

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Grundbegriffe	1
1.1	Systeme	2
1.2	Modelle	4
1.3	Simulation	7
1.4	Modellbildung und Modellbildungszyklus	10
1.5	Anwendungsfelder der zeitdiskreten Simulation	19
1.6	Möglichkeiten und Grenzen der Modellbildung und Simulation	19
1.6.1	Das Potential der Modellbildung und Simulation	21
1.6.2	Probleme der Modellbildung und Simulation	22
2	Elemente zeitdiskreter Simulationsmodelle	25
2.1	Beziehungen zwischen Zustand und Zeit	25
2.2	Konzepte der zeitdiskreten Simulation	28
2.2.1	Ereignisorientierte Sicht (event scheduling)	29
2.2.2	Prozeßorientierte Sicht (process interaction)	30
2.2.3	Transaktionsorientierte Sicht (transaction flow)	32
2.3	Komponenten ereignisorientierter Simulationsmodelle	33
2.4	Typische Modellklassen und ihre Realisierung	36
2.4.1	Simulation von Bedienungs-/Wartesystemen	36
2.4.1.1	Systemstruktur	37
2.4.1.2	Beispiel: Ein Bedienungssystem mit mehreren Servicestellen und begrenztem Warteraum	42
2.4.1.3	Implementation in Modula-2	48
2.4.2	Simulation von Lagerhaltungssystemen	52
2.4.2.1	Systemstruktur	53
2.4.2.2	Beispiel: Ein Mehrprodukt-Lagerhaltungssystem mit Vorbestellungen	57
2.4.3	Simulation von ausfallanfälligen Systemen	64
2.4.3.1	Systemstruktur	65
2.4.3.2	Beispiel: Wartungsstrategien für eine technische Anlage	67
2.5	Ereignisorientierte versus prozeßorientierte Sicht	71
2.5.1	Beispielmodell eines Fertigungssystems	71
2.5.2	Ereignisorientierte Version	73
2.5.3	Prozeßorientierte Version	76

3	Implementation von Simulationsmodellen mit Modula-2	79
3.1	Anforderungen an Implementationsprachen für Simulationsmodelle	80
3.1.1	Allgemeine Anforderungen	80
3.1.2	Simulationsspezifische Anforderungen	82
3.2	Realisierung grundlegender Simulationsbausteine mit Modula-2	85
3.2.1	Modularisierung	86
3.2.2	Freispeicherverwaltung	87
3.2.3	Simulationsstatistik	88
3.2.4	Ereignislistenverwaltung (Modul EventChain)	88
3.2.5	Warteschlangenverwaltung (Modul Queue)	90
3.2.6	Verteilungsfunktionen (Modul Distributions)	92
3.2.7	Implementationsdetails	93
3.3	Implementation eines Beispielsmodells in der Modula-2-Simulationsumgebung	94
3.3.1	Datenstrukturen	95
3.3.2	Prozeduren	96
3.3.3	Statistische Berechnungen	99
4	Statistische Verfahren	101
4.1	Zufallszahlenerzeugung	101
4.1.1	Die Bedeutung von Zufallszahlen für die Simulation	101
4.1.2	Erzeugung gleichverteilter Zufallszahlen	103
4.1.3	Zufallszahlen beliebiger Verteilungen	107
4.2	Ein portabler Zufallszahlengenerator in Modula-2	113
4.3	Testverfahren zur Bestimmung statistischer Eingabevertelungen für Simulationsmodelle	117
4.4	Die statistische Planung und Auswertung von Simulationsexperimenten	121
4.4.1	Zur Notwendigkeit der Wiederholung von Simulationsexperimenten	121
4.4.2	Anfangszustand und Anlaufphase	122
4.4.2.1	Heuristische Verfahren zur Bestimmung der Anlaufphase	122
4.4.2.2	Statistische Testverfahren zur Bestimmung der Anlaufphase	124
4.4.3	Schätzgenauigkeit der Simulationsergebnisse	127
4.4.3.1	Autokorrelation	129
4.4.3.2	Konfidenzintervalle bei unabhängigen Stichprobenwerten	129
4.4.3.3	Konfidenzintervalle bei quasi-unabhängigen Stichprobenwerten	130
4.4.3.4	Konfidenzintervalle bei autokorrelierten Stichprobenwerten	134
4.4.3.5	Schlußbetrachtung zur Ermittlung der Schätzgenauigkeit	136
4.4.4	Wahl des Stichprobenumfangs	137
4.4.5	Varianzreduzierende Methoden	138
4.4.5.1	Antithetische Variablen	139
4.4.5.2	Gemeinsame Zufallszahlen	140
4.4.6	Bestimmung des Optimums in einem Simulationsexperiment	141

5	Modellvalidierung und -dokumentation	145
5.1	Zur Notwendigkeit einer Gültigkeitsprüfung	145
5.2	Grundsätze für ein Validierungskonzept	146
5.3	Ein mehrstufiger Ansatz zur Modellvalidierung	148
5.3.1	Validierung des konzeptuellen Modells	148
5.3.2	Modellverifikation	150
5.3.3	Operationale Modellvalidierung	150
5.4	Modelltransparenz durch Dokumentation	155
6	Simulationssoftware	157
6.1	Klassifikation von Simulationssoftware	157
6.1.1	Simulationssoftware auf Sprachebene	158
6.1.2	Simulationssoftware auf Modellebene	161
6.1.3	Unterstützungssysteme	162
6.2	Simulationssysteme	165
6.2.1	Definition und generelle Zielsetzung	165
6.2.2	Anforderungen an Simulationssysteme	165
6.2.3	Aufbau von Simulationssystemen	169
6.2.4	Beispiel für ein Simulationssystem	171
7	DESMO – Ein umfassendes Simulationspaket in Modula-2	175
7.1	Entwicklungsziele	176
7.2	Unterstützte Modellierungsstile	177
7.3	Ereignisorientierte Modellierung	178
7.3.1	Entities und Ereignisse	178
7.3.2	Warteschlangen	181
7.4	Prozeßorientierte Modellierung	182
7.4.1	Entities	182
7.4.2	Warteschlangen	183
7.5	Höhere Modellierungskonstrukte	184
7.5.1	Ressourcenwettbewerb	184
7.5.2	Produzenten/Konsumenten-Beziehungen	185
7.5.3	Direkte Prozeßkooperation	186
7.5.4	Bedingtes Warten	188
7.6	Zufallszahlenerzeugung	189
7.7	Statistik	191
7.7.1	Nicht zeitgewichtete Statistik	191
7.7.2	Zeitgewichtete Statistik	195
7.7.3	Zeitreihen und Grafik	195
7.8	Reportgenerierung	197
7.9	Fehlerbehandlung	197
7.10	Deadlock-Überwachung	198

7.10.1	Definition und Ursachen	199
7.10.2	Behandlungsmaßnahmen	200
7.11	Implementation	205
7.11.1	Übersicht über die DESMO-Modulstruktur	205
7.11.2	Organisation der Ereignisliste	206
7.11.3	Systemtechnische Angaben	208
7.12	DESMO in der Simulationsanwendung	210
7.12.1	Modell eines Fertigungssystems (Jobshop-Modell)	210
7.12.2	Ereignisorientierte Modellimplementation	211
7.12.3	Prozeßorientierte Modellimplementation	214
7.12.4	Transaktionsorientierte Modellimplementation	216
7.12.5	Aktivitätsorientierte Modellimplementation	218
7.12.6	Modellerweiterung: Prioritäten und Unterbrechungen	221
7.12.7	Zeitreihen und Grafik	224
7.12.8	Weitere Beispielmodelle	226
8	Ausblick: Neuere Konzepte zur Unterstützung der Modellbildung und Simulation	227
8.1	Objektorientierte Modellbildung	227
8.1.1	Objektorientierte Programmierung	227
8.1.2	Vorzüge der objektorientierten Programmierung	229
8.1.3	Bedeutung der objektorientierten Programmierung für die Modellbildung und Simulation	231
8.2	Einsatz von KI-Methoden	232
8.2.1	Einsatz von Expertensystemen zur Unterstützung der Modellbildung und Simulation	234
8.2.2	Qualitative Simulation	240
Anhang A: Übungen		245
A.1	Simulationsaufgaben	245
A.2	Simulationsprojekte	249
Anhang B: Modula-2-Simulationsprogramme		257
B.1	Modula-2-Programm eines Platzreservierungsmodells	257
B.2	Eine einfache Modula-2-Simulationsumgebung	271
B.2.1	Modul EventChain	271
B.2.2	Modul Queue	274
B.2.3	Modul Distributions	279
B.2.4	Modul FixedInOut	282
B.2.5	Anwendungsbeispiel: Modul JobShop	284
Anhang C: DESMO-Benutzerdokumentation		293
C.1	Ereignisorientierte Simulation	293

C.1.1	Modul EventSimulation	293
C.1.2	Modul eQueue	298
C.2	Prozeßorientierte Simulation	301
C.2.1	Modul ProcessSimulation	301
C.2.2	Modul Queue	307
C.3	Höhere Synchronisationsmechanismen	311
C.3.1	Modul Res	311
C.3.2	Modul Bin	314
C.3.3	Modul WaitQ	316
C.3.4	Modul CondQ	320
C.4	Zufallszahlen	323
C.4.1	Modul RealDist	323
C.4.2	Modul IntDist	325
C.4.3	Modul BoolDist	328
C.5	Statistik	330
C.5.1	Modul Tally	330
C.5.2	Modul Histogram	332
C.5.3	Modul Count	334
C.5.4	Modul Accumulate	335
C.5.5	Modul Regression	337
C.5.6	Modul TimeSeries	339
C.5.7	Modul DESgraph	340
C.6	Hilfsmodule	342
C.6.1	Modul StringHdl	342
C.6.2	Modul ReportIO	344
	Anhang D: Programmtexte der Beispielmodelle	345
D.1	Jobshop-Modell	345
D.1.1	Ereignisorientierte Version	345
D.1.2	Prozeßorientierte Version	354
D.1.3	Transaktionsorientierte Version	363
D.1.4	Aktivitätsorientierte Version	370
D.1.5	Version mit Prioritäten und Unterbrechungen	378
D.2	Weitere Beispielmodelle	389
D.2.1	Simulation einer Fähre	389
D.2.2	Simulation einer Fähre mit direkt kooperierenden Prozessen	393
D.2.3	Tanker-Modell mit Prioritäten	399
D.2.4	Erweitertes Tanker-Modell	403
	Literatur	409
	Sachverzeichnis	417