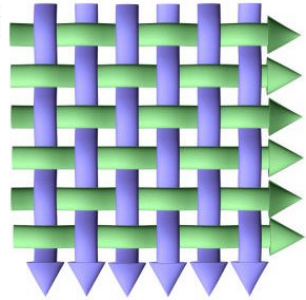


Sonderforschungsbereich 559

**Modellierung großer
Netze in der Logistik**



Technical Report 03017

ISSN 1612-1376

**Anwendung nicht-simulativer Techniken
zur Analyse eines dezentralen
Güterverkehrszentrums**

Teilprojekt M2:
M. Arns, M. Fischer, P. Kemper

Universität Dortmund
Lehrstuhl Informatik IV
August-Schmidt-Straße 12
D-44227 Dortmund

11. August 2003

1. Einleitung

Das übergeordnete Thema des Sonderforschungsbereichs „Modellierung großer Netze in der Logistik“ in der zweiten Projektphase heißt „Experimentieren“. Unter diesem Gesichtspunkt liegen die Schwerpunkte des Methodenteilprojekts M2 „Effiziente Analyseverfahren“ in der Erprobung und Verfeinerung der in der ersten Phase bereitgestellten Verfahren anhand zahlreicher Anwendungsbeispiele.

Dieser Bericht dokumentiert die Arbeitsschwerpunkte des Teilprojekts M2 an einem ausgewählten Anwendungsbeispiel, das aus einer Kooperation mit dem Anwendungsteilprojekt A4 „Netze und Güterverkehrszentren“ und dem Methodenteilprojekt M1 „Strukturierte GNL-Modelle und effiziente Simulation“ entstanden ist.

2. Ziele

Die übliche Vorgehensweise zur Analyse eines Logistiknetzes besteht darin, ein für das Netz entworfenes Modell zu simulieren. Das Ziel des TP M2 ist es, das erhebliche Potential nicht-simulativer Techniken, insbesondere die Vorteile analytisch-algebraischer und analytisch numerischer Analysemethoden, für die Analyse von Logistiknetzen nutzbar zu machen. Die wesentlichen Vorteile dieser Verfahren liegen in der Effizienzsteigerung der Simulation (Verkürzung der Dauer eines Simulationslaufs) durch Voranalyse ausgewählter Teilmodelle sowie in der Aufdeckung von Modellierungsfehlern bzw. dem Erkennen unerwünschten Modellverhaltens.

Dieser Bericht verdeutlicht die besondere praktische Relevanz nicht-simulativer Techniken an einem ausgewählten Anwendungsbeispiel. Zu diesem Zweck stellt das Kapitel 3 das in diesem Bericht betrachtete Referenzmodell eines dezentralen Güterverkehrszentrums kurz vor. In den folgenden Kapiteln werden verschiedene effiziente Analyseverfahren zur Untersuchung dieses Modells herangezogen und die Vorteile dieser Verfahren gegenüber einer simulativen Analyse herausgestellt bzw. das Potential zur Ergänzung der Simulation dargelegt.

3. Das Modell

Dieses Kapitel stellt das diesem Bericht zugrunde liegende Referenzmodell eines dezentralen Güterverkehrszentrums (GVZ) vor, das aus einer Kooperation mit dem TP A4 und dem TP M1 entstanden ist. Das Modell ist einer recht frühen Phase der Kooperationstätigkeit entnommen und abstrahiert daher von einigen Details, die in der weiteren Kooperation hinzugefügt wurden. Diese Abstraktion hat jedoch keine Auswirkungen auf die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse des TP M2, so dass die Kernaussagen dieses Berichts für das weiterentwickelte Modell unverändert erhalten bleiben. Dieses Modell wird in [DiV03] detailliert beschrieben, so dass hier nur ein Überblick über die Modellstruktur sowie das dynamische Modellverhalten gegeben wird. Die folgende Definition erläutert den Begriff GVZ und grenzt dezentrale GVZs von zentralen ab.

„Ein Güterverkehrszentrum ist eine Verkehrsgewerbefläche, auf der sich Verkehrsbetriebe und verkehrsergänzende Dienstleistungsbetriebe ... als selbständige Unternehmen ansiedeln, und die an mehrere, mindestens zwei Verkehrsträger angebunden ist. ...

Güterverkehrszentren enthalten eine Umschlaganlage des Kombinierten Verkehrs Schiene/Straße ..., die allgemein zugänglich ist (zentrales GVZ). Ausreichend ist, wenn die Umschlaganlage in unmittelbarer Nähe der Verkehrsgewerbefläche gelegen ist und organisatorisch mit ihr verbunden ist. Ein Güterverkehrszentrum ist auch gegeben, wenn mehrere, räumlich getrennte Teilflächen durch organisatorische Vorkehrungen, insbesondere Informationsvernetzung, miteinander verbunden sind (dezentrales GVZ).“ (vgl. [VDV97]).

Das hier betrachtete GVZ-Referenzmodell beinhaltet eine Stückgutumschlaghalle (SUH), in der der Güterumschlag zwischen LKWs realisiert wird sowie einer räumlich davon entfernten Umschlaganlage für den Kombinierten Verkehr Schiene/Straße (KV-Umschlag). Der Gütertransport zwischen SUH und KV-Umschlag erfolgt über die Straße.

Das Modell wurde mit dem Prozessketteneditor (vgl. [AEF03,AFT01,BBF02]) erstellt. Der Prozessketteneditor wurde im Teilprojekt M1 entwickelt und erlaubt die graphische Modellierung einer Prozessketten-Modellwelt, die auf der Prozessketten-Modellwelt nach Kuhn (vgl. [Kuh95]) basiert und um Elemente angereichert wurde, die eine quantitative und qualitative Analyse von Prozesskettenmodellen erlaubt.

Die Abbildung 3.1 zeigt die hierarchische Organisation des Modells.

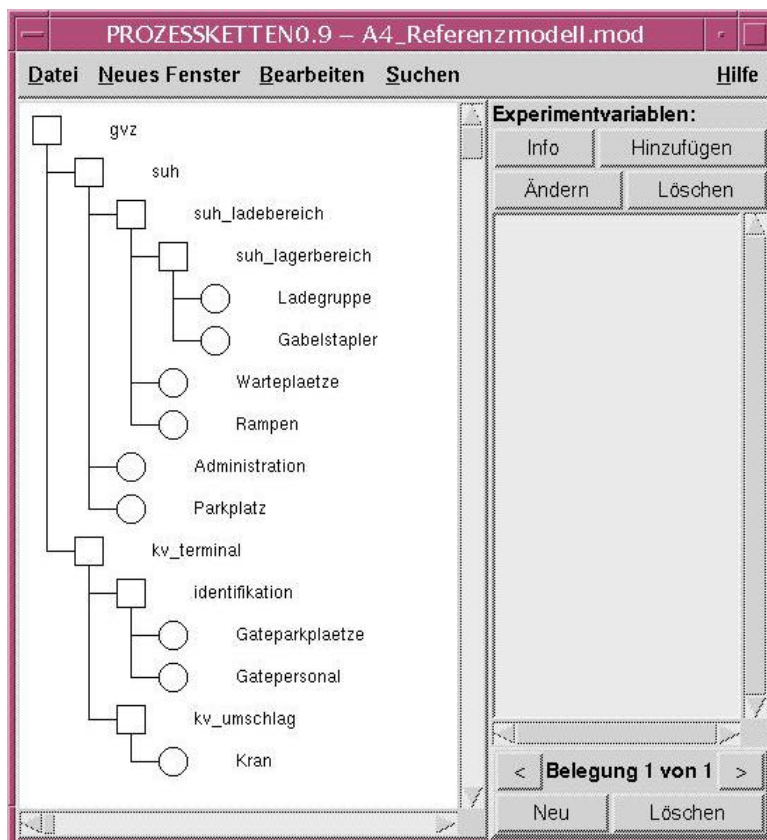


Abbildung 3.1: Struktur des Referenzmodells

Auf den verschiedenen Hierarchieebenen werden jeweils Ausschnitte des Modells in unterschiedlichen Detaillierungsgraden spezifiziert. Die oberste Hierarchieebene gvz beschreibt die Belastung des Modells durch Spezifikation der Ankünfte der Verkehrsträger LKW und Zug sowie das

Grobverhalten der Verkehrsträger innerhalb des GVZ. LKWs werden weiter unterschieden in solche, die lediglich die Stückgutumschlaghalle anfahren und solche, die für den Verkehr zwischen SUH und KV-Umschlag zuständig sind. Die Stückgutumschlaghalle und das KV-Terminal werden in den Funktionseinheiten `suH` und `kv_terminal` weiter verfeinert. Die Funktionseinheit `suH` gibt die äußere Sicht auf die Stückgutumschlaghalle wieder und regelt im wesentlichen die geordnete LKW-Abfertigung anhand der begrenzten Ressource `Parkplatz`. Der eigentliche Umschlagprozess wird in den verfeinernden Funktionseinheiten `suH_ladebereich` und `suH_lagerbereich` beschrieben.

Ebenso spezifiziert die FE `kv_terminal` die äußere Sicht auf das KV Terminal. Der geordnete Umschlag zwischen den Verkehrsträgern LKW und Zug wird durch die in der Hierarchie tieferliegenden FEs `identifikation` und `kv_umschlag` modelliert.

Auf eine detaillierte Beschreibung des Verhaltens innerhalb all dieser FEs wird an dieser Stelle verzichtet und auf [DiV03] verwiesen.

4. Sizing

Bei der Erstellung von Modellen im Anwendungsgebiet Logistik zu Analyse Zwecken steht häufig neben der Ermittlung interessierender logistischer Kennzahlen eine hohe Akzeptanz bzw. Realitätsnähe der Modelle im Vordergrund. Der Modellierer hat somit das Bestreben, das betrachtete System durch das Modell möglichst detailgetreu wiederzugeben. Aufgrund dieses hohen Detaillierungsgrads sind Logistikmodelle meist nur durch sehr zeitintensive Simulationsläufe analysierbar. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die hohe Komplexität negativ auf die Modellverifikation auswirkt. Modellierungsfehler müssen mühselig identifiziert werden, da die Simulation hierzu kaum Unterstützung bietet. Somit ist der der Analyse vorgeschaltete Prozess der Modellerstellung bereits sehr langwierig.

Das Teilprojekt M2 treibt daher den häufig propagierten, jedoch wenig beachteten Top-Down Modellentwurf voran. Dieser teilt den Entwurfsprozess in mehrere Phasen ein, von denen jede das betrachtete System in unterschiedlichen Detaillierungsgraden beschreibt. Beginnend mit einem sehr einfachen Modell werden sukzessive ausgewählte Modellteile verfeinert. Dieses Vorgehen wird durch die hierarchische, modulare Strukturierung von ProC/B-Modellen besonders unterstützt. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser Methodik liegt darin, dass bereits in sehr frühen Phasen aufgrund der geringen Modellkomplexität ausgewählte Kennzahlen des Modells anhand sehr effizienter analytisch-algebraischer Analysemethoden berechnet werden können. Zur Erläuterung dieses Vorgehens wird im folgenden ein abstraktes Modell (Sizing-Modell) des in Abschnitt 3 vorgestellten GVZ-Modells entwickelt, das gezielt auf die Bestimmung der Ressourcenauslastungen ausgerichtet ist. Dieses Modell besitzt die gleiche hierarchische Struktur wie das detaillierte Modell (vgl. Abbildung 3.1), ist jedoch vom internen Verhalten der einzelnen Teilmodelle deutlich einfacher aufgebaut.

Die Belastung des Sizing-Modells erfolgt ebenfalls durch die Temporärobjekte LKW und Zug, die jedoch nicht unterscheidbar sind, d.h. sie sind nicht einzeln gekennzeichnet durch ihre Größe, Ladung etc. Die Typenvielfalt eines Temporärobjektes findet darin Berücksichtigung, dass mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines bestimmten Typs ein bestimmtes Verhalten assoziiert wird.

Die Teilmodelle beschreiben im wesentlichen die Dauer der Benutzung der aktiven Ressourcen durch die Temporär Objekte. Die Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft einen Screenshot des Teilmodells `sub_lagerbereich` des Sizing-Modells.

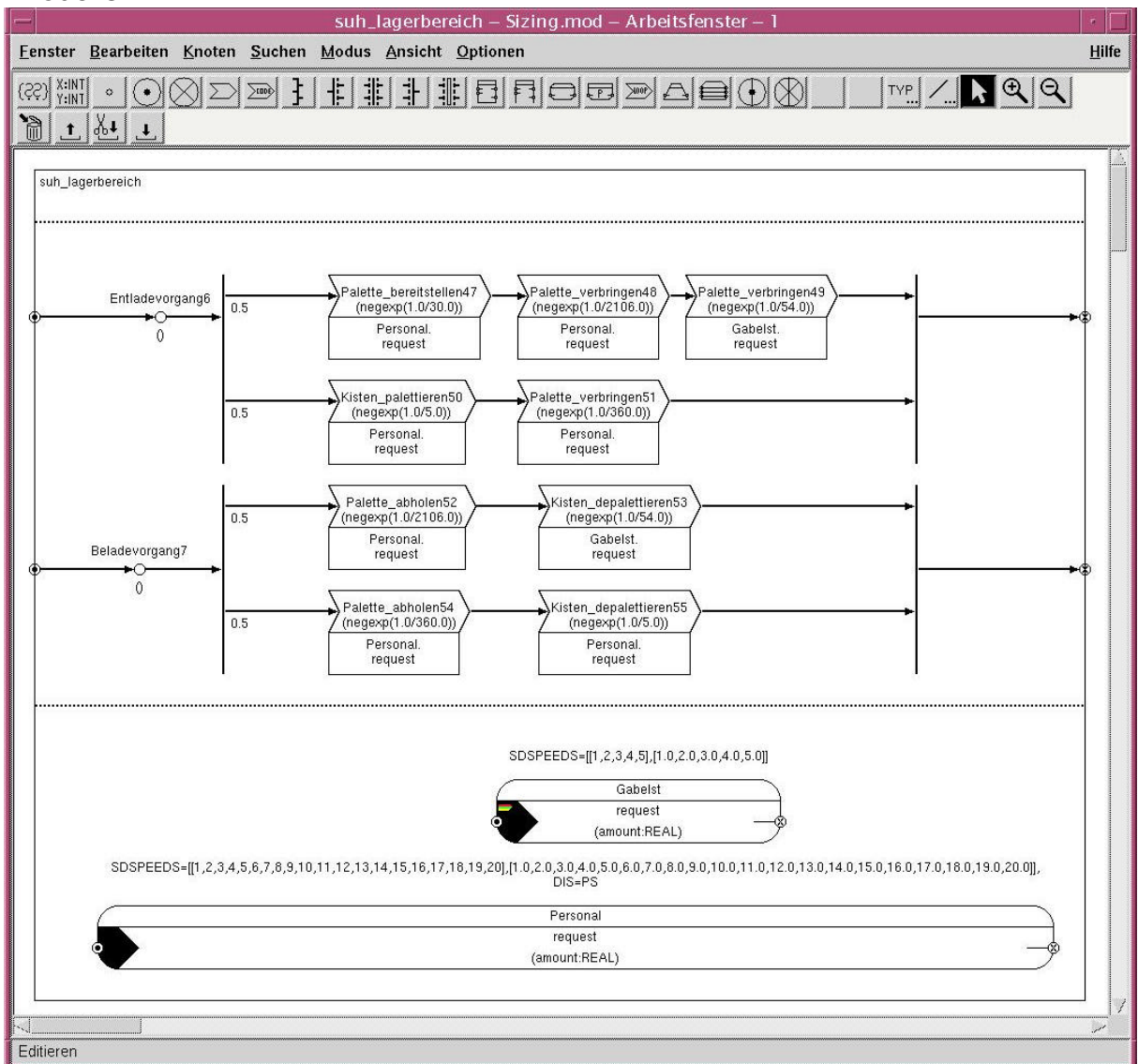


Abbildung 4.1: Lagerbereich des Sizing-Modells

Die Prozessketten „Entladevorgang“ bzw. „Beladevorgang“ beschreiben grob das Systemverhalten beim Entladen bzw. Beladen verschiedener LKW-Typen (Wahrscheinlichkeit 0.5 Typ „groß“, 0.5 Typ „klein“). Das detaillierte Verhalten beim Ent- bzw. Beladen der verschiedenen Typen bleibt unberücksichtigt. Berücksichtigt ist lediglich, dass beim Ent- bzw. Beladen die Ressourcen „Personal“ und „Gabelstapler“, die in unterschiedlicher Anzahl vorhanden sind, benutzt werden. Die Dauer der Benutzung der Ressourcen, die im detaillierten Modell von der Ladungsgröße jedes einzelnen LKWs abhängt, wird im Sizing-Modell anhand der mittleren Ladungsgröße der verschiedenen LKW-Typen bestimmt. In ähnlicher Weise wird im Sizing-Modell von den internen Abläufen der übrigen Teilmodelle abstrahiert.

Dieses Modell ist geeignet, die Auslastungen der Ressourcen „Personal“ und „Gabelstapler“ sowie auch die Auslastungen der Ressourcen der übrigen Teilmodelle, exakt anhand analytisch-algebraischer Analyseverfahren zu

ermitteln. Die Tabelle 1 gibt die Ressourcenauslastungen des suh_lagerbereichs bzgl. der Prozesse Entladevorgang und Beladevorgang an.

	Lastpfad	Auslastung
Gabelstapler	ALL	0,014
	Entladevorgang	0,007
	Beladevorgang	0,007
Personal	ALL	0,161
	Entladevorgang	0,081
	Beladevorgang	0,080

Tabelle 1: Ressourcenauslastung des suh_lagerbereichs

Anhand dieses Sizing-Modells lässt sich ebenfalls eine Approximation der Durchlaufzeiten der Temporärobjekte angeben. Dies ist jedoch im allgemeinen für Logistiknetze nicht möglich. Die Gründe hierfür lassen sich im wesentlichen an den folgenden beiden Aspekten festmachen. Zum einen sind die algebraischen Analyseverfahren nicht geeignet, Synchronisationsaspekte zu behandeln. Der an Synchronisationsaspekten auftretende Zeitverzug bleibt somit unberücksichtigt und führt zu kürzeren Durchlaufzeiten der Sizing-Modelle. Zum anderen setzen die algebraischen Analyseverfahren voraus, dass sich die Zwischenankunfts- und abgangszeiten der Temporärobjekte an den einzelnen Bearbeitungsstationen und auch die Bedienzeiten an FCFS-Bedienern durch negativ-exponentiell verteilte Zufallsvariablen beschreiben lassen. Diese Annahme lässt sich in Logistiknetzen jedoch meist nicht rechtfertigen. Realitätsnäher sind Verteilungen mit recht kleinem Variationskoeffizienten. Die Verletzung dieser Eigenschaft führt zu einer Überschätzung der Durchlaufzeiten im Sizing-Modell.

Die folgende Tabelle stellt vergleichend die simulativ ermittelten Durchlaufzeiten des Referenzmodells und die algebraisch ermittelten Durchlaufzeiten des Sizing-Modells gegenüber.

FE	Ev. Objekt	Hierarchie	Referenzmodell	Sizing-Modell	Abweichung in %
suh	Durchlaufzeit	ALL	2870,06	3058,92	6,17%
suh_ladebereich	Durchlaufzeit	ALL	1648,25	1823,85	9,63%
suh_lagerbereich	Durchlaufzeit	ALL	1287,74	1270	1,38%
kv_terminal	Durchlaufzeit	ALL	689,5	691,49	0,29%
kv_umschlag	Durchlaufzeit	ALL	260,1	261,39	0,49%
identifikation	Durchlaufzeit	ALL	212,2	213	0,38%

Tabelle 2: Vergleich der Durchlaufzeiten des Referenzmodells und des Sizing-Modells

5. Aggregation

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Arbeitsergebnisse zum Thema Aggregation mit analytisch-algebraischen Analysemethoden für separable Warteschlangennetze. Das Ziel der Aggregation ist die Reduktion der Ausführungszeit von Simulatoren zur Analyse von Logistiknetzen.

Simulationsmodelle im Anwendungsgebiet Logistik sind häufig sehr komplex und detailliert. Demzufolge sind Simulationen der Modelle sehr zeitintensiv. Unter Berücksichtigung der Aussagen, die über ein Modell per Simulation getroffen werden sollen, ist jedoch oft die konkrete Ausprägung bestimmter Teilmodelle irrelevant. Für die Simulation des Gesamtmodells würde es ausreichen, die zeitliche Verzögerung, die die Temporärobjekte durch diese

Teilmodelle erfahren, zu kennen. Diese zeitliche Verzögerung wird in der Regel nicht für alle Temporärobjekte konstant sein, sondern von verschiedenen Einflussfaktoren abhängen, wie bspw. der Anzahl bereits anwesender Temporärobjekte beim Eintreffen eines neuen Temporärobjekts. Die Idee der Aggregation besteht darin, solche Teilmodelle in einer der Simulation vorgeschalteten Phase zu analysieren und eine einfache Ersatzdarstellung zu berechnen, die diese zeitliche Verzögerung realisiert. Dadurch wird eine Reduktion der Modellkomplexität erzielt und die Simulation des Modells beschleunigt.

Der Erfolg der Aggregation hängt wesentlich von der Effizienz der eingesetzten Aggregationstechnik und von der Komplexität der aggregierten Teilmodelle ab. Von einer Aggregation „unkomplexer“ Teilmodelle ist in den meisten Fällen kein wesentlicher Zeitgewinn in der Simulation zu erwarten.

Der hier verfolgte Ansatz bestimmt für ein Teilmodell ein „flussäquivalentes“ Aggregat anhand analytisch-algebraischer Analysemethoden für separable Warteschlangennetze. Die Idee der flussäquivalenten Aggregation für ein Teilmodell besteht darin, die Verzögerung eines Temporärobjektes durch dieses Teilmodell in Abhängigkeit der bereits anwesenden Temporärobjekte darzustellen. Die algebraischen Analysemethoden zur Bestimmung dieses Aggregattyps setzen jedoch einige Eigenschaften der betrachteten Teilmodelle voraus, die in Simulationsmodellen meist nicht erfüllt sind. Demzufolge sind die Teilmodelle zunächst unter dem Gesichtspunkt zu untersuchen, ob sich eine geeignete Modifikation, die diese Eigenschaften erfüllt, rechtfertigen lässt. Diese Modifikation muss derart sein, dass der dadurch eingebrachte Fehler nicht signifikant ist.

Unter diesen Gesichtspunkten wird im folgenden das in Kapitel 3 beschriebene GVZ-Modell betrachtet und demonstriert, wie mittels Aggregation die Simulationszeit des Modells reduziert wird.

Die im Zentrum der Analyse stehenden Logistikkennzahlen sind die Durchlaufzeiten und Bestände der LKWs in der Funktionseinheit (FE) suh sowie die Durchlaufzeiten und Bestände der LKWs und Züge in der FE kv_terminal. Zur Ermittlung dieser Kennzahlen ist das detaillierte Verhalten der diesen Teilmodellen untergeordneten FEs nicht relevant. Diese untergeordneten FEs sind somit potentielle „Aggregationkandidaten“.

Die folgenden Ausführungen erläutern die Bestimmung eines Aggregats für die FEs suh_lagerbereich und identifikation. Die FE suh_lagerbereich wurde ausgewählt, da in dieser FE ein erheblicher Teil der Modellaktivität stattfindet und die Aggregation dieser FE somit einen signifikanten Zeitgewinn in der Simulation verspricht. Aufgrund der sehr hohen Modellkomplexität dieser FE werden aus Gründen der Darstellung die einzelnen Schritte zur Aggregatberechnung an der sehr viel einfacheren FE identifikation erläutert. Die Abbildung 5.1 zeigt einen Screenshot der FE identifikation im ursprünglichen Simulationsmodell.

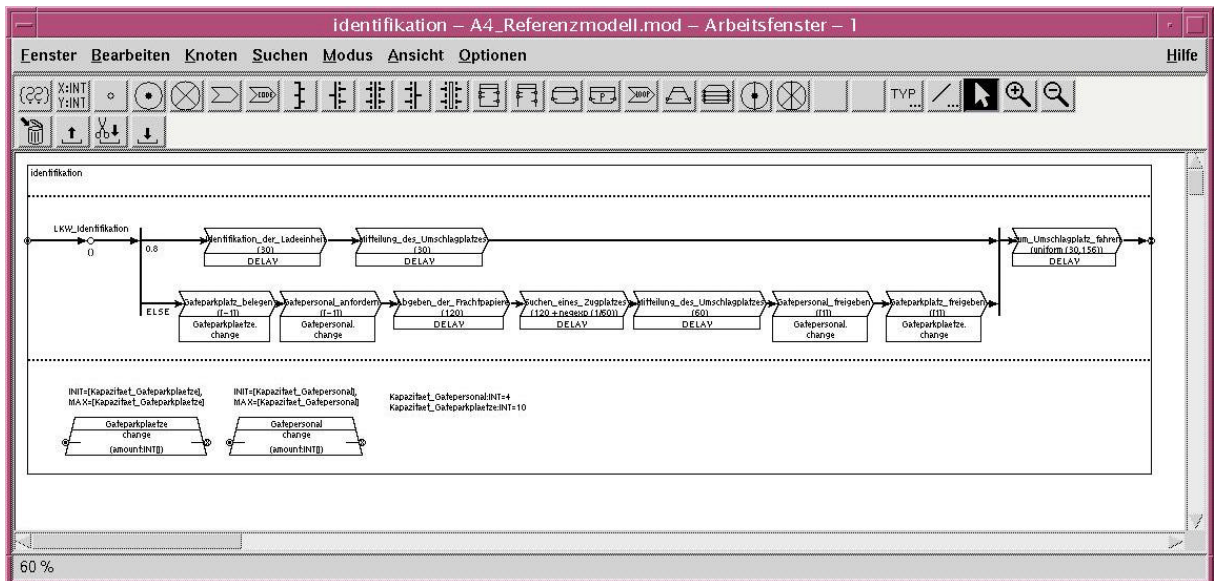


Abbildung 5.1: FE identifikation im ursprünglichen Simulationsmodell

In diesem Teilmodell sind für die Anwendung der algebraischen Analysetechnik zur Aggregatbestimmung zwei Aspekte hinderlich. Dies ist einerseits die Repräsentation der Fahrtzeit in dem Prozesskettenelement „zum_Wartepplatz_fahren“ durch eine Gleichverteilung und andererseits die Benutzung der beiden passiven Ressourcen „Gatepersonal“ und „Gateparkplätze“. Zur Lösung dieser Problematik wird zunächst die „schwankende“ Fahrtzeit in dem Prozesskettenelement „zum_Wartepplatz_fahren“ durch den Mittelwert ersetzt. Die beiden passiven Ressourcen „Gatepersonal“ und „Gateparkplätze“ modellieren einen Bedienprozess, bei dem zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe gewisse Ressourcen für eine bestimmte Dauer benötigt werden. Beide Ressourcen sind mehrfach, jedoch in unterschiedlicher Anzahl, vorhanden. Diese Konstruktion eines Bedienprozesses, bei dem passive Ressourcen für eine gewisse Zeitspanne festgehalten werden, ist in Prozesskettenmodellen sehr häufig zu beobachten und kann oft durch einen zustandsabhängigen aktiven Bediener, wie er aus Warteschlangennetzen bekannt ist, ersetzt werden. Die Abbildung 5.2 zeigt ein modifiziertes Modell der FE identifikation, das einerseits die ursprüngliche FE sehr gut approximiert und andererseits der algebraischen Analysemethode zugänglich ist. Dieses modifizierte Modell bildet die Basis zur Bestimmung eines Aggregats. Dieses Aggregat repräsentiert die Verzögerung, die die Temporärobjekte LKW, abhängig von der Anzahl anwesender LKWs, in der FE identifikation erfahren. Die Abbildung 5.3 zeigt das Aggregat, das anhand der algebraischen Analysetechnik für die FE identifikation ermittelt wurde.

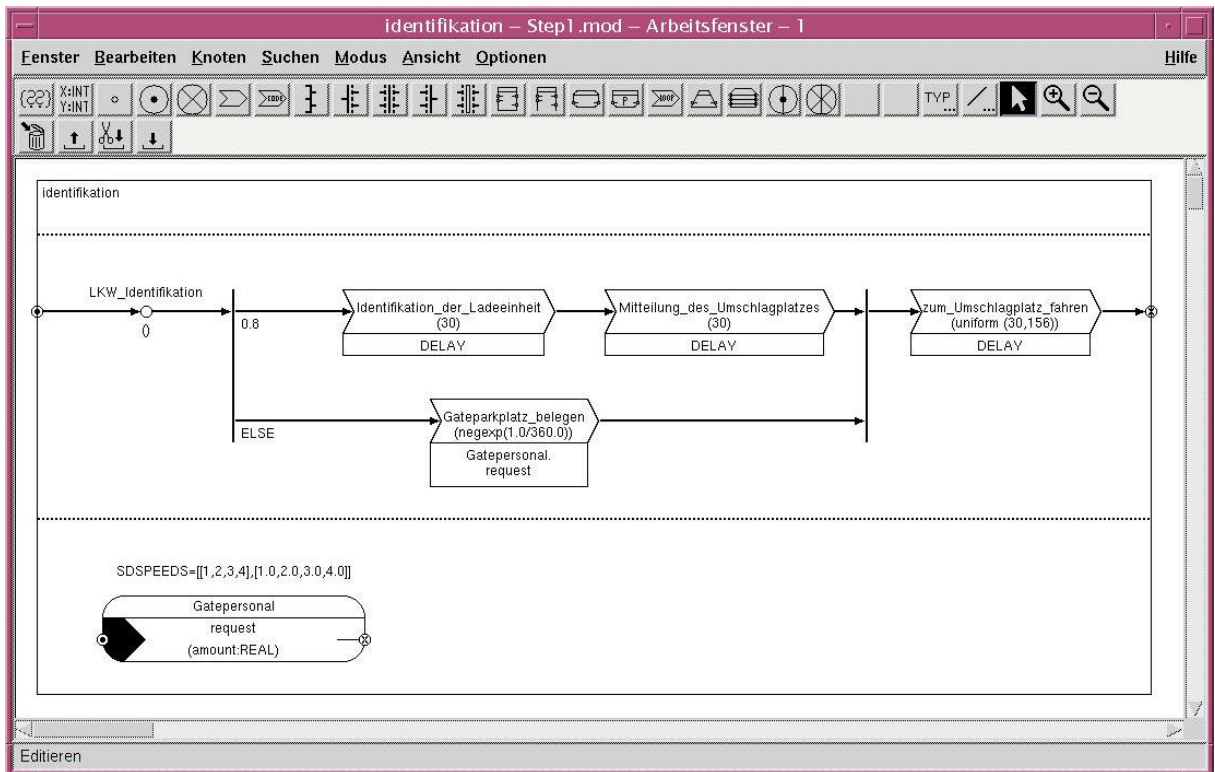


Abbildung 5.2: Modifizierte FE identifikation

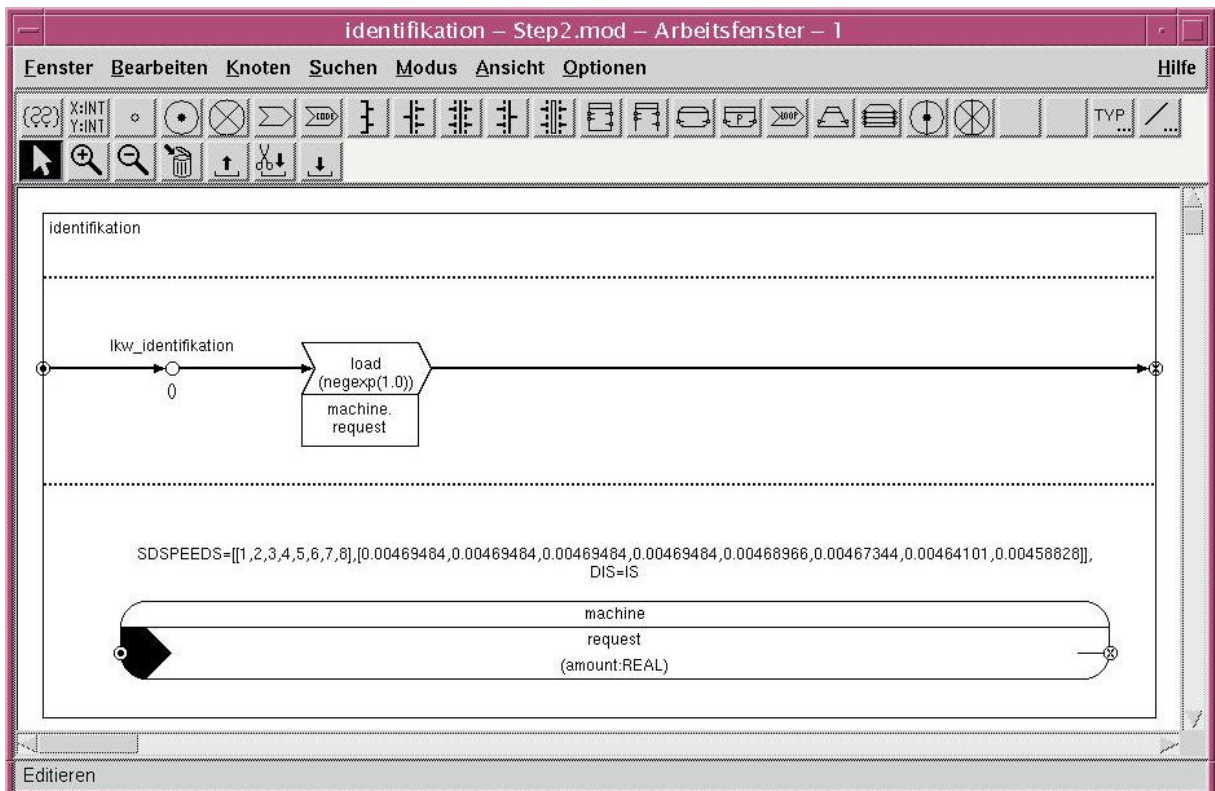


Abbildung 5.3: Aggregat der FE identifikation

Aufgrund der recht einfachen Struktur der FE identifikation ist für die Simulation des Gesamtmodells unter Verwendung des Aggregats kein signifikanter Zeitgewinn zu erwarten. Daher wurde in der dargestellten Weise ein Aggregat für die FE suh_lagerbereich bestimmt. Unter Verwendung eines Aggregats für die FE suh_lagerbereich konnte in der Simulation des Gesamtmodells ein Zeitvorteil von 40 % erzielt werden. Die für die Aggregation nötige Modifikation

der beiden Teilmodelle induzierte einen sehr geringen Fehler, wie die Tabelle 3 zeigt.

FE	Ev. Object	Hierarchy	Referenzmodell	Step 2	Step 4
suh	Bestand	All	5,93	5,96	5,74
	Durchlaufzeit		2864	2876	2735
kv_terminal	Bestand	All	0,808	0,82	0,815
		Zug	0,1708	0,171	0,171
		LKW	0,637	0,648	0,644
	Durchlaufzeit	All	694	692	694
		Zug	1464	1464	1464
		LKW	553	553	554

Tabelle 3: Kennzahlen des GVZ-Modells

Die interessierenden Kennzahlen des Modells waren der Bestand und die Durchlaufzeit der LKWs in der Stückgutumschlaghalle (SUH) sowie die Bestände und Durchlaufzeiten der LKWs und Züge im KV Terminal.

Die Spalte „Referenzmodell“ zeigt die Simulationsergebnisse ohne Verwendung von Aggregaten. Die Spalten „Step 2“ bzw. „Step 4“ zeigen die Ergebnisse nur unter Verwendung des Aggregats für die FE identifizierung bzw. unter Verwendung des Aggregats für die FE identifizierung und des Aggregats für die FE suh_lagerbereich.

6. Approximative Analyse

In diesem Kapitel werden die Arbeiten des Teilprojekts M2 in der zweiten Antragsphase zu dem Themenbereich approximative Analyseverfahren für erweiterte Warteschlangennetze zusammengefasst.

Diese Arbeiten sind durch die Defizite der simulativen Analyse von GNLs einerseits und der analytisch-numerischen bzw. analytisch-algebraischen Analyse andererseits motiviert. Die Nachteile der simulativen Analyse resultieren aus häufig extrem langen Simulationslaufzeiten, der potentiellen Unsicherheit in den Analyseresultaten sowie der fehlenden Möglichkeit einer qualitativ/funktionalen Analyse. Die Nachteile der analytischen Verfahren sind durch Einschränkungen bzgl. der behandelbaren Modellgröße im Fall numerischer Methoden und durch Einschränkungen bzgl. der behandelbaren Modellklasse im Fall algebraischer Methoden begründet.

Die betrachteten approximativen Analyseverfahren kombinieren Techniken der analytisch-numerischen und analytisch-algebraischen Verfahren mit dem Ziel, „gute“ Analyseresultate in „akzeptabler“ Zeit für eine „hinreichende“ Klasse von GNLs zu erhalten. Der Begriff „hinreichende“ Klasse von GNLs lässt sich durch den in Kapitel 4 vorgestellten Abstraktionsgedanken definieren. Es wird ein systematischer mehrstufiger Modellentwurf empfohlen, der mit einem sehr abstrakten Modell startet und in jeder Stufe das Modell um einige Details anreichert. Dabei lassen sich bereits in frühen Modellierungsphasen Analyseresultate anhand effizienter analytischer Analysemethoden erzielen. Erst in späten Phasen wird die Simulation zur Analyse sehr detaillierter Modelle herangezogen.

Die approximativen Verfahren sollen die Einsatzmöglichkeiten der analytischen Methoden ausweiten, indem sie für typische Eigenschaften von Logistik-Netzen angepasst werden.

Im folgenden wird zunächst das Analyseverfahren beschrieben und anschließend an einem Beispiel erprobt.

Die Basis für das Analyseverfahren bildet ein von Kühn/Whitt vorgestellter Dekompositionsansatz für allgemeine offene Warteschlangennetze [Küh79,Whi83]. Die Idee des Verfahrens besteht darin, ein allgemeines Warteschlangennetz geeignet in eine Menge von Subnetzen zu zerlegen und diese Subnetze getrennt voneinander anhand geeigneter Techniken zu untersuchen. Die Beziehung der Subnetze untereinander wird durch den Verkehrsfluss innerhalb des Netzes hergestellt. Dieses Verfahren hat seinen Ursprung in der Analyse von Rechen- und Telekommunikationssystem und ist dazu vielfach erweitert worden. Die wesentliche Erweiterung, die zur Nutzbarmachung des Verfahren für den Logistikbereich herangezogen wird, ist die Darstellung von Zeiten durch phasenverteilte Zufallsvariablen. Dadurch wird in vielen Fällen eine Abbildung der isolierten Subnetze auf Quasi-Geburts-Todes-Prozesse (QBD) möglich, die numerisch und teilweise auch algebraisch gut behandelt werden können.

In der zweiten Projektphase wurde das Kühn/Whitt-Verfahren um zwei für Logistiknetze typische Aspekte ergänzt.

Zum einen wurde zur Behandlung von Prozesssynchronisationen ein Ansatz von Simonetta Balsamo zur Analyse von Fork/Join-Warteschlangennetzen integriert [BDD98]. Zum anderen werden Mehrklassennetze zur Berücksichtigung der für Logistiknetze typischen Variantenvielfalt von Temporärobjecten behandelt.

Im folgenden wird dieses Verfahren anhand eines vereinfachten Ausschnitts des bereits vorgestellten GVZ-Modells erprobt. Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 zeigen eine vereinfachte Sicht auf den Lagerbereich der Stückgutumschlaghalle.

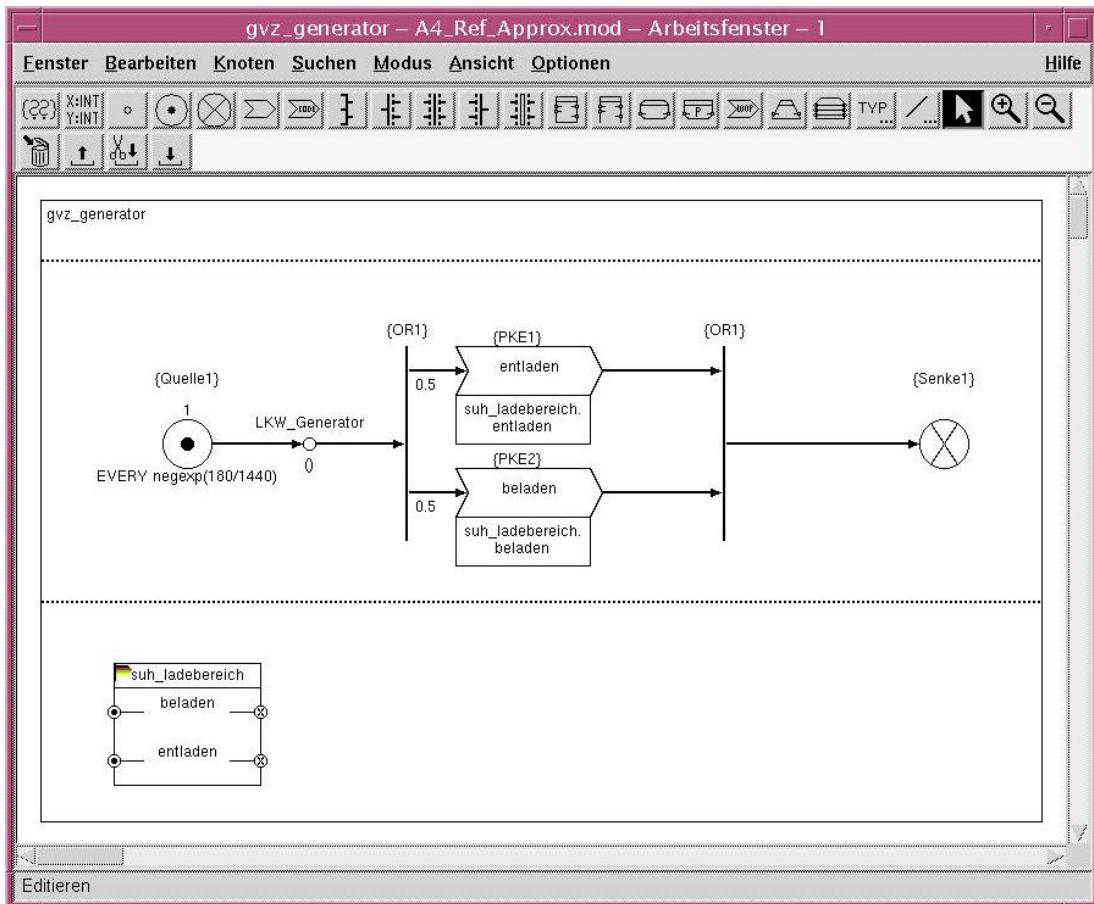


Abbildung 6.1: Vereinfachter Lagerbereich des GVZ-Modells

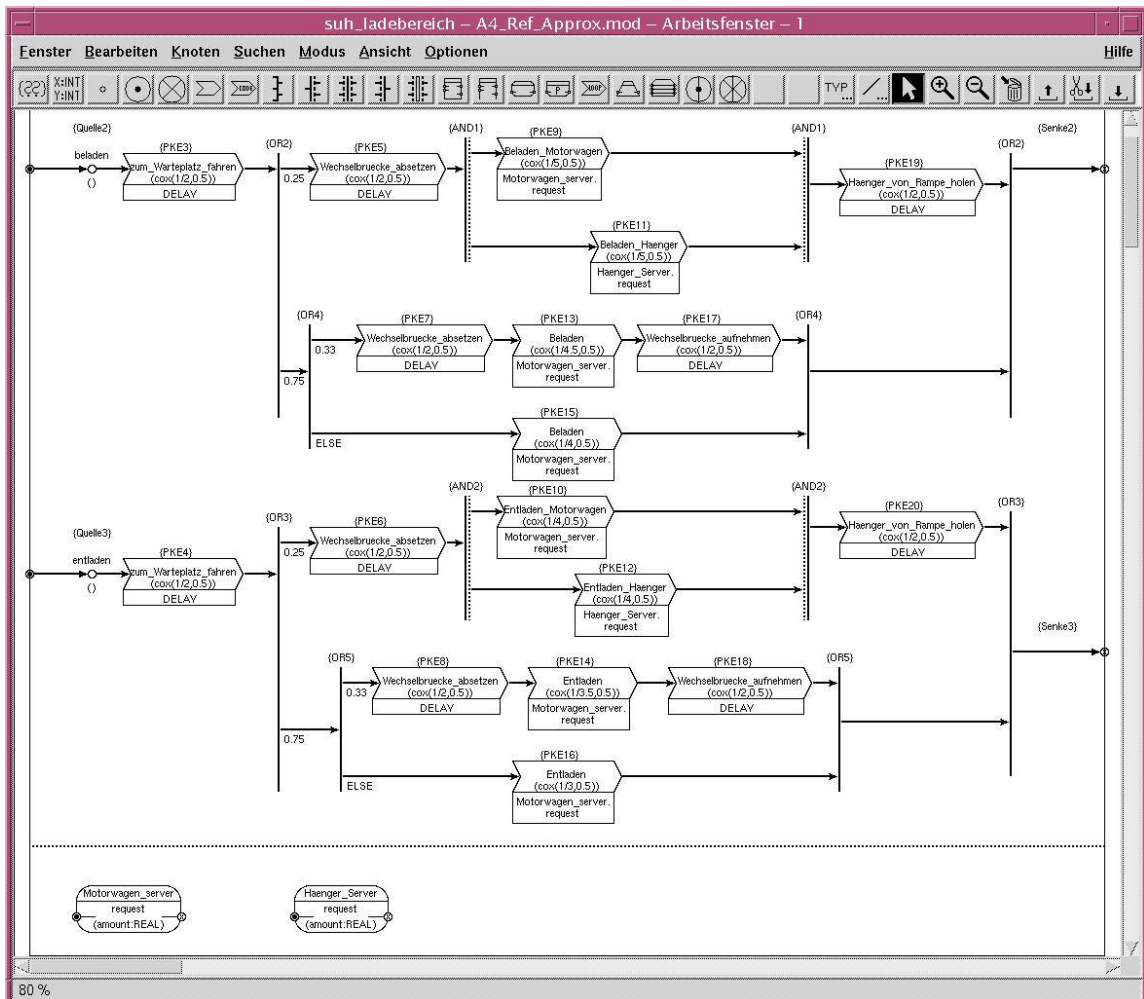


Abbildung 6.2: Lagerbereich der Stückgutumschlaghalle

In dem Modell wird ausschließlich der Umschlagprozess von LKWs in der Stückgutumschlaghalle betrachtet. Dabei werden der Entlade- und Beladeprozess getrennt voneinander betrachtet. Die LKWs werden in drei verschiedene Typen eingeteilt, die sich in ihrer Größe bzw. durch das Mitführen eines Anhängers unterscheiden. Im Modell wird dieser Variantenvielfalt durch eine typabhängige Verzweigung des Belade-/ Entladeprozesses in spezifische Unterprozesse Rechnung getragen. Der eigentliche Belade- bzw. Entladevorgang wird von einer Ladegruppe durchgeführt und dauert je nach LKW-Typ unterschiedlich lange. Führt ein LKW einen Anhänger mit, so wird dieser mit dem LKW parallel von einer zweiten Ladegruppe entladen bzw. beladen.

Die typspezifischen Belade- bzw. Entladezeiten sowie das parallele Umschlagen von LKW und Anhänger verhindern eine exakte algebraische Analyse dieses Modells. Die approximative Analyse liefert jedoch sehr gute Resultate. In der Tabelle 4 sind die Durchlaufzeiten und Populationen der LKWs aufgezeigt. Im Vergleich zur Simulation ergeben sich geringe Abweichungen von etwa 5 %.

Messobjekt	Hierarchie	simulativ	approximativ
Population	ALL	1,3	1,36
Antwortzeit	ALL	10,39	10,93
Population	entladen	0,62	0,65
Antwortzeit	entladen	9,88	10,36
Population	beladen	0,68	0,72
Antwortzeit	beladen	10,88	11,51

Tabelle 4: Vergleich der approximativen Methode mit der Simulation

7. Verteilte Numerische Analyse

Numerische Techniken zur Lösung von Markov-Ketten können zur Voranalyse dedizierter Teilmodelle logistischer Netze eingesetzt werden. Die erzielten Ergebnisse sind nützlich, weil sie zum einen Aussagen zur Dynamik von Teilmodellen (in Isolation von der Umgebung) ermöglichen und zum anderen für die Spezifikation von Aggregaten verwendet werden können.

Die Anwendbarkeit numerischer Techniken wird durch die Größe des Zustandsraums limitiert. Frühere Arbeiten [BuK03] haben gezeigt, dass die behandelbare Zustandsraumgröße durch eine hierarchische, auf Kronecker-Algebra basierenden Darstellung der Markov-Kette deutlich gesteigert werden kann. Die hierarchische Darstellung ist effizient, wenn auf der Ebene des ProC/B Modells, dessen Zustandsraum generiert werden muss, Teilmodelle mit geringer Interaktion identifizierbar sind.

Systembeschreibung: Eine modifizierte Variante der FE Stückgutumschlaghalle ist numerischen Techniken gut zugänglich. Der Abfertigungsbereich der LKWs ist hier organisatorisch in verschiedene Terminals unterteilt, die schwach interagierende Systemteile darstellen. Jedes Terminal verfügt über eine bestimmte Anzahl von Rampen, die von LKWs für deren Abfertigung angefahren werden. Sobald ein LKW an einer von ihm belegten Rampe wartet, wird ein Gabelstapler angefordert. Die Gabelstapler sind entweder bereits im Terminal oder müssen aus einem Gabelstapler-Pool angefordert werden, vgl. Abbildung 7.1. Sobald ein freier Gabelstapler verfügbar ist, findet der

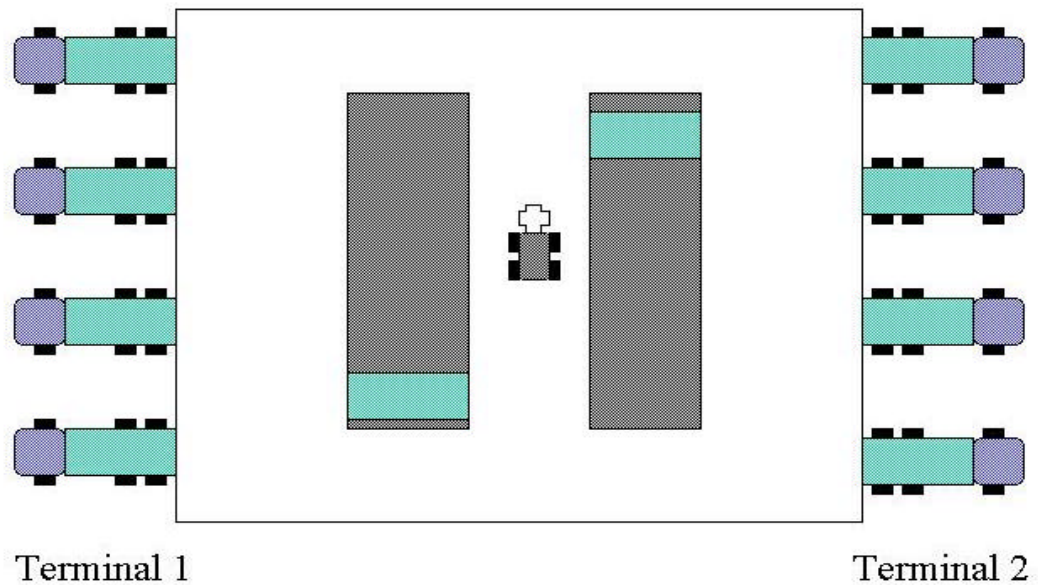


Abbildung 7.1: Anordnungsstruktur der Stückgutumschlaghalle mit 2 Terminals und 5 Rampen je Terminal (sind alle durch LKWs belegt).

LKW-Umschlagprozess statt, der konzeptionell in zwei Phasen unterteilt ist. In der ersten Phase wird zusätzlich zum Gabelstapler Personal (=aktive Ressource) beansprucht (Frachtpapiere prüfen). In der zweiten Phase wird nur der Gabelstapler benötigt (Umschlag). Nach dem Umschlag verläßt der LKW die Rampe und der Gabelstapler ist darüber hinaus noch für eine gewisse Zeit nicht verfügbar (Einsatzplanung, Fahrt zum nächsten Einsatzort). Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden, der Gabelstapler bleibt im aktuellen Terminal, wenn bereits ein LKW auf Bedienung wartet, anderenfalls fährt er zum zentralen Gabelstapler-Pool zurück, um dort auf Einsätze, u. U. an einem anderen Terminal zu warten. Somit wird jeder Gabelstapler an allen Terminals lastabhängig gesteuert eingesetzt.

Modellbildung: Wenn man von den Details abstrahiert, ist die oben beschriebene Stückgutumschlaghalle ein komplexes Bediensystem, in dem unabhängige Ankunftsströme von Kunden (=LKWs) an Bedienstationen mit endlichem Warteraum (=Terminal mit Rampen) von Bedienern (=Gabelstapler) verarbeitet werden, die sich zwischen den Bedienstationen lastgesteuert und zeitbehaftet bewegen. Aufgrund des komplexen Verhaltens der Bediener und des eigentlichen Bedienprozesses ist jedoch eine (geschlossene) analytische Lösung des Bediensystems nicht möglich.

Nachfolgend soll ein ProC/B Modell für die Stückgutumschlaghalle vorgestellt werden, für das über die Zwischennotation eines Petri-Netzes eine hierarchische Zustandsbeschreibung der unterliegenden Markov-Kette ableitbar ist, vgl. Abbildung 7.2.

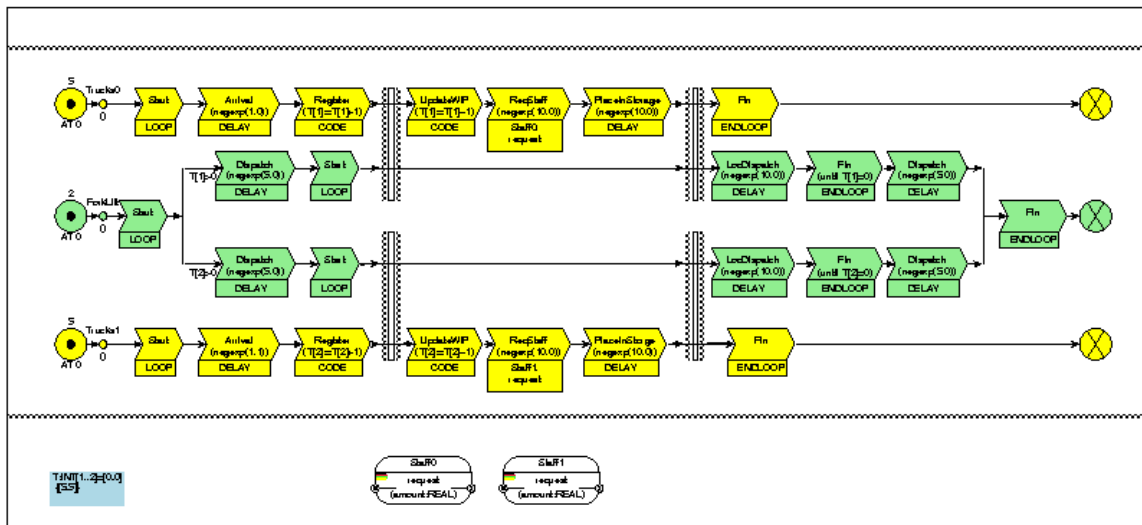


Abbildung 7.2 ProC/B Modell der Stückgutumschlaghalle mit LKW-Prozess (unten und oben, gelb) und Gabelstapler-Prozess (mittig, grün)

Der LKW-Prozess ist durch die untere und obere Prozesskette spezifiziert, der mittlere Teil beschreibt den Gabelstapler-Prozess. Die LKW-Prozesse sind separat für jedes Terminal (hier 2) anzugeben. Der Gabelstapler-Prozess ist durch einen booleschen ODER-Konnektor gekennzeichnet, der die lastabhängige Einsatzplanung der Gabelstapler an den Terminals modelliert. Sind beide Zweige des Konnektors erfüllt, wird probabilistisch (Gleichverteilung) ein Zweig gewählt, sind beide Zweige nicht erfüllt, blockiert der Gabelstapler-Prozess (abweichende Semantik zu simulativen ProC/B Modellen). LKW- und Gabelstapler-Prozesse werden an Synchronisations-Konnektoren synchronisiert. Die zeitliche Bewertung der Aktivitäten in den Prozessen kann dem ProC/B Modell entnommen werden.

In der nachfolgenden zustandsraum-basierten Analyse des ProC/B Modells wird folgende Belegung der Modellparameter angenommen: $J=6$ Terminals und $C=5$ Rampen je Terminal und $S=2$ Gabelstapler. Jedes Terminal und der Gabelstapler-Pool definieren Teilmodelle, die in der Interpretation des Systems als Warteschlangen-Netzwerk als Bedienstationen fungieren. Es ist bekannt, dass über die Gruppierung von Zuständen (=Makro-Zustände), welche den selben Populationsvektor für die Verteilung der Bediener über den Stationen kodieren, eine hierarchische Beschreibung des Zustandsraums ableitbar ist. Die Low-Level Beschreibung erfasst alle Transitionen, in der die Verteilung der Bediener invariant ist. Die High-Level Beschreibung erfasst alle Transitionen zwischen Makro-Zuständen. Die Anzahl der Makro-Zustände ergibt sich hier rein kombinatorisch aus der Anzahl möglicher Bediener-Verteilungen gemäß dem Binomialkoeffizienten $J+2$ über $S=28$.

Analyse: Das Ziel der Analyse ist die Ermittlung der erzielten LKW-Durchsätze an den einzelnen Terminals. Die Durchsätze variieren in Abhängigkeit vom Terminal, weil der Ankunftsprozess der LKWs Terminal-spezifisch gewählt ist (mit zunehmender Rate von Terminal 1 zu Terminal 6). Der generierte Zustandsraum hat 12 814 848 Zustände, die in 28 Makrozustände gruppiert sind, die wiederum eine Dekomposition des Berechnungsproblems für eine parallele numerische Analyse definieren. An der verteilten Berechnung partizipieren 6 SUNBlade 100 Rechner, die über ein nicht-exklusives 100 MBit Ethernet-LAN Daten austauschen. Aus der berechneten Lastverteilung für 6 parallele Rechenprozesse resultiert ein Kommunikationsaufwand von 105 MB (in 40 Nachrichten unterteilt) je Iterationsschritt. Zur Bewertung der Effizienz des gewählten Ansatzes zur Markov-Ketten-basierten Analyse eines logistischen Systems: die Zustandsraumgenerierung benötigt 20 min (nicht verteilt), die Berechnung der Lastverteilung dauert 2 Minuten, die eigentliche verteilte Berechnung der stationären Verteilung der Markov-Kette verbrauchte 71 Minuten, die Aufbereitung der Ergebnisse (Durchsätze etc) 4 Minuten. Eine detaillierte Protokollierung des Laufzeit- und Konvergenzverhaltens der verteilten iterativen Berechnung wird in einem (automatisch generierten) Bericht für jeden Lauf festgehalten.

Die Analyseergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengetragen:

Terminal	Durchsatz
1	0.7702
2	0.8280
3	0.8849
4	0.9413
5	0.9976
6	1.0541

8. Tool-unterstützte Erkennung von Verklemmungen

Obwohl in realen Güterverkehrszentren Verklemmungen nicht auftreten, sind bei der ProC/B Modellbildung Verklemmungen beobachtbar, die durch Modellierungsfehler (falsche Dimensionierung von Betriebsmitteln) oder nicht abgebildete Steuerungen zur Vermeidung von Verklemmungen in realen Systemen verursacht sind. Es ist bekannt, dass Verklemmungen oft in Szenarien auftreten, wo Prozesse auf geteilte Betriebsmittel zugreifen und jeder einzelne Prozess sequentiell Betriebsmittel anfordert und mehrere Betriebsmittel gleichzeitig beansprucht. Ein typisches Beispiel aus dem Anwendungsbereich der Logistik sind Ein- und Auslagerungsprozesse, die als Betriebsmittel z.B. Gabelstapler und freien Platz im Lager bzw. ein auszulagerndes Teil beanspruchen. Solche Prozesse treten auch in der Stückgutumschlaghalle des Güterverkehrszentrums auf, vgl. Abbildung 8.1.

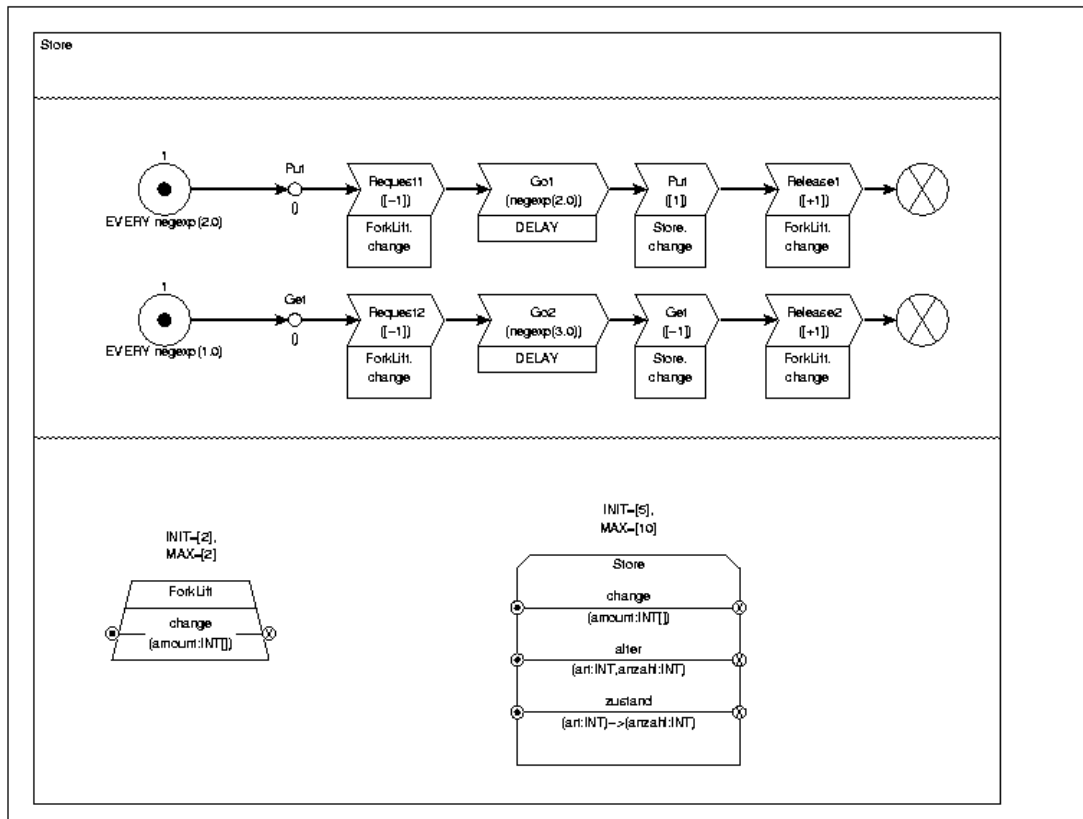


Abbildung 8.1 Schematisches ProC/B Modell der Stückgutumschlaghalle mit Lager

Durch eine automatisierte Transformation des ProC/B Modells aus Abb. 8.1 auf ein Petri-Netz Modell (Abbildung 8.2) können auf Petri-Netzen basierende Techniken zur Erkennung von Verklemmungen angewendet werden. Tatsächlich enthält das erzeugte Petri-Netz Modell der Stückgutumschlaghalle zwei Verklemmungen. Für dieses relativ einfache Beispiel sind die Verklemmungen intuitiv klar: erstens, Einlagerungsprozesse haben alle Gabelstapler belegt, aber das Lager ist voll und zweitens, Auslagerungsprozesse haben alle Gabelstapler belegt, aber das Lager ist leer. In der Praxis würde in solchen Situationen eine simple Steuerung aktiviert, die belegte Gabelstapler auf den jeweils anderen Prozesstyp umverteilt oder vorausschauend nur Gabelstapler zuweist, wenn der nachfolgende Lagerzugriff ausführbar ist. Derartige Steuerungen wurden nach Erkennung der Verklemmungen in das ProC/B Modell implementiert.

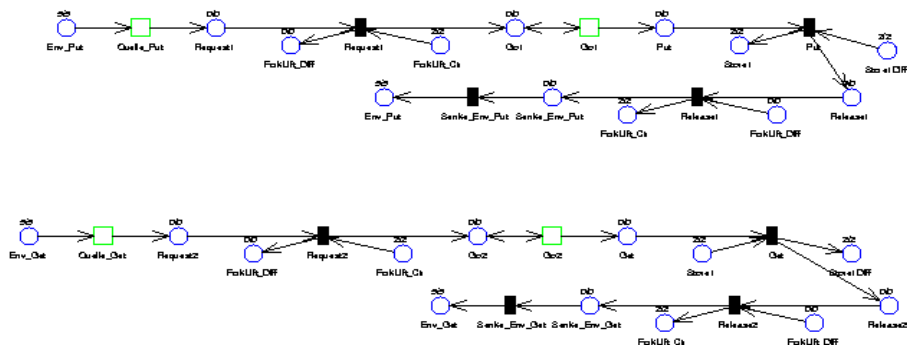


Abbildung 8.2 Schematisches Petri-Netz Modell der Stückgutumschlaghalle mit Lager

9. Zusammenfassung

Die Arbeitsschwerpunkte des Teilprojekts M2 „Effiziente Analyseverfahren“ in der zweiten Phase des Sonderforschungsbereichs 559 lagen in der Durchführung von Experimenten an ausgewählten Beispielmodellen verschiedener Anwendungsteilprojekte. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt M1 konnten die Experimente die besondere praktische Relevanz nicht-simulativer Analyseverfahren zur Ergänzung der in M1 behandelten simulativen Analyse herausstellen.

Eine wichtige Erkenntnis der Experimentierphase ist, dass der Entwurfsprozess für GNLs in mehreren Stufen ablaufen sollte. Der Entstehungsprozess eines GNL-Modells beginnt mit einem sehr einfachen, abstrakten Modell, und in jeder weiteren Stufe wird das Modell um einige Details angereichert.

Auf diese Weise lassen sich einerseits bereits in sehr frühen Phasen des Entwurfsprozesses erste Aussagen über die betrachteten Modelle anhand effizienter Analyseverfahren ableiten.

Andererseits vermeidet dieses strukturierte Vorgehen zahlreiche Modellierungsfehler, die bei Missachtung dieses Vorgehens nicht nur unvermeidbar sind sondern zusätzlich nur mühselig aufgespürt werden können. Die Vorteile der nicht-simulativen Analyseverfahren gegenüber der Simulation lassen sich besonders in den frühen Phasen des Modellentwurfs aufgrund der meist geringen Modellkomplexität ausnutzen. Es lassen sich erste Voranalysen durchführen sowie die funktionale Korrektheit der Modelle überprüfen.

Dieser Bericht verdeutlicht die kombinierte Modellanalyse mit nicht-simulativen Verfahren und der Simulation exemplarisch anhand eines aus dem Anwendungsteilprojekt A4 hervorgegangenen Modells eines Güterverkehrszentrums.

10. Literaturverzeichnis

- [AEF03] Arns, M.; Eickhoff, M.; Fischer, M.; Tepper, C.; Völker, M.: New Features in the ProC/B toolset. (accepted for presentation at Tools 2003 conference).
- [AFT01] Arns, M.; Fischer, M.; Tatlitürk, H.; Tepper, C.; Völker, M.: Modeling and Analysis Framework of Logistic Process Chains. In. Proc. Of Joint Tool Session at PNPM/MMB/PAPM Conferences, pp. 56-61, Aachen, Germany, Sept. 2001.
- [BBF02] Bause, F.; Beilner, H.; Fischer, M.; Kemper, P.; Völker, M.: The ProC/B Toolset for the Modelling and Analysis of Process Chains. In T. Field, P.G. Harrison, J. Bradley, U. Harder (eds.) Computer Performance Evaluation Modelling Techniques and Tools (Proc. Performance TOOLS 2002), Springer, LNCS 2324, pp. 51-70, 2002.
- [BDD98] Balsamo, S.; Donatiello, L.; Van Dijk, N.M.: Bound Performance Models of Heterogeneous Parallel Processing Systems. IEEE Trans. Par. Distr. Systems, Vol. 9, No. 10, 1998.
- [BuK03] Buchholz, P.; Kemper, P.: Kronecker based Matrix Representations for large Markov Models. GI/Dagstuhl Research Seminar on Validation of Stochastic Systems, 2003.
- [DiV03] Dilling, C.; Völker, M.: Beispielmodellierung eines Güterverkehrszentrums im ProC/B-Paradigma. SFB 559-Bericht 03016, 2003.
- [Küh79] Kühn, P.J.: Approximate analysis of general queueing networks by decomposition. IEEE Trans. Comm., Com-27(1), 1979.
- [Kuh95] Kuhn, A.: Prozessketten in der Logistik, Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995.
- [VDV97] VDV Verband deutscher Verkehrsunternehmen (1997): VDV-Nachrichten Nr. G3, G57, Köln.
- [Whi83] Whitt, W.: The Queueing Network Analyzer. Bell System Technical Journal, 62(9), 1983.

Sonderforschungsbereich 559

Bisher erschienene Technical Reports

- 03004 Falko Bause, Jochen Bernhard, Thomas Fender, Kay Hömberg, Dirk Jodin, Marcus Völker, Sigrid Wenzel: Standardisierte Beschreibung von Eingangsdaten für die Simulation auf Basis des Prozesskettenparadigmas
- 03005 Jochen Bernhard, Miroslaw Dragan, Sigrid Wenzel: Klassifikation von Visualisierungsverfahren für GNL
- 03006 Thomas Fender, Sonja Kuhnt: Statistisches Datenmanagement zur Informationsgewinnung in GNL
- 03007 Bernd Hellingrath, Markus Witthaut: Modellierungsrahmen für Dispositionsstrategien in GNL
- 03008 Mirko Eickhoff: Verteilte Simulation – Output Analyse paralleler Replikationen
- 03009 Markus Ohlbrecht: Modellansatz zur Ermittlung der Verfügbarkeit von Redistributionsnetzen
- 03010 Falko Bause: Input-Output Hidden Markov Models for the Aggregation of Performance Models
- 03011 Markus Fischer, Peter Kemper, Carsten Tepper, Zenghui Wu: Abbildung von ProC/B nach Petri-Netzen – Version 2
- 03012 Markus Fischer: Numerische Verfahren zur quantitativen Analyse von ProC/B und Petri-Netz Modellen
- 03013 Christian Dilling, Markus Fischer: Analytisch-numerische Techniken zur Lagerbestand-Analyse unter Berücksichtigung einer zeitlich-variierenden Belastung
- 03014 Jochen Bernhard, Thomas Fender: Experimentelle Anwendung statistischer Verfahren und Visualisierungsmethoden zur Gewinnung ausgesuchter Eingangsdaten im Kontext von GNL
- 03015 Amrei Bauseler, Christian Dilling, Anne Schulze im Hove, Frank Stüllen-berg: Ausgestaltung der Netzwerk-Balanced Scorecard für Güterverkehrszentren
- 03016 Christian Dilling, Marcus Völker: Beispielmodellierung eines Güterverkehrszentrums im ProC/B-Paradigma
- 03017 Markus Arns, Markus Fischer, Peter Kemper: Anwendung nicht-simulativer Techniken zur Analyse eines dezentralen Güterverkehrszentrums

Alle Technical Reports können im Internet unter
<http://www.sfb559.uni-dortmund.de/>
abgerufen werden. Für eine Druckversion wenden Sie
sich bitte an die SFB-Geschäftsstelle
e-mail: grosseca@iml.fhg.de