

---

# 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<br>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<br>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<br>von Zufallszahlengeneratoren . . . . .  | 59        |
| 3.4      | Implementierung mehrerer unabhängiger<br>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<br>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<br>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 |

## Teil II Theoretische Grundlagen

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>8</b>  | <b>Grundlagen aus der Stochastik</b>   | 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 |
| <b>9</b>  | <b>Theorie der Markov-Prozesse</b>   | 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 |
| <b>10</b> | <b>Warteschlangentheorie</b>   | 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<br>in $M/M/1$ -Systemen                 | 206 |
| 10.7      | $M/M/c$ -Systeme   | 208 |
| 10.7.1    | Vergleich zweier Bedienstationen mit einer Bedienstation<br>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>                      | 215 |
| 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> |



<http://www.springer.com/978-3-642-34870-9>

Simulation diskreter Prozesse

Methoden und Anwendungen

Hedtstück, U.

2013, XIII, 235 S. 232 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-34870-9