

SimNet - ein Werkzeug für Modellierung und Simulation auf Basis stochastischer Petri-Netze

Wolf Garbe, Antje Kantelberg

Der vorliegende Beitrag stellt ein auf stochastischen Petri-Netzen basierendes, universelles Modellierungskonzept sowie das darauf aufbauende Simulationssystem SIMNET zur Untersuchung stochastischer Systeme vor. Damit können Leistungsvorhersagen auf eine wissenschaftliche Basis gestellt und Investitionen im Rahmen komplexer Systeme durch eine gezielte Planung gesichert werden.

1. Gegenstand

Als Alternative zu Messungen an realen Versuchsaufbauten wird häufig die Modellierung genutzt. Verfahren zur Systemanalyse und Leistungsbewertung werden aus den folgenden Gründen eingesetzt:

- Vermeidung von Fehlentwicklungen (hardwareloser Versuchsaufbau),
- Abschätzung des Aufwandes,
- Leistungsbewertung und -prognose,
- Optimieren der Struktur und Parameter von Soft- und Hardware,
- Erkennen von Schwachpunkten im System (bottlenecks),
- Analyse vorhandener und geplanter Lösungen bei verschiedenen Bedingungen und Anforderungen.

Als Modellierungskonzept wurden im folgenden stochastische Petri-Netze verwendet, die sich durch ihre Eigenschaften zur Darstellung paralleler Prozesse und deren Synchronisation auszeichnen. Es wurde ein interaktives Simulationssystem für auf stochastischen Petri-Netzen basierende Modelle entwickelt. Dabei wurde die Ergebnisaufbereitung ins System integriert.

Da viele Simulatoren als abgeschlossenes System konzipiert sind, gibt es für den Nutzer keine Möglichkeit, eine Erweiterung des Systems um zusätzliche Modellelemente oder Komponenten zur Ermittlung und Darstellung von Simulationsergebnissen vorzunehmen. Häufig können aufgrund der nicht offen liegenden Simulationsalgorithmen und fehlender Angaben keine Aussagen zur Genauigkeit der gewonnenen Ergebnisse getroffen werden. Das waren Gründe für die Eigenentwicklung eines Simulationssystems, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

2. Erweiterte Petri-Netze

Im weiteren werden die für Petri-Netze gebräuchlichen Begriffe, wie in der Literatur [Kön88], [Sta80], [Sta90] üblich, verwendet.

Um Petri-Netze zur Modellierung stochastischer Prozesse einsetzen zu können, wurden folgende Erweiterungen [Sta90], [Vos87], [Mol82], [Gar92] gegenüber der Definition von Standard-Petri-Netzen implementiert :

Zeitbewertung (stochastische Petri-Netze):

Für die Modellierung vieler Prozesse muß die Zeitkomponente quantitativ berücksichtigt werden. Dazu gibt es in den Standard-Petri-Netzen keine Mechanismen. Netze mit Schaltdauer (Timed Petri Nets), Zeit-Netze und stochastische Petri-Netze sind als erweiterte Petri-Netze in der Lage, eine Zeitbewertung vorzunehmen [Vos87, S.38], [Sta90, S.192], [Kön88, S.126].

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Zeitbewertung zu lokalisieren. Dafür kommen prinzipiell alle Elemente des Petri-Netzes in Frage. So können die Zeiten den Plätzen, Marken, Kanten und Transitionen zugeordnet werden. Eine Übersicht dazu ist in [Sta90, S.192] zu finden.

Für die geplante Modellierung wurde die Zuordnung der Zeiten zu den Transitionen gewählt (Netze mit Schaltdauer), da mittels Transitionen die teilweise zeitbehafteten Aktionen dargestellt werden. Die Plätze dienen hingegen zur Modellierung der Zustände.

Wenn zeitbewertete Marken in einer Transition die gleiche Schaltzeit haben, können sie durch eine zeitbewertete Transition ersetzt werden. Im Gegensatz zu [Sta90, S.194] werden im vorliegenden Konzept auch bei zeitbewerteten Transitionen die Marken während der Schaltzeit nicht im Inneren der Transition festgehalten, sondern als noch nicht verfügbar (reserviert) auf die Nachplätze aufgebracht. Damit wird vermieden, daß durch nebenläufige Prozesse einer bereits konzessionierten Transition die Konzession wieder entzogen wird. Das müßte sonst die Rückgabe der Marken auf die Vorplätze zur Folge haben, was die Vorgänge in der Realität kaum widerspiegelt und sich nicht in das ansonsten unidirektionale Petri-Netz-Konzept einfügt.

Da nicht nur mit festen, sondern auch mit durch statistische Verteilungen beschriebenen Zeiten gearbeitet werden soll, kommen die stochastischen Petri-Netze als eine Spezialform der zeitbewerteten Petri-Netze zum Einsatz.

Nachdem die Transition Konzession hat, feuert sie sofort (Sofortschaltregel). Die Marken werden von den vorgelagerten Plätzen abgezogen und auf die nachgelagerten Plätze aufgebracht. Auf den nachgelagerten Plätzen stehen die Marken zur weiteren Verarbeitung aber erst nach Ablauf einer Bedienzeit zur Verfügung. Die Bedienzeit kann einer der folgenden Verteilungen gehorchen:

- konstante Verteilung (Punktverteilung),
- Gleichverteilung,
- Exponentialverteilung,
- Erlang-k-Verteilung,
- Normalverteilung,
- nutzerdefinierbare, tabellarische Verteilung.

Schaltbedingung ohne Schaltaktion

Das Gewicht einer Kante legt nur die Schaltbedingung fest, es werden jedoch keine Marken übertragen.

- Bei Schaltbedingung ohne Schaltaktion erhält man eine "Test-Kante", wie sie aus anderen Petri-Netz-Konzepten bekannt ist (Pre-Kante : Test auf Markierung, Post-Kante : Test auf freien Platz).
- Durch parallelen Einsatz einer Kante mit Schaltaktion und einer Kante ohne Schaltaktion kann man erreichen, daß Schaltbedingung und Anzahl der zu übertragenden Marken unterschiedlich groß gewählt werden können.

erweiterte Schaltbedingung ohne Aktion

Für die Schaltbedingung (ohne Aktion) sind die Relationen " \leq ", "=", " \geq " zugelassen.

- Pre-Kante : neben dem üblichen [Markierung] \geq [Gewicht] sind auch "=" und " \leq " erlaubt.
- Post-Kante : neben dem üblichen [Kapazität-Markierung] \geq [Gewicht] sind auch "=" und " \leq " erlaubt.
- Mit [Gewicht] ≤ 0 erhält man eine "Inhibitor-Kante", wie aus anderen Petri-Netz-Konzepten bekannt ist.

erweiterte Schaltbedingung mit Aktion

Auch wenn die Schaltbedingung nicht erfüllt ist, wird die Aktion so weit wie möglich ausgeführt.

Die Vorbedingung für Konzession wird dahingehend erweitert, daß bei Gewicht einer Kante $>$ Markierung unterschieden wird zwischen:

- Rückstau (keine Konzession),
- Verlust (Konzession, Markierung=0, Entnahme aller vorhandener Marken).

Die Nachbedingung für Konzession wird dahingehend erweitert, daß bei Gewicht einer Kante $>$ Kapazität - Markierung unterschieden wird zwischen:

- Rückstau (keine Konzession),
- Verlust (Konzession, Markierung=Kapazität, restliche Marken gehen verloren).

gefärbte Petri-Netze

Unterscheidung verschiedener Marken-Klassen.

Bei vielen Modellierungsaufgaben ist es notwendig, unterschiedliche Forderungsarten, die in einem System auftreten, zu unterscheiden. Das ist zum Teil durch nach Forderungsklassen getrennten Petrinetzstrukturen, die nur an den Transitionen synchronisiert werden, zu erreichen. Das Modell verliert dadurch aber an Analogie zum Originalsystem, bei dem unterschiedliche Forderungen zum Teil gleiche Übertragungswege benutzen. Weitere Probleme treten bei der Darstellung einer gleichzeitigen Nutzung begrenzter Ressourcen durch unterschiedliche Forderungen auf. Um die gegenseitige Abhängigkeit bei der Nutzung zu modellieren, ist eine räumliche Trennung der Forderungen nicht mehr möglich. Deshalb ist es wünschenswert, die bisher uniformen Marken unterscheidbar zu machen. Diese Erweiterung gegenüber Standard-Petri-Netzen wird als gefärbtes Petri-Netz (Coloured Petri Net) bezeichnet.

- Es können 2^{16} Marken-Klassen definiert werden.

Wartedisziplinen für Plätze (Warteschlangendisziplin, Bedienstrategie)

Einführung von Wartedisziplinen für Plätze (FIFO-Netze [Sta90]).

- FIFO (First In First Out) bzw. FCFS (First Come First Served)
- LIFO (Last In First Out) bzw. LCFS (Last Come First Served)
- Random (Ankunftsreihenfolge hat keinen Einfluß auf Bedienreihenfolge)

Konfliktlösung

Einführung von Strategien zur Lösung von Verzweigungs- und Wettbewerbskonflikten. Zwischen zwei Transitionen besteht ein Konflikt, wenn beide Konzession haben, aber nach dem Feuern einer Transition die

Vorbedingung (Verzweigungskonflikt) oder die Nachbedingung (Wettbewerbskonflikt) der anderen Transition nicht mehr erfüllt ist. Über die folgenden Strategien wird deshalb festgelegt, welche der Transitionen tatsächlich schalten soll :

- **Priorität**

Jeder Transition ist ein Prioritätsparameter zugeordnet. Wenn mehrere Transitionen gleichzeitig Konzession haben, feuert zuerst die mit der höchsten Priorität und dann eventuell weitere Transitionen in Reihenfolge absteigender Priorität. Lag ein Konflikt vor, dann wurde durch das Feuerm der Transition höherer Priorität der Transition niederer Priorität die Konzession entzogen und letztere feuert nicht.

- **Wahrscheinlichkeit**

Jeder Transition ist ein Wahrscheinlichkeitsparameter zugeordnet. Haben mehrere Transitionen gleicher Priorität gleichzeitig Konzession, dann wird eine Transition mit der diesem Parameter entsprechenden Wahrscheinlichkeit zuerst schalten.

Damit können neben der Konfliktlösung auch Verzweigungswahrscheinlichkeiten von Forderungsströmen nachgebildet werden.

Verteilungen für Gewicht:

Das Gewicht einer Kante kann einer Verteilungsfunktion gehorchen. Folgende Verteilungen stellt SIMNET zur Verfügung:

- konstante Verteilung (Punktverteilung),
- Gleichverteilung,
- Exponentialverteilung,
- Erlang-k-Verteilung,
- Normalverteilung,
- nutzerdefinierbare, tabellarische Verteilung.

Weiterhin ist die Implementation folgender Erweiterungen gegenüber der Definition von Standard-Petri-Netzen [Gar92] in das Simulationssystem SimNet geplant.:

Submodell-Konzept mit unbegrenzter Verschachtelungstiefe

Dadurch wird eine Strukturierung und Hierarchisierung des Modells, eine nachträgliche Veränderung, Verfeinerung oder Austausch von Submodellen, eine Bottom-Up- und Top-Down-Modellierung sowie der Einsatz von Submodell-Bibliotheken möglich. Damit steigt die Übersichtlichkeit und Handhabbarkeit des Gesamtmodells. Der Entwicklungsaufwand sinkt durch die Möglichkeit des mehrfachen Einbaus einmal beschriebener Submodelle in das Hauptmodell.

Die Verbindung der Submodelle mit dem Hauptmodell erfolgt über Plätze. Bei Aufruf eines Submodells werden die Plätze des Hauptmodells, die den Kontaktplätzen des Submodells entsprechen, als Parameter übergeben.

Marken mit Zeitstempel

Für bestimmte Zwecke kann es von Interesse sein zu bestimmen, welche Zeit eine Marke benötigt, um vom Punkt A zum Punkt B des Petri-Netz-Modells zu gelangen. Um eine solche Messung vorzunehmen, soll folgende Methode verwandt werden:

Die Punkte A und B sollen ausschließlich auf Kanten liegen. Die Marke erhält beim Durchlaufen der Kante A einen Zeitstempel in Form der aktuellen Simulationszeit aufgeprägt. Beim Durchlaufen der Kante B wird die Differenz zwischen der nunmehr aktuellen Systemzeit und dem Zeitstempel der Marke gebildet. Diese Differenz gibt die Zeit an, welche die Marke für ihren Weg von Punkt A nach Punkt B benötigt hat.

zerstörungsfreie Übertragung von Marken

Bisher werden beim Feuerm einer Transition die von den Schaltbedingungen der Pre-Kanten bestimmten Marken von den Vorplätzen entnommen und die von den Schaltbedingungen der Post-Kanten bestimmten, neuen Marken auf die Nachplätze aufgebracht. Es findet also kein Transport der Marke von Platz zu Platz über die Transition statt, sondern es werden Marken vernichtet und andere neu erschaffen.

Sollen Attribute (bisher Farben, eventuell Zeitstempel oder Erweiterung um zusätzliche Attribute) übertragen werden, so ist bisher für jede mögliche Realisierung eines Attributes eine getrennte Transition erforderlich. Das macht die Modellierung aufwendig, unübersichtlich und bei einem großen genutztem Wertebereich des Attributes unmöglich. Daher wird ein Transfer von Marken in der Art vorgeschlagen, daß je Post-Kante statt der Farbe der abzugebenden Marke die Nummer der Pre-Kante angegeben wird, von der die Marken übertragen werden. Die Anzahl der von der Post-Kante abgegebenen Marken entspricht der Anzahl der von der zugeordneten Pre-Kante aufgenommenen Marken und wird daher nur für die Pre-Kante als Verteilung angegeben.

Transitionen mit Mehrfachaktivierung

Unter Mehrfachaktivierung soll verstanden werden, daß auch bei einer aktivierten Transition die Vor- und Nachbedingungen überprüft werden, wenn sie für Mehrfachaktivierungen spezifiziert ist. Sind sie erfüllt, wird die Transition ein weiteres Mal aktiviert. Es sollen jetzt zwei Varianten unterschieden werden:

- Nachbilden von Prozessorsharing

Die Restbedienzeit der ersten Aktivierung und die Bedienzeit der zweiten Aktivierung bis zum Ende der ersten Aktivierung verdoppelt sich.

- Nachbilden von Markenverzögerung

Die erste und die zweite Aktivierung der Transition haben identische Bedienzeiten (bzw. nur Abweichungen im Rahmen der angegebenen Verteilung)

Selbstmodifikation

Über Attribute von Marken kann eine Veränderung von Parametern von spezifizierten Plätzen, Transitionen und Kanten vorgenommen werden. Damit können Strukturen des Lernens und der Selbstorganisation durch Petri-Netze implementiert werden. An dieser Stelle erfolgt die Erweiterung von Petri-Netzen um Eigenschaften von neuronalen Netzen [Smi91].

Modellierung von Subprozessen.

Werden mehrere gleichartige aufeinanderfolgende Prozesse in Subprozesse untersetzt (z.B. Filetransfer in Blocktransfer), kann es nach Durchlaufen der Bedienstrukturen durch die Subprozesse notwendig sein, die Subprozesse wieder zu den Ursprungsprozessen zusammenzufassen. Da sich die zeitliche Reihenfolge der Subprozesse bei Parallelverarbeitung geändert haben kann, ist es notwendig, eine sogenannte Geschwisterkennung vorzunehmen, um die aus einem Prozeß hervorgegangenen Subprozesse identifizieren zu können. Damit besteht dann die Möglichkeit, sie wieder zum Ursprungsprozeß zusammenzufassen (ohne z.B. fälschlicherweise ein File aus Blöcken des ersten und dritten Files zusammenzusetzen).

attributabhängigen Prioritäten für Marken.

Bisher wurden nur unter konkurrierenden Transitionen Prioritäten vergeben. Es sollen jetzt auch Prioritäten für Markenattribute (z.B. Farbe oder Zeitstempel vergeben werden). Die Angabe dieser Prioritätsoption erfolgt an den Pre-Kanten. Die Priorität der Marken wird nur bei Entnahme von Random-Plätzen (kein FIFO/LIFO) berücksichtigt. Somit kann jetzt z.B. erreicht werden daß die Marken zuerst entnommen werden, die am längsten unterwegs waren.

unterbrechenden Prioritätstechniken.

Bisher ist nur die unterbrechungsfreie Priorität implementiert, d.h. bei Eintreten einer hohen Priorität wird zuerst die aktuelle Aktivierung beendet, auch wenn sie niedrigerer Priorität ist. Folgende drei unterbrechende Prioritätstechniken sollen ergänzt werden:

- Unterbrechen mit Fortsetzen: Nach Abarbeitung der unterbrechenden Aktivierung wird die unterbrochene Aktivierung fortgesetzt.
- Unterbrechen mit Rückgabe: Die Marken, die von der unterbrochenen Aktivierung entnommen wurden, werden auf die Herkunftsplätze zurückgegeben.
- Unterbrechen mit Verlust: Die unterbrochene Aktivierung geht verloren.

3. Das Simulationssystem SIMNET

3.1. Überblick und Aufbau

Gesamtkonzept des Simulationssystems SimNet

Im folgenden wird das Simulationssystem SIMNET näher vorgestellt, das eine Weiterentwicklung des in [Gar92] vorgestellten Systems SPNS (Stochastic Petri-Net Simulator) darstellt.

Das Modellierungskonzept basiert auf Petri-Netzen, da sie eine explizite Darstellung der Bedingungen und Abhängigkeiten zur Synchronisation der zum Teil parallel ablaufenden Teilprozesse erlauben. Es ist eine Experimentdurchführung in der Form möglich, daß numerische Parameter automatisch in einem vorzugebenden Bereich und Schrittweite variiert werden können, und somit die Funktion einer Größe in Abhängigkeit von der Variablen ermittelt werden kann. Es wurden Möglichkeiten zur graphischen Darstellung der Ergebnisse in das Simulationssystem integriert.

Die Konzeption des aus verschiedenen Funktions-Modulen zur Modellerstellung, interaktiver Simulation mit graphischer Animation, Momentanwertmessung, Mittelwertbestimmung, Verteilungsbestimmung und Experimentdurchführung bestehenden Simulationssystems ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Eine nähere Beschreibung der einzelnen Funktionsgruppen erfolgt in den Abschnitten 3.2. bis 3.7.

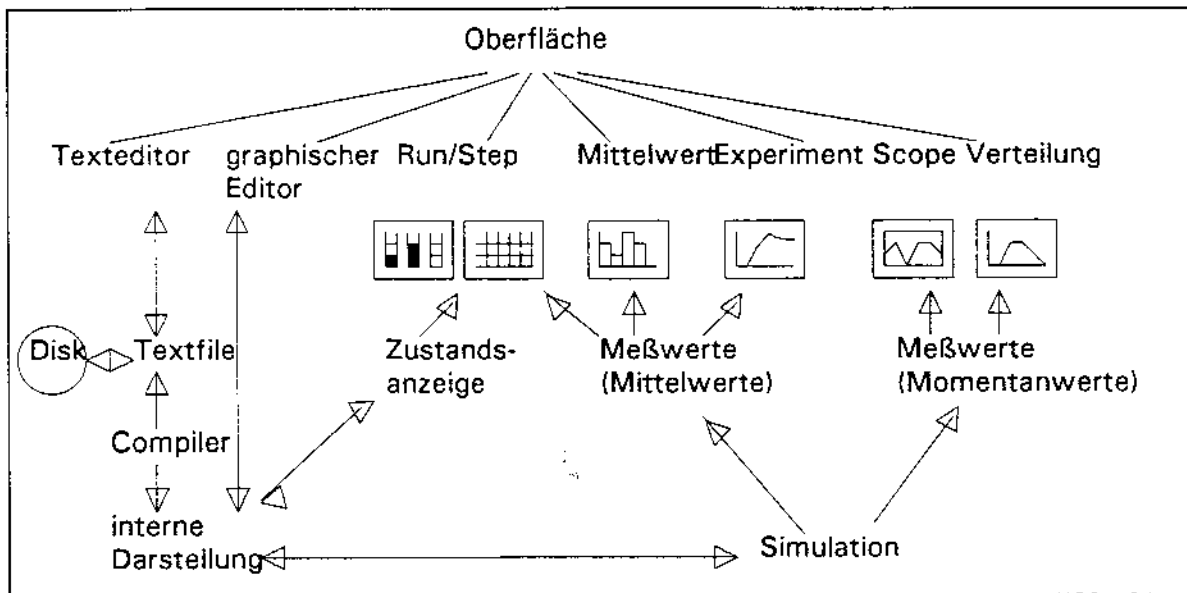


Abbildung 1: Aufbau des Simulationssystems SIMNET

Programmetechnische Realisierung:

SIMNET 1.17 wurde in PASCAL geschrieben und setzt MS-DOS, einen Prozessor ≥ 80286 sowie eine VGA-Karte voraus.

Zeitbasis:

Die Ereigniszeitpunkte werden im Kalender als ganze, positive Zahlen im Bereich von $0 \dots 2^{63}-1$ abgelegt. Es können also Prozesse dargestellt werden, die sich über einen Zeitraum des 2^{63} -fachen der atomaren Zeiteinheit (Auflösung, Zeitraster) erstrecken (z.B. Zeitraster 1ns, Beobachtungszeitraum 300 Jahre).

Der reale Zeitwert, den man einer atomaren Zeiteinheit gleichsetzt, entspricht der kleinsten unterscheidbaren Zeiteinheit im Simulationslauf.

Modellumfang:

Die Modellbeschreibung darf in der Version 1.17 von SIMNET folgenden Umfang haben:

Plätze:	ca. 2000
Transitionen:	ca. 2000
Kanten:	ca. 4000
Startcluster:	ca. 2000

Simulationsgeschwindigkeit:

Die Geschwindigkeit des Simulationslaufes (Ereignisse/Zeit) ist unabhängig von der Modellgröße (Anzahl der Plätze, Transitionen, Kanten), nimmt aber mit steigendem Verzweigungsgrad des Modells (Kanten/Transition; Kanten/Platz) ab.

Bei einem Verzweigungsgrad von 2 und einem 80386/25 MHz werden ca. 100 Ereignisse/Sekunde simuliert.

Bei eingebautem Coprozessor (80x87) steigt die Simulationsgeschwindigkeit um den Faktor 7-8.

Modellbeschreibungssprache:

Zur Definition der Modelle in SIMNET wurde eine Modellbeschreibungssprache entwickelt. Als Beispiel ist in Abbildung 2 die Beschreibung eines Modells dargestellt.

3.2. Editoren

Das Erstellen des Modellbeschreibungs-Files kann über einen im Simulationssystem integrierten Texteditor erfolgen. Mit einem weiteren Editor kann das im Modellbeschreibungs-File definierte Petri-Netz graphisch dargestellt werden (Abbildung 2).

Der Simulationslauf kann dann anhand dieser animierten graphischen Darstellung des Petri-Netzes beobachtet werden. Die Visualisierung des im Modellbeschreibungsfile definierten Modells ermöglicht auch eine einfache und schnelle Überprüfung der logischen Struktur.

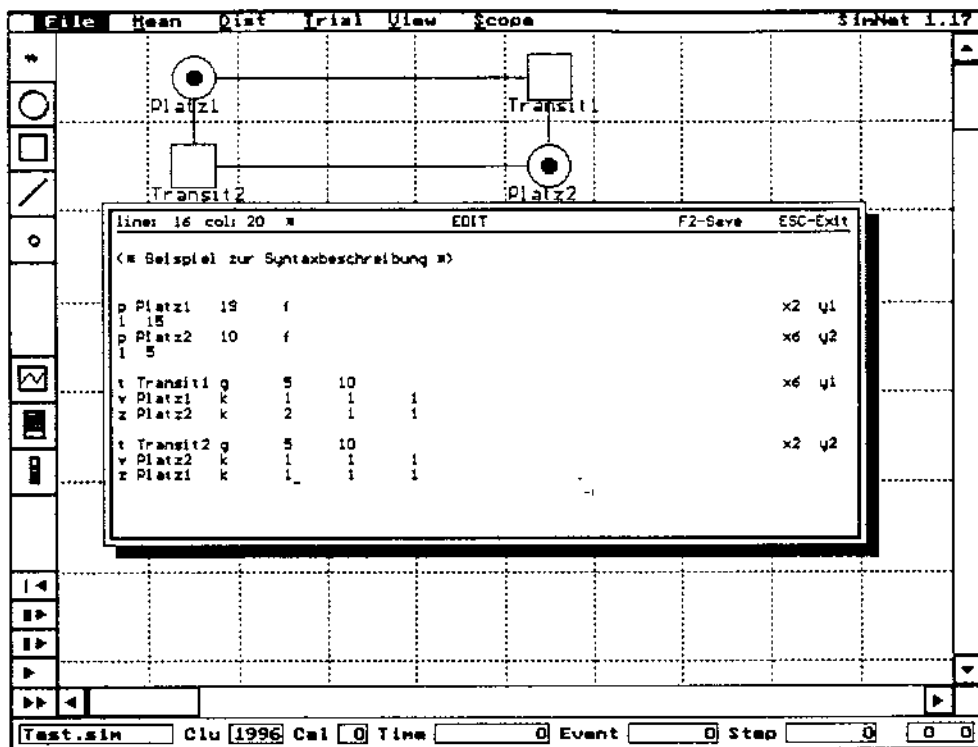


Abbildung 2:
Text- und
graphischer
Editor

3.3. Test-Werkzeuge

Zur Testung und Fehlersuche stehen während des animierten Simulationslaufes folgende Hilfsmittel zur Verfügung:

Schrittbetrieb

- Event
- Step
- Kontinuierlich

Warteraumanzeige

- Platzname
- Wartedisziplin (FIFO, LIFO, Random)
- Kapazität
- Reserviert (Marken, die sich in Bedienung befinden)
- Frei
- Markierung
- Anzeige der Marken im Warteraum (Reihenfolge und Farbe)
- Anzeige der freien Warteschlangen-Cluster

Kalenderanzeige

- Anzahl der aktiven Transitionen
- Anzeige der aktiven Transitionen und deren Deaktivierungs-Zeitpunkt

weiterhin werden angezeigt :

- Prozeßzeit (bei Simulationsbeginn = 0)
- Anzahl der Ereignisse seit Simulationsbeginn
- Anzahl der Schritte seit Simulationsbeginn

Mittelwertanzeige

Für die einzelnen Modellelemente werden verschiedene Basiskenngrößen als Summenvariablen geführt. Bei Aufruf der Mittelwertanzeige werden dann aus den Summenvariablen die Mittelwerte verschiedener Kenngrößen berechnet. Die Anzeige der Mittelwerte in diesem Menüpunkt ist nur für Testzwecke gedacht, da hier keine Angaben zur Genauigkeit der Ergebnisse gemacht werden.

Protokoll-Datei

während des Simulationslaufes können alle Ereignisse protokolliert werden.

3.4. Momentanwertmessung

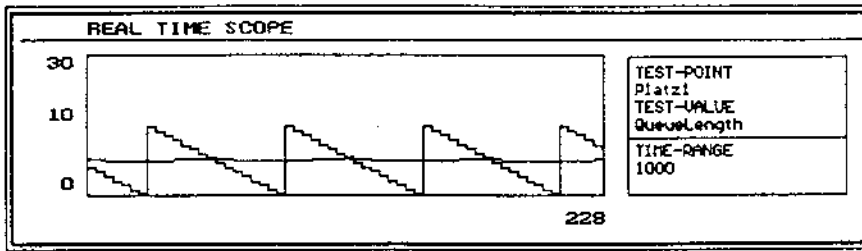
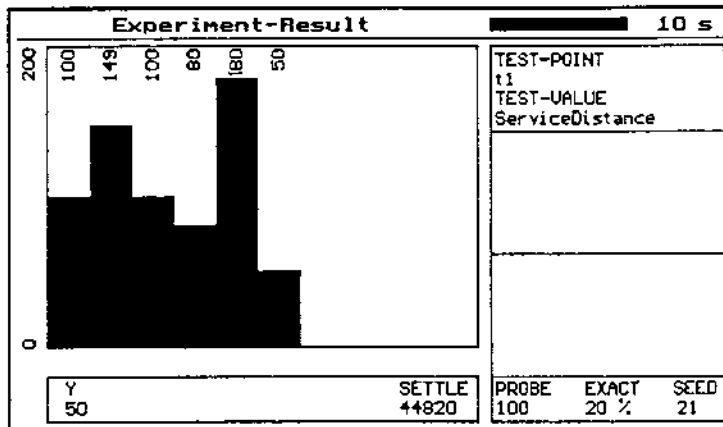


Abbildung 3a:
Momentanwertmessung

Diese Funktion dient zur Darstellung des Momentanwertverlaufes über der Zeitachse (Abbildung 3a). Damit können Prozesse auf Einschwingphase und Stationarität untersucht werden. Das oszilloscope-ähnliche Display zeigt sowohl den Momentanwert als auch den Mittelwert in einem wählbaren Zeitfenster an. Die Skalierung in Y-Richtung erfolgt automatisch.

3.5. Mittelwertmessung



Die Ergebnisse des Experiments werden graphisch dargestellt. Es findet ein automatisches Scaling für den Y-Bereich statt, wobei auch mehrere Messungen zu Vergleichszwecken nebeneinander gelegt werden können. Es kann der maximal zugelassene Fehler der Ergebnisse bei einer statistischen Sicherheit von 95% vorzugeben werden. Zur Untersuchung des stationären Systemverhaltens kann die Dauer der auszublendenden Einschwingphase angegeben oder automatisch ermittelt werden.

Abbildung 3b: Mittelwertmessung

Es werden folgende Meßgrößen ermittelt :

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Transitionen | Plätze |
| • Gesamtdurchsatz (throughput) | • Gesamtankünfte |
| • Durchsatz/Zeiteinheit | • Ankünfte/Zeiteinheit |
| • mittlerer Bedienabstand | • mittlerer Ankunftsabstand (interarrival time) |
| • mittlere Bedienzeit (service time) | • Gesamtdurchsatz (throughput) |
| • mittlere Ruhezeit (idle time) | • Durchsatz/Zeiteinheit |
| • mittlere Auslastung (utilisation) | • mittlerer Passageabstand |
| | • mittlere Passagewahrscheinlichkeit |
| | • Gesamtverluste (loss) |
| | • mittlerer Verlustabstand |
| | • mittlere Verlustwahrscheinlichkeit |
| | • mittlere Wartezeit (waiting time) |
| | • mittlere Warteschlangenlänge (queue length). |

3.6. Stichprobenmessung

Es besteht die Möglichkeit, eine Stichprobe von Momentanwerten aufzunehmen. Es werden Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion graphisch dargestellt sowie ausgewählte Kenngrößen angezeigt (Abbildung 4). Die Meßwerte werden nach Ablauf der Einschwingphase aus einem einzigen Simulationslauf entnommen. Es können folgende statistische Kenngrößen der Stichprobe ermittelt werden :

- | | |
|----------------------------|----------------|
| • kleinster Wert x_{min} | der Stichprobe |
| • größter Wert x_{max} | der Stichprobe |
| • Mittelwert \bar{x} | der Stichprobe |
| • Standardabweichung s | der Stichprobe |

- Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ der Stichprobe
- Verteilungsfunktion $F(x)$ der Stichprobe
- Extremwerte von $f(x)$ der Stichprobe
- Name der Verteilung der Stichprobe (Chi²-Anpassungstest)
- Parameter der Verteilung der Stichprobe (Chi²-Anpassungstest).

Diese Kenngrößen können für folgende Meßgrößen errechnet werden:

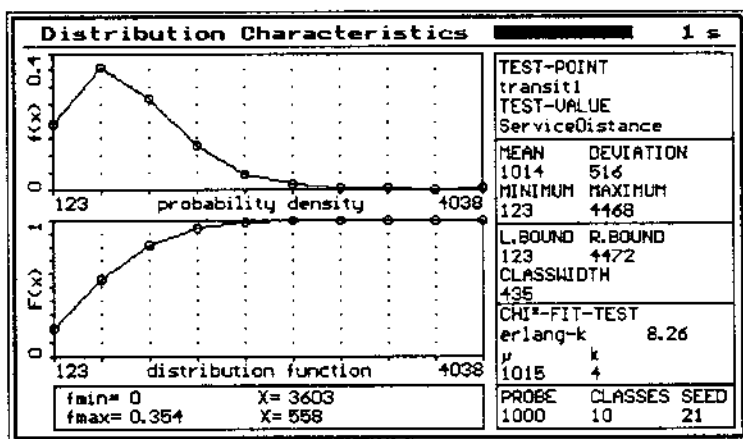
Messgrößen von Transitionen :

- Bedienabstand
- Servicezeit
- Ruhezeit

Meßgrößen von Plätzen :

- Ankunftsabstand
- Passageabstand
- Verlustabstand
- Wartezeit
- Warteschlangenlänge.

Die Tabelle der Klassenhäufigkeiten einer Stichprobe kann gespeichert werden. Auf solchen Tabellen können nutzerdefinierte Verteilungen basieren. Außerdem stehen damit die Daten für eine externe Weiterverarbeitung zur Verfügung.



Über den Chi²-Anpassungstest wird auf Übereinstimmung mit bekannten Verteilungen geprüft. Damit können zum einen die Voraussetzungen für eine analytische Lösung von Teilmodellen untersucht werden und zum anderen rückkopplungsfreie Teilmodelle in Quellen mit den entsprechenden Verteilungen für die Zwischenankunftszeiten umgewandelt werden.

Abbildung 4: Verteilungsbestimmung

3.7. Experimentdurchführung

Anstelle von numerischen Konstanten können im Modellbeschreibungsfiler die Variablen X bzw. Y eingesetzt werden. Daraus resultieren folgende Meßgrößen:

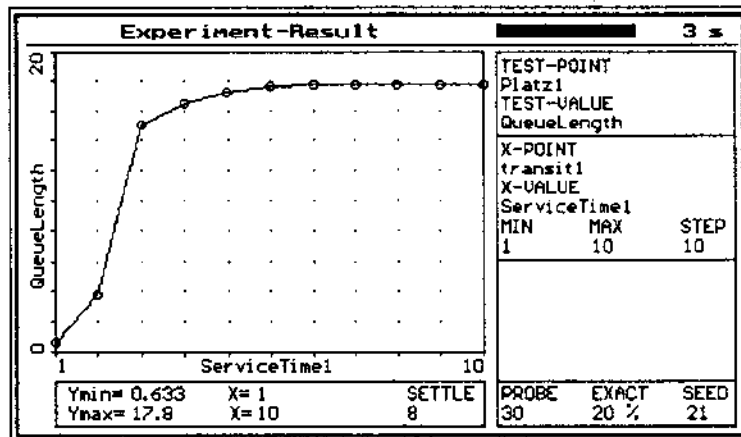
- | | | |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Variable : | Meßgrößen von Transitionen : | Meßgrößen von Plätzen : |
| • Kapazität | • gesamter Durchsatz | • gesamte Ankünfte |
| • Anfangs-Markierung | • Durchsatz/Zeit | • Ankünfte/Zeit |
| • Bedienzeit | • mittlerer Bedienabstand | • mittlerer Ankunftsabstand |
| • Kantengewicht | • mittlere Servicezeit | • gesamter Durchsatz |
| • Priorität | • mittlere Ruhezeit | • Durchsatz/Zeit |
| • Wahrscheinlichkeit | • mittlere Auslastung | • mittlerer Passageabstand |
| • Einschwingzeit | | • mittlere Passagewahrscheinlichkeit |
| | | • gesamte Verluste |
| | | • Verluste/Zeit |
| | | • mittlerer Verlustabstand |
| | | • mittlere Verlustwahrscheinlichkeit |
| | | • mittlere Wartewahrscheinlichkeit |
| | | • mittlere Wartezeit |
| | | • mittlere Warteschlangenlänge. |

Diese Parameter werden dann entsprechend dem festgelegten Bereich und der festgelegten Schrittzahl variiert. Die Ergebnisse des Experiments werden graphisch dargestellt und die Extremwerte werden ermittelt (Abbildung 5). Es findet ein automatisches Scaling für den Y-Bereich statt, wobei auch mehrere Meßkurven zu Vergleichszwecken übereinander gelegt werden können. Bei zwei Variablen erfolgt eine dreidimensionale Darstellung der Ergebnisfläche.

Oft interessiert nicht nur der ungefähre Verlauf, sondern es sollen auch Aussagen über die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Kurve getroffen werden. Auch in [Pag91, S.127] wird die Angabe von Konfidenzintervallen für Stichprobenmittelwerte gefordert, um eine sinnvolle Interpretation der Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Deshalb wurde die Möglichkeit geschaffen, den maximal zugelassenen Fehler der Experimentergebnisse bei einer statistischen Sicherheit von 95% vorzugeben.

Die Vorgabe eines maximal zugelassenen Fehlers bietet gegenüber der Ermittlung des Fehlers bei vorgegebenem Stichprobenumfang drei wesentliche Vorteile. Erstens kann für die gesamte Kurve, die sich aus mehreren Punkten zusammensetzt, eine einheitlicher Fehlergrenze angegeben werden. Das ist einer unterschiedlichen Fehlerangabe für jeden Punkt der Kurve vorzuziehen.

Zweitens wird der Stichprobenumfang automatisch so groß gewählt, daß die gewünschte Fehlerschranke eingehalten wird, jedoch keine überflüssigen Messungen ausgeführt werden. Es wird also vermieden, daß ein Simulationslauf wegen unzureichender Genauigkeit wiederholt werden muß und gleichzeitig wird der Zeitbedarf für die Simulation auf das unbedingt notwendige Maß reduziert.



Drittens wird durch die Vorgabe einer einheitlichen Fehlerschranke die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Simulationsläufe gewährleistet. Dies ist für die Auswertung der Simulationsergebnisse von wesentlicher Bedeutung.

Die Einschwingphase kann automatisch ausgeblendet werden. Das Ende der Einschwingphase, bezogen auf einen gewählten Meßpunkt und Meßwert, wird nach einer modifizierten Methode von Conway [Pag91, S.122] [Gar92] ermittelt.

Abbildung 5: Experimentdurchführung

4. Zusammenfassung

Es wurde eine Modellbeschreibungskonzepte formuliert und ein Simulationssystem geschaffen. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt :

1. Integration verschiedener Erweiterungen der Petri-Netz-Methode zu einem Modellierungskonzept :

- individuelle Marken,
- mehrere Marken pro Platz,
- Festlegung von Wartedisziplinen für Plätze (FIFO, LIFO, RANDOM),
- Kantengewichte > 1,
- Angabe von Verteilungsfunktionen für das Kantengewicht,
- Zeiten für das Schalten der Transitionen (vom Feuern bis zur Verfügbarkeit der Marken),
- Angabe einer Verteilungsfunktion für diese Zeiten,
- Schaltbedingung ohne Schaltaktion (Test-Kante),
- erweiterte Schaltbedingung ohne Aktion (" \leq ", " $=$ ", " \geq "),
- erweiterte Schaltbedingung mit Aktion (Rückstau, Verlust),
- Prioritäten für Transitionen,
- Wahrscheinlichkeiten für Transitionen.

2. Folgende Erweiterungen des Modellierungskonzeptes wurden für eine spätere Integration in SIMNET vorgeschlagen:

- zerstörungsfreie Übertragung von Marken mit ihren Attributen beim Feuern einer Transition,
- Transitionen mit Mehrfachaktivierung für das Modellieren von Prozessorsharing und Verzögerungen,
- selbstmodifizierende Petri-Netze,
- Submodell-Konzept mit unbegrenzte Verschachtelungstiefe,
- Einsatz von Techniken zur Modellierung von Subprozessen.
- Einführung von attributabhängigen Prioritäten für Marken.
- Einsatz von unterbrechenden Prioritätstechniken.

3. Folgende Möglichkeiten zur effektiven Lösung praktischer Aufgabenstellungen wurden in SIMNET integriert:

- Graphische animierte Darstellung des Simulationslaufes zur Veranschaulichung des Prozesses sowie zur Überprüfung auf Richtigkeit der Modellstruktur,
- Schrittbetrieb,
- Protokoll-Funktion,
- oszilloskopartige Momentanwertmessung,
- Darstellung des Kalenders und der Warteschlangen zur Unterstützung der Fehlersuche,
- automatisches Durchführen von Meßreihen mit ein und zwei Parametern,
- Integration von zwei- und dreidimensionaler graphischer Darstellung der Kurven der Experimente mit automatischer Meßbereichswahl,
- Kurvenvergleich für Testreihen mit unterschiedlichen Modellen bzw. Parametern (für Experiment- und Verteilungsmodul),
- Vorgabe von Genauigkeiten zur Vergleichbarkeit von Kurven,
- Untersuchung der Einschwingphase,
- automatisches Ausblenden der Einschwingphase nach einem modifizierten Verfahren von Conway,
- Untersuchung der Verteilungsfunktion von Meßwerten zum Ersetzen von Teilmodellen durch Quellen mit entsprechender Verteilungsfunktion,
- Ermittlung von Verteilungsfunktionen mittels Chi-Quadrat-Anpassungs-Test,
- Möglichkeit zur Definition beliebiger Verteilungen über Tabellen,
- Exportfunktion zum Integrieren von Kurven- und Modelldarstellungen in Textverarbeitungssystemen und Zeichenprogrammen (PCX- und ASCII-Format).

Mit SIMNET wurde ein auf stochastischen Petri-Netzen basierendes Simulationssystem entwickelt, das prinzipiell für alle Systeme angewendet werden kann, deren Verhalten durch diskrete stochastische Prozesse beschreibbar ist. Bisher wurde SIMNET bei der Untersuchung von Fileserver-Architekturen [Gar90/91/92], bei der Modellierung von Bauprozessen, für Netzpläne mit beliebigen Verteilungen der Vorgangsdauern sowie bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen eingesetzt.

Eine Testversion ist bei den Autoren verfügbar.

5. Literaturverzeichnis

- [Gar90] Garbe, W. / Leupold, W.: Modellierung und Simulation in Rechnernetzen, 11. Wissenschaftliches Seminar Mikrorechner - Studentische Ausbildung und Industrielle Anwendung, Tagungsmaterial, Polytechnische Hochschule Wroclaw, 1990
- [Gar91] Garbe, W.: Architekturbewertung und Optimierung von Fileservern durch Simulation auf der Basis stochastischer Petri-Netze, Wissenschaftliche Beiträge zur Informatik, Fakultät Informatik an der Technischen Universität Dresden, 1991
- [Gar92] Garbe, W.: Ein Beitrag zur Methodik der Architekturbewertung und Optimierung von Fileservern durch Simulation auf der Basis stochastischer Petri-Netze. Dissertation, Fakultät Informatik, Technische Universität Dresden 1992
- [Kön88] König, R. / Quäck, L. : Petri-Netze in der Steuerungstechnik, VEB Verlag Technik Berlin 1988
- [Mol82] Molloy, M.K.: Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets, IEEE Transactions on Computers, Vol C-31, No.9 Sept.1982
- [Smi91] Smith, E.: Neuroinformatik und Petri-Netze, GMD-Spiegel 2/91, S.46-49
- [Sta80] Starke, P.H.: Petri-Netze, Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1980
- [Sta90] Starke, P.H.: Analyse von Petri-Netz-Modellen, B.G. Teubner Stuttgart 1990
- [Vos87] Voss, K. / Gennrich, H. J. / Rozenberg, G.: Concurrency and Nets - Advances in Petri Nets, Springer Verlag Berlin 1987 S.38

Wolf Garbe
Otto-Dix-Ring 20
01219 Dresden
Tel. (0351) 2752531
Fax (0351) 2752531

Antje Kantelberg
TU Dresden / Inst. für Baubetriebswesen
Mommensenstraße 13
01062 Dresden
Tel. (0351) 463 4242 / Fax (0351) 463 4680
E-mail: kantelberg@bauingenieurw.tu-dresden.d400.de