

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Begriff der Simulation	5
2.2 Modelle und Systeme	5
2.3 Kontinuierliche Simulation	6
2.4 Diskrete Simulation	7
2.5 Realisierung der Simulation auf dem Computer	7
2.5.1 Höhere Programmiersprachen	7
2.5.2 Simulationssprachen	8
2.5.3 Simulatoren	10
2.6 Einsatz der Simulation	10
2.7 Entwicklungen im Hard- und Softwarebereich und deren Auswirkungen auf die Simulation	12
<b>3 Problembereiche im Rahmen der Simulation</b>	<b>15</b>
3.1 Rechenzeitaufwand bei Simulationen	15
3.1.1 Komplexität von Modellen	15
3.1.2 Notwendigkeit von Testläufen und Experimenten	16
3.2 Verfügbarer Hauptspeicher bei Simulationen	18
3.2.1 Diskrepanz zwischen vorhandenem und nutzbarem Hauptspeicher	18
3.2.2 Speicherkonzepte kommerzieller Simulationssysteme	19
3.3 Beziehung zwischen Simulationsexperten und Anwendern	21
3.3.1 Unterschiedliche Fachkenntnisse und Fähigkeiten	22
3.3.2 Unterstützungskonzepte	23

---

<b>4 Grundsätzliches Lösungskonzept</b>	<b>27</b>
4.1 Ganzheitlicher Ansatz - Entwicklung eines Simulationssystems	27
4.2 Allgemeine Ziele und Grundideen	28
<b>5 Diskrete Simulation</b>	<b>31</b>
5.1 Grundbegriffe der zeitdiskreten Simulation	31
5.2 Arten diskreter Simulation	33
5.2.1 Zeitgesteuerte Simulation	34
5.2.2 Ereignisgesteuerte Simulation	35
5.2.2.1 Ereignisorientierte Simulation	36
5.2.2.2 Aktivitätsorientierte Simulation	38
5.2.2.3 Prozeßorientierte Simulation	39
<b>6 Das Simulationssystem PC-SIM</b>	<b>45</b>
6.1 Generelles Konzept	45
6.2 Simulationssprache	46
6.2.1 Komponenten der Simulationssprache	46
6.2.1.1 Steuerkommandos	47
6.2.1.2 Modellkommandos	48
6.2.1.3 Daten	49
6.2.2 Beispiel eines Simulationsmodells	50
6.3 Grundkonzepte der Realisierung	52
6.3.1 Interpreter und Compiler	52
6.3.2 Speicherung der Modellinformation	54
6.3.3 Ausführung der Simulation	56
6.3.3.1 Interne Listen der Ablaufsteuerung	56
6.3.3.2 Speicherverwaltung	59
6.3.3.3 Datenstrukturen	60
6.3.3.4 Ablaufsteuerung	61
6.3.3.5 Schnittstellen zur ereignisorientierten Simulation	63
6.3.3.6 Statistiken	63
6.4 Technische Umsetzung der Grundkonzepte	65
6.4.1 Grundlagen der Implementierung	65
6.4.2 Programmstruktur	65

---

6.5 Vergleich mit anderen Simulationssystemen	68
6.5.1 Auswahlkriterien	68
6.5.2 Überblick ausgewählter Simulationssysteme	71
6.5.3 Vergleich von Systemeigenschaften	73
6.5.3.1 Modellierungssichtweise	73
6.5.3.2 Modellstruktur	74
6.5.3.3 Realisierungskonzepte	76
6.5.3.4 Modellbegrenzung und Speicherkonzepte	77
<b>7 Untersuchungen zum Rechenzeitaufwand</b>	<b>81</b>
7.1 Gegenstand bisheriger Untersuchungen	81
7.1.1 Hold Model	82
7.1.2 Kritik am Hold Model	83
7.1.2.1 Konstante Ereignisliste	83
7.1.2.2 Feste Wahrscheinlichkeitsverteilung	84
7.1.2.3 Arten der Implementierung	85
7.1.3 Analytische Untersuchungen	85
7.1.3.1 Komplexität von Algorithmen	86
7.1.3.2 Praktische Relevanz	87
7.2 Empirische Untersuchungen mit PC-SIM	88
7.2.1 Ansatzpunkte für eine Reduzierung der Rechenzeit	89
7.2.2 Auswahl der Testmodelle	90
7.2.2.1 Auswahlkriterien	90
7.2.2.2 Simulationsmodelle	91
7.2.2.3 Vergleich der Simulationsmodelle	93
7.2.3 Testbedingungen	95
7.2.4 Übersetzungszeit	98
7.2.4.1 Ergebnisse von PC-SIM	98
7.2.4.2 Vergleich der Ergebnisse mit SLAMSYSTEM	101
7.2.5 Algorithmen und Datenstrukturen	103
7.2.5.1 Algorithmen mit linearen Listenstrukturen	104
7.2.5.2 Algorithmen mit Baumstrukturen	111
7.2.5.3 Algorithmen mit gemischten Strukturen	120

7.2.6 Ausführungszeit	125
7.2.6.1 Ergebnisse der Interpreter-Version	125
7.2.6.2 Bewertung der getesteten Algorithmen	129
7.2.6.3 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	147
7.2.6.4 Ergebnisse der Compiler-Version	150
7.2.6.5 Vergleich mit SLAMSYSTEM	155
<b>8 Parallele Simulation</b>	<b>159</b>
8.1 Ansätze für eine Parallelisierung der Simulation	159
8.1.1 Parallele Simulationsläufe	159
8.1.2 Vektorisierung	160
8.1.3 Funktionale Verteilung	160
8.1.4 "Natürliche Parallelität" mittels Dekomposition	162
8.2 Verteilte Simulation	162
8.2.1 Unabhängigkeit von Ereignissen	162
8.2.2 Synchronisationsstrategien	165
8.2.3 Aktuelle Situation der verteilten Simulation	165
8.2.4 Zukünftige Forschungsschwerpunkte	167
8.3 Ein neues Verfahren zur Ablaufsteuerung	170
8.3.1. Voraussetzungen und Vorgehen	170
8.3.2 Auswirkungen auf die Rechenzeit	173
8.3.3 Konzept für eine parallele Realisierung	176
<b>9 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen</b>	<b>179</b>
<b>Anhang A: Sprachelemente von PC-SIM</b>	<b>185</b>
<b>Anhang B: Testmodelle</b>	<b>209</b>
<b>Anhang C: Ausführungszeiten der Testmodelle</b>	<b>251</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>261</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zusammenhang zwischen Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen	32
Abbildung 2:	Arten von Simulation	34
Abbildung 3:	Beispiel eines ereignisorientierten Simulationsablaufs	37
Abbildung 4:	Beispiel einer Ereignisliste im Rahmen der ereignisorientierten Simulation	37
Abbildung 5:	Beispiel eines prozeßorientierten Simulationsablaufs	41
Abbildung 6:	Beispiel der internen Listen im Rahmen der prozeßorientierten Simulation	42
Abbildung 7:	Die Steuerkommandos von PC-SIM	47
Abbildung 8:	Die Modellkommandos von PC-SIM	48
Abbildung 9:	Das Friseur-Beispiel als PC-SIM Programm	51
Abbildung 10:	Die prinzipielle Struktur der Hauptliste	58
Abbildung 11:	Die Hauptliste für ein kleines Simulationsmodell	62
Abbildung 12:	Summary Report für das Friseur-Beispiel	64
Abbildung 13:	Datenstruktur der Skip Lists	106
Abbildung 14:	Datenstruktur der Cross Lists	109
Abbildung 15:	Verschmelzung von 2 Teilbäumen beim Skew Heap ("top-down")	115
Abbildung 16:	Verschmelzung von 2 Teilbäumen beim Skew Heap ("bottom-up")	117
Abbildung 17:	Einfügen und Entfernen eines Knotens beim Splay Tree	119
Abbildung 18:	Datenstruktur der Calendar Queue	121
Abbildung 19:	Datenstruktur von CROSS_SKEW	123
Abbildung 20:	Datenstruktur von SKEW_LINK	125
Abbildung 21:	Gewichtete Ausführungszeiten des Interpreters	147
Abbildung 22:	Prinzip der kombinierten Ablaufsteuerung	172

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die Speicher- und Modellierungskapazität von SLAMSYSTEM und PC-SIM	79
Tabelle 2:	Komplexitätsvergleich	86
Tabelle 3:	Vergleich der Testmodelle	94
Tabelle 4:	Übersetzungszeiten der Interpreter-Version	99
Tabelle 5:	Übersetzungszeiten der Compiler-Version	100
Tabelle 6:	Vergleich der Übersetzungszeiten von SLAMSYSTEM und PC-SIM (in Sekunden)	102
Tabelle 7:	Verteilungen der Ausführungszeiten mit kleinster und größter Streuung für PORT.MOD und JOB.MOD	127
Tabelle 8:	Ausführungszeiten der einfach bzw. doppelt verketteten linearen Listen	130
Tabelle 9:	Ausführungszeiten der doppelt verketteten linearen Listen mit einem Mittel-Pointer	132
Tabelle 10:	Vergleich der Ausführungszeiten von SKIP_LIST mit MIDDLE_FF	134
Tabelle 11:	Ausführungszeiten der linearen Variationen der Cross Lists	136
Tabelle 12:	Ausführungszeiten der Heap-Variationen	138
Tabelle 13:	Ausführungszeiten der Skew Heap-Variationen	140
Tabelle 14:	Ausführungszeiten der Splay Tree-Variationen	142
Tabelle 15:	Vergleich der Ausführungszeiten der CALENDAR_QUEUE mit SKEW_HEAP und MOD_SPLAY_TREE	144
Tabelle 16:	Vergleich der Ausführungszeiten von CROSS_SPLAY/2 und CROSS_MOD_SPLAY mit MOD_SPLAY_TREE	146
Tabelle 17:	Gewichtete Ausführungszeiten der Compiler-Version im Real Mode	151
Tabelle 18:	Gewichtete Ausführungszeiten der Compiler-Version im Protected Mode	153
Tabelle 19:	Vergleich der Ausführungszeiten von SLAMSYSTEM und PC-SIM (in Sekunden)	156

---

Tabelle 20: Vergleich der prozeßorientierten Ablaufsteuerung mit der kombinierten Ablaufsteuerung für FIFO-Teilsysteme (anhand des Modells WORK.MOD)	174
Tabelle 21: Ausführungszeiten der Interpreter-Version mit linearen Listenstrukturen (kleine Modelle)	252
Tabelle 22: Ausführungszeiten der Interpreter-Version mit linearen Listenstrukturen (große Modelle)	253
Tabelle 23: Ausführungszeiten der Interpreter-Version mit Baumstrukturen (kleine Modelle)	254
Tabelle 24: Ausführungszeiten der Interpreter-Version mit Baumstrukturen (kleine Modelle)	255
Tabelle 25: Ausführungszeiten der Interpreter-Version mit gemischten Datenstrukturen (kleine Modelle)	256
Tabelle 26: Ausführungszeiten der Interpreter-Version mit gemischten Datenstrukturen (kleine Modelle)	257
Tabelle 27: Gewichtete Ausführungszeiten der Interpreter-Version	258
Tabelle 28: Ausführungszeiten der Compiler-Version im Real Mode (für die 5 besten Algorithmen)	259
Tabelle 29: Ausführungszeiten der Compiler-Version im Protected Mode (für die 5 besten Algorithmen)	260