In: E. Schnieder (Hrsg.), 4. Fachtagung Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, Braunschweig 1995, S. 249–262.

Modellierung von Fertigungssystemen und Arbeitsplänen mit farbigen Petri-Netzen

Armin Zimmermann und Stefan Bode *

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Prozeßdatenverarbeitung und Robotik

Kurzfassung

Für moderne Fertigungssysteme gewinnt die rechnergestützte Modellierung und Bewertung der Leistung und Zuverlässigkeit eine zunehmende Bedeutung. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen. Es wird eine neue Methode dargestellt, die eine getrennte Modellierung des Fertigungssystems und der darin bearbeiteten Produkte ermöglicht. Die dabei entstehenden Modellteile werden automatisch zu einem speziellen Petri-Netz zusammengefaßt. Diese Methode basiert auf *Coloured Petri Nets*, die in einer vorangegangenen Arbeit speziell für Fertigungssysteme angepaßt wurden. Zusammen mit einer anschließenden numerischen oder simulativen Analyse können Fertigungssysteme in ihrer Leistungsfähigkeit bewertet werden.

Schlüsselworte

Modellierung und Leistungsbewertung
Petri-Netze
Fertigungssysteme

---

* Die Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Kennzeichen Ho 1257/4-2 gefördert.

1 Einleitung

Moderne Fertigungssysteme sind durch eine hohe Variantenvielfalt der Produkte und einen wachsenden Automatisierungsgrad der Anlagen geprägt. Dadurch bedingt steigen die Investitions- und Planungskosten. Außerdem erhöht sich durch eine immer mehr auftrags- und kundenorientierte Fertigung die Komplexität des Fertigungsablaufs. Während in der Vergangenheit der Schwerpunkt der Fabrikplanung in der optimalen Gestaltung und Auslastung der Betriebsmittel gesehen wurde, rückt darum der produkt- und auftragsgerechte Produktionsablauf in den Vordergrund. Ein Hersteller muß in der Lage sein, bei Einhaltung von hohen Qualitätsstandards flexibel auf sich verändernde Kundenwünsche zu reagieren. Infolgedessen wird die Planung der Fabrik und des Produktionsablaufs immer wichtiger und kostenintensiver [8, 13].

Aus den genannten Gründen wird deutlich, daß eine rechnergestützte Modellierung und Leistungsbewertung der Fertigung als wesentliches Hilfsmittel der Fabrikplanung notwendig ist. Anhand eines Modells läßt sich zunächst die korrekte Funktionsweise eines geplanten Fertigungssystems prüfen. Mit Hilfe der anschließenden Leistungsbewertung ist es möglich, anpassungsfähige Produktionsstrukturen zu finden, die eine Verringerung der Durchlaufzeiten und Bestände ermöglichen. Dabei können unter anderem Aussagen über Produktdurchlaufzeiten, Auslastung der Betriebsmittel, auftretende Engpässe oder das Ausfallverhalten des modellierten Fertigungssystems getroffen werden. Durch den Vergleich verschiedener Systemkonfigurationen (z.B. verschiedene Dimensionierung von Puffern, Anzahl von Transportsystemen) und die Auswahl der besten Lösung ist eine Optimierung möglich.

In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, mit der sowohl die Struktur des Fertigungssystems als auch die Arbeitspläne der zu bearbeitenden Produkte modelliert werden können. Diese getrennten Modelle werden im Anschluß zu einem Gesamtmodell zusammengefügt.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Überblick über die Modellierung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen gegeben. Danach wird anhand eines Beispiels die in dieser Arbeit entwickelte Modellierungsmethode erläutert. Den Abschluß bildet eine Zusammenfassung.

2 Modellierung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen

Im Gegensatz zu bereits verfügbaren spezialisierten Modellierungs- und Simulationswerkzeugen für Fertigungssysteme wie z. B. MOSYS [9] wird in dieser Arbeit ein auf Petri-Netzen basierender Ansatz zur Modellierung verwendet. Damit wird versucht, die im folgenden näher erläuterten Eigenschaften von Petri-Netzen für die Modellierung und Leistungsbewertung von Fertigungssystemen nutzbar zu machen.

Zeiterweiterte (stochastische) Petri-Netze [1] sind eine grafische Modellierungsmethode, mit

der sich komplexe Wechselwirkungen zwischen Produkten, Prozessen und Anlagen darstellen lassen. Sie können eine Vielzahl von Abläufen in einem einzigen Schema abbilden und trotzdem strukturelle Eigenschaften korrekt wiedergeben. Petri-Netze vereinen in natürlicher Weise Zustände und Aktivitäten und können Synchronisation sowie das Teilen und Zusammenfügen von Prozessen einfach darstellen. Darum sind sie von ihren Eigenschaften her gut dazu geeignet, um das Verhalten der hier betrachteten diskreten Fertigungssysteme abzubilden.

Bei der Verwendung von Petri-Netzen zur Modellierung von Fertigungssystemen ist es möglich, spezielle Simulationstechniken zur Varianzreduktion und damit Beschleunigung der Berechnung von Kennzahlen einzusetzen. Die als Methode der Steuervariablen bezeichnete Technik [7] nutzt die strukturellen Eigenschaften von Petri-Netzen aus. Darum ist es nicht ohne weiteres möglich, sie auf die von verschiedenen Simulationswerkzeugen verwendeten Simulationssprachen anzuwenden.

Darüber hinaus existieren für zeiterweiterte Petri-Netze numerische Analysemethoden zur quantitativen Bewertung von Modellen, die bereits in leistungsfähigen Softwarewerkzeugen implementiert sind [5]. Für viele Fragestellungen, in denen die Komplexität des zugrundeliegenden Modells nicht zu groß ist, liefert die numerische Analyse exakte Lösungen schneller als eine Simulation. Anhand struktureller Eigenschaften (z.B. Deadlocks, Erreichbarkeit) eines Petri-Netz-Modells kann die korrekte Spezifikation eines Modells noch vor der quantitativen Analyse geprüft werden.

Durch ihre Anpaßbarkeit an spezielle Anwendungsgebiete und die durchgängig grafische Beschreibung eignen sich Petri-Netze als gemeinsames Beschreibungsmittel für Planung, Leistungsbewertung und Steuerung von Fertigungssystemen.

In der Literatur wurden Fertigungssysteme [2, 3, 10] und insbesondere flexible Fertigungssysteme [5, 11] bereits häufig mit Petri-Netzen modelliert. Außerdem wurde versucht, speziell für die Modellierung von Fertigungssystemen gedachte Arten von Petri-Netzen zu entwickeln. Bruno und andere entwickelten *Prot nets* [4], in denen markierungsabhängige Kantenausdrücke zugelassen sind. Allgemein werden ungefärbte Petri-Netz-Modelle dabei aber sehr schnell unübersichtlich, da in ihnen unterschiedliche Produkte nicht durch unterscheidbare Marken nachgebildet werden können. Darum wurden farbige Petri-Netze (*Coloured Petri Nets* oder *CPN*s, [6]) ebenfalls zur Modellierung von Fertigungssystemen eingesetzt [12]. Mit ihnen wird dieses Problem zwar gelöst, dafür enthalten CPN-Modelle aber komplexe Definitionen von Farben und Variablen sowie viele nichtgrafische Elemente. Aus diesem Grund wurde in [14] eine im nächsten Abschnitt näher erläuterte Methode entwickelt, die farbige Petri-Netze speziell für die Modellierung von Fertigungssystemen anpaßt. Diese Methode ist die Grundlage für die vorliegende Arbeit.

3 Eine Methode zur Modellierung des Fertigungssystems und der Arbeitspläne

Wie bereits im letzten Abschnitt erwähnt, ist die Modellierung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen ohne unterscheidbare Marken problematisch, insbesondere wenn Systeme realistischer Größe betrachtet werden. Farbige Petri-Netze bieten sich als natürliche Lösung dieses Problems an, da sie unterscheidbare Marken besitzen und außerdem eine hierarchische Modellierung ermöglichen. Leider wird mit ihnen der in der fast ausschließlich grafischen Beschreibung liegende Vorteil von Petri-Netzen dadurch verringert, daß die verwendeten Markentypen (Farben) und Variablen vorher in einer Art Programmiersprache definiert werden müssen.

In [14] wird darum eine auf farbigen Petri-Netzen basierende neue Methode zur Modellierung von Fertigungssystemen vorgestellt, die die Vorteile von farbigen und Stellen-Transitions-Netzen verbindet. Das geschieht über eine Beschränkung der verwendbaren Markentypen auf zwei Arten, die entweder Produkte oder Zustände modellieren. Marken des Typs *Zustand* sind ununterscheidbar wie in Stellen-Transitions-Netzen. Sie lassen sich dadurch einfach verwenden und grafisch darstellen. Mit ihnen werden Zustände von Ressourcen modelliert, z.B. eine belegte oder ausgefallene Maschine. Marken des Typs *Produkt* modellieren die im Fertigungssystem bearbeiteten Produkte. Stellen, die Marken des Typs *Produkt* enthalten, entsprechen Orten, an denen sich zu bearbeitende Teilen befinden können, z.B. Lager oder Transportmittel. Produkte werden durch einen *Namen* und eine *Bearbeitungsstufe* charakterisiert, die bei der Bezeichnung einer Marke durch einen Punkt getrennt sind.

Durch die Beschränkung auf zwei Markentypen können Stellen und Kanten des Modells nur noch zu einem der beiden vordefinierten Typen gehören. Durch eine grafische Unterscheidung (Typ *Zustand* dünn, Typ *Produkt* dick gezeichnete Stellen und Kanten) wird die Verständlichkeit des Modells stark verbessert. Auf einem Farbmonitor können statt dessen unterschiedliche Farben verwendet werden. Dadurch ist es nicht mehr nötig, den Typ einer Stelle im Modell anzugeben oder Variablen und Typen zu definieren. Es wird also eine sehr viel stärker grafisch orientierte Modellierung ermöglicht. Außerdem ähnelt ein Modell unter Verwendung dieser Methode der Struktur des Fertigungssystems, was die intuitive Verständlichkeit verbessert.

Durch die Verwendung der hierarchischen Verfeinerung von Transitionen ist es möglich, das Verhalten von Betriebsmitteln auf einer niedrigeren Darstellungsstufe genauer zu spezifizieren. Damit ist eine übersichtliche Darstellungsweise möglich. Maschinen des gleichen Typs, die an verschiedenen Stellen eines Fertigungssystems auftreten, können durch dieselbe Verfeinerung näher beschrieben werden. Das erlaubt einen modularen Aufbau und die Wiederverwendbarkeit von Teilen des Modells. Die Bereitstellung einer Bibliothek vordefinierter Komponenten ist denkbar, die nach einer Parametrisierung in das Modell übernommen werden können.

Eine wichtige Forderung an Modellierungstechniken für Fertigungssysteme ist die getrennte Modellierung der Struktur des Fertigungssystems und der zu bearbeitenden Produkte. Ohne

eine solche Trennung muß bei einer Änderung des zu fertigenden Produktmixes das gesamte Modell neu erstellt werden. Dieses Problem wurde bisher bei der Modellierung mit Petri-Netzen nicht angemessen gelöst. In dieser Arbeit wird darum eine Methode vorgeschlagen, mit der die Arbeitspläne getrennt vom Fertigungssystem mit Petri-Netzen modelliert werden können.

Für die genannte Trennung von Fertigungsstruktur und Arbeitsplänen werden *assoziierte Petri-Netze* eingeführt. Mit dem Petri-Netz-Modell der Fertigungsstruktur sind weitere Netze *assoziiert*, die die Arbeitspläne der Produkte beschreiben. Ein assoziiertes Petri-Netz beschreibt dabei immer einen Weg durch das die Struktur nachbildende Modell. In ihm können also nur Stellen und Transitionen auftreten, die bereits im Strukturmodell enthalten sind, da Arbeitsgänge der Produkte nur mit im Fertigungssystem vorhandenen Maschinen bearbeitet werden bzw. sich Produkte nur in existierenden Lagern befinden können. Mit diesem Modellierungsprinzip ist das Strukturmodell des Fertigungssystems unabhängig von der Art und Menge der herzustellenden Produkte.

Anhand des im nächsten Abschnitt folgenden Beispiels wird eine Methode beschrieben, mit der aus dem Strukturmodell des Fertigungssystems und den die Arbeitspläne modellierenden assoziierten Petri-Netzen ein das Gesamtverhalten beschreibendes Modell erzeugt wird.

In Jensens Definition farbiger Petri-Netze [6] sind den Ein- und Ausgangskanten von Transitionen Ausdrücke zugeordnet (*arc expressions*), die Variablen enthalten können. Jede Transition besitzt außerdem ein Schaltprädikat (*guard function*). Damit eine Transition schaltfähig ist, muß eine Belegung der Variablen gefunden werden, die in den Ausdrücken der mit der Transition verbundenen Kanten auftreten. Die Variablen können mit Marken belegt werden, die sich in den mit der Transition verbundenen Stellen befinden. Eine derartige Variablenbelegung wird *Belegung* (*binding*) genannt, wenn dadurch auch das Schaltprädikat der Transition erfüllt ist. In einer gegebenen Markierung (einer bestimmten Markenverteilung auf die Stellen) kann eine Transition unter mehreren Belegungen schaltfähig sein. In einem solchen Fall ist die Transition nach Jensen konkurrierend zu sich selbst schaltfähig. Übertragen auf Fertigungssysteme macht diese Semantik wenig Sinn, da z.B. eine Maschine normalerweise nur ein Teil auf einmal bearbeiten kann. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit immer nur eine von mehreren möglichen Belegungen einer Transition als schaltfähig angenommen. Ist die Auswahl der Belegung nicht mit Prioritäten geregelt, wird sie zufällig vorgenommen.

Durch die Anwendung der in [14] dargestellten vordefinierten Markentypen ist es möglich, auf die bei farbigen Petri-Netzen nötigen Kantenausdrücke, Farb- und Variablendefinitionen zu verzichten. Die je nach auftretender Markenbelegung unterschiedlichen Eigenschaften einer Transition werden statt dessen in einer *Übergangstabelle* (siehe Abschnitt 3.3) spezifiziert. In dieser Tabelle ist die Menge der möglichen Belegungen einer Transition zusammen mit den entsprechenden Schaltbedingungen und -zeiten aufgeführt. Diese Tabelle ersetzt die in

Coloured Petri Nets nötigen Schaltprädikat- und Kantenausdrücke, und kann von den assoziierten Petri-Netzen abgeleitet werden. Das Strukturmodell beschreibt das Gesamtverhalten, nachdem es um die Übergangstabellen angereichert wurde. Anhand des folgenden Beispiels wird diese Vorgehensweise näher erläutert.

3.1 Ein Beispiel

Wir betrachten als Beispiel die in Bild 1 dargestellte einfache Fertigungszelle. Zwei Maschinen (M1 und M2) montieren bzw. bearbeiten zwei Produkte A und B. Das Produkt A tritt im unbearbeiteten Zustand (A.0) über die Einlastung EIN1 ins System ein, Produkt B.0 über EIN2 und Bauteil C.0 über den Kleinteilepuffer KT. Die Maschine M1 montiert jeweils ein Teil A.0 und zwei Teile C.0. Die entstehenden Teile A.1 werden zusammen mit den eintreffenden Teilen vom Typ B im Zwischenlager ZW abgelegt, von wo sie durch ein Transportmittel TM zur Maschine M2 gebracht werden. Die durch die Bearbeitung in der Maschine M2 entstehenden Teile A.2 bzw. B.1 verlassen das System über die Auslastung AUS.

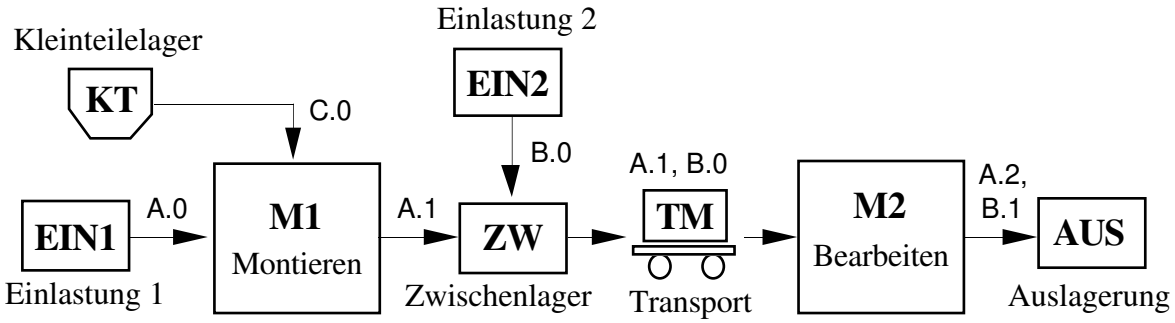

Bild 1: Struktur des Fertigungssystems und Wege der Produkte

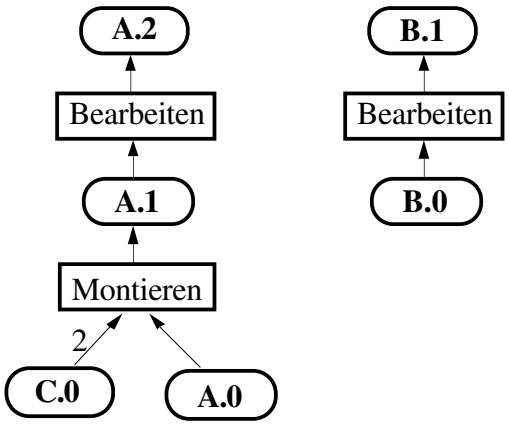

Bild 2: Erzeugnisstruktur und Bearbeitungsschritte

Der in Bild 2 dargestellte Erzeugnisstrukturbaum beschreibt die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Produkte sowie die zu ihrer Herstellung notwendigen Arbeitsgänge.

3.2 Modellierung der Struktur des Fertigungssystems

Hierarchische Petri-Netze können in sogenannte *Seiten* eingeteilt werden. Die im Bild 3 dargestellte Seite STRUKTUR modelliert die Struktur des Fertigungssystems (die Betriebsmittel und die möglichen Transportwege der Werkstücke). Ein solches Modell kann aus einer Skizze der Struktur des Fertigungssystems gewonnen werden, wie in unserem Beispiel aus Bild 1. Dabei entsprechen Lager und andere Behälter von Produkten Stellen im Petri-Netz, wogegen Maschinen und Transportmittel durch Transitionen modelliert werden. Dadurch entspricht die Form des Petri-Netz-Modells der Struktur des modellierten Fertigungssystems. Ein- und Ausgänge des Systems werden ebenfalls als Transitionen nachgebildet. Dieses Modell beschreibt das Fertigungssystem auf dem höchsten Abstraktionsniveau und ist der Ausgangspunkt für weitere hierarchische Verfeinerungen.

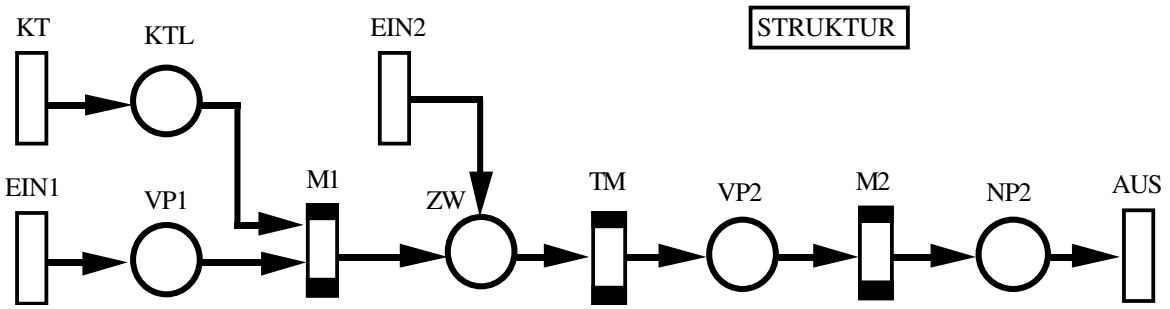

Bild 3: Petri-Netz-Modell der Struktur des Fertigungssystems

Die verfeinerten Transitionen werden *Vertretertransitionen* genannt und sind hier durch zwei dicke Balken gekennzeichnet (M1, TM und M2 im Beispiel). Jeder Vertretertransition ist eine *Unterseite* zugeordnet. Im Bild 4 ist die der Transition M2 zugeordnete Unterseite MASCH2 dargestellt.

Dieses Modell beschreibt das Verhalten der Maschine 2 näher. Die Stellen der Unterseite, die die Verbindung mit der übergeordneten Seite herstellen, heißen *Anschlußknoten* und sind durch ein Kästchen mit der Bezeichnung "In", "Out" oder "In/Out" (*Anschlußtyp*) zu erkennen.

Liegt im Vorpuffer VP der Maschine ein Werkstück, wird es aufgespannt (Transition AUFSP) und befindet sich danach auf dem Bearbeitungsplatz PLATZ. Die Bearbeitung des Produkts wird durch die Transition BEARB modelliert, die die Bearbeitungsstufe des Werkstücks ändert. Nach dem Ende der Bearbeitung wird das Werkstück abgespannt (Transition ABSP), und verläßt das Teilmodell über den Nachpuffer NP. Auf dieser Beschreibungsebene kann für jede Transition eine Standard-Schaltzeit angegeben werden (AUFSP und ABSP 5.2 bzw. 3.5 Zeiteinheiten), die aber später möglicherweise abhängig von der Art des Werkstücks überschrieben wird.

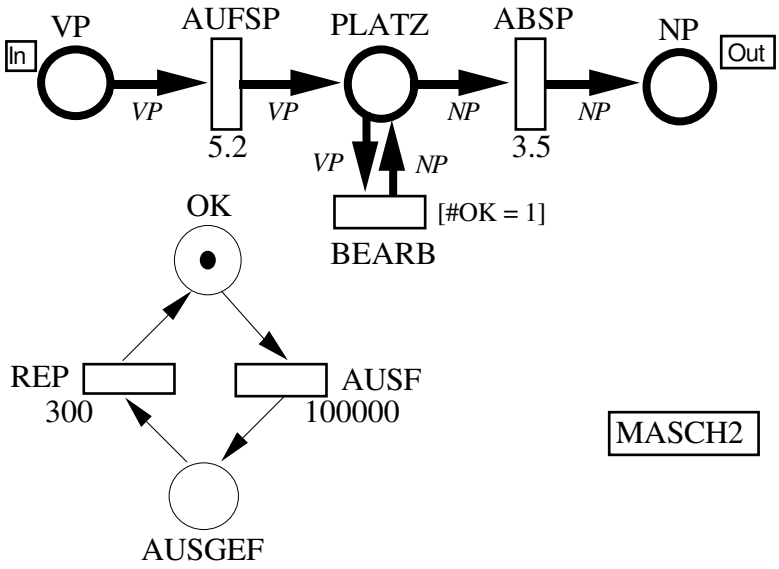

Bild 4: Verfeinertes Modell der Maschine 2

Die schräggestellten Namen von Stellen im Modell (*VP* und *NP*) sind Platzhalter, die später durch die tatsächlich zu bearbeitenden Teile aus den Arbeitsplänen ersetzt werden. Sie sind nötig, um das Verhalten der Maschine auf der verfeinerten Ebene darstellen zu können. In unserem Beispiel verändert das Schalten der Transition BEARB die Art der Marke, wogegen AUFSP und ABSP die Marke nur weitertransportieren. Der Ausdruck *VP* (*NP*) an einer Kante bedeutet, daß durch diese Kante Marken geschaltet werden, wie sie in der Anschlußstelle VP (NP) im verfeinerten Modell ankommen (das Modell verlassen).

Die Stellen OK und AUSGEF können nur farblose Marken enthalten, da sie dünn gezeichnet sind (Typ *Zustand*). Eine Marke in OK bedeutet, daß die Maschine in Ordnung ist; ist die Marke in AUSGEF, ist die Maschine fehlerhaft und muß repariert werden. Der Ausfall und die Reparatur der Maschine werden durch das Schalten der Transitionen AUSF und REP modelliert (100000 bzw. 300 Zeiteinheiten). Die Maschine kann nur arbeiten, wenn sie im Zustand OK ist. Darum hat die Transition BEARB eine Schaltbedingung [#OK = 1]. Das bedeutet, daß die Anzahl der Marken in der Stelle OK gleich 1 sein muß, damit die Transition schaltfähig ist.

In der Unterseite sind also genauere Eigenschaften der Maschine 2 sowie ihr Ausfall- und Reparaturverhalten spezifiziert. Die Unterseiten der Transitionen M1 und TM werden aus Platzgründen nicht vorgestellt. Verschiedene Vertretertransitionen, die Maschinen gleichen Aufbaus modellieren, können mit derselben Unterseite verfeinert werden. Damit ist ein modularer Modellaufbau möglich.

3.3 Modellierung der Erzeugnisstruktur

Die in Bild 5 dargestellten Petri-Netz-Modelle der Arbeitspläne lassen sich aus der Beschreibung der einzelnen Produktionsschritte ableiten, die als Graph oder Tabelle vorliegen können (in unserem Beispiel aus Bild 2). Auf dieser Modellierungsebene ist bereits zusätzlich festgelegt worden, welche Arbeitsgänge auf welcher Maschine durchgeführt werden und welchen genauen Weg die Teile durch das System nehmen. Aus Platzgründen wurden in diesem Beispiel keine Arbeitspläne mit Varianten verwendet, wie z.B. ersetzende Maschinen oder alternative Transportwege. Diese lassen sich jedoch ebenfalls mit einem Petri-Netz modellieren, es sind dann beim Beginn einer Variante verschiedene Transitionen konkurrierend schaltfähig. Die Auflösung dieses Konfliktes kann dann entweder anhand von Prioritäten, des aktuellen Zustands des Fertigungssystems oder zufällig erfolgen.

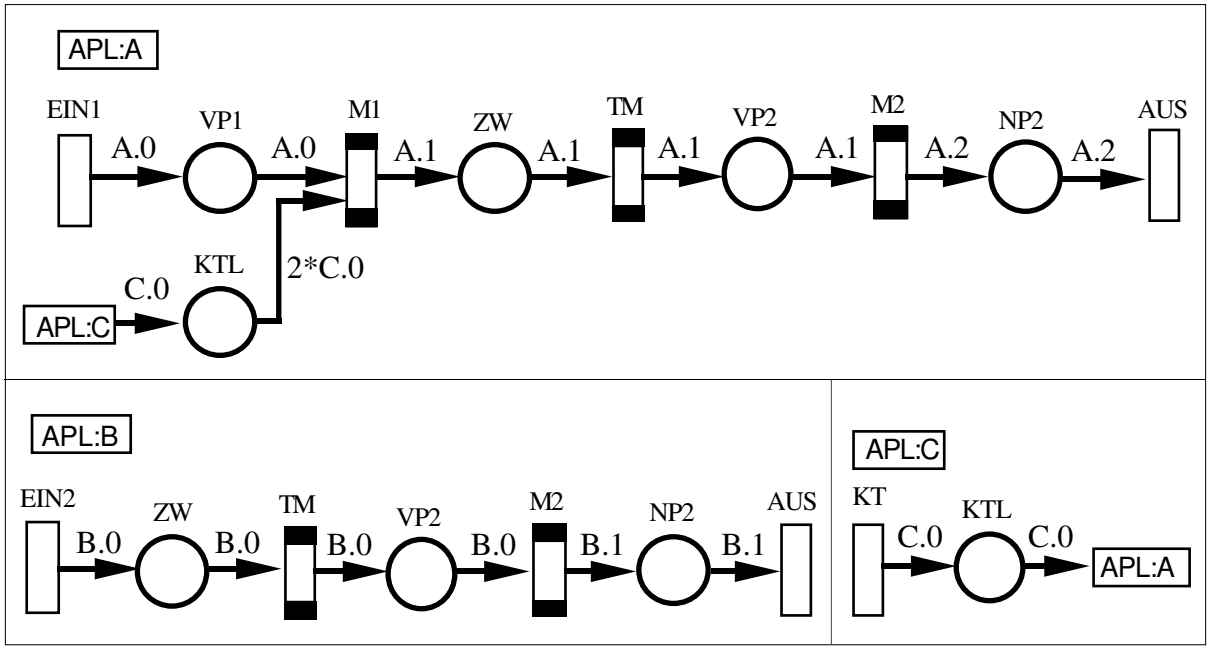

Bild 5: Petri-Netz-Modelle der Arbeitspläne

Mit dem im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Modell der Fertigungsstruktur sind die Petri-Netze der Arbeitspläne APL:A, APL:B und APL:C (Bild 5) assoziiert. Wie bereits erwähnt, entspricht jedes assoziierte Petri-Netz einem Pfad innerhalb des Strukturmodells. Insbesondere können in assoziierten Netzen nur Knoten vorkommen, die es auch in der Struktur gibt. Assoziierte Petri-Netze beginnen und enden entweder an den Ein- und Ausgangstransitionen der Struktur oder durch Übergang in ein anderes assoziiertes Netz. In unserem Beispiel geht der Arbeitsplan für Teil C in den für Teil A an der Stelle KTL über.

Um das Gesamtverhalten des Fertigungssystems bei der Fertigung der angegebenen Produkte zu modellieren, werden aus den assoziierten Petri-Netzen automatisch Übergangstabellen generiert. Eine Übergangstabelle beschreibt alle möglichen Belegungen einer im Strukturmodell enthaltenen Transition und beginnt mit dem Namen der Transition. Es folgt in runden Klammern ein logischer Ausdruck: die optionale *Schaltbedingung* der Transition. Die Transition ist nur schaltfähig, wenn dieser Ausdruck erfüllt ist. Anschließend steht in eckigen Klammern eine Liste der möglichen Belegungen der Transition. Jede Belegung beschreibt in einer Liste die möglichen Markenzuweisungen zu Kanten der Transition zusammen mit der entsprechenden Schaltzeit.

Hinter dem Namen einer Vertretertransition steht zuerst das Schlüsselwort *substitution*, der Name der zugeordneten Unterseite und die Liste der Anschlußzuweisungen (Sockelknoten der Überseite -> Anschlußknoten der Unterseite). Dann folgt für jede Transition der Unterseite ein Eintrag in der oben beschriebenen Form.

Arbeitsplan A

```
M2      [substitution -> MASCH2: VP2 -> VP, NP2-> NP;
         AUFSP    [ in#VP = A.1,          out#PLATZ = A.1 ]
         BEARB    [ in#PLATZ = A.1,       out#PLATZ = A.2; 10.3 ]
         ABSP     [ in#PLATZ = A.2,       out#NP = A.2 ]
        ]
```

Arbeitsplan B

```
M2      [substitution -> MASCH2: VP2 -> VP, NP2-> NP;
         AUFSP    [ in#VP = B.0,          out#PLATZ = B.0 ]
         BEARB    [ in#PLATZ = B.0,       out#PLATZ = B.1; 8.8 ]
         ABSP     [ in#PLATZ = B.0,       out#NP = B.0 ]
        ]
```

Tabelle 1: Übergangstabellen aus den Arbeitsplänen A und B für Maschine 2

Die sich für die Maschine 2 ergebenden Übergangstabellen sind in Tabelle 1 dargestellt. Sie beschreiben das Verhalten der Transitionen der Unterseite MASCH2 für die Arbeitspläne A und B. In der ersten Zeile wird festgelegt, daß die Transition M2 der obersten Seite durch die Unterseite MASCH2 ersetzt wird. Außerdem bestimmt die Anschlußzuweisung, welche Stellen der Überseite welchen Anschlußknoten der Unterseite zugeordnet sind (VP2 wird intern VP zugeordnet bzw. NP2 NP).

Darunter folgt für jede Transition der Unterseite, deren Verhalten von der Art der zu bearbeitenden Produkte abhängt, eine Beschreibung des Schaltverhaltens. Die Zeile

```
AUFSP    [ in#VP = A.1,          out#PLATZ = A.1 ]
```

bedeutet, daß die Transition AUFSP schaltfähig ist, wenn an der Eingangskante zur Stelle VP (Symbol: in#VP) eine Marke des Typs A.1 verfügbar ist. Schaltet die Transition unter dieser Belegung, wird eine Marke des Typs A.1 von der Stelle VP abgezogen und in die Stelle PLATZ bewegt (out#PLATZ = A.1).

Spezielle Bedingungen, unter denen eine der Belegungen schaltfähig ist, wurden in diesem einfachen Modell nicht benötigt. Diese lassen sich zusätzlich in die Belegungszeile einfügen. Die für die Transition BEARB angegebenen Schaltzeiten (10.3 und 8.8 Zeiteinheiten) bestimmen die Zeit, die die Maschine zur Bearbeitung von Teilen des Typs A.1 bzw. B.0 benötigt. Für die Transitionen AUFSP, ABSP, AUSF und REP sind keine Angaben über die Schaltzeit enthalten, d.h. es werden die in der Unterseite angegebenen Zeiten verwendet.

Für nicht verfeinerte Transitionen lassen sich die Übergangstabellen für jeden Arbeitsplan leicht ableiten: aus dem Petri-Netz-Modell des Arbeitsplanes ist ersichtlich, welche Werkstücke in welchen Bearbeitungsstufen die Transition erreichen bzw. verlassen. Für jede dieser Kombinationen jedes Arbeitsganges entsteht eine Belegungszeile der Übergangstabelle für die Transition.

Bei der Bestimmung der Übergangstabellen einer Vertretertransition wird keine Tabelle für die Transition selbst aufgestellt, da sie ja nur ein Platzhalter für das auf der entsprechenden Unterseite spezifizierte Teilnetz ist. Statt dessen wird nach der Substitution der Vertretertransition durch ihre Unterseite für die Transitionen der Unterseite die Übergangstabelle aufgestellt. Aus den Arbeitsplänen ist bekannt, welche Arten von Werkstücken an den Anschlußstellen der Unterseite auftreten können. Auf diese Produkttypen wird in der Unterseite über die im Beispiel schräggestellten Variablen *VP* und *NP* zugegriffen. Die Zeilen der Übergangstabellen der einzelnen Transitionen ergeben sich dann aus dem in der Unterseite angegebenen Schaltverhalten, zusammen mit dem aus dem Arbeitsplan gewonnenen Markentyp.

Damit entsteht aus den Petri-Netz-Modellen der Arbeitspläne unter Berücksichtigung des Strukturnetzes für jeden Arbeitsplan eine Tabelle der möglichen Belegungen der Transitionen.

3.4 Generierung eines Gesamtmodells

Im vorangegangenen Abschnitt wurde erläutert, wie für jeden Arbeitsplan Übergangstabellen für die von ihm im Strukturmodell betroffenen Transitionen generiert wurden. Um das Verhalten des modellierten Fertigungssystems bei der Bearbeitung aller in den Arbeitsplänen beschriebenen Produkte zu modellieren, werden die in den Übergangstabellen enthaltenen Informationen automatisch in das Strukturmodell integriert. Dazu wird für jede Transition des Strukturmodells eine neue Übergangstabelle hergestellt, deren Grundaufbau ähnlich dem oben beschriebenen ist. Die entsprechende Tabelle für die Transition M2 aus dem Beispiel ist in Tabelle 2 dargestellt. Für hierarchisch verfeinerte Transitionen wird wie im letzten Abschnitt für die einzelnen in der Unterseite liegenden Transitionen eine Übergangstabelle hergestellt.

In den neuen Tabellen werden alle Zeilen aus den alten Übergangstabellen zusammengefaßt, die zu einer Transition des Strukturmodells gehören. Es findet also eine Umsortierung der Einträge der Übergangstabellen nach den Transitionen statt. Alle zu einer Transition gehörenden Einträge werden Oder-verknüpft und bilden die der Transition zugeordnete Übergangs-

tabelle. Jede Zeile in diesen neuen Tabellen enthält dabei eine Schaltzeit. Diese stammt aus dem entsprechenden Eintrag in der Übergangstabelle der Arbeitspläne. Falls dort keine angegeben wurde, wird die im Strukturmodell angegebene Standard-Schaltzeit der Transition eingesetzt.

```
M2      [substitution -> MASCH2: VP2 -> VP, NP2-> NP;
         AUFSP                [ in#VP = A.1,      out#PLATZ = A.1; 5.2 |
                                in#VP = B.0,      out#PLATZ = B.0; 5.2 ]
         BEARB    (#OK=1)     [ in#PLATZ = A.1,  out#PLATZ = A.2; 10.3 |
                                in#PLATZ = B.0,  out#PLATZ = B.1; 8.8 ]
         ABSP                 [ in#PLATZ = A.2,  out#NP = A.2;     3.5 |
                                in#PLATZ = B.0,  out#NP = B.0;     3.5 ]
        ]
```

Tabelle 2: Zusammengefaßte Übergangstabelle der Maschine 2

War der Transition im Strukturmodell eine Schaltbedingung zugeordnet (wie im Beispiel Transition BEARB), wird diese Bedingung in die Übergangstabelle vor den verschiedenen möglichen Übergängen eingetragen. Damit wird modelliert, daß die Transition unabhängig von ihren Belegungen nur dann schaltfähig ist, wenn die Bedingung erfüllt ist.

Die beschriebene Methode zur Generierung der Übergangstabellen der Transitionen kann automatisch erfolgen, denn es sind keine Eingriffe des Modellierers notwendig. Im Anschluß daran ist jeder Transition eine Tabelle zugeordnet, die ihr Verhalten unter den verschiedenen möglichen Belegungen beschreibt. Ist später bei der Erzeugung des Erreichbarkeitsgraphen oder der automatischen Simulation eine Transition unter mehreren Belegungen schaltfähig (d.h. mehrere Zeilen der Übergangstabelle sind „anwendbar“), muß eine Auswahl zwischen diesen Möglichkeiten erfolgen. Das mögliche Auftreten einer solchen Situation läßt sich bereits durch eine Untersuchung des Gesamtmodells erkennen. In unserem Beispiel ist die Transition AUFSP unter zwei Belegungen schaltfähig, wenn sich in der Stelle VP ein Teil A.1 und ein Teil B.0 befindet. Dieser Fall läßt sich aus der Übergangstabelle der Transition AUFSP erkennen und kann dem Modellierer angezeigt werden, um die Konfliktauflösung manuell zu beeinflussen. Dabei können den verschiedenen Alternativen Prioritäten oder unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Es können also bereits vor einer Simulation Aussagen über auftretende Konflikte getroffen werden.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine neue Methode zur Modellierung von Fertigungssystemen entwickelt. Dafür wurden Petri-Netze eingesetzt, die sich als Beschreibungsmittel für diskrete Ereignissysteme anbieten. Durch geeignete Einschränkungen und die Definition spezieller Konstrukte in *Coloured Petri Nets* können Fertigungssysteme übersichtlicher modelliert werden. Insbesondere werden sowohl die Struktur des Fertigungssystems als auch die Arbeitspläne der Produkte mit Petri-Netzen getrennt modelliert. Ein das gesamte Systemverhalten beschreiben-

des Modell kann aus diesen Modellteilen automatisch erzeugt werden. Ausgehend von einem solchen Modell ist es möglich, das Verhalten des Fertigungssystems mit numerischer Analyse oder diskreter Simulation zu untersuchen.

Petri-Netze erweisen sich als geeignetes Beschreibungsmittel für die Modellierung und Leistungsbewertung von Produktionssystemen. Mit ihnen lassen sich sowohl die Struktur als auch das Verhalten eines Fertigungssystems in einem Modell darstellen. Für die Berechnung von Kennzahlen eines Modells lassen sich bei der Verwendung von Petri-Netzen spezielle Simulationstechniken [7] sowie bekannte Analysemethoden [1] verwenden.

Modellierung und Leistungsbewertung sind ohne die Unterstützung durch ein entsprechendes Softwarewerkzeug nicht denkbar. Die Einbindung der hier vorgestellten Methoden in das in [5] vorgestellte Werkzeug TimeNET ist darum ein Ziel der weiteren Arbeit.

Literaturliste

[1] M. Ajmone Marsan. Stochastic Petri Nets: An Elementary Introduction. In G. Rozenberg (Ed.), *Advances in Petri Nets 1989, Lecture Notes in Computer Science 424,* S. 1-29, Springer 1990.

[2] R.Y. Al-Jaar, A.A. Desrochers. Petri Nets in Automation and Manufacturing. In G.N. Saridis (Ed.): *Advances in Automation and Robotics*, Vol. 2, JAI Press, 1990.

[3] R.Y. Al-Jaar, A.A. Desrochers. Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets. *IEEE Trans. on Robotics and Automation,* Vol. 6, 1990.

[4] G. Bruno, M. Morisio. Petri-Net Based Simulation of Manufacturing Cells. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, S. 1174-1179, 1987.

[5] R. German, A. Zimmermann, C. Kelling, G. Hommel. Modellierung und Bewertung von flexiblen Fertigungssystemen mit TimeNET. *CIM Management*, Heft 3, 1994.

[6] K. Jensen. *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer 1992.

[7] C. Kelling. Control Variates Selection Strategies for Timed Petri Nets. *Proc. of the European Simulation Symposium,* Istanbul, S. 73-77, Oktober 1994.

[8] K. Kurbel. Produktionsplanung und -Steuerung. *Handbuch der Informatik 13.2,* Oldenbourg 1993.

[9] K. Mertins, M. Rabe. Flexible Abbildung von Produktionseinrichtungen und Steuerung mit dem Planungssystem MOSYS. In *Fortschritte der Simulationstechnik Band 4*, S. 386-390, Vieweg 1991.

[10] C. Lindemann, G. Ciardo, R. German, and G. Hommel. Performability Modeling of an Automated Manufacturing System with Deterministic and Stochastic Petri Nets. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, S. 576-581, 1993.

[11] M. Silva, R. Valette. Petri Nets and Flexible Manufacturing. In G. Rozenberg (Ed.) *Advances in Petri Nets 1990*, *Lecture Notes in Computer Science 424,* S. 364-417, Springer 1991.

[12] N. Viswanadham, Y. Narahari. Coloured Petri Net Models for Automated Manufacturing Systems. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh, North Carolina, S. 1985-1990, 1987.

[13] H.-P. Wiendahl. *Analyse und Neuordnung der Fabrik.* Reihe CIM-Fachmann, Springer Verlag und TÜV Rheinland 1991.

[14] A. Zimmermann. A Modeling Method for Flexible Manufacturing Systems based on Colored Petri Nets. *Proc. of the Hong Kong Int. Workshop on New Directions of Control and Manufacturing,* Hong Kong, S. 147-154, 1994.

Adresse

Armin Zimmermann, Stefan Bode
Technische Universität Berlin
Prozeßdatenverarbeitung und Robotik
Sekretariat FR 2-2
Franklinstr. 28/29
10587 Berlin

Tel.: 030 / 314-73114
Fax.: 030 / 314-21116
E-Mail: azi | sbo@cs.tu-berlin.de