

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Methoden und Anwendungen

<b>1</b>	<b>Einführung und grundlegende Begriffe</b>	<b>3</b>
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
<b>2</b>	<b>Simulationstechniken für diskrete Prozesse</b>	<b>21</b>
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
<b>3</b>	<b>Simulation zufälliger Ereignisse</b>	<b>39</b>
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
<b>4</b>	<b>Statistische Auswertung von Simulationsexperimenten . . . . .</b>	<b>63</b>
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
<b>5</b>	<b>Ereignisorientierte Simulation stochastischer diskreter Prozesse . . . . .</b>	<b>75</b>
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
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiele für die Simulation diskreter Prozesse . . . . .</b>	<b>117</b>
6.1	Reihenfolgeplanung . . . . .	118
6.2	Straßenverkehr . . . . .	121
6.3	Menschenströme . . . . .	123
6.4	Geschäftsprozesse . . . . .	125
6.5	Lagerhaltung . . . . .	127
6.6	Übungsaufgaben . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Modellierung und Simulation von Geschäftsprozessen . . . . .</b>	<b>139</b>
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
<b>Teil II Theoretische Grundlagen</b>		
<b>8</b>	<b>Grundlagen aus der Stochastik</b>	<b>167</b>
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
<b>9</b>	<b>Theorie der Markov-Prozesse</b>	<b>175</b>
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
<b>10</b>	<b>Warteschlangentheorie</b>	<b>193</b>
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
<b>11</b>	<b>Grafische Modellierungsformalismen für diskrete Prozesse</b>	<b>215</b>
11.1	Verknüpfungen der Aussagenlogik	216

---

11.2	Petri-Netze . . . . .	217
11.3	Übungsaufgaben . . . . .	223
	<b>Lösungshinweise für ausgewählte Übungen . . . . .</b>	<b>225</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>231</b>