

1	Einleitung	1
2	Simulation	3
2.1	Modellierung	4
2.1.1	Bonini-Paradoxon	5
2.1.2	Experimentierfähiges Modell	6
2.1.3	Kopplung von Modell und Realität	10
2.2	Simulationsmethoden	12
2.2.1	Deterministische Simulation	12
2.2.2	Stochastische Simulation	13
2.2.3	Statische und dynamische Simulation	14
2.2.4	Kontinuierliche und diskrete Simulation	14
2.2.5	Lokale und verteilte Simulation	15
2.2.6	Ereignisorientierte Simulation	15
2.3	Einsatzgebiete ereignisorientierter stochastischer Simulation	16
2.3.1	Wann ist Simulation notwendig?	16
2.3.2	Wann sind Simulationsmethoden einsetzbar?	19
2.3.3	Wo wird Simulation eingesetzt?	22
2.3.4	Das Unerwartete erwarten	24
2.4	Monte-Carlo-Methoden	25
2.4.1	Monte-Carlo-Integration	28
2.4.2	Beispiele für die Monte-Carlo-Integration	31
2.4.3	Monte-Carlo-Simulation	34
2.5	Gesetz der großen Zahlen	36
2.6	Funktionsweise ereignisorientierter stochastischer Simulation	39
2.6.1	Ereignisse und Regeln	39
2.6.2	Regelsatz für ein einfaches Callcenter-System	40
2.6.3	Ablauf des Simulationsprozesses	42
2.6.4	Komponenten eines ereignisorientierten stochastischen Simulators	44
3	Warteschlangentheorie	47
3.1	Determinismus versus reale Welt	47
3.1.1	Getaktete Bediensysteme	48
3.1.2	Stochastische Bedienzeiten	49

3.1.3	Stochastische Zwischenankunftszeiten	49
3.1.4	Erste Ergebnisse.	50
3.2	Grundbegriffe der Warteschlangentheorie	51
3.2.1	Grundmodell der Warteschlangentheorie	52
3.2.2	Arbeitslast und Auslastung	54
3.2.3	Warteschlangenlänge und Anzahl an Kunden im System	55
3.2.4	Kendall-Notation	56
3.2.5	Stationär und transient	61
3.2.6	Wartezeit und Warteschlangenlänge	62
3.3	Markov-Modelle	66
3.3.1	Bediensysteme als Markov-Ketten	68
3.3.2	Bestimmung der Wartezeitenverteilung bei Markov-Modellen	69
3.4	Erlang-B- und Erlang-C-Formel	71
3.4.1	M/M/1-System.	72
3.4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis eines M/M/1-Systems	74
3.4.3	M/M/c-System	77
3.4.4	Economy of Scale	81
3.4.5	M/M/c/c-System	82
3.4.6	Berechnung der Modelle	84
3.5	Modelle mit allgemeinen Verteilungen	84
3.5.1	GI/G/c-System	85
3.5.2	$GI^{b_1}/G^{b_2}/c$ -System	87
3.5.3	Warteschlangen-Rechner	89
3.6	System-Design	90
4	Eingabeparameter.	95
4.1	Mittelwert und Erwartungswert	96
4.1.1	Wofür wurden die Daten ursprünglich erfasst?	97
4.1.2	Statistik, Stochastik und zurück.	99
4.1.3	Umgang mit Ausreißerwerten	101
4.2	Streuumaße	104
4.2.1	Stichprobenvarianz	105
4.2.2	Stichprobenstandardabweichung	106
4.2.3	Variationskoeffizient	107
4.3	Verteilungsanpassung.	110
4.3.1	Verteilungsfunktionen im Warteschlangensimulator.	111
4.3.2	Eigenschaften einiger wichtiger Verteilungsfunktionen	112
4.3.3	Automatisierte Verteilungsanpassung mit dem Warteschlangensimulator.	114
4.4	Kalibrierung.	118
4.4.1	Funktionsweise der Parameterkalibrierung	121

5	Modellierung mit dem Warteschlangensimulator	125
5.1	Voraussetzungen und Installation	125
5.1.1	Systemvoraussetzungen	125
5.1.2	Download und Installation des Warteschlangensimulators	127
5.2	Programmoberfläche	128
5.2.1	Modell-Editor und Simulationsergebnisse	129
5.2.2	Modell- und Statistikdateien	129
5.2.3	Vertikale Symbolleiste des Modell-Editors	130
5.2.4	Zeichenfläche des Modell-Editors	131
5.3	Erstellung eines ersten Modells	132
5.3.1	Station: Kundenquelle	134
5.3.2	Rechenausdrücke erstellen	140
5.3.3	Station: Bedienstation	143
5.3.4	Station: Ausgang	149
5.3.5	Modelleigenschaftendialog	151
5.3.6	Schnelle Variation von Parametern	158
5.3.7	Online-Hilfe	158
5.3.8	Modellgenerator	160
5.4	Simulation, Animation und Ergebnisausgabe	161
5.4.1	Simulation von Modellen	162
5.4.2	Vergleich der Simulationsergebnisse mit analytischen Rechnungen	166
5.4.3	Animation von Modellen	167
6	Interpretation der Ergebnisse	173
6.1	Mittelwerte und Varianzen	174
6.2	Konfidenzintervalle	175
6.2.1	Konfidenzintervalle bei Bediensystemen/Output-Analyse	176
6.2.2	Grenzen der Genauigkeit	180
6.3	Poisson Arrivals See Time Averages	181
7	Typische Fragestellungen	183
7.1	Streuung und Verteilungstyp der Bedienzeiten	183
7.1.1	Variation der Bedienzeitverteilung	184
7.1.2	Bus-Stopp-Paradoxon	187
7.1.3	Homogenisierung des Kundenankunftsstroms	188
7.2	Ungeduldige Kunden und Wiederholer	189
7.2.1	Ungeduldige Kunden	190
7.2.2	Wiederholer	196
7.2.3	Weiterleitungen und Netze	205
7.3	Economy of Scale	206
7.4	Prioritäten	208
7.4.1	Prioritäten im Warteschlangensimulator	209
7.4.2	Kundenprioritäten innerhalb eines Kundentyps	211

7.4.3	Priorisierung nach Lieferterminen	215
7.4.4	Kundenprioritäten bei mehreren Kundentypen	218
7.5	Zuweisungsstrategien	225
7.5.1	Einfluss der Varianz der Bedienzeiten	230
7.6	Push-/Pull-Produktion	231
7.6.1	Push-Produktion bzw. schiebende Produktion	231
7.6.2	Pull-Produktion bzw. ziehende Produktion	232
7.6.3	Pull-Produktion im Warteschlangensimulator	233
7.6.4	Vergleich von Push- und Pull-Produktion	238
7.6.5	Dilemma der Ablaufplanung	242
7.6.6	Begrenzung des Bestands bei komplexeren Produktionen/Umgang mit Ausfällen	243
7.7	Gemeinsame Lager	243
7.7.1	Modellierung eines gemeinsamen Lagers	246
7.7.2	Werkstattfertigung versus strenger Fließfertigung	248
7.7.3	Auswirkung der Größe eines gemeinsamen Lagers	250
7.7.4	Reservierung von Lagerkapazität	251
7.8	Warteschlangenlängenabhängige Bedienzeiten	252
7.9	Bedieneranzahl nach Warteschlangenlänge	254
8	Fortgeschrittene Funktionen	259
8.1	Kunden- und Bedientypen	259
8.1.1	Kundentypen	259
8.1.2	Bedientypen	263
8.1.3	Beispiel für Kundentypen mit verschiedenen Eigenschaften	265
8.1.4	Beispiel für geteilte Nutzung von Ressourcen	268
8.1.5	Beispiel für geteilte Nutzung von Ressourcen – mit Bedienalternativen	270
8.2	Batch-Ankünfte und Batch-Bedienungen	272
8.2.1	Batch-Ankünfte	273
8.2.2	Batch-Bedienungen	277
8.2.3	Batch-Bedienungen und Kundentypen	280
8.2.4	Kombinierte Batch-Ankünfte und Batch-Bedienungen	281
8.2.5	Temporäre und permanente Batch-Bildung	282
8.2.6	Bedienungen mit kundentypabhängigen Batch-Größen	290
8.2.7	Zerteilen-Stationen	291
8.2.8	Zusammenführen-Stationen	292
8.2.9	Ausleiten-Stationen	296
8.3	Transporte	297
8.3.1	Direkte Transporte	297
8.3.2	Transporte mit Transportern	303
8.3.3	Fertigungspläne	313

8.3.4	Fließbandtransporte	316
8.3.5	Teleport-Transporte	317
8.4	Zeitpläne	317
8.4.1	Kundenankünfte nach Zeitplänen	319
8.4.2	Schichtpläne für Ressourcen	320
8.4.3	Erfassung des zeitlichen Verlaufs von Kenngrößen	322
8.5	Rüstzeiten und Kampagnen	324
8.6	Ausfälle	332
8.6.1	Ausfälle versus Puffer	333
8.6.2	Ausfälle versus warteschlangenabhängige Bedienzeiten	336
8.7	Kosten	339
8.7.1	Kosten der Bedienstationen	340
8.7.2	Kosten der Bediener	341
8.7.3	Kosten der Kunden	342
8.7.4	Sonstige Kosten	343
8.8	Zeitkontinuierliche Werte	344
8.8.1	Analoger-Wert-Stationen	345
8.8.2	Tank-Stationen	348
8.8.3	Verwendung der Simulationszeit	350
8.9	Geschlossene Warteschlangennetze	352
8.9.1	Modellierung von geschlossenen Warteschlangennetzen	353
8.9.2	Statistikerfassung bei geschlossenen Warteschlangennetzen	355
8.10	Flusssteuerung	356
8.10.1	Verzweigungen	356
8.10.2	Schleifen	357
8.11	Exakt reproduzierbare Ergebnisse	358
8.12	Weitere Stationstypen	360
8.12.1	Aktionen	360
8.12.2	Referenzen	361
8.12.3	Untermodele	361
8.12.4	Interaktive Animationselemente	362
9	Automatisierung	365
9.1	Aufzeichnung von Simulationsläufen	365
9.1.1	Aufzeichnung der Ereignisse	366
9.1.2	Logging-Ausgabe während der Animation	366
9.1.3	Auswertung von Ausdrücken und Ausführung von Skripten während der Animation	367
9.1.4	Aufzeichnung von Animationsvideos	368
9.2	Reportgenerierung und Filterung der Ergebnisse	369
9.2.1	Zusammenfassungen	370
9.2.2	Filtern der Ergebnisse	371

9.3	Ein- und Ausgabe-Stationen	372
9.3.1	Tabellenquellen	372
9.3.2	Laden von Werten während der Simulation	375
9.3.3	Speichern von Werten während der Simulation	376
9.3.4	Datenaufzeichnung-Stationen	377
9.4	Modelle vergleichen	377
9.5	Parameterreihen	379
9.5.1	Beispiel	383
9.5.2	Automatisierung von Simulationen mit Skripten	388
9.5.3	Varianzanalyse	389
9.6	Optimierer	391
9.6.1	Optimierungsalgorithmen	393
9.6.2	Beispiel	395
9.7	Netzwerksimulation	398
9.7.1	Client für Netzwerksimulation	398
9.7.2	Server für Netzwerksimulation	399
9.7.3	Webserver	399
9.8	Kommandozeilenbetrieb	401
9.8.1	Aufrufarten des Warteschlangensimulators	402
9.8.2	Simulation	402
9.8.3	Ergebnisse verarbeiten	404
9.8.4	Parameterreihen	406
9.8.5	Optimierung	407
9.8.6	Serverbetrieb	407
9.8.7	Interaktiver Kommandozeilenmodus	409
Anhang A Wahrscheinlichkeitsverteilungen		411
Anhang B Zufallszahlen		427
Anhang C Beweise der Erlang-Formeln		439
Anhang D Glossar		457
Anhang E Formelsammlung		475
Anhang F Bezeichnungen		485
Literatur		487
Stichwortverzeichnis		491