



Institut für  
Angewandte Informatik **AIFB**  
und Formale Beschreibungsverfahren  
Universität Karlsruhe (TH)

**Petri-Netze zur Modellierung  
verteilter DV-Systeme**  
Erfahrungen im Rahmen des DFG-  
Schwerpunktprogramms "Verteilte DV-Systeme in  
der Betriebswirtschaft"

von

Wolffried Stucky, Udo Winand

Bericht 350

März 1997

Forschungsberichte

Herausgeber: H. Schmeck, D. Seese, W. Stucky, R. Studer

**Modellierung und Koordinierung  
Flexibler Fertigungssysteme mit Petrinetzen**

Univ.-Prof. Dr. St. Zelewski

Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft / Universität Leipzig

**I Das Projekt PEMVEK**

Das Projekt "Petri-netzbasierte Modellierung und verteilte Koordinierung komplexer Produktionssysteme" (kurz: PEMVEK)<sup>1)</sup> wird seit Januar 1995 vom Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft der Universität Leipzig im Rahmen des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) über "Verteilte DV-Systeme in der Betriebswirtschaft" bis voraussichtlich Ende Mai 1997 durchgeführt.

**II Allgemeine Projektaspekte**

**II.1. Die Modellierungsperspektive**

Im Rahmen des Projekts PEMVEK wird die Entwicklung eines Konzepts zur Modellierung komplexer Produktionssysteme angestrebt, das zwei zentralen betriebswirtschaftlichen Anforderungen gerecht wird: Einerseits soll es - trotz der vorausgesetzten hohen Komplexität der zu modellierenden Produktionssysteme - einen hohen Grad an *Realitätsnähe* zulassen, andererseits aber auch eine *benutzerfreundliche* Konstruktion und Analyse der Systemmodelle ermöglichen.

Beide Postulate stellen zumindest im produktionswirtschaftlichen Bereich eine große Herausforderung dar. Denn eine Vielzahl konventioneller Modellierungen auf diesem Gebiet, wie sie etwa aus dem Bereich des Operations Research (OR) seit mehreren Jahrzehnten bekannt sind und auch derzeit noch in immer neuen Varianten publiziert werden, läßt sich weder als realitätsnah noch als benutzerfreundlich bezeichnen.

Ein typisches Beispiel bilden die OR-Modelle zur Bearbeitung von Job-Shop-Scheduling-Problemen. Es handelt sich um - angesichts der Komplexität der zugrundeliegenden Realprobleme - hochgradig simplifizierte Formalprobleme, die sich "nur" auf eine dreidimensionale Zuordnung zwischen Arbeitsgängen ("jobs"), Ressourcen (z.B. Maschinen) und Zeitpunkten oder -intervallen erstrecken. Hinzu kommen Restriktionen, wie etwa Präzedenzbeziehungen zwischen Arbeitsgängen desselben Produktionsauftrags, die den Raum zulässiger Zuordnungsalternativen einschränken, sowie (mindestens) ein Optimierungsziel. Obwohl solche Job-Shop-Scheduling-Probleme wegen ihrer Zugehörigkeit zur Klasse der NP-harten Probleme (und bei Betrachtung als

Entscheidungsprobleme zur Klasse der NP-vollständigen Probleme) auf der algorithmischen Ebene überaus schwer zu lösen sind, handelt es sich dennoch um eine realitätsferne "Prokrustesbett"-Modellierung, weil zahlreiche Einflußgrößen aus der betrieblichen Praxis zwecks Beschränkung der Modellkomplexität ausgeblendet werden. Dazu gehören z.B. nicht-lineare Arbeitspläne, die Zulässigkeit von Alternativmaschinen oder die Berücksichtigung von unvorhergesehenen Maschinenausfällen. Darüber hinaus handelt es sich bei den typischen OR-Modellen für dieses Problemfeld um unübersichtliche Konglomerate aus Variablen, Konstanten, Funktionen und Relationen. Weder die Modelle selbst noch die darauf angewandten Lösungsprozeduren sind für einen "normalen" betriebswirtschaftlichen Betrachter transparent. Der Umgang mit solchen OR-Modellen erweist sich als benutzerunfreundlich. Daher treffen sie sowohl bei betrieblichen Praktikern als auch in der akademischen Betriebswirtschaftslehre oftmals auf erhebliche Akzeptanzbarrieren.

Zwar existieren durchaus ernsthafte Ansätze, die mangelnde Realitätsnähe und Benutzerfreundlichkeit von OR-Modellen auch im produktionswirtschaftlichen Bereich zu überwinden. Dazu gehören beispielsweise einerseits Arbeiten zum Constraint-Satisfaction-Programming, die darauf abzielen, eine Vielzahl von Produktionsrestriktionen ("constraints") realitätsnah zu erfassen und zu verarbeiten. Allerdings fehlt den Formalismen des Constraint-Satisfaction-Programming die intuitive Anschaulichkeit von benutzerfreundlichen Modellierungen. Andererseits könnten neuere Ansätze auf dem Gebiet der Workflow-Modellierung einen erheblichen Beitrag zur Entwicklung transparenter, leicht verständlicher und unkompliziert handhabbarer Ablaufmodelle leisten. Sie fokussieren sich zwar derzeit noch auf Arbeitsprozesse im Verwaltungsbereich. Aber nichts spricht grundsätzlich dagegen, sie auf die benutzerfreundliche Modellierung von Produktionsprozessen zu übertragen. Jedoch leiden solche Workflow-Ansätze im Produktionsbereich zumindest derzeit noch unter erheblicher Realitätsferne. Denn weder ist es bisher gelungen, die zuvor erwähnten vielfältigen Produktionsrestriktionen umfassend einzubeziehen, noch wird den betriebswirtschaftlich eminent wichtigen Optimierungszielen in ihrer inhaltlichen Breite die erforderliche Beachtung geschenkt.

Aus den vorgenannten Gründen mangelt es im produktionswirtschaftlichen Bereich an einem überzeugenden Modellierungskonzept, das den beiden zentralen, eingangs erwähnten Anforderungen der Realitätsnähe *und* der Benutzerfreundlichkeit *zugleich* gerecht wird. Die Ausgangshypothese des Forschungsprojekts PEMVEK bestand in der Vermutung, diese konzeptionelle Modellierungslücke mit der Hilfe von Petrinetzen schließen zu können. Für diese Annahme sprach, daß Höhere Petrinetze:

- aufgrund ihrer - im Vergleich zu konventionellen OR-Modellen - großen *Ausdrucksstärke* die Gestaltung *realitätsnah* Modelle auch für komplexe Produktionssysteme gestatten und
- aufgrund ihrer graphischen *Visualisierungsmöglichkeiten* für Strukturen (Netztopologien) und Prozesse (Markenflüsse durch Netze) *benutzerfreundliche* Modellierungen ermöglichen.

Als Testobjekte für die Forschungshypothese hinsichtlich der Eignung von Petrinetzen wurden ursprünglich *Flexible Fertigungssysteme* ausgewählt. Sie gelten infolge der zahlreichen Freiheitsgrade, die sie bei der Prozeßplanung sowie -steuerung dem betrieblichen Disponenten einräumen, und wegen ihrer technischen Vielschichtigkeit, die sich z.B. auf den automatisierten Transport von Werkstücken zwischen den Bearbeitungsstationen und den Fluß von nicht-permanenten Werkzeugen zwischen den Bearbeitungsstationen erstreckt, als besonders schwierige Modellierungsobjekte. Damit liefern sie eine inhaltliche Konkretisierung der im Projekttitel angeführten "komplexen Produktionssysteme". Sie soll vor dem denkmöglichen Vorwurf bewahren, die o.a. Forschungshypothese nur an einem "gutmütigen" Testobjekt überprüfen zu wollen, um das Risiko einer empirischen Widerlegung so gering wie möglich zu halten.

Zwischenzeitlich wurde der Kreis intendierter Testobjekte jedoch auf *Produktionsnetzwerke* verallgemeinert [Ze197a]. Sie schließen Flexible Fertigungsnetze als Spezialfall mit ein, umgreifen jedoch auch "raumgreifendere" Systeme, die von Lieferanten-Netzwerken über Produktionsverbundsysteme im Rahmen des Global Manufacturings bis hin zu Virtuellen (Produktions-) Unternehmen reichen.

## II.2. Die Koordinierungsperspektive

Die zweite Stoßrichtung des Projekts PEMVEK betrifft die Koordinierung jener Prozesse, die in einem modellierten Produktionsnetzwerk (Flexiblen Fertigungssystem) zur Erfüllung vorgegebener betriebswirtschaftlicher Sach- und Formalziele ausgeführt werden. Für diese Prozeßkoordinierung sollte ein Konzept entwickelt werden, daß sich durch zwei charakteristische Eigenschaften auszeichnet.

Erstens wird ein *weit gefaßter Koordinierungsbegriff* zugrundegelegt, der sowohl die *Planung* (ex ante) als auch die *Steuerung* (ex post) der auszuführenden Produktionsprozesse umfaßt. Das angestrebte Koordinierungskonzept soll also nicht - wie etwa die meisten OR-Modelle - auf die vorausschauende Prozeßplanung beschränkt bleiben. Vielmehr muß es ebenso steuernde Eingriffe in bereits ablaufende Produktionsprozesse zulassen, wenn sich das reale Produktionssystem und die darin abzuwickelnden Produktionsaufträge im Zeitablauf anders verhalten haben, als es in der Produktionsplanung ursprünglich unterstellt wurde. Dies betrifft beispielsweise unvorhergesehene Maschinenstörungen ebenso wie plötzlich eintreffende Eilaufträge oder nachträgliche Auftragsstornierungen.

Zweitens soll das Koordinierungskonzept ein weites Spektrum überdecken, das von einfachen *Ad-hoc-Koordinierungsentscheidungen* über den Einsatz betriebswirtschaftlich vertrauter *Prioritätsregelverfahren* bis hin zu *Optimalplanungen* reicht. Die beiden erstgenannten Koordinierungsvarianten sind für Simulationsstudien typisch, die für die praktische Prozeßplanung und -steuerung in komplexen Produktionssystemen oftmals Anwendung finden. Die letztgenannte Koordinierungsvariante spielt zwar nur in theoretischen Untersuchungen eine Rolle, vor allem im Rahmen der oben angesprochenen realitätsfernen OR-Modelle. Dennoch wurde die Durchführbarkeit von Optimalplanungen in das "Pflichtenheft" des Koordinierungskonzepts aufge-

nommen, um die Güte der Ergebnisse von Simulationsstudien - zumindest in ausgewählten Einzelfällen - vor dem Hintergrund der Kenntnisse über optimale Planungsergebnisse fundiert beurteilen zu können. Denn ohne solche Kenntnisse ist es lediglich möglich, die *relative* Güte von Simulationsstudien durch Vergleich ihrer Resultate untereinander festzustellen, ohne aber einen Maßstab für die *absolute* Simulationsgüte in den Händen zu halten. Diese Beurteilungslücke sollte mit der Ausdehnung des Koordinierungskonzepts auf Optimalplanungen geschlossen werden.

### II.3. Der Homogenitätsaspekt

Schließlich wurde von dem Gesamtkonzept für die Modellierung und Koordinierung von Produktionssystemen bzw. -prozessen erwartet, daß es sich durch die Eigenschaft der Homogenität auszeichnet. Mit Homogenität ist gemeint, daß ein Konzept zur Verfügung steht, mit dem sich die Modellierungs- und die Koordinierungsaufgaben des Forschungsprojekts auf einheitliche, in sich konsistente Weise erfüllen lassen.

Mit dieser Anforderung wird bewußt Abstand genommen von anderen Konzepten, die etwa schon für die Modellierung von Daten-, Funktions-, Prozeß- und Organisationsstrukturen verschiedenartige Ansätze verwenden, die - zumindest auf der formalen Ebene - zu keinem einheitlichen Gesamtmodell integriert werden können. Für die anschließende Koordinierung der Prozesse, die in solchen Strukturen ablaufen, werden dann häufig nochmals andere Ansätze verwendet. Es ist äußerst schwierig, dies öfteren sogar praktisch ausgeschlossen, in derart heterogenen Modellierungs- und Koordinierungsumgebungen Erkenntnisse, die in einem Partialbereich gewonnen wurden, auf andere Partialbereiche zu übertragen oder übergreifende Einsichten zu erlangen, die den gesamten Modellierungs- und Koordinierungsbereich umgreifen.

Um diese heterogenitätsbedingten Komplikationen zu vermeiden, wurde ein Konzept entwickelt, das sowohl die *Modellierung* von komplexen Produktionssystemen als auch die *Koordinierung* der darin ablaufenden Produktionsprozesse *gemeinsam* auf der Basis von *Petrinetzen* ermöglicht. Petrinetze erwiesen sich in dieser Hinsicht als besonders vielversprechend. Denn sie besitzen neben ihrer realitätsnahen und benutzerfreundlichen Modellierungsfähigkeit, die bereits oben angesprochen wurde, obendrein die Eigenschaft, sich mit mehreren mathematisch anspruchsvollen Techniken zur Auswertung von Netzmodellen kombinieren zu lassen. Dazu gehören beispielsweise Erreichbarkeitsanalysen oder die Konstruktion und Auswertung von Prozeßnetzen [DeOZ96], die sich beide auf die hier interessierende Koordinierung von Produktionsprozessen anwenden lassen.

Mit der Eigenschaft der Homogenität wird also nicht die starke - und hinsichtlich ihrer Erfüllbarkeit überzogen anmutende - Forderung erhoben, jeden Modellierungs- und Koordinierungsaspekt unmittelbar als ein Petrinetz wiedergeben zu können. Vielmehr wird lediglich gefordert, Petrinetze als einheitlichen, konsistenzstiftenden Konzeptkern zu verwenden. Hinzu kommt die Maßgabe, alle anderen, daneben eingesetzten Konzepterweiterungen in systematischer und prinzipiell vollständig formalisierbarer (infolgedessen auch automatisierbarer) Weise auf die zugrunde liegenden Petrinetze zurückführen zu können. Dies trifft z.B. auf die vorgenannten Analysen in Erreichbarkeitsgraphen und dem Umgang mit Prozeßnetzen uneingeschränkt zu.

Aufgrund dieser Rückführbarkeit auf Petrinetze bleibt der innere Zusammenhang des gesamten Modellierungs- und Koordinierungskonzepts gewahrt, ohne auf leistungsstarke Auswertungstechniken für Netzmodelle verzichten zu müssen. Durch diese konzeptionelle Öffnung lassen sich Erkenntnisse aus der Erforschung Künstlicher Intelligenz (KI) und Erkenntnisse des Operations Research (OR) in die Auswertung von Netzmodellen für Zwecke der Prozeßkoordinierung einbeziehen, ohne daß dadurch der konsistente Zusammenhang des gesamten Modellierungs- und Koordinierungskonzepts verloren geht. Dies gilt beispielsweise für Techniken, die im KI- und OR-Bereich zur möglichst effizienten Suche innerhalb großvolumiger Graphen entwickelt wurden. Es trifft ebenso zu auf Anregungen, die sich aus der Erforschung von Multi-Agenten-Systemen auf die wechselseitige Abstimmung zwischen Einheiten übertragen lassen, die bei der arbeitsteiligen Erfüllung von Produktionsaufgaben zusammenwirken.

## III. Spezielle Projektaspekte mit Bezug auf Petrinetze

### III.1. Einordnung in den Kontext anderer Arbeiten

Die voranstehenden Erläuterungen haben verdeutlicht, daß im Zentrum des Projekts PEMVEK die Absicht steht, die Eignung von Höheren Petrinetzen für Modellierungs- und Koordinierungszwecke im produktionswirtschaftlichen Bereich auszuloten. Allerdings kann der Einsatz von Petrinetzen für produktionswirtschaftliche Modellierungs- und Koordinierungsaufgaben keinen Anspruch auf grundsätzliche Novität erheben. Zwar werden Petrinetze von rein betriebswirtschaftlich orientierten Autoren - bis auf seltene Ausnahmen wie [RoWi91] und [Reut95] - noch weitgehend ignoriert. Aber außerhalb des engeren Kreises der Betriebswirtschaftslehre wurde schon eine größere Anzahl von Arbeiten vorgelegt, die sich mit dem Einsatz von Petrinetzen zur Lösung produktionswirtschaftlicher Probleme befassen [z.B. SrEm90, Adam91, Harh91, Glue92, Behr92, DiCe93, RaBa95, Venk96, Wang96, vdAa96 sowie - als aktueller und umfassender Überblicksartikel - MoGu96]. Daher bedarf es zur Abgrenzung des Forschungsprojekts PEMVEK von jenen Arbeiten hinsichtlich der Anwendung von Petrinetzen einiger zusätzlicher Erläuterungen.

Die Beiträge zum Einsatz von Petrinetzen auf produktionswirtschaftlichem Gebiet, die bislang erschienen sind, lassen sich dadurch charakterisieren, daß sie stets nur einzelne *Teile* jener Aspekte abdecken, die zuvor aus der Modellierungs- und Koordinierungsperspektive des Projekts PEMVEK angesprochen wurden. So existieren durchaus Publikationen, in denen die Ausdrucksmächtigkeit und Visualisierungsmöglichkeiten Höherer Petrinetze genutzt werden, um eine realitätsnahe und benutzerfreundliche Modellierung produktionswirtschaftlicher Probleme zu erzielen. Aber die Anwendung der Netzmodelle zu Koordinierungszwecken bleibt in der Regel auf simple Simulationsstudien beschränkt. Weitaus weniger Veröffentlichungen konzentrieren sich auf die Nutzung von Petrinetzen, um die Koordinierung von Produktionsprozessen zu unterstützen. Sie begnügen sich dann aber, um die Auswertungsschwierigkeiten Höherer Petrinetze zu umgehen, im allgemeinen mit der Verwendung von Stellen/Transitions-Netzen (oder von ähnlich einfachen "Niederer" Petrinetzen). Der Einsatz von Petrinetzen für strenge Optimalplanungen wurde - zumindest im hier interessierenden produktionswirtschaftlichen Anwendungsbereich -

sogar überhaupt noch nicht näher untersucht. Aus dieser Kurzcharakterisierung wird ein erheblicher "trade off" deutlich. Er erstreckt sich zwischen:

- einerseits der realitätsnahen und benutzerfreundlichen Modellierung mit Höheren Petrinetzen sowie
- andererseits der effektivitäts- und effizienzorientierten Auswertung von Netzmodellen auf der Basis Niedriger Petrinetze.

Ein wesentliches Anliegen des Forschungsprojekts besteht darin, neuartige Wege zur Überwindung dieses markanten, petrinetzspezifischen "trade offs" zu beschreiten. Dadurch hebt es sich von anderen Arbeiten ab, die - wie oben erwähnt - bislang zur petrinetz-basierten Lösung produktionswirtschaftlicher Probleme präsentiert wurden.

Als grundsätzliche "Marschrichtung" wurde die Modellierung mit der Hilfe von Höheren Petrinetzen vorgegeben. Auf dieser Grundlage galt es, ein Koordinierungskonzept zu entwickeln, das die Auswertung der Netzmodelle für Zwecke der Planung und Steuerung von Produktionsprozessen auf sowohl effektive als auch effiziente Weise gestattet. Um sich nicht vorzeitig auf nur eine - unter Umständen wenig fruchtbare - Alternative festzulegen, wurden zwei grundsätzliche verschiedene Koordinierungsansätze parallel verfolgt.

Der eine Ansatz konzentriert sich darauf, die Aufgabe der Prozeßkoordination möglichst weitgehend in die Modellierung des zu koordinierenden Produktionssystems zu integrieren. Zu diesem Zweck wird auf das Kontraktnetz-Konzept aus dem Bereich der Multi-Agenten-Systeme zurückgegriffen, das bislang in Petrinetz-Modellen für Produktionssysteme kaum Beachtung gefunden hat. Die einzelnen Agenten und ihre Aushandlungen von Bearbeitungskontrakten werden in die petrinetzgestützte Modellierung einbezogen. Zugleich wird die Art der Kontraktaushandlung durch Rückgriff auf marktwirtschaftliche Versteigerungsmechanismen (Auktionen) zu einer neuartigen Koordinator-Variante der Multi-Agenten-Systeme fortentwickelt. Auf diese Aspekte wird hier aber nicht näher eingegangen, weil sie aus der Perspektive von Petrinetzen keine Neuerungen mit sich bringen, sondern nur aus dem Blickwinkel neuartiger Konzepte für die Koordination von Produktionsprozessen von Interesse sind [vgl. statt dessen die diesbezüglichen Erläuterungen in ScWu96, Zele97a].

Demgegenüber verfolgt der zweite Ansatz das Ziel, die Aufgabe der Prozeßkoordination durch möglichst leistungsfähige Techniken für die Auswertung von Netzmodellen zu unterstützen. Dabei werden Netzmodelle vorausgesetzt, die den Ausdrucksreichtum Höherer Petrinetze - einschließlich aller Erweiterungen, die in Kürze näher vorgestellt werden, - vollständig ausschöpfen können. Im Rahmen des Projekts PEMVEK sollte untersucht werden, in welchem Ausmaß sich petrinetz-basierte Auswertungstechniken für die hier interessierenden Aufgaben aus dem Umfeld der Koordination von Produktionsprozessen eignen und in welcher Weise sie erforderlichenfalls weiterentwickelt werden müssen. Dabei stellte sich heraus, daß insbesondere das ehrgeizige Vorhaben, auch Optimalplanungen im strengen betriebswirtschaftlichen Sinne zu ermöglichen, im Kontext von Petrinetzen bisher überhaupt noch nicht analysiert - geschweige denn verwirklicht wurde. Dennoch wurde an diesem Vorhaben festgehalten, um nicht vorschnell jede Hoffnung

aufzugeben, die weiter oben beklagte Bewertungslücke bei der Beurteilung der absoluten Güte von Simulationsstudien doch noch schließen zu können. Daher bildet die Anwendung von Netzmodellen für Prozeßoptimierungen ein wesentliches Differenzierungsmerkmal des Forschungsprojekts PEMVEK gegenüber den o.a. Arbeiten, die sich ebenso mit dem Einsatz von Petrinetzen auf produktionswirtschaftlichem Gebiet befassen.

Zuvor wurde der *primär theoretische* Aspekt des Projekts PEMVEK hervorgehoben, ein einheitliches *Konzept* für die Modellierung komplexer Produktionssysteme und die Koordinierung der darin ablaufenden Produktionsprozesse zu entwickeln. Aber ein solches Konzept bliebe "blutleer" und entzöge sich auch realistischen "Belastbarkeitstests", würde es nicht zur Bearbeitung von realitätsnahen produktionswirtschaftlichen Problemen eingesetzt werden. Daher bestand das wesentliche *praxisorientierte* Anliegen des Forschungsvorhabens von vornherein darin, das petrinetz-basierte Modellierungs- und Koordinierungskonzept auf eine kleine "virtuelle Fabrik" konkret anzuwenden.

Bei dieser virtuellen Fabrik handelt es sich um kein reales Produktionssystem, sondern "nur" um das Modell eines idealtypischen Flexiblen Fertigungssystems. Zwar mag sich prima facie der Einwand aufdrängen, daß die Erprobung des Modellierungs- und Koordinierungskonzepts an einem realen Produktionssystem erstrebenswerter gewesen wäre. Aber einschlägige Erfahrungen des Verfassers mit der praktischen Anwendung von Petrinetzen gemahnten ihn zur Vorsicht. Denn der Umgang mit Petrinetzen zeigt immer wieder, daß schon relativ bescheidene Realprobleme zu überaus umfangreichen Netzmodellen führen, deren Darstellung und Auswertung auch die Kapazitäten moderner Hochleistungs-Personalcomputer oder Workstations bei weitem überfordern.

Bereits in einer Vorstudie [Zele95, Bd. 7] führte die realitätsnahe Modellierung eines idealisierten Flexiblen Fertigungssystems mit nur drei Bearbeitungsstationen, einem Werkstück- und einem Werkzeuglager, einer Spannstation sowie einem "repräsentativen" Produktionsauftrag zu einem Petrinetz mit knapp 3.000 Knoten. Die Modellkomponente zur Prozeßkoordination war in dieser Vorstudie sogar nur rudimentär vorhanden. Mittels Extrapolation ließ sich abschätzen, daß für ein etwas weniger idealisiertes Flexibles Fertigungssystem mit z.B. 12 Bearbeitungsstationen, 3 Lagern und 20 Produktionsaufträgen bei gleicher Modellierungstechnik bereits ein Petrinetz erforderlich gewesen wäre, das weit über 11.000 Knoten umfaßt [Zele95, Bd. 7, S. 393]. Die Anzahl der Knoten von Erreichbarkeitsgraphen, die das dynamische Verhalten solcher Netzmodelle mit mehreren Tausend Knoten beschreiben, entzog sich bereits der Nachprüfbarkeit, weil sie sich mittels der verfügbaren Computerausstattung nicht mehr erzeugen ließen. Ihre Knotenanzahlen dürften jedoch - grob geschätzt - im Bereich von Millionen, Milliarden oder noch mehr liegen.

Diese einschlägigen Erfahrungen werden auch durch petrinetz-basierte Modellierungen von Produktionssystemen gestützt, die in den oben erwähnten Beiträgen der Fachliteratur veröffentlicht wurden. Sie beschränken sich durchgehend auf kompakte "Spielzeug-Probleme", deren Umfang und Komplexität deutlich unter demjenigen Ausmaß bleibt, das in der o.a. Vorstudie realisiert wurde.

Aufgrund dieser Vorkenntnisse wurde im Projekt PEMVEK mit Bedacht nicht das Ziel verfolgt, von vornherein die Modellierung eines realen Flexiblen Fertigungssystems - oder eines noch komplexeren Produktionsnetzwerks - anzustreben. Ein solches Vorhaben hätte nahe an der Schwelle zu maßloser Überschätzung der eigenen Möglichkeiten oder gar zur Ignoranz gelegen. Vielmehr ging es darum, zunächst "nur" die Anwendbarkeit des Modellierungs- und Koordinierungskonzepts auf praxisnahe Problemstellungen *grundsätzlich* aufzuzeigen. Für diesen ersten Schritt reicht es aus, anstelle eines realen Flexiblen Fertigungssystems das idealisierende Modell eines solchen Produktionssystems - die oben erwähnte virtuelle Fabrik - zu betrachten. Diese virtuelle Fabrik wurde einerseits mit so vielfältigen *Details* realer Flexibler Fertigungssysteme modelliert, daß sie gestattet, alle Aspekte zu erfassen, die für eine realistische Modellierung und Koordinierung von Produktionsprozessen in derart komplexen Produktionssystemen erforderlich sind. Andererseits wurde ihr *Umfang* mittels Idealisierung so weit reduziert, daß sich die virtuelle Fabrik mit den Kapazitäten moderner Hochleistungs-Personalcomputer oder Workstations noch bewältigen lassen sollte (Näheres dazu später). Dies wurde z.B. durch die drastische Einschränkung der Anzahlen von Bearbeitungsstationen und Lagern, von Arbeitskräften, von Werkstücken und Werkzeugen, von Transportmitteln sowie von Produktionsaufträgen erreicht.

Für diese Selbstbeschränkung sprachen auch die begrenzten finanziellen und zeitlichen Ressourcen, die für ein Forschungsprojekt von ca. 2 Jahren Dauer erwartet werden konnten. Falls es gelingen sollte, im Rahmen des Projekts PEMVEK den Nachweis zu erbringen, daß sich das hier entwickelte Modellierungs- und Koordinierungskonzept auf praxisnahe Problemstellungen grundsätzlich anwenden läßt, böten sich Nachfolgeprojekte an, um die zuvor gesammelten Erkenntnisse in *späteren* Untersuchungen auf die Bearbeitung konkreter Praxisprobleme mit realistischer Größenordnung zu übertragen.

### III.2. Eingehen einer Entwicklungspartnerschaft im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms

Das Modellierungs- und Koordinierungskonzept des Projekts PEMVEK stößt bereits bei seiner Anwendung auf Demonstrationsbeispiele wie die zuvor thematisierte virtuelle Fabrik auf erhebliche Praktikabilitätsprobleme, solange nicht auf Hilfsmittel der Automatischen Informationsverarbeitung zurückgegriffen werden kann. Allein das Editieren eines Höheren Petrinetzes mit einem Umfang von knapp 3.000 Knoten läßt sich "von Hand" kaum noch mit praktisch vertretbarem Zeitaufwand realisieren. Dies gilt insbesondere dann, wenn auch die sehr aufwendige Spezifizierung aller Markenstrukturen sowie der Ausprägungen aller Markenkopien unter der Ausgangsmarkierung eines Netzmodells in Rechnung gestellt wird.

Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms eine "Entwicklungspartnerschaft" mit dem Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren der Universität Karlsruhe unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr. Wolfrid Stucky und mit dem Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik II der Universität Frankfurt am Main unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis geschlossen. Ziel der Partnerschaft war es, ein bereits

vorliegendes Softwarepaket, das als Modellierungs- und Simulations-Werkzeug für Petrinetze dient, anhand komplexer produktionswirtschaftlicher Probleme hinsichtlich seiner "Praxistauglichkeit" zu testen und erforderlichenfalls weiterzuentwickeln.

Die Karlsruher und die Frankfurter Arbeitsgruppe brachten in die Kooperation ihr Softwarepaket INCOME/STAR ein, das unter der maßgeblichen Inspiration von Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis erstellt worden war<sup>3)</sup>. Aufgabe der Leipziger Arbeitsgruppe war es zunächst, mit der Hilfe von INCOME/STAR die virtuelle Fabrik einschließlich der zugehörigen Produktionsaufträge als Netzmodell darzustellen. Anschließend sollte untersucht werden, wie sich in diesem Netzmodell - also weiterhin auf der Basis von Petrinetzen - die Varianten des Koordinierungskonzepts für Produktionsprozesse umsetzen lassen, die weiter oben aus der Koordinierungsperspektive skizziert wurden.

Es bestand die Erwartung, daß etliche produktionswirtschaftliche Feinheiten bei der Fabrik- und Auftragsmodellierung sowie bei der anschließenden Prozeßkoordinierung nicht unmittelbar durch die Funktionalität von INCOME/STAR abgedeckt sein würden. Diese Lücken sollten von der Leipziger Arbeitsgruppe aufgespürt und in präzise spezifizierte Erweiterungsvorschläge für INCOME/STAR umgesetzt werden. Diese Erwartungshaltung wurde nicht enttäuscht. Tatsächlich wurde eine Vielzahl von Erweiterungswünschen aus Leipziger Sicht artikuliert. Die wichtigsten von ihnen werden im nächsten Kapitel näher erläutert.

Anschließend übernahmen die Karlsruher und Frankfurter Arbeitsgruppen die mühevollen Aufgabe, die Leipziger Anregungen in fortentwickelte Releases von INCOME/STAR umzusetzen. Sie wurden in Leipzig auf die produktionswirtschaftlichen Problemstellungen, die zu Erweiterungswünschen geführt hatten, angewendet, hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit den ursprünglichen Spezifikationen überprüft und gegebenenfalls noch einmal überarbeitet. In einem regen Wechselspiel zwischen den drei involvierten Arbeitsgruppen schälte sich eine Funktionalität von INCOME/STAR heraus, die über das ursprünglich vorgegebene Leistungsvermögen deutlich hinausreicht und produktionswirtschaftliche Modellierungsanforderungen in wesentlich verbesserter Weise unterstützt (vgl. zu den Details das nachfolgende Kapitel). In dieser Hinsicht wurde die Entwicklungspartnerschaft - zumindest aus Leipziger Sicht - den in sie gesetzten Erwartungen vollauf gerecht<sup>3)</sup>.

Als längerfristige Perspektive wurden mit der Kooperation noch zwei weitere Ziele verfolgt.

Einerseits wurde in Betracht gezogen, seitens der Leipziger Arbeitsgruppe eigenständige, ergänzende Softwareentwicklung zu betreiben. Denn das Softwarepaket INCOME/STAR stellt zunächst nur einen benutzerfreundlichen Editor für anspruchsvolle Höhere Petrinetze sowie eine interaktive Simulationsumgebung für die editierten Netzmodelle zur Verfügung. Wegen der Einschränkung der Auswertungsmöglichkeiten von Netzmodellen auf konventionelle Simulationsstudien war beabsichtigt, Erweiterungen um Erreichbarkeitsanalysen einzubringen. Für spätere Folgeprojekte waren zusätzliche Analysemodule zur Untersuchung von produktionswirtschaftlich interessanten Modelleigenschaften (wie etwa Deadlockfreiheit, Fairness und Promptheit) in Aussicht gestellt.

Allerdings erwies sich die Erfüllung des Nahziels, die Editier- und Simulationsmöglichkeiten von INCOME/STAR durch produktionswirtschaftlich motivierte Neuerungen zu bereichern, als derart arbeitsintensives Unterfangen, daß die Durchführbarkeit von Erreichbarkeitsanalysen nur noch konzeptionell angedacht werden konnte [Zeile97b]. Zu einer Konkretisierung oder gar Implementierung der diesbezüglich entwickelten Ideen reichten die Ressourcen der Kooperationspartnerschaft aber nicht mehr aus. Die zusätzlichen Analysemodule konnten ebenso nicht mehr in Angriff genommen werden<sup>4)</sup>. Immerhin gelang es noch, aufgrund der intensiven Auseinandersetzung mit INCOME/STAR einige konzeptionelle Ideen zur Fortentwicklung auf der softwaretechnischen Ebene zu entwickeln, die in [Rößl96] näher ausgeführt sind.

Andererseits bestand das Fernziel, INCOME/STAR so weit fortzuentwickeln, daß sich mit seiner Hilfe reale produktionswirtschaftliche Modellierungs- und Koordinierungsaufgaben erfüllen lassen. Von der virtuellen Fabrik, die nur als Übungsmittel bezweckt war, sollte nach Abschluß des Projekts PEMVEK zu einer Prozeßkoordinierung in einem realen Produktionssystem übergegangen werden, um die vorher gesammelten Modellierungs- und Koordinierungserfahrungen praktisch umzusetzen.

Dieses Fernziel mußte jedoch aufgrund der Erfahrungen, die in der Entwicklungspartnerschaft gemeinsam gesammelt wurden, auf eine weiter entfernte Zukunft verschoben werden. Denn es stellte sich heraus, daß das Softwarepaket INCOME/STAR bereits bei der Modellierung der "kleinen" virtuellen Fabrik auf massive Größenprobleme stieß. (Hierauf wird noch näher eingegangen.) Sie führten u.a. dazu, daß sich das Netzmodell der virtuellen Fabrik mit Hilfe von INCOME/STAR auf keinem derjenigen Computer, die den drei beteiligten Kooperationspartnern zur Verfügung standen<sup>5)</sup>, als Einheit vollständig implementieren ließ. Statt dessen konnte lediglich das gesamte Netzmodell zerlegt in einzelne Module - und das auch noch zuweilen unter erheblichen Schwierigkeiten<sup>6)</sup> - realisiert werden. Die Module ließen sich nur separat laden, so daß es nicht möglich war, auch modulübergreifende Prozesse innerhalb des Gesamtmodells zu untersuchen. Dies wäre aber für die intendierte Untersuchung der Konzepte zur Koordinierung von Produktionsprozessen erforderlich gewesen. Daher konnte die Koordinierungsperspektive des Projekts PEMVEK nicht in dem Ausmaß computergestützt verfolgt werden, wie es oben als Forschungsvorhaben skizziert wurde.

Aufgrund dieser derzeit noch ungelösten Schwierigkeiten, das Netzmodell einer virtuellen Fabrik mit INCOME/STAR vollständig darzustellen (und anschließend auch auszuwerten), wäre es vermessen, schon an den übernächsten Schritt zu denken, die Prozeßkoordinierung in einem realen Produktionssystem mittels INCOME/STAR gestalten zu wollen. Als nächster Schritt müßte die Funktionalität von INCOME/STAR zunächst so erweitert werden, daß sich die eklatant offenbaren Größenprobleme überwinden lassen<sup>7)</sup>. Hierfür wären aufgrund der Leipziger Modellierungserfahrungen auf jeden Fall Modularisierungs- und Hierarchisierungstechniken erforderlich, auf die noch zurückgekommen wird. Hierfür standen aber im Rahmen der Entwicklungspartnerschaft keine Ressourcen mehr zur Verfügung.

## IV. Fortentwicklungen von Prädikate/Transitions-Netzen

### IV.1. Einführung in den Fortentwicklungsbedarf aus betriebswirtschaftlicher Sicht

Häufig stellt sich zwischen "professionellen" Petrinetz-Anhängern, die zumeist aus dem Bereich von Informatik und Wirtschaftsinformatik stammen, und eher "kasuellen" Petrinetz-Anwendern auf Seiten der Betriebswirtschaftslehre ein gravierender Dissens hinsichtlich der Erwartungshaltungen ein, die an Petrinetze herangetragen werden<sup>8)</sup>: Aus professioneller Perspektive interessiert in der Regel ein möglichst eleganter Formalismus, der nicht nur präzise und ausdrucksstark, sondern zugleich auch möglichst kompakt ausfällt. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird dagegen zumeist gefordert, Petrinetze sollten vor allem eine *realitätsnahe* und *benutzerfreundliche* Modellierung von Realproblemen gestatten. Auf diese beiden Anforderungen war schon eingangs ausführlicher hingewiesen worden. Darüber hinaus möchte man auf betriebswirtschaftlicher Seite die Aspekte der Präzision, Ausdrucksstärke und Kompaktheit des zugrundeliegenden Formalismus keineswegs missen. Aber sie stehen nicht im Vordergrund des Modellierungsinteresses.

Insbesondere die Kompaktheit des zugrunde liegenden Formalismus konfliktiert oftmals mit der erwünschten Realitätsnähe und Benutzerfreundlichkeit eines Modellierungskonzepts. Zwar kann von professionellen Petrinetz-Anhängern zu Recht darauf hingewiesen werden, daß sich - von wenigen Ausnahmen abgesehen<sup>9)</sup> - nahezu jeder Sachverhalt letztlich mit Hilfe einer der "sauber" definierten Netzklassen - wie z.B. mit Bedingung/Ereignis-, Stellen/Transitions- oder Prädikate/Transitions-Netzen - modellieren läßt. Dazu muß aber oftmals auf Hilfsmittel zurückgegriffen werden, die aus der Perspektive betriebswirtschaftlicher Petrinetz-Anwender als "formale Krücken" und "artifizielle Konstrukte" erscheinen. Dies betrifft z.B.:

- die Verwendung von Komplementstellen, die zur Vermeidung der (beschränkten) Markenzapazitäten von Stellen und/oder zur Vermeidung von Inhibitorkanten eingeführt werden,
- die Benutzung von "I-Schleifen", um das Vorliegen einer Nebenbedingung zu modellieren,
- die "Abwicklung" von Höheren Netzen auf Bedingung/Ereignis- oder Stellen/Transitions-Netze, um Komplikationen von strukturierten Marken bei Invarianten- oder Erreichbarkeitsanalysen zu umgehen.

Konstruktionen dieser Art sind jedoch weder realitätsnah noch benutzerfreundlich. Denn sie geben nicht *unmittelbar* - intuitiv verständlich und transparent - den jeweils zu modellierenden Sachverhalt wieder. Statt dessen projizieren sie den Sachverhalt auf eine Hilfskonstruktion, von der zumeist nur der "Netzprofi" zu durchschauen vermag, daß sie sich in genau der Weise verhält, wie es der zu modellierende Sachverhalt vorgibt.

Solche Hilfskonstruktionen erweisen sich als realitätsfern, weil sie Bestandteile enthalten, denen im zu modellierenden Realitätsausschnitt kein unmittelbar entsprechendes Pendant zugeordnet werden kann. Dies trifft beispielsweise auf Komplementstellen ebenso zu wie auf den "rückwärts gerichteten" Markenfluß von I-Schleifen, die zur Repräsentation von Nebenbedingungen herangezogen werden. Die Hilfskonstruktionen verletzen auch das Postulat der Benutzerfreundlichkeit,

und zwar aus zwei Gründen. Erstens setzen sie ein intimes Verständnis für die formale Funktionsweise von Petrinetzen voraus, das von eher kasuellen Petrinetzanwendern im allgemeinen nicht erwartet werden kann. Zweitens fallen sie umfangreicher als die "unmittelbare" Modellierung der betroffenen Sachverhalte aus, weil sie um die zuvor erwähnten realitätsfernen Bestandteile aufgebläht sind. Dies wird besonders dann deutlich, wenn den Erweiterungen, die nachfolgend kurz vorgestellt werden, jeweils diejenigen Hilfskonstruktionen gegenübergestellt werden, die in Bedingung/Ereignis-, Stellen/Transitions- oder Prädikate/Transitions-Netzen zur Vermeidung jener Erweiterungen erforderlich wären.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht bestand daher ein zentrales Anliegen nicht nur der Entwicklungspartnerschaft mit den Karlsruher und Frankfurter Arbeitsgruppen, sondern des gesamten Projekts PEMVEK darin, jenes "Modellierungsniveau" oder jene "Modellierungsgranularität" zu verdeutlichen, die für Modellierungen mit Petrinetzen erforderlich sind, um von kasuellen Petrinetz-Anwendern als realitätsnah und benutzerfreundlich empfunden zu werden. Aufgrund der fachlichen Ausrichtung der Leipziger Arbeitsgruppe lag es allerdings nahe, die betriebswirtschaftliche auf eine dezidiert produktionswirtschaftliche Betrachtungsweise zu fokussieren.

## IV.2. Überblick über die wesentlichen Fortentwicklungen

Aufgrund der hier gebotenen Kürze werden die Fortentwicklungen der Funktionalität von INCOME/STAR, die von der Leipziger Arbeitsgruppe im wesentlichen angeregt wurden, im folgenden nur skizziert und hinsichtlich ihrer produktionswirtschaftlichen Relevanz knapp kommentiert. Die Details sind an anderer Stelle dokumentiert [Schi96, S. 5ff.]. Die Anwendung der Erweiterungen von INCOME/STAR auf konkrete produktionswirtschaftliche Aufgabenstellungen findet sich in [RöWu96]. Dort wird ausführlich beschrieben, wie eine virtuelle Fabrik mittels INCOME/STAR modelliert wurde.

### IV.2.a. Marken

Da INCOME/STAR das Arbeiten mit Höheren Petrinetzen gestattet, die sich durch die Strukturierung ihrer Marken von Niederen Petrinetzen unterscheiden, bedarf es einer Präzisierung des formalsprachlichen Rahmens für die Spezifikation der Markenstrukturen sowie der Operationen, die auf den zugehörigen Markenkopien ausgeführt werden dürfen. Aus produktionswirtschaftlicher Perspektive reicht das Ausdrucksvermögen Gefärbter Petrinetze dazu nicht aus, weil es keine *quantitativen Markenattribute* mit möglichst reellzahligen<sup>10)</sup> und im Zweifelsfall unbeschränkten Definitionsbereichen einschließt. Solche Attribute sind jedoch erforderlich, um z.B. Ausführungsdauern von Arbeitsgängen oder Wartedauern und Bearbeitungskosten von Werkstücken wiederzugeben. In dieser Hinsicht brauchte INCOME/STAR nicht erweitert zu werden, da es von vornherein den Formulierungsreichtum von Prädikate/Transitions-Netzen zur Verfügung stellte.

Allerdings wäre es aus der Perspektive der "Modellierungsästhetik" willkommen gewesen, wenn dieser Formulierungsreichtum im Sinne eines *sortierten algebraischen Kalküls* hätte ausgeschöpft werden können. Zwar läßt der INCOME/STAR-Editor beliebige algebraische Spezifikationen von Markenstrukturen und Operationen zu, aber er unterstützt kein Sortenkonzept. Eine entsprechende Erweiterung wurde nicht realisiert, zumal sie sich durch keinen produktionswirtschaftlichen Sachverhalt zwingend motivieren läßt. Es sollte aber erwogen werden, in späteren Versionen über die Einbeziehung des Sortenkonzepts noch einmal nachzudenken, da es sich in anderen Bereichen - z.B. auf dem Feld der Programmiersprachen - als Hilfsmittel für eine "disziplinierte" Spezifikation komplexer Sachverhalte vielfach bewährt hat.

Die Zulässigkeit von *Multimengen* erwies sich als wünschenswert, weil bei produktionswirtschaftlichen Problemen oftmals nur die Anzahl bestimmter Objekte, nicht aber deren Identität interessiert. Dies betrifft z.B. die *Anzahl* von Werkstücken eines bestimmten Typs - etwa eines zu bearbeitenden Metallrohlings -, die sich mittels der typbeschreibenden Eigenschaften bereits vollständig charakterisieren lassen. Die Identität eines einzelnen solchen Werkstücks zu kennen ist dagegen aus produktionswirtschaftlicher Sicht überflüssig. Die Zulässigkeit von Multimengen bedeutet jedoch den Übergang von strikten zu nicht-strikten Petrinetzen. Da die Eigenschaft der Striktheit die Formalisierung von Höheren Petrinetzen erheblich vereinfacht (es kann auf die aufwendige Multimengen-Notation verzichtet werden), wird oftmals angeregt, die Striktheit eines Netzmodells dadurch herzustellen, daß allen darin mittels Markenkopien modellierten Objekten jeweils eine objektspezifische Identifikationsnummer zugewiesen wird. Dies bereitet zwar rein modellierungstechnisch keine Schwierigkeiten, stellt aber eine derjenigen Hilfskonstruktionen dar, die oben als "formale Krücken" stigmatisiert wurden. Denn den Identifikationsnummern entspricht qua Voraussetzung kein produktionswirtschaftlich relevanter Sachverhalt im zu modellierenden Realitätsausschnitt. Um derart realitätsferne Artefakte zu vermeiden, wurde INCOME/STAR um die Zulässigkeit von Multimengen erweitert.

Die Objekte, die in produktionswirtschaftlich fundierten Netzmodellen als Markenkopien repräsentiert werden, zeichnen sich in der Regel durch eine Vielzahl von Attributen aus, die nicht unabhängig nebeneinanderstehen, sondern sachlogisch zu mehreren Attributgruppen zusammengefaßt werden können. Dies betrifft beispielsweise Werkstücke und Werkzeuge, die gewöhnlich u.a. durch material-, zeit- und wertbezogene Attributgruppen charakterisiert werden. Innerhalb der wertbezogenen Attributgruppe sind z.B. Kosten- und Leistungs- oder auch Deckungsbeitragsattribute zu unterscheiden, die im allgemeinen in weitere Subattribute - z.B. hinsichtlich verschiedener Kostenarten - aufgespalten werden können. Sogar einzelne Kostenartenattribute lassen sich aus "tieferliegenden" Subattributen zusammensetzen, so etwa die Kapitalbindungskosten (Zinskosten) aus den Kapitalbindungskosten, die bis zur letzten Berechnung angefallen sind, sowie aus der seitdem verstrichenen Zeitdauer und aus der in diesem Intervall zusätzlich angefallenen Kapitalbindung.

Diese vielfachen Über- und Unterordnungsbeziehungen zwischen sachlogisch zusammenhängenden Objektattributen legt es nahe, ähnlich wie bei objektorientierten Modellierungsansätzen *hierarchische Objektstrukturen* zuzulassen. Dies läuft allerdings gewöhnlichen Höheren Petrinetzen

zuwider, in denen für die Markenkopien lediglich "flache" Tupel vorgesehen sind. Mit ihnen lassen sich nur nebengeordnete Objektattribute erfassen, nicht jedoch hierarchisch über- oder untergeordnete Attribute. Derart flache Objektstrukturen mögen zwar zur petrinetzgestützten Modellierung Relationaler Datenbanksysteme geeignet sein, werden aber den zuvor skizzierten produktionswirtschaftlichen Gegebenheiten nicht gerecht. Daher wurde der INCOME/STAR-Editor so erweitert, daß er auch die Spezifizierung hierarchischer Markenstrukturen zuläßt.

Der zugehörige Simulator konnte jedoch während der Entwicklungspartnerschaft nicht mehr entsprechend erweitert werden. Statt dessen mußte man sich mit einer Hilfslösung begnügen: Die Markierungen von editierten Netzmodellen, die hierarchisch strukturierte Marken(kopien) enthielten, werden über eine Schnittstelle an das Softwarepaket PASIPP übergeben. Es war als ein Vorläufer von INCOME/STAR entwickelt worden und vermag hierarchisch strukturierte Marken(kopien) zu verarbeiten. Die Folgemarkierungen, die mittels PASIPP ermittelt werden, können über die Schnittstelle an INCOME/STAR zurückgereicht werden. Diese Kopplung zweier Softwarepakete, die recht unterschiedlichen Softwarephilosophien und auch Entstehungszeiten zuzurechnen sind, erwies sich im praktischen Gebrauch nicht nur als umständlich, sondern auch als fehleranfällig und zeitaufwendig. Leider fehlten im Rahmen der Entwicklungspartnerschaft aber die Ressourcen, die erforderlich gewesen wären, um diese Softwarekopplung durch eine entsprechende Erweiterung des INCOME/STAR-Simulators zu ersetzen.

#### IV.2.b. Transitionen und Kanten

Hinsichtlich der Ausdrucksmächtigkeit von Transitionen schälten sich aus produktionswirtschaftlicher Perspektive mehrere Erweiterungswünsche heraus. Zunächst galt es auf prädikatenlogischer Ebene, eine vollwertige Negation mittels *Inhibitor-kanten* zu verwirklichen. Das Ausdrucksmittel der Negation wird beispielsweise erforderlich, um darzustellen, daß im Falle der Abwesenheit von Arbeitskräften an einer Bearbeitungsstation bestimmte Aktivitäten ausgelöst werden (wie etwa ein Nothalt<sup>11</sup>). Inhibitor-kanten lassen sich zwar durch die Einführung von Komplementstellen vermeiden. Aber erstens trifft dies nur so lange zu, wie die adjazenten Stellen beschränkte Markenzapazitäten aufweisen<sup>12</sup>. Zweitens müßte man hierdurch auf artifizielle Konstrukte zurückgreifen, die bereits oben im Interesse einer realitätsnahen und benutzerfreundlichen Modellierung ausgeschlossen wurden. Daher wurde die Funktionalität von INCOME/STAR um Inhibitor-kanten bereichert.

Darüber hinaus war eine *modallogische Vervollständigung der Schaltregel* von Petrinetzen wünschenswert. Denn Petrinetze erfüllen aufgrund der Permissivität ihrer Schaltregel - d.h. aktivierte Transitionen *können* schalten, müssen es aber nicht - im allgemeinen nur die modallogische Qualität des Erlaubtseins. Die beiden anderen "klassischen" modallogischen Qualitäten des Verbotenseins und des Notwendigseins werden hingegen nicht abgedeckt. Sie werden aber erforderlich, um etwa auszudrücken, daß in zulässigen Systemzuständen bestimmte Objekte nicht zugleich vorkommen dürfen oder daß eine Aktivität in einem Systemzustand notwendig ist. Der erste Fall betrifft vor allem die Formulierung von Integritätsbedingungen [vgl. zu einem Beispiel Zele95, Bd.

7, S. 385ff.]. Der zweite Fall liegt beispielsweise vor, wenn modelliert werden soll, daß zwischen den Ausführungen zweier Arbeitsgänge eine Maximalfrist mit Normalfolgencharakter besteht: Dann *muß* mit der Ausführung des späteren Arbeitsgangs begonnen werden, sobald die Ausführung des früheren Arbeitsgangs beendet wurde und die zusätzliche Maximalfrist verstrichen ist.

Um die Schaltregel von Petrinetzen modallogisch zu vervollständigen, sind neben "normalen" Transitionen auch *faktische* und *obligatorische* Transitionen zu berücksichtigen. Faktische Transitionen *dürfen niemals* aktiviert sein, während obligatorische Transitionen im Falle ihrer Aktivierung unmittelbar schalten *müssen*. In INCOME/STAR wurden beide Transitions-Typen auf der Editor-Ebene zugänglich gemacht. Der Simulator vermag jedoch nur faktische Transitionen korrekt zu verarbeiten.

Eine weitere wünschenswerte Bereicherung stellen *Absorber- und Distributorkanten* dar. Sie sind in produktionswirtschaftlichen Kontexten immer dann erforderlich, wenn mittels einer Aktivität, die aus der Sicht des Modellgestalters als atomar erscheint, eine *ex ante unbestimmte* Anzahl von Objekten zur Kenntnis genommen und/oder manipuliert werden soll. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Vorrätigkeit eines bestimmten Werkzeugs an einer Maschine überprüft werden soll und jedes Werkzeug durch eine Markenkopie repräsentiert wird<sup>13</sup>. Ebenso ist es bei der Koordinierung von Produktionsprozessen mit der Hilfe von Auktionsverfahren nötig, durch den Koordinator-Agenten aus allen aktuell vorliegenden Geboten das jeweils beste *uno actu* zu selektieren. Abermals lassen sich Substitute für solche Absorber- und Distributorkanten in der Gestalt von schleifenförmigen Subnetzen vorstellen. Aber dies widerspricht den eingangs aufgestellten Anforderungen einer realitätsnahen und benutzerfreundlichen Modellierungsweise, weil den iterativen Schaltprozessen in den Subnetzen kein unmittelbares Pendant im zu modellierenden Realitätsausschnitt entspricht. Hinzu kommt (siehe weiter unten), daß die Implementierung der Subnetztechnik auf der Softwareebene außergewöhnliche Schwierigkeiten bereitet. Aus diesem Grund wurde die Erweiterung von INCOME/STAR um Absorber- und Distributorkanten vorgesehen und auch in Angriff genommen. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts konnte aber noch keine spezifikationsgerechte und stabile Funktionsweise von Transitionen mit diesen Sonderkanten sichergestellt werden.

Von noch größerem produktionswirtschaftlichen Interesse ist die Verwendung von *Informations-kanten*. Sie sind zur unmittelbaren Modellierung von Nebenbedingungen erforderlich, die einerseits erfüllt sein müssen, damit eine Aktivität erfolgen kann, die aber andererseits durch das Ausführen der Aktivität nicht verändert werden. Solche Nebenbedingungen spielen bei der Modellierung von Produktionssystemen und -prozessen eine herausragende Rolle. Beispielsweise können sie sich auf die Betriebsbereitschaft einer Bearbeitungsstation oder die Anwesenheit einer Bedienungskraft erstrecken. Die hohe Praxisrelevanz solcher Nebenbedingungen manifestiert sich u.a. auch darin, daß sich ein ganzer Forschungszweig - das bereits eingangs erwähnte Constraint-Satisfaction-Programming - der Erfassung und Verarbeitung von Nebenbedingungen widmet.

In Petrinetzen werden Nebenbedingungen zumeist durch 1-Schleifen modelliert, innerhalb derer die schaltende Transition eine oder mehrere Markenzapazitäten zunächst von einer inzidenten Stelle

abzieht und uno actu dort auch wieder unverändert ablegt. Dabei handelt es sich jedoch um eine artifizielle Konstruktion, die insbesondere hinsichtlich des "rückwärts gerichteten" Markenflusses nichts mit dem zu modellierenden realen Sachverhalt gemein hat. Darauf wurde schon oben hingewiesen. Deshalb sind Informationskanten ("Read-only-Kanten") vorzuziehen, über die eine Transition nur das Vorliegen von Markenkopien auf einer inzidenten Stelle - und gegebenenfalls auch die Ausprägungen der zugehörigen Markenattribute - registriert, ohne jedoch die betroffenen Markenkopien abzuziehen oder abzulegen. INCOME/STAR wurde um diesen speziellen Kantentyp erweitert.

Des weiteren erweisen sich aus produktionswirtschaftlicher Sicht *Schaltprioritäten* als willkommen. Sie können sich sowohl auf die nebenläufige Aktivierung derselben Transition mit unterschiedlichen Ensembles aktivierender Markenkopien als auch auf die nebenläufige Aktivierung mehrerer Transitionen erstrecken. Solche Schaltprioritäten sind z.B. erforderlich, um betriebswirtschaftliche Prioritätsregelverfahren bei der Einlastung von Werkstücken zu modellieren, die vor einer Bearbeitungsstation warten und um die nächste Arbeitsgangausführung konkurrieren. Ebenso können sie benutzt werden, um die Priorisierung von Aktivitäten im Falle von Betriebsstörungen auszudrücken. Schaltprioritäten konnten in INCOME/STAR noch nicht realisiert werden, flossen jedoch in ein experimentelles "Auswahltool" ein [Rö8197]. Es wurde von der Leipziger Arbeitsgruppe entwickelt, um die Selektion tatsächlich zu schaltender Transitionen aus einer mehrelementigen Menge von nebenläufig oder auch konfliktionär aktivierten Transitionen zu unterstützen.

Als letzte Erweiterung der Ausdrucksmächtigkeit von Transitionen, die sich aus produktionswirtschaftlichem Blickwinkel aufdrängt, sind *Realtransitionen* anzuführen. Es handelt sich um Transitionen, die trotz der Erfüllung ihrer Aktivierungsbedingung in einem Petrinetz noch nicht geschaltet werden dürfen, sondern erst dann schalten können, wenn ein zusätzliches (Schalt-)Signal bei der Transition eintrifft. Mit diesem Signal lassen sich Informationen über reale Ereignisse oder Zustände erfassen, die im jeweils modellierten Produktionssystem geschehen sind bzw. vorliegen. Auf diese Weise ist es möglich, eine informatorische Kopplung zwischen Netzmodell und zugrunde liegendem Realitätsausschnitt herzustellen. Sie kann z.B. mit der Hilfe von Sensoren und Eingabestationen der Betriebsdatenerfassung hergestellt werden. Eine solche Kopplung wird insbesondere dann nötig, wenn im Netzmodell Entscheidungen über die Koordinierung von Produktionsprozessen getroffen werden sollen, die von der aktuellen Produktionssituation abhängen. Dies trifft weniger auf den Fall der ex ante erfolgenden Produktionsplanung, wohl aber auf den Fall der prozeßbegleitenden Produktionssteuerung zu.

Diese Verknüpfung von Netzmodellen mit dem jeweils realisierten Realitätsausschnitt lag jedoch von vornherein außerhalb der Erwartungen, die für Erweiterungsmöglichkeiten von INCOME/STAR gehegt wurden. Denn es bestand keine realistische Aussicht, mit den verfügbaren Ressourcen die aufwendigen Schnittstellen zu Sensoren oder Eingabestationen im realen Produktionsumfeld zu verwirklichen.

#### IV.2.c. Zeit

Die Absicht, die Anschauungsform Zeit in Petrinetze einzubeziehen, stellt ein heikles Unterfangen dar: Einerseits gründet sich die Petrinetz-Theorie darauf, die *rein kausalen* Abhängigkeiten oder Unabhängigkeiten zwischen Ereignissen zu erfassen. Daher wird in "reinen" Petrinetzen auf eine zeitliche Dimension grundsätzlich verzichtet. Zeitbezogene Komponenten wie globale Systemuhren oder Gleichzeitigkeit von Ereignissen werden daher von "Netzpuristen" mit guten Gründen als Sakrileg empfunden. Andererseits lassen sich produktionswirtschaftliche Probleme im Bereich der Prozeßkoordinierung ohne Zeitbezug nicht realitätsnah modellieren. Wesentliche Formalziele der betrieblichen Praxis, wie etwa die Reduzierung von Durchlaufzeiten, die Verringerung der Reaktionszeiten auf Produktnachfragen oder die durchschnittliche Abwicklungsdauer von Auftragspaketen, sind unmittelbar zeitabhängig definiert. Aber auch andere wichtige Formalziele können mittelbar von Zeitgrößen abhängig sein. Dazu gehören z.B. die Verringerung von Zinskosten, die als Kapitalbindungskosten u.a. von der Kapitalbindungsdauer bestimmt werden, oder auch die Liquiditätserhaltung, da die liquiditätsbestimmenden Ein- und Auszahlungen jeweils zeitpunktbezogen erfolgen.

Aufgrund dieser vielfältigen Zeiteinflüsse kommen produktionswirtschaftliche Modellierungen von Prozeßkoordinierungen ohne die Anschauungsform Zeit nicht aus. Daher steht aus der Sicht der zu bearbeitenden Realprobleme nicht zur Diskussion, *ob* Zeit in Petrinetzen berücksichtigt werden soll, sondern es gilt nur darüber zu debattieren, *wie* dies zu geschehen hat.

Zeitabhängige Petrinetze lassen sich im wesentlichen in zwei Gruppen aufteilen. In der einen Gruppe wird Zeit als Schaltdauer von Transitionen erfaßt. Die andere Gruppe ist dadurch gekennzeichnet, daß sich Zeit als Bindungsdauern von Marken auf Stellen manifestiert. Beide Ansätze sind - rein technisch betrachtet - letztlich äquivalent, da sie sich wechselseitig ineinander überführen lassen.

Im Rahmen der Projekts PEMVEK wurde die zweite Art der Zeiterfassung in Petrinetzen bevorzugt, weil sie an der "punktförmigen" oder "ereignishaften" Charakteristik der Schaltakte von Transitionen festhält. Die stellenbezogenen Markenbindungsdauern werden mit der Hilfe von "*Zeitstempeln*" realisiert, die den Markenkopien beim Schalten von Transitionen aufgeprägt werden und in den Aktivierungsbedingungen anderer Transitionen zur Kenntnis genommen werden können. Zu den Details dieser Vorgehensweise, die beispielsweise auch die Repräsentation von Minimal- und Maximalfristen wie im Rahmen der Netzplantechnik gestattet, wird auf [Ze95, Bd. 6, S. 130ff.] verwiesen.

Die Verwendung von Zeitstempeln ist bei der Erweiterung von Petrinetzen um die Anschauungsform Zeit des öfteren üblich. Einen wesentlichen Streitpunkt bildet aber die Frage, *ob darüber hinaus* auch noch Konstrukte erforderlich sind, welche die Funktion einer *globalen Systemuhr*<sup>14)</sup> erfüllen. Die Opponenten weisen zu Recht darauf hin, daß solche globalen Systemuhren nicht nur der charakteristischen Lokalität der Schaltregel von Transition in Petrinetzen zuwiderlaufen, sondern sich auch nicht mit der fundamentalen Nebenläufigkeitsrelation von Petrinetzen vertragen. Außerdem sei eine globale Systemuhr in rein technischer Hinsicht nicht erforderlich, weil sich

durch eine Fülle lokaler Uhren (oder durch "spontane" Schaltakte, die als Äquivalente lokaler Uhren von Transitionen aufgefaßt werden können) der gleiche Koordinierungseffekt wie mittels einer globalen Systemuhr erzielen läßt.

Allerdings bedeutet der Verzicht auf eine globale Systemuhr zugleich auch, daß sich unter *derselben* Markierung eines Petrinetzes Markenkopien auf unterschiedlichen oder sogar denselben Stellen befinden können, die zu *unterschiedlichen* Zeitpunkten oder -intervallen gehören. Der Markierung des Netzmodells entspricht also nicht mehr einem Zustand des jeweils modellierten realen Produktionssystems. Vielmehr stellt die Netzmarkierung ein petrinetzspezifisches Artefakt dar, mit dem kein reales Pendant in intuitiv nachvollziehbarer Weise korrespondiert. Dadurch wird die Anforderung einer realitätsnahen Modellierung eklatant verletzt. Um diese - aus produktionswirtschaftlicher Sicht inakzeptable - Konsequenz zu vermeiden, wurde statt dessen der Zeitablauf in Netzmodellen mittels einer globalen Systemuhr dargestellt. -

Alle zeitbezogenen Aspekte, wie vor allem Ausführungsdauern von Aktivitäten oder Prozessen, Minimal- oder Maximalfristen sowie das (aktivitätslose) Verstreichen von Zeit, wurden innerhalb des Projekts PEMVEK unmittelbar mit Ausdrucksmitteln von Petrinetzen realisiert [vgl. RöWu96], die nicht über die vorgenannten Fortentwicklungen von INCOME/STAR hinausreichen. Dazu gehören insbesondere die bereits erwähnten Zeitstempel, die als Zuweisungen von Attributausprägungen in Transitionsinschriften behandelt werden, und ein separates Netzmodul für die globale Systemuhr. Daher konnten alle zeitbezogenen Erweiterungen von Petrinetzen seitens der Leipziger Arbeitsgruppe geleistet werden, ohne auf zusätzliche Implementierungshilfe von den Kooperationspartnern angewiesen zu sein.

#### IV.2.d. Modularisierung und Hierarchisierung

Als deutlicher Engpaß stellte sich beim Editieren großvolumiger Netzmodelle heraus, daß sich mittels INCOME/STAR nur zusammenhängende und planare Petrinetze bearbeiten lassen. *Zusammenhängende* Petrinetze werden vorausgesetzt, weil die Zerlegung in mehrere Netzmodule zwar möglich ist, aber kein Mechanismus unterstützt wird, der die Verknüpfung der Netzmodule verwirklicht. *Planare* Petrinetze, bei denen sich alle Knoten und Kanten der Netztopologie auf derselben Ebene ("Layer") befinden, sind erforderlich, weil die hierarchische Verfeinerung von Knoten (oder Kanten) auf tieferliegenden Ebenen in keiner Weise implementiert ist.

Beide Voraussetzungen erwiesen sich bereits für die Modellierung der virtuellen Fabrik als prohibitiv. Denn die zu editierenden Netzmodelle wurden rasch so umfangreich, daß sie sich selbst mit der höchsten Auflösungsstufe von INCOME/STAR praktisch nicht mehr handhaben ließen. Dies gilt keineswegs für nur das Gesamtmodell der virtuellen Fabrik, das wegen dieser Größenprobleme niemals auf INCOME/STAR zusammenhängend erstellt werden konnte. Vielmehr betrifft es z.B. ebenso die Modellierung "lediglich" der Transportsysteme [RöWu96, ScWu96].

Aufgrund dieser Größenprobleme, die insbesondere im Hinblick auf die Modellierung *praktischer* Problemstellungen für *reale* Produktionssysteme herausragende Bedeutung besitzen, wurden von der Leipziger Arbeitsgruppe zwei Strategien zur Komplexitätsbewältigung parallel ausgearbeitet.

Erstens wurden aus horizontalem Blickwinkel großvolumige Netzmodelle in separate *Netzmodule* zerlegt. Sie bleiben jedoch nicht unzusammenhängend nebeneinander stehen, sondern sind in zweifacher Hinsicht miteinander gekoppelt: einerseits statisch über *Schnittstellen*, die am Rande von mehreren Netzmodulen als identische Stellen vorkommen, und andererseits dynamisch über Markenkopien, die über die gemeinsamen Schnittstellen zwischen Netzmodulen ausgetauscht werden.

Zweitens erfolgte aus vertikaler Perspektive eine ebenenbezogene Kompaktifizierung von Netzmodellen, indem das Gesamtmodell auf mehrere, *hierarchisch* miteinander verknüpfte Modellierungsebenen verteilt wurde. Zu diesem Zweck wurden auf höheren Ebenen *Makro-Transitionen* verwendet, deren komplexes Schaltverhalten auf tiefer gelegenen Ebenen mit der Hilfe von transitionsberandeten *Subnetzen* spezifiziert wird. Durch solche Makro-Transitionen lassen sich z.B. ad- und disjunktive Verknüpfungen von Ein- oder Ausgangskanten einer Transition ebenso wie "zeitverbrauchende" Transitionen darstellen.

Mittels der Modularisierungs- und Hierarchisierungstechniken war es möglich, das Gesamtmodell der virtuellen Fabrik in überschaubare, transparente Teilnetze zu zerlegen, die dennoch in einem wohldefinierten statischen und dynamischen Zusammenhang stehen. Allerdings konnten beide Unterstützungstechniken in INCOME/STAR nicht - zumindest nicht innerhalb der Zeit- und Ressourcengrenzen, die der Entwicklungspartnerschaft vorgegeben waren, - verwirklicht werden. Daher mußte die bereits vorliegende modular-hierarchische Zerlegung des Gesamtmodells wieder zurückgenommen werden, um planare und zusammenhängende Teilmodelle zu rekonstruieren.

Jedoch ließen es die realen Beschränkungen der INCOME/STAR-Plattformen (insbesondere hinsichtlich Hauptspeicher und Monitoroberfläche) nicht zu, ein planares und zusammenhängendes Netzmodell für die *gesamte* virtuelle Fabrik zu editieren. Insofern konnte das Ziel der Entwicklungspartnerschaft, INCOME/STAR so zu erweitern, daß sich mit seiner Hilfe die produktionswirtschaftliche Koordinierung von Produktionsprozessen in einer virtuellen Fabrik bewältigen läßt, bereits in der Phase der Modell-*Erstellung* nicht vollständig erreichen. Die koordinierungsbezogene Modell-*Auswertung* konnte infolgedessen erst recht nicht mit Bezug auf die gesamte virtuelle Fabrik erfolgen. Statt dessen war es nur möglich, die Koordinierungskonzepte für stark eingegrenzte Teilmodellierungen mittels INCOME/STAR zu implementieren [vgl. ScWu96].

#### V. Zusammenfassende Würdigung

Die Leipziger Arbeitsgruppe hat aus ihrer Zusammenarbeit mit den Karlsruher und Frankfurter Partnern auf vielfache Weise gewonnen: Dies trifft vor allem auf die beträchtliche Fortentwicklung der Funktionalität von INCOME/STAR zu. Gegen Ende der Entwicklungspartnerschaft liegt eine "Leipziger Variante" von INCOME/STAR vor, die aufgrund ihrer umfangreichen Erweiterungen weitaus besser an produktionswirtschaftliche - und wohl auch umfassender: an betriebswirtschaftliche - Modellierungsbedürfnisse angepaßt ist als andere Petrinetz-Werkzeuge. Hinzu kommen mannigfache Einsichten und Erfahrungen, die aus den intensiven Diskussionen mit den Kooperationspartnern hinsichtlich des praktischen Umgangs mit Petrinetzen gesammelt

werden konnten. Dazu gehört beispielsweise ein verbessertes Verständnis der Rolle globaler Systemuhren bei der Modellierung von Zeitgrößen in Petrinetzen.

"Negative" Erkenntnisse erstrecken sich - erfreulicherweise - nur auf wenige Gebiete, die eng miteinander verwoben sind. Vor allem wurde der zeitliche Aufwand für die Anpassung von INCOME/STAR an produktionswirtschaftliche Modellierungsbedürfnisse drastisch unterschätzt. Auch die organisatorischen Anforderungen an die räumlich verteilte Spezifizierung, Implementierung und Erprobung von Softwaremodifizierungen erforderten ein Lernprozeß, der zusätzliche Ressourcen band. Aus diesen Gründen konnten einerseits von den Karlsruher und Frankfurter Arbeitsgruppen nicht alle produktionswirtschaftlich motivierten Erweiterungswünsche erfüllt werden. Andererseits gelang es der Leipziger Arbeitsgruppe hinsichtlich der Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen nur noch, einige konzeptionelle Überlegungen einzubringen, die sich insbesondere mit der strengen Optimierung von Netzmodellen befassen. Eine Konkretisierung und Implementierung dieser Konzepte war jedoch im Rahmen der Ressourcen, die für das Projekt PEMVEK zur Verfügung standen, nicht mehr möglich.

Für künftige Fortentwicklungen stellen sich aus produktionswirtschaftlicher Sicht an ein Petrinetz-Werkzeug wie INCOME/STAR im wesentlichen zwei Desiderata: Erstens erscheint es für die Handhabung praktischer Problemstellungen mit realistischer Größenordnung unverzichtbar, Netzmodelle mittels Modularisierung und hierarchischer Subnetztechnik sowohl horizontal als auch vertikal in überschaubare und dennoch miteinander verknüpfte Teilnetze zerlegen zu können. Zweitens wäre eine Erweiterung der Funktionalität um die Generierung von Erreichbarkeitsgraphen (oder Prozeßnetzen) wünschenswert, um mittels dieser abgeleiteten Graphen (bzw. Netze) die Auswirkungen von Koordinierungsmaßnahmen auf betriebswirtschaftliche Formalziele besser untersuchen zu können.

## VI. Danksagung

Das Projekt PEMVEK wird seitens der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms "Verteilte DV-Systeme in der Betriebswirtschaft" finanziell gefördert (Projekt-Nr. Ze 239/3-1). Der Verfasser fühlt sich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre großzügige Unterstützung zu nachhaltigem Dank verbunden.

Darüber hinaus dankt der Verfasser den beiden Arbeitsgruppen, die bereits einleitend als Kooperationspartner an den Universitäten Karlsruhe und Frankfurt am Main erwähnt wurden, vielmals für ihre immerwährende Aufgeschlossenheit gegenüber den Leipziger Fortentwicklungsanregungen. Ohne die übergroßen Mühen der Karlsruher und Frankfurter Kooperationspartner, die in die Umsetzung dieser Anregungen eingeflossen sind und zu einer beträchtlichen Anzahl neuer Software-Releases führten, hätte das Projekt niemals seinen heutigen Reifegrad erreichen können. Auch darf die große Geduld und wohlwollende Nachsicht unserer Kooperationspartner nicht unerwähnt bleiben, mit der sie den Leipziger Vorstellungen während der gesamten Zusammenarbeit begegneten, obwohl diese Anregungen aufgrund ihrer rein produktionswirtschaftlichen Motivierung professionellen Informatikern und Wirtschaftsinformatikern mitunter absonderlich

erschienen sein müssen. Tief empfundener Dank aus Leipzig gebührt daher nicht nur den Leitern der beiden Arbeitsgruppen, Herrn Univ.-Prof. Dr. Wolfried Stucky (Karlsruhe) und Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis (Frankfurt am Main). Vielmehr gilt er auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die an den Standorten Karlsruhe und Frankfurt am Main zum Gelingen der Kooperation unter großem persönlichen Einsatz beitrugen, und zwar Frau Kirsten Lenz, Frau Gabriele Zimmermann, Herrn Hans Richter, Herrn Volker Sänger, Herrn Roland Schätzle, Herrn Wolfgang Weitz sowie Herrn Torsten Zimmer. Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Jörg Desel (Karlsruhe), der besonders in den letzten Monaten mit konstruktiver Kritik und einer Fülle zukunftsweisender Ideen die Leipziger Arbeiten auf dem Gebiet der Auswertung von Petrinetz-Modellen immer wieder bereichert hat.

Schließlich möchte der Verfasser seinen eigenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern - Frau Katrin Schimmel, Frau Martina Haase, Herrn Maik Wurch, Herrn Henrik Rößler sowie Herrn Gunter Oley - für ihr bewundernswertes Engagement danken. Ihren vielfältigen, stimulierenden Anregungen und ihrer unermüdlichen Arbeit (oftmals auch bis tief in die Nacht, an Wochenenden und sogar in den Weihnachtsferien) ist der Erfolg des Forschungsprojekts maßgeblich zu verdanken.

## Anmerkungen

- 1) Vgl. hinsichtlich einer kurzen Projektvorstellung die Präsentationsseite im World-Wide-Web / Internet: <http://www.uni-leipzig.de/~ifpw/pemvek.htm>.
- 2) Einen Vorgänger, die PROLOG-basierte Software PASIPP, hatte der Verfasser bereits vor mehreren Jahren von Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis zur Verfügung gestellt erhalten. Wesentliche Strukturen von PASIPP, insbesondere seine Ausrichtung an einer Netzdarstellung in PROLOG-Notation, hatten den Verfasser bei seiner Entwicklung einer Klasse erweiterter Höherer Netze maßgeblich beeinflusst, die auf die Spezifika der Modellierung produktionswirtschaftlicher Problemstellungen zugeschnitten waren. Es handelt sich um die Klasse der "Synthetischen Netze", die in [Ze95, insb. Bd. 5 u. 6] beschrieben sind. Aufgrund dieser Vorarbeiten lag es nahe, in der Entwicklungspartnerschaft auf einen Nachfolger von PASIPP, das Softwarepaket INCOME/STAR, zurückzugreifen und dabei die schon über mehrere Jahre hinweg gewachsenen Beziehungen zur Arbeitsgruppe unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis zu vertiefen.
- 3) Natürlich konnte angesichts der finanziellen und personellen Ressourcen, die für die Entwicklungspartnerschaft zur Verfügung standen, nicht erwartet werden, daß sich alle Leipziger Erweiterungswünsche ohne jegliche Abstriche in neuen Releases von INCOME/STAR implementieren ließen. Daher blieben einzelne Wünsche unerfüllt, auf die im anschließenden Kapitel noch eingegangen wird. Sie schmälern aber nicht den Gesamteindruck, daß das realistisch Erwartbare - und manchmal auch noch deutlich mehr - in der Fortentwicklung von INCOME/STAR Berücksichtigung fand.
- 4) Dies schmerzte jedoch weniger, weil sie nicht in den Katalog der Ziele aufgenommen worden waren, die mit dem Projekt PEMVEK auf jeden Fall verwirklicht werden sollten, sondern von vornherein als Perspektive für mögliche Folgeprojekte deklariert worden waren.
- 5) In der Regel handelte es sich um Pentium-Computer.
- 6) Besondere Probleme bereitete das Modul für das Transportsystem. Die zugehörige Netzdatei umfaßte 1,8 MB und benötigte zum Laden auf einem Pentium-Computer unter Windows 3.11 mit 90 MHz und 32 MB RAM ca. 10 Minuten. Vgl. dazu die detaillierteren Angaben in [Sch96, S. 23f.].
- 7) Statt dessen könnte auch daran gedacht werden, auf ein anderes Petrinetz-Werkzeug zurückzugreifen, das z.B. auf kommerzieller Basis für andere Größenordnungen entwickelt wurde (in Betracht käme etwa die INCOME-Variante der Gesellschaft "Promatis"). Diese Alternative hätte jedoch dazu geführt, auf die Fülle der produktionswirtschaftlich motivierten Erweiterungen von INCOME/STAR verzichten zu müssen, da diese Feinheiten in anderen Petrinetz-Werkzeugen zumeist überhaupt nicht und in wenigen Ausnahmefällen nur rudimentär enthalten sind. Daher kam der Übergang zu einem alternativen Petrinetz-Werkzeug nicht ernsthaft in Betracht.

- 8) Die nachfolgend genannten Beurteilungskriterien stellen nur einen Ausschnitt aus einem Spektrum von Kriterien dar, die zur Beurteilung eines Modellierungskonzepts oder -werkzeugs in Erwägung gezogen werden können. Es erfolgt eine Beschränkung auf diesen prägnanten Ausschnitt, weil er ausreicht, um den hier interessierenden Dissens zu verdeutlichen. Vgl. aber auch zu einem ausführlicheren Kriterienkatalog [Ze96, S. 370ff.].
- 9) Dazu gehört etwa die Modellierung zeitkontinuierlicher Systeme, die von Petrinetzen aufgrund der Diskretheit der Schaltakte ihrer Transitionen allenfalls nur approximiert, niemals aber exakt geleistet werden kann.
- 10) Im Prinzip reichen auch rationalzählige Definitionsbereiche aus; jedoch ist es bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen üblich, von vornherein auf die Menge reeller Zahlen zurückzugreifen (so z.B. bei den meisten OR-Modellen).
- 11) Allerdings wird eingeräumt, daß die meisten Anwendungen von Inhibitoranten nicht aus produktionswirtschaftlichen Modellierungsanforderungen resultieren, sondern nötig werden, um das korrekte Schaltverhalten von Makro-Transitionen in Verbindung mit der Subnetztechnik zu erzwingen. Vgl. dazu beispielsweise die Subnetze für Makro-Transitionen in [Ze95, Bd. 6, S. 44ff.].
- 12) Diese Voraussetzung ist bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen oftmals erfüllt.
- 13) Zwar könnte daran gedacht werden, die ex ante unbestimmte Anzahl von Werkzeugen dadurch zu "entschärfen", daß nicht jedes Werkzeug durch eine werkzeugspezifische Markenkopie repräsentiert wird, sondern die gesamte Information über die Vorrätigkeit von Werkzeugen in der nur eine Kopie einer "Informationsmarke" mit einer listenartigen Attributstruktur enthalten ist. Dies würde jedoch gegen das Postulat einer realitätsnahen Modellierung verstoßen, weil es sich bei den zu repräsentierenden Werkzeugen um reale Objekte handelt, denen im Modell jeweils eine Markenkopie auf eindeutige Weise entsprechen sollte. Dieser bijektive Abbildungszusammenhang zwischen realen Objekten und repräsentierenden Markenkopien ginge verloren, wenn auf das Artefakt der Informationsmarke zurückgegriffen würde.
- 14) Da die Systemuhr durch ein kompaktes Modul als Bestandteil eines umfassenderen Netzmodells realisiert wird, könnte ebenso von einer *zentralen* Systemuhr gesprochen werden. Der Globalitätsbegriff wird hier aber bevorzugt, weil er das Spannungsverhältnis "lokales Schaltverhalten versus globale Systemuhr" prägnanter ausdrückt.

## Literatur

- [Adam91] Adam, W.; Hertwig, G.; Schebesta, W.: Einsatz von Petri-Netzen in der Leittechnik. In: Pritschow, G.; Spur, G.; Weck, M. (Hrsg.): Leit- und Steuerungstechnik in flexiblen Produktionsanlagen. Carl Hanser, München et al. 1991, S. 93-114.
- [Behr92] Behrens, A.: Prädikat/Transitionsnetze zur Steuerung von Prozessen. Dissertation Technische Universität Chemnitz 1992.
- [DeOZ96] Desel, J.; Oberweis, A.; Zimmer, T.: Simulation-Based Analysis of Distributed Information System Behaviour. Erscheint in: Proceedings 8th European Simulation Symposium ESS'96, Oktober 1996 in Genua.
- [DiCe93] DiCesare, F.; Harhalakis, G.; Proth, J.M.; Silva, M.; Vernadat, F.B.: Practice of Petri Nets in Manufacturing. Chapman & Hall, London et al. 1993.
- [Glue92] Gluer, D.; Schmidt, G.: Die Anwendung von Petri-Netzen zu Modellbildung, Simulation und Steuerungsentwurf bei flexiblen Fertigungssystemen. In: Schnieder, E. (Hrsg.): Petrinetze in der Automatisierungstechnik. Oldenbourg, München et al. 1992, S. 102-116.
- [Harh91] Harhalakis, G.; Lafiti, S.; Proth, J.-M.: Event Graphs for Modeling and Evaluating Modern Production Systems. In: Fandel, G.; Zäpfel, G. (Hrsg.): Modern Production Concepts - Theory and Applications, Proceedings of an International Conference, 20.-24.08.1990 in Hagen. Springer, Berlin et al. 1991, S. 438-451.
- [MoGu96] Moore, K.E.; Gupta, S.M.: Petri net models of flexible and automated manufacturing systems: a survey. In: International Journal of Production Research 24 (1996) 11, S. 3001-3035.

- [RaBa95] Ramaswamy, S.; Barber, K.S.: A High Level Specification Mechanism for the Analysis and Design of Manufacturing Systems. In: o.V.: Proceedings on the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 1995, o.O., S. 524-528.
- [Reut95] Reuter, B.: Direkte und indirekte Wirkungen rechnerunterstützter Fertigungssysteme: Formalisierte Netzstrukturen zur Darstellung und Analyse der Unternehmung. Physica, Heidelberg 1995.
- [RöB196] Rößler, H.: Zur Animation und Integration hierarchischer Petrinetze. Arbeitsberichte des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, Nr. 22, Universität Leipzig 1996.
- [RöB197] Rößler, H.: XPNC - Auswahltool für parallele Schaltentscheidungen bei der Simulation von Petrinetzen. Arbeitsberichte des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, Nr. 31, Universität Leipzig 1997.
- [RöWu96] Rößler, H.; Wurch, M.: Implementierung eines Flexiblen Fertigungssystems, Teilbände 1-3. Arbeitsberichte des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, Nr. 23, Universität Leipzig 1996.
- [RoWi91] Rosenstengel, B.; Winand, U.: Petri-Netze. Eine anwendungsorientierte Einführung. Vieweg, Braunschweig et al. 1991.
- [Schi96] Schimmel, K.: Abstimmung der Implementierungssoftware INCOME/STAR. Bericht zu Phase 1 des Projekts PEMVEK. Arbeitsberichte des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, Nr. 24, Universität Leipzig 1996.
- [ScWu96] Schimmel, K.; Wurch, M.: Simulation eines Koordinations-Moduls in einem Flexiblen Fertigungssystem, Arbeitsberichte des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, Nr. 30, Universität Leipzig 1996.
- [SrEm90] Srihari, K.; Emerson, C.R.; Cecil, J.A.: Modeling Manufacturing with Petri Nets. In: CIM Review 6 (1990) 3, S. 15-21.
- [vdAa96] van der Aalst, W.M.P.: Petri net based scheduling. In: OR Spektrum 18 (1996), S. 219-229.
- [Venk96] Venkatesh, K.; Zhou, M.-C.; Kaighobadi, M.; Caudill, R.: A Petri net approach to investigating push and pull paradigms in flexible factory automated systems. In: International Journal of Production Research 34 (1996) 3, S. 595-620.
- [Wang96] Wang, L.-C.: The Development on an Object-Oriented Petri Net Cell Control Model. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 11 (1996), S. 59-69.
- [Ze95] Zelewski, S.: Petrinetz-basierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Bd. 1-10. Arbeitsberichte des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft (Nr. 5-15), Universität Leipzig 1995.
- [Ze96] Zelewski, S.: Eignung von Petrinetzen für die Modellierung komplexer Realsysteme - Beurteilungskriterien. In: Wirtschaftsinformatik 38 (1996) 4, S. 369-381.
- [Ze97a] Zelewski, S.: Elektronische Märkte zur Prozeßkoordinierung in Produktionsnetzwerken. Eingereicht für: Wirtschaftsinformatik 39 (1997).
- [Ze97b] Zelewski, S.: Eignung von Petrinetzen für ökonomische Optimierungsprobleme - eine prozeßorientierte Übersicht. Erscheint in: Schnieder, E. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme - EKA 97, Methoden, Anwendungen und Tools auf der Basis von Petrinetzen und anderer formaler Beschreibungsmittel, 5. Fachtagung, 22.-23.05.1997 in Braunschweig.

- 1) Vgl. hinsichtlich einer kurzen Projektvorstellung die Präsentationsseite im World-Wide-Web / Internet: <http://www.uni-leipzig.de/~ifpw/pemvek.htm>.
- 2) Einen Vorgänger, die PROLOG-basierte Software PASIPP, hatte der Verfasser bereits vor mehreren Jahren von Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis zur Verfügung gestellt erhalten. Wesentliche Strukturen von PASIPP, insbesondere seine Ausrichtung an einer Netzdarstellung in PROLOG-Notation, hatten den Verfasser bei seiner Entwicklung einer Klasse erweiterter Höherer Netze maßgeblich beeinflusst, die auf die Spezifika der Modellierung produktionswirtschaftlicher Problemstellungen zugeschnitten waren. Es handelt sich um die Klasse der "Synthetischen Netze", die in [Ze95, insb. Bd. 5 u. 6] beschrieben sind. Aufgrund dieser Vorarbeiten lag es nahe, in der Entwicklungspartnerschaft auf einen Nachfolger von PASIPP, das Softwarepaket INCOME/STAR, zurückzugreifen und dabei die schon über mehrere Jahre hinweg gewachsenen Beziehungen zur Arbeitsgruppe unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Oberweis zu vertiefen.
- 3) Natürlich konnte angesichts der finanziellen und personellen Ressourcen, die für die Entwicklungspartnerschaft zur Verfügung standen, nicht erwartet werden, daß sich alle Leipziger Erweiterungswünsche ohne jegliche Abstriche in neuen Releases von INCOME/STAR implementieren ließen. Daher blieben einzelne Wünsche unerfüllt, auf die im anschließenden Kapitel noch eingegangen wird. Sie schmälern aber nicht den Gesamteindruck, daß das realistisch Erwartbare - und manchmal auch noch deutlich mehr - in der Fortentwicklung von INCOME/STAR Berücksichtigung fand.
- 4) Dies schmerzte jedoch weniger, weil sie nicht in den Katalog der Ziele aufgenommen worden waren, die mit dem Projekt PEMVEK auf jeden Fall verwirklicht werden sollten, sondern von vornherein als Perspektive für mögliche Folgeprojekte deklariert worden waren.
- 5) In der Regel handelte es sich um Pentium-Computer.
- 6) Besondere Probleme bereitete das Modul für das Transportsystem. Die zugehörige Netzdatei umfaßte 1,8 MB und benötigte zum Laden auf einem Pentium-Computer unter Windows 3.11 mit 90 MHz und 32 MB RAM ca. 10 Minuten. Vgl. dazu die detaillierteren Angaben in [Sch96, S. 23f.].
- 7) Statt dessen könnte auch daran gedacht werden, auf ein anderes Petrinetz-Werkzeug zurückzugreifen, das z.B. auf kommerzieller Basis für andere Größenordnungen entwickelt wurde (in Betracht käme etwa die INCOME-Variante der Gesellschaft "Promatis"). Diese Alternative hätte jedoch dazu geführt, auf die Fülle der produktionswirtschaftlich motivierten Erweiterungen von INCOME/STAR verzichten zu müssen, da diese Feinheiten in anderen Petrinetz-Werkzeugen zumeist überhaupt nicht und in wenigen Ausnahmefällen nur rudimentär enthalten sind. Daher kam der Übergang zu einem alternativen Petrinetz-Werkzeug nicht ernsthaft in Betracht.
- 8) Die nachfolgend genannten Beurteilungskriterien stellen nur einen Ausschnitt aus einem Spektrum von Kriterien dar, die zur Beurteilung eines Modellierungskonzepts oder -werkzeugs in Erwägung gezogen werden können. Es erfolgt eine Beschränkung auf diesen prägnanten Ausschnitt, weil er ausreicht, um den hier interessierenden Dissens zu verdeutlichen. Vgl. aber auch zu einem ausführlicheren Kriterienkatalog [Ze96, S. 370ff.].
- 9) Dazu gehört etwa die Modellierung zeitkontinuierlicher Systeme, die von Petrinetzen aufgrund der Diskretheit der Schaltakte ihrer Transitionen allenfalls nur approximiert, niemals aber exakt geleistet werden kann.
- 10) Im Prinzip reichen auch rationalzahlige Definitionsbereiche aus; jedoch ist es bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen üblich, von vornherein auf die Menge reeller Zahlen zurückzugreifen (so z.B. bei den meisten OR-Modellen).
- 11) Allerdings wird eingeräumt, daß die meisten Anwendungen von Inhibitoranten nicht aus produktionswirtschaftlichen Modellierungsanforderungen resultieren, sondern nötig werden, um das korrekte Schaltverhalten von Makro-Transitionen in Verbindung mit der Subnetztechnik zu erzwingen. Vgl. dazu beispielsweise die Subnetze für Makro-Transitionen in [Ze95, Bd. 6, S. 44ff.].
- 12) Diese Voraussetzung ist bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen oftmals erfüllt.

- 13) Zwar könnte daran gedacht werden, die ex ante unbestimmte Anzahl von Werkzeugen dadurch zu "entschärfen", daß nicht jedes Werkzeug durch eine werkzeugspezifische Markenkopie repräsentiert wird, sondern die gesamte Information über die Vorrätigkeit von Werkzeugen in der nur einen Kopie einer "Informationsmarke" mit einer listenartigen Attributstruktur enthalten ist. Dies würde jedoch gegen das Postulat einer realitätsnahen Modellierung verstoßen, weil es sich bei den zu repräsentierenden Werkzeugen um reale Objekte handelt, denen im Modell jeweils eine Markenkopie auf eindeutige Weise entsprechen sollte. Dieser bijektive Abbildungszusammenhang zwischen realen Objekten und repräsentierenden Markenkopien ginge verloren, wenn auf das Artefakt der Informationsmarke zurückgegriffen würde.
- 14) Da die Systemuhr durch ein kompaktes Modul als Bestandteil eines umfassenderen Netzmodells realisiert wird, könnte ebenso von einer *zentralen* Systemuhr gesprochen werden. Der Globalitätsbegriff wird hier aber bevorzugt, weil er das Spannungsverhältnis "*lokales* Schaltverhalten versus *globale* Systemuhr" prägnanter ausdrückt.