einführung und grundlegende Begriffe	3
1.1	Simulation als Werkzeug zur Prozessverbesserung	5
1.1.1	Prozessexploration	6
1.1.2	Zielsetzung	6
1.1.3	Prozessmodellierung	8
1.1.4	Optimierungszyklus	8
1.2	Systeme und Prozesse	10
1.2.1	Systeme	10
1.2.2	Ereignisse und Aktivitäten	11
1.2.3	Nebenläufigkeit von Aktivitäten	13
1.2.4	Abhängige und unabhängige Ereignisse	13
1.2.5	Prozesse	15
1.3	Übungsaufgaben	17
2	Simulationstechniken für diskrete Prozesse	21
2.1	Ereignisorientierte Simulation	22
2.1.1	Das Prinzip der ereignisorientierten Simulation	22
2.1.2	Ereignisorientierte Simulation einer Warteschlange	24
2.2	Prozessorientierte Simulation	26
2.2.1	Prozessorientierte Simulation einer Warteschlange	26
2.2.2	Vergleich der ereignisorientierten und der prozessorientierten Simulation	30
2.3	Periodenorientierte Simulation	30
2.3.1	Das Prinzip der periodenorientierten Simulation	30
2.3.2	Periodenorientierte Simulation einer Lagerhaltung	31
2.4	Übungsaufgaben	33
3	Simulation zufälliger Ereignisse	39
3.1	Erzeugung von gleichverteilten Zufallszahlen	40

3.1.1	Lineare Kongruenzmethoden	40
3.1.2	Wahl der Parameter bei linearen Kongruenzmethoden	42
3.2	Erzeugung von Zufallszahlen mit beliebiger Verteilung	43
3.2.1	Die inverse Transformationsmethode	44
3.2.2	Gleichverteilte Zufallszahlen auf einem beliebigen Intervall	45
3.2.3	Exponentialverteilte Zufallszahlen	46
3.2.4	Erlang-verteilte Zufallszahlen	48
3.2.5	Normalverteilte Zufallszahlen	49
3.2.6	Binomialverteilte Zufallsvariablen	51
3.2.7	Poisson-verteilte Zufallsvariablen	52
3.3	Bewertung von Zufallszahlengeneratoren	54
3.3.1	Der Chi-Quadrat-Test	54
3.3.2	Der Run-Test	57
3.3.3	Eine empirische Methode zur Gütebewertung von Zufallszahlengeneratoren	59
3.4	Implementierung mehrerer unabhängiger Zufallszahlengeneratoren	60
3.5	Übungsaufgaben	61
4	Statistische Auswertung von Simulationsexperimenten	63
4.1	Zeitpfade	64
4.2	Anlaufphase und stationäre Phase	65
4.3	Klassifikation von Ergebnisdaten	66
4.4	Schätzung von Erwartungswerten	67
4.4.1	Das Ensemblemittel	67
4.4.2	Das Zeitmittel	67
4.4.3	Qualitative Größen	69
4.5	Schätzung von Varianz und Standardabweichung	69
4.6	Beispiele für die statistische Auswertung von Simulationsexperimenten	70
4.7	Übungsaufgaben	73
5	Ereignisorientierte Simulation stochastischer diskreter Prozesse	75
5.1	Eine grafische Beschreibungssprache für stochastische diskrete Prozesse	76
5.1.1	Bearbeitungsstationen	77
5.1.2	Quellen und Senken	77
5.1.3	Verbindungen	77
5.1.4	Aufteilung des Flusses	78
5.1.5	Zusammenführung des Flusses	79
5.1.6	Zusammenfassung	79
5.2	Ereignisorientierte Simulation von Bearbeitungsstationen	80
5.2.1	Varianten von Bearbeitungsstationen	82
5.2.2	Wartung einer Bearbeitungsstation	86

5.2.3	Ausfall einer Bearbeitungsstation mit direkt anschließender Reparatur	88
5.2.4	Ausfall einer Bearbeitungsstation mit eventueller Wartezeit vor der Reparatur	90
5.2.5	Frühzeitiges Verlassen einer Warteschlange	91
5.3	Behandlung simultaner Ereignisse	92
5.4	Complex Event Processing	94
5.5	Ereignisorientierte Simulation von sequenziellen und parallelen Abläufen	98
5.5.1	Quellen und Senken	98
5.5.2	Sequenzielle Abläufe mit Steuerung nach dem Push-Prinzip	99
5.5.3	Blockade an beschränkten Warteschlangen	101
5.5.4	Eine einfache Deadlock-Situation	103
5.5.5	Parallele Abläufe mit Steuerung nach dem Push-Prinzip	104
5.5.6	Sequenzielle Abläufe mit Steuerung nach dem Pull-Prinzip – Kanban-Steuerung	107
5.5.7	Ablaufbezogene Kennzahlen für stochastische Prozesse	110
5.6	Übungsaufgaben	111
6	Anwendungsbeispiele für die Simulation diskreter Prozesse	117
6.1	Reihenfolgeplanung	118
6.2	Straßenverkehr	121
6.3	Menschenströme	123
6.4	Geschäftsprozesse	125
6.5	Lagerhaltung	127
6.6	Übungsaufgaben	130
7	Modellierung und Simulation von Geschäftsprozessen	139
7.1	Ereignisgesteuerte Prozessketten	140
7.2	Business Process Model and Notation	143
7.2.1	Die Fluss-Objekte Ereignis, Aktivität, Gateway	144
7.2.2	Darstellung des Flusses	146
7.2.3	Aufteilung des Flusses	146
7.2.4	Zusammenführung des Flusses	149
7.2.5	Modellierung von Wiederholungen	152
7.2.6	Strukturierung von Prozessen	152
7.2.7	Simulationstools für BPMN-Modelle	153
7.3	Semantik für Prozessdiagramme	154
7.4	Lösungsansätze für die synchronisierende Vermischung	157
7.4.1	Ersetzung von OR durch AND und XOR	157
7.4.2	Wohlgeformte Prozessdiagramme	158
7.5	Ereignisorientierte Simulation von Verzweigungen	159
7.5.1	Simulation von AND-Verzweigungen	159
7.5.2	Simulation von OR-Verzweigungen	160

7.6	Zusammenfassung	162
7.7	Übungsaufgaben	163

Teil II Theoretische Grundlagen

8	Grundlagen aus der Stochastik	167
8.1	Wahrscheinlichkeit	167
8.2	Zufallsvariablen und ihre Verteilung	170
8.2.1	Diskrete Zufallsvariablen	170
8.2.2	Stetige Zufallsvariablen	171
8.3	Übungsaufgaben	172
9	Theorie der Markov-Prozesse	175
9.1	Übergangswahrscheinlichkeiten	176
9.2	Die Markov-Eigenschaft	176
9.3	Die Gedächtnislosigkeit der Exponentialverteilung	177
9.4	Gewichtete Graphen zur Darstellung von Markov-Prozessen	179
9.4.1	Intensitätsgraphen	180
9.4.2	Übergangsgraphen	182
9.5	Irreduzible Markov-Prozesse	185
9.6	Stationäre Verteilungen	187
9.7	Bestimmung der stationären Verteilung	188
9.8	Periodenorientierte Simulation von Markov-Prozessen	189
9.9	Übungsaufgaben	191
10	Warteschlangentheorie	193
10.1	Grundlagen der Warteschlangentheorie	193
10.2	Klassifikation von Warteschlangensystemen	195
10.3	Ankunftsrate und Bedienrate	196
10.4	Verkehrsdichte und Auslastung	197
10.5	Das Gesetz von Little	198
10.6	$M/M/1/n$ - und $M/M/1$ -Systeme	199
10.6.1	Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten p_i	199
10.6.2	Bestimmung der Größen L , L_q , W , W_q	203
10.6.3	Die Verteilung von Wartezeit und Verweilzeit in $M/M/1$ -Systemen	206
10.7	$M/M/c$ -Systeme	208
10.7.1	Vergleich zweier Bedienstationen mit einer Bedienstation mit doppelter Bedienrate	209
10.8	$M/G/1$ -Systeme	210
10.9	Warteschlangennetze	212
10.10	Übungsaufgaben	213
11	Grafische Modellierungsformalismen für diskrete Prozesse	215
11.1	Verknüpfungen der Aussagenlogik	216

11.2 Petri-Netze	217
11.3 Übungsaufgaben	223
Lösungshinweise für ausgewählte Übungen	225
Sachverzeichnis	231