



Simulations- techniken

Von
Professor
Dr. Detlef Steinhausen

R. Oldenbourg Verlag München Wien

Eingetragene Warenzeichen sind nicht besonders gekennzeichnet. Deshalb ist den Bezeichnungen nicht zu entnehmen, ob sie freie Warennamen sind bzw. ob Patente oder Gebrauchsmuster vorliegen.

Das in diesem Buch enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Die Autoren und der Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Steinhausen, Detlef:

Simulationstechniken / von Detlef Steinhausen. – München ;

Wien : Oldenbourg, 1994

ISBN 3-486-22656-8

© 1994 R. Oldenbourg Verlag GmbH, München

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Gesamtherstellung: WB-Druck, Rieden

ISBN 3-486-22656-8

Vorwort

Simulation erlebt nach einem Boom in den 60-er und 70-er Jahren gegenwärtig eine Renaissance und gilt als schnellwachsende Schlüsseltechnologie. Entsprechend hoch ist der Bedarf an Fachleuten und Ausbildungsbedarf auf diesem fachübergreifenden Gebiet.

Der hier vorliegende einführende Text beschäftigt sich hauptsächlich mit den Gebieten der Simulation, die der Informatik und dem Operations Research (OR) zuzurechnen sind. Er ist entstanden aus Lehrveranstaltungen, die ich am Universitätsrechenzentrum und im Fachbereich Wirtschaft der Fachhochschule Münster im Rahmen des Schwerpunktes OR gehalten habe.

Angestrebt wird eine eher handwerkliche, anschauliche und anwendungsorientierte Einführung, was auch durch den Titel dieses Lehrbuches, "Simulationstechniken" zum Ausdruck kommen soll. Mathematische Herleitungen treten dabei, obschon eigentlich unverzichtbar, ebenso in den Hintergrund wie wissenschaftstheoretische Begründungen der Methodik. Erläuterungen erfolgen vorzugsweise anhand von (kleinen) Beispielen.

Allerdings wird bewußt der Tatsache Rechnung getragen, daß ein praktischer Einsatz von Simulationstechniken ohne Computer heute schwer vorzustellen ist. Die flächendeckende Ausstattung mit Rechnern, deren Leistungsfähigkeit und die Verfügbarkeit von Software lassen es angemessen erscheinen, daß wir zur Lösung der behandelten Standardprobleme Programme in Pascal, mit Tabellenkalkulation oder in der Simulationssprache GPSS angeben. Wir möchten den Leser dazu anregen, diese Programme selbständig auszuführen. Als "praktizierender Simulant" kann er dann anschaulich erfahren, wie man mit Simulation zu Ergebnissen gelangen kann.

Wir beginnen nach einer Begriffsbestimmung von Simulation mit einführenden Beispielen im ersten Kapitel. Generelle Hinweise zum Ablauf einer Simulationsstudie werden im zweiten Kapitel beschrieben. Das dritte Kapitel beschäftigt sich ausführlich mit der Erzeugung und Beurteilung von Zufallszahlen, die bei der stochastischen Simulation und bei Monte-Carlo-Methoden von fundamentaler Bedeutung sind. Zwei Hauptanwendungsgebieten der Simulation, der Warteschlangen- und Lagerhaltungsproblematik, sind das vierte und fünfte Kapitel gewidmet. Weitere betriebswirtschaftliche Standardanwendungen werden in Kapitel sechs vorgestellt. Das siebte Kapitel enthält wieder Handwerkliches: Einführende Darstellungen der Simulationssprache GPSS anhand von Beispielen und kleinen GPSS/H Programmen.

Nach dem Studium dieses Textes sollte der Leser in die Lage versetzt worden sein, sich an komplexere Simulationsstudien heranzuwagen.

Aber was versteht man eigentlich unter "*Simulation*" ?

Zieht man verschiedene Lexika zu Rate, sieht sich der Hilfesuchende mit divergenten Definitionen konfrontiert:

Psychembel, Klinisches Wörterbuch:

Simulation (lat.: simulatio): Verstellung, Vortäuschen von Krankheitszuständen, z.B. Gefühllosigkeit, Lähmung, (meist einseitiger) Blindheit, Taubheit, Krämpfen, Geisteskrankheit.

Auch im **Großen Brockhaus** heißt es:

Simulation: Die bewußte Vortäuschung von Krankheit... .

Während das **Wörterbuch der Soziologie** (Enke-Verlag) diesen Begriff offensichtlich überhaupt nicht kennt, lesen wir schließlich in **Gablers Wirtschafts-Lexikon**, die für dieses Buch passende Definition:

Simulation, das zielgerichtete Experimentieren an Modellen, die der Wirklichkeit nachgebildet sind... . Die S. ist auch eine wichtige Methode des Operations Research.

Somit ist nach dieser Definition ein "Simulant" jemand, der Simulationen durchführt.

Wenn mit Hilfe dieses Buches der Einstieg in die Simulation erleichtert oder im Selbststudium möglich ist, so hat er seinen Zweck erfüllt.

Den Herren Dipl.-Betriebsw. Arnold Terliesner und Dipl.-Betriebsw. Thomas Weißelmann danke ich an dieser Stelle für das Abfassen von Mitschriften. Für zahlreiche wertvolle Verbesserungs- und Gestaltungsvorschläge sei den Herren Dipl.-Betriebsw. Udo Rahenbrock und Dipl.-Betriebsw. Wolfgang Wicht gedankt. Herr Dipl.-Betriebswirt Horst Gondek hat durch seine konstruktive Kritik, Implementationen einiger Programme und zahlreichen Verbesserungen wesentlich an der Gestaltung dieses Buches mitgewirkt.

Davon unabhängig liegt die Verantwortung für die Darstellung und deren Mängel beim Verfasser.

Detlef Steinhausen

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	5
1.1 Grundbegriffe und Zielsetzung der Simulation.....	5
1.2 Arten, Anwendungsgebiete und Zweck von Simulationen	5
1.3 Einführende Beispiele	7
1.3.1 Beispiel zur deterministischen Simulation: Erneuerungsproblem	7
1.3.2 Beispiele zur stochastischen Simulation	9
1.3.2.1 Weg des Betrunkenen.....	9
1.3.2.2 Zeitungsverkäufer	13
1.3.2.3 Das Ziegenproblem.....	15
1.3.3 Beispiel Monte-Carlo-Methode: Berechnung der Zahl π	18
2 Allgemeine Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulationsstudie	20
2.1 Problemformulierung und -analyse	21
2.2 Modellbildung.....	21
2.3 Datenerhebung	22
2.4 Erstellung eines Computerprogramms.....	22
2.5 Modellvalidierung.....	24
2.6 Planung und Durchführung von Simulationsläufen	24
2.7 Auswertung und Implementation der Ergebnisse	25
3 Die Erzeugung von Zufallszahlen	26
3.1 Charakterisierung von Zufallsvariablen und deren Verteilung in Simulationsmodellen	26
3.2 Die Erzeugung von (0,1)-gleichverteilten Zufallszahlen	27
3.2.1 Echte Zufallszahlen	27
3.2.2 Pseudozufallszahlen.....	28
3.2.2.1 Zufallszahlen aus Ziffern in transzendenten Zahlen	28
3.2.2.2 Die Mid-Square-Methode	29
3.2.2.3 Das lineare Kongruenzverfahren	29
3.3 Statistische Tests für die Qualität von Pseudozufallszahlen.....	31
3.3.1 χ^2 - Anpassungstest.....	31
3.3.2 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest.....	33

3.3.3	Serielle Autokorrelation	34
3.3.4	Weitere Tests	35
3.4	Die Erzeugung beliebig verteilter Zufallszahlen	36
3.4.1	Die Transformationsmethode	36
3.4.2	Die Erzeugung von Zufallszahlen beliebiger (a,b)- Gleichverteilung.....	38
3.4.3	Die Erzeugung von exponentialverteilten Zufallszahlen	39
3.4.4	Die Erzeugung von normalverteilten Zufallszahlen	40
3.5	Bestimmung der notwendigen Anzahl von Simulationsläufen	42
4	Warteschlangensimulation	45
4.1	Problemstellung	45
4.2	Charakterisierung von Warteschlangensystemen	46
4.2.1	Grundbegriffe der Warteschlangentheorie	46
4.2.2	Klassifizierungscodes für Warteschlangensysteme	48
4.2.3	Ergebnisparameter von Warteschlangensystemen	48
4.3	Eine analytische Lösungsmethode	49
4.4	Simulation der Ankünfte und des Bedienvorgangs	50
4.5	Simulation eines Warteschlangenproblems.....	52
5	Lagerhaltungssimulation	60
5.1	Grundlagen	60
5.1.1	Problembereiche	60
5.1.2	Lagerhaltungspolitiken.....	60
5.1.3	Kosten im Lagerhaltungssystem	61
5.2	Eine analytische Lösung: Das Harris-Modell	62
5.3	Simulation einer (t,q)-Lagerhaltungspolitik.....	64
6	Weitere betriebswirtschaftliche Anwendungen der Simulation.....	69
6.1	Ein Instandhaltungsproblem	69
6.2	Simulation anhand einer Bilanz und GuV.....	75
6.3	Simulation zur Beurteilung von Investitionsalternativen.....	85
7	Simulation mit GPSS.....	89
7.1	Die Simulationssprache GPSS	89
7.2	Ein einfaches Warteschlangenmodell in GPSS	90
7.3	Einbeziehen von weiteren Warteschlangen-Statistiken in GPSS/H	94

7.4 Warteschlangenmodell mit exponentialverteilten Ankunfts- und Bedienzeiten in GPSS/H	96
7.5 Mehrere parallele Bedienstationen.....	98
7.6 &Variable, Verzweigungen und Ausgabe in GPSS/H.....	101
7.7 Weiteres Beispiel: Simulation einer Boutique	104
7.8 Noch einmal: Das Ziegenproblem.....	109
Anmerkungen.....	111
Anhang	113
Literaturverzeichnis.....	114
Stichwortverzeichnis	122

1 Einführung

1.1 Grundbegriffe und Zielsetzung der Simulation

Unter Simulation wird das zielgerichtete Experimentieren an Modellen, die der Wirklichkeit nachgebildet sind, verstanden. Durch die Simulation, d.h. die Beobachtung von Modellen bei zielgerichteter Veränderung der Einflußgrößen, sollen Rückschlüsse auf das reale System ermöglicht werden. So wurden früher militärische Operationen in Sandkastenspielen simuliert. Bei Unternehmensplanspielen wird das Geschehen im Unternehmen zum Zwecke der Schulung von Entscheidungsträgern simuliert. Die Spielteilnehmer haben, wie ein Vorstand, Entscheidungen zu treffen und werden mit deren Folgen konfrontiert, allerdings nicht mit den harten Konsequenzen einer Fehlentscheidung. Ähnliches gilt für die Schulung von Piloten in Flugsimulatoren.

Wir interessieren uns allerdings in diesem Buch für **Simulation als Methode des Operations Research**, die dann angewandt wird, wenn sich ein Problem nicht durch ein mathematisches Modell beschreiben läßt, wenn es kein analytisches Lösungsverfahren gibt oder wenn ein solches einen zu hohen Rechenaufwand erfordern würde.

Modelle sind durch Abstraktion und Reduktion gewonnene vereinfachte Darstellungen realer Systeme. Reale Systeme werden auf einen vereinfachten Teilzusammenhang reduziert, indem man die wesentlichen Faktoren von den unwesentlichen isoliert. Neben der Struktur wird auch das Verhalten der Systemelemente im Modell durch eine Menge von näher bestimmten Variablen und Parametern und deren Relationen abgebildet. Hierbei kann die Formalsprache der Mathematik und der Logik verwendet werden.

Aus diesen Erkenntnissen heraus lassen sich Maßnahmen ableiten, die das reale System zielgerecht beeinflussen. Insofern ist die Simulation als entscheidungsunterstützendes Instrument anzusehen.

1.2 Arten, Anwendungsgebiete und Zweck von Simulationen

Nach dem Zweck lassen sich Simulationen in **Schulungs-** bzw. **Unterrichts-** sowie **Forschungssimulationen** unterteilen. Bei Unterrichtssimulationen z.B. Unternehmensplanspielen werden Erkenntnisse über Zusammenhänge vermittelt. Es sollen in einem Unternehmensmodell Entscheidungen trainiert und den Teilnehmern deren unternehmensbezogene Auswirkungen demonstriert werden. Im Flugsimulator wird die

Was ist Simulation ?

*Sandkastenspiele
Planspiele*

Simulator

*Simulation als
Methode des
Operations
Research*

Modelle

*Forschungs-
simulationen*

*Unterrichts-
simulationen*

Pilotenkanzel eines Flugzeuges wirklichkeitsgetreu nachgebildet, so daß die Auswirkungen verschiedener simulierter Flugmanöver unter unterschiedlichen Umweltbedingungen nachgebildet und die Piloten ohne Risiko trainiert werden können.

Forschungssimulationen mit mathematischen Modellen dienen der Erkenntnis von bisher unbekanntem Zusammenhängen. Folgende Arten werden unterschieden:

Arten von Forschungssimulationen

- **Deterministische Simulation:**

Von deterministischer Simulation spricht man, wenn alle Daten und Entscheidungsregeln, die in das Simulationsmodell eingehen, als bekannt und eindeutig angesehen werden, d.h. alle Komponenten und die Auswirkungen ihrer wechselseitigen Beziehungen zueinander sind vollständig voraussagbar. So bildet ein deterministisches Simulationsmodell die Wirklichkeit unter Ausschluß stochastischer Einflüsse ab. Alle Parameter werden als feste Werte vorgegeben, so daß sich der Modellzustand bei gegebenen Anfangsbedingungen für jeden Zeitpunkt eindeutig voraussagen läßt. Die Annahme, daß ein deterministisches Simulationsmodell vorliegt, ist in vielen Fällen jedoch nicht realistisch, da nur selten über alle Zusammenhänge eines komplexen Problems eindeutige Aussagen gemacht werden können.

- **Stochastische Simulation:**

Unter stochastischer Simulation versteht man die Simulation von stochastischen Modellen. Diese beinhalten Elemente, deren Eigenschaften und Relationen vom Zufall abhängig sind. Im Gegensatz zur deterministischen Simulation können nicht alle Daten als konstant angesehen werden. So sind z.B. bei Instandhaltungsproblemen die Ausfallzeitpunkte bestimmter Maschinenbauteile, bei Lagerhaltungsproblemen die Nachfrage und bei Warteschlangenproblemen die Ankunftszeiten bzw. die Bedienungszeiten überwiegend stochastischer Natur.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines zufälligen Ereignisses läßt sich nach seinen Verteilungsgesetzen errechnen. Diese Verteilungsgesetze sind dem Praktiker in der Regel jedoch nicht von vornherein bekannt. Deshalb muß zunächst eine empirische Erhebung durchgeführt werden, von der auf das entsprechende Verteilungsgesetz geschlossen werden kann. Ein Problem der Simulation besteht darin, mit möglichst geringem Aufwand eine möglichst große Stichprobe zu erhalten, die dem gewünschten Verteilungsgesetz gehorcht. Zur Lösung dieses Problems werden die **Monte-Carlo-Methoden** herangezogen. Die Monte-Carlo-Methoden liefern spezielle Verfahren, um stochastische Probleme zu simulieren, wobei mit Hilfe von Zufallszahlen künstliche bzw. zufällige Stichproben erzeugt werden, die dem gewünschten Verteilungsgesetz genügen (Auf die Erzeugung von Zufallszahlen wird in Kapitel 3 näher eingegangen). Der Vollständigkeit halber muß an-

Monte-Carlo-Methode

gemerkt werden, daß die Monte-Carlo-Methoden nicht nur zur Lösung stochastischer Probleme dienen, sondern auch zur Lösung deterministischer Probleme, wie z.B. zur Berechnung von bestimmten Integralen. Hierbei besteht die Schwierigkeit, ein dem Problem angepaßtes stochastisches Modell zu finden, bei dem theoretische Merkmale (z.B. der Mittelwert) auftauchen, die mit den gesuchten Lösungen übereinstimmen.¹

Weiterhin unterscheidet man nach:

- **Diskreter Simulation**, bei der sich die Zustände des zu simulierenden Systems diskontinuierlich, also in Zustandssprüngen (z.B. zu diskreten Zeitpunkten) ändern. Damit werden wir uns hauptsächlich in diesem Buch beschäftigen.

Kennzeichen der

- **kontinuierlichen Simulation** ist die kontinuierliche Zustandsveränderung, die hauptsächlich in naturwissenschaftlichen Modellen anzutreffen ist.
- **Dynamische Simulation** kennzeichnet meist kontinuierliche Simulationen, deren zeitliche Verläufe und Rückkoppelungseffekte, die man durch Differentialgleichungen beschreiben könnte, eine Rolle spielen. Beispiele sind Weltmodelle, wie sie in Arbeiten von Forrester beschrieben sind.²

Zielsetzung der Simulation ist das Finden von sogenannten Suboptima, z.B. die optimale Bestellmenge, optimale Ersatzzeitpunkte, optimale Bediensystemgestaltung u.ä. Häufig werden lediglich suboptimale Lösungen erreicht, da die Modelle nur Teilzusammenhänge realer Systeme nachbilden. Simulationen gehören somit zu den heuristischen Verfahren.

*Zielsetzung von
Forschungs-
simulationen*

1.3 Einführende Beispiele

1.3.1 Beispiel zur deterministischen Simulation: Erneuerungsproblem³

Bei einem chemischen Prozeß ist dessen Ausbringungsmenge von der Konzentration einer Lauge abhängig. Die Ausbringungsmenge reduziert sich aufgrund der sich ändernden Konzentration täglich um 5%. Bei Erneuerung der Lauge fällt die Produktion für einen Tag aus. Nach wieviel Tagen soll die Lauge jeweils erneuert werden, damit die durchschnittliche Ausbringung maximal wird?

Problemstellung

Die Ausbringung x_j am j -ten Tag nach Erneuerung der Lauge und die durchschnittliche Ausbringung z_i nach i Tagen werden wie folgt berechnet:

Formeln

$$x_j = A \cdot (1-p)^{j-1}, \quad z_i = \frac{\sum_{j=1}^i x_j}{1+i}$$

Tab. 1:
Erläuterungen zu
den Formeln

<i>A</i>	volle Ausbringung nach Erneuerung der Lauge
<i>p</i>	täglicher Produktionsrückgang (hier: $p=0.05$)
x_j	Ausbringung am <i>j</i> -ten Tag nach Erneuerung der Lauge
z_i	durchschnittliche Ausbringung am <i>i</i> -ten Tag
<i>i</i>	Anzahl der Produktionstage nach Erneuerung der Lauge
<i>j</i>	Laufparameter

Die Berechnung erfolgt in der folgenden Tabelle, aus der man die Lösung in der 4. Spalte (dortiges Maximum) ablesen kann. Wir haben sie mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Multiplan⁴; siehe Tab. 3) berechnet.

Tab. 2: Berech-
nung des Er-
neuerungs-
problems

	1	2	3	4
1	volle Produktion	1000		
2	Rückgang	0,05		
3				
4	Anz. Prod.-Tage	Ausbringung	aufaddiert	Durchschnitt
5				
6	Laugenwechsel	0	0	0
7	1	1000,00	1000,00	500,00
8	2	950,00	1950,00	650,00
9	3	902,50	2852,50	713,13
10	4	857,38	3709,88	741,98
11	5	814,51	4524,38	754,06
12	6	773,78	5298,16	756,88
13	7	735,09	6033,25	754,16
14	8	698,34	6731,59	747,95
15	9	663,42	7395,01	739,50
16	10	630,25	8025,26	729,57

Tab. 3: Formel-
angaben zum
Erneuerungs-
problem

	1	2	3	4
1	volle Produktion	1000		
2	Rückgang	0,05		
3				
4	Anz. Prod.-Tage	Ausbringung	aufaddiert	Durchschnitt
5				
6	Laugenwechsel	0	0	0
7	1	Z1S2	ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
8	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
9	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
10	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
11	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
12	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
13	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
14	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
15	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)
16	Z(-1)S+1	Z(-1)S*(1-Z2S2)	Z(-1)S+ZS(-1)	ZS(-1)/(ZS(-3)+1)