Queueing Petri Nets

Falko Bause
Peter Kemper

Informatik IV
Universität Dortmund

Zusammenfassung. In farbigen Petri-Netzen (CPN) entstehen neben Synchronisation und Nebenläufigkeit häufig auch Wartesituationen, deren explizite Modellierung sich als aufwendig erweist. Diese Wartesituationen sind in der Modellwelt der Queueing-Petri-Netze (QPN) auf natürliche Weise beschreibbar, da Wartestationen in CPNs integriert werden. Auf QPNs sind einerseits Verfahren aus der Petri-Netz-Theorie zur Gewinnung qualitativer Aussagen, wie z.B. Beschränktheit, anwendbar. Andererseits können mit Verfahren aus der Markov-Theorie Leistungskenngrößen bestimmt werden. Beide Analysetechniken finden sich im QPN-Tool vereint, das den Zugang zur Modellwelt der QPNs über eine graphische Benutzerschnittstelle eröffnet.

1 Einführung

Eine Systemanalyse wird i.a. sowohl unter qualitativen als auch quantitativen Gesichtspunkten durchgeführt. Um beide Aspekte in einer Modellbeschreibung erfassen zu können, wurde der Zeitbegriff nachträglich in die Petri-Netz Modellwelt integriert (zeitbehaftete Petri-Netze, z.B. Generalized Stochastic Petri Nets (GSPNs) [1]).

In letzter Zeit hat sich gezeigt, daß sich gerade Petri-Netze zur Modellierung von Automatisierungssystemen anbieten. Heutige Automatisierungssysteme weisen in der Regel eine Vielzahl von Konkurrenz- und Nebenläufigkeitssituationen auf, welche oft direkt durch entsprechende Petri-Netzbeschreibungen dargestellt werden können [7, 8].

Konkurrenzsituationen bedingen allerdings auch häufig Warteumstände. Typische Wartesituationen treten bei der Beschreibung der technischen Prozesse eines Automatisierungssystemes auf, z.B. Bearbeitung von Werkstücken an Drehbänken, Warten von Flugzeugen auf Freigabe der Startbahn. Die Reihenfolge der Bedienung der Wartenden ist durch Scheduling-Strategien festgelegt, z.B. FCFS. Standardmäßig lassen sich mittels zeitbehafteter Petri-Netze solche Strategien häufig nur mit großem Aufwand beschreiben.

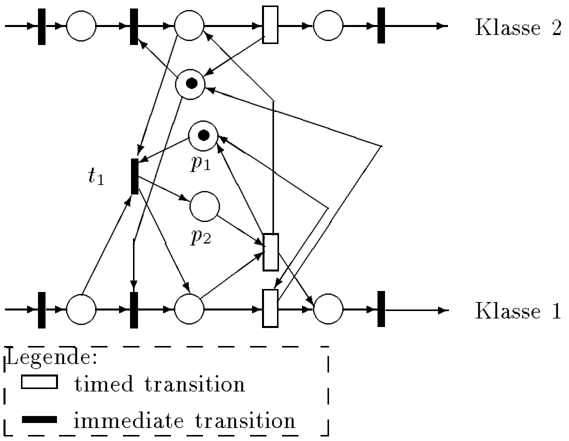

Abb. 1. "Priority preemptive resume" Bedienung

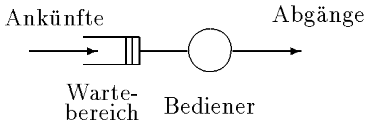

Abb. 2. M/M/1 - "priority preemptive resume" Station

Das GSPN in Abb. 1 verdeutlicht diese Schwierigkeit. Der abgebildete Netzausschnitt zeigt eine Station, welche zwei Klassen von Kunden bedient, wobei die Bedienung von Klasse-1 Kunden Vorrang vor der von Klasse-2 Kunden hat. Bei Ankunft eines Klasse-1 Kunden wird ein evtl. in Bedienung befindlicher Klasse-2 Kunde unterbrochen (Transition t1), welcher nach Bedienung aller anwesenden Klasse-1 Kunden seine Bedienung wieder aufnimmt. Die Belegung der Stellen p1 und p2 zeigt an, ob eine solche Situation aufgetreten ist. Die Bedienzeit beider Kundenklassen wird hier jeweils durch eine Exponentialverteilung beschrieben. Wie Abb. 1 zeigt, ist die Darstellung solcher Wartesituationen nicht direkt einsichtig und erhöht die Komplexität der Netzdarstellung. Aus Gründen der Komplexitätsreduzierung könnte nun argumentiert werden, daß bei hierarchischer Beschreibung des Modells, sich Scheduling-Strategien innerhalb von Subnetzen darstellen lassen. Dies ist allerdings auch keine zufriedenstellende Lösung. Man stelle sich z.B. vor, daß der Modellierer des Systems aus Abb. 1 quantitative Größen für mehrere Bedienzeitverteilungen oder zusätzliche Kundenklassen ermitteln möchte. Dies würde zu komplexeren Subnetzen führen, die nur mit Mühe verstanden und verifiziert werden könnten.

Eine einfache Form der Darstellung von Wartesituationen ist dagegen aus der Theorie der Warteschlangen bekannt [14]. Die übliche Notation von Kendall erlaubt eine sehr kompakte Darstellung des GSPN-Subnetzes (vgl. Abb. 2) als Station. Ferner ist eine Modifikation des Modells bzgl. Kundenklassen und Bedienzeiten ohne Aufwand möglich.

Um die angesprochenen Defizite zeitbehafteter Petri-Netze zu eliminieren, bietet sich die Integration von Warteschlangenstationen an. Dieser Artikel beschreibt eine Modellwelt zur Verbindung von Warteschlangen- und Petri-Netzen (QPNs) in Kapitel 2. Ein Tool, QPN-Tool, welches die Eingabe und Analyse solcher Netze unterstützt, wird in Kapitel 3 vorgestellt.

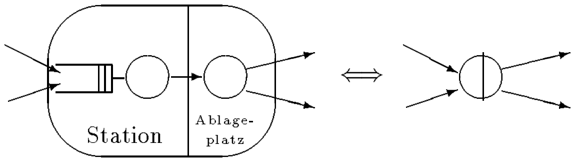

Abb. 3. Zeitbehafteter Platz und seine piktorielle Notation

2 QPN - eine Warteschlangen-Petri-Netz Modellwelt

Die Queueing-Petri-Net (QPN) Modellwelt [2, 3, 10] integriert die Beschreibung von Stationen aus der Warteschlangentheorie, indem Plätze zusätzlich Stationsbeschreibungen beinhalten dürfen.

Die Struktur eines QPNs wird durch ein farbiges Petri-Netz (CPN) [9] mit jeweils zwei Arten von Plätzen und Transitionen festgelegt:

'Zeitloser' Platz (ordinary place) Ein solcher Platz entspricht dem Platz eines farbigen Petri-Netzes. Marken, die auf solche Plätze gefeuert werden, stehen den Ausgabetransitionen sofort zur Verfügung.

Zeitbehafteter Platz (timed place) Ein zeitbehafteter Platz enthält zusätzlich die Beschreibung einer Station. Marken, die auf solche Plätze gefeuert werden, werden gemäß der Scheduling-Strategie in den Wartebereich der Station eingefügt oder direkt bedient. Nach Bedienung gelangt die Marke auf einen Ablageplatz (vgl. Abb. 3). Erst jetzt ist sie für Ausgabetransitionen des zeitbehafteten Platzes verfügbar! Ein zeitbehafteter Platz kann als Kurznotation für ein komplexes Subnetz betrachtet werden, welches die zu erfassende Wartesituation modelliert. Um den Zustand der Warteschlange nach Gruppenankünften eindeutig festlegen zu können, kann zusätzlich eine Rangordnung zwischen den einzelnen Markenfarben angegeben werden. Dies ist z.B. notwendig bei einer FCFS Scheduling-Strategie und gleichzeitiger Ankunft von Marken unterschiedlicher Typen.

Zeitlose Transition (immediate transition) Eine aktivierte zeitlose Transition feuert bzgl. aller ihrer Farben modellmäßig in Nullzeit. Jeder solchen Transition wird bzgl. ihrer Farben eine relative Feuerungshäufigkeit zugeordnet. Diese bestimmt bei nebenläufig aktivierten zeitlosen Transitionen die Wahrscheinlichkeit mit der eine solche Transition feuert.

Zeitbehaftete Transition (timed transition) Eine zeitbehaftete Transition feuert erst einige Zeit nach ihrer Aktivierung. Die Verzögerungszeit wird dabei für die Farben der Transition durch jeweils eine Exponentialverteilung beschrieben. Die Feuerung zeitbehafteter Transitionen hat geringere Priorität als die Feuerung zeitloser Transitionen. Sie sind nur dann aktiviert, wenn keine zeitlose Transition aktiviert ist. Ähnlich der GSPN-Modellwelt wird auch bei QPNs eine sog. 'race policy' zugrundegelegt [1].

Beispiel 1. Abb. 5 zeigt ein QPN zur Modellierung eines Materialfluss-Systems. In diesem Beispiel werden aus zwei Rohstoffarten, welche im "Lager" bereitgehalten werden, drei Endprodukte hergestellt. Hierzu müssen die Rohstoffe mittels FTS der "Schlosserei" und "Dreherei" zugeführt werden, um dort zu Halbfertigprodukten (Halb-1, Halb-2, Halb-3, Halb-4, vgl. Abb. 7) verarbeitet werden zu können. Diese werden nach dem Weitertransport mittels FTS in zwei Montagelinien ("Montage-1" und "Montage-2") zu den Endprodukten weiterverarbeitet. Endprodukte werden für den Vertrieb eingelagert. Beispiele für zeitbehaftete Plätze sind "Schlosserei" und "Dreherei", für zeitlose Plätze "Transportmittel" und "Vorrat".

Die Darstellung der Transitionen ist ähnlich der in GSPNs. Die Dynamik weist jedoch aufgrund der zeitbehafteten Plätze Unterschiede zu GSPNs auf. Marken auf dem Platz "Vorrat" stehen der Transition "T4" unmittelbar zur Verfügung. Diese zeitlose Transition feuert bei Aktivierung in Nullzeit jeweils eine Marke auf ihre Ausgabeplätze. Dort werden die Marken in die Station eingefügt und gemäß der jeweiligen Scheduling-Strategie bedient. Nach Bedienung gelangen die Marken auf die entsprechenden Ablageplätze der zeitbehafteten Plätze und stehen jetzt erst der zeitlosen Transition "T3-start" zur Verfügung.

Damit für eine spätere Analyse ein endlicher Zustandsraum vorliegt, wird das Lager für Rohstoffe als Quelle des Netzes und das Lager für Endprodukte als Senke des Netzes kurzgeschlossen. Endprodukte werden bei Feuerung von "T3-stop" in Rohstoffe zerlegt.

Jedes QPN beschreibt einen stochastischen Prozeß. Ein Zustand ist durch das kartesische Produkt der Zustandsbeschreibungen aller Stationen, der Belegung der zugehörigen Ablageplätze und der Belegung der zeitlosen Plätze gegeben. Werden die Bedienzeitverteilungen in den Stationen durch geeignete Verteilungen, z.B. Cox-Verteilungen, beschrieben, so läßt sich die Analyse eines QPNs mittels Untersuchung der eingebetteten Markov-Kette vornehmen.

Ähnlich der GSPN-Modellwelt [1] besteht der Zustandsraum des stochastischen Prozesses eines QPNs aus zwei Zustandstypen:

Zeitlose Zustände (vanishing states) Die Feuerung zeitloser Transitionen besitzt Vorrang vor der Feuerung zeitbehafteter Transitionen oder Zustandswechseln innerhalb von Stationen zeitbehafteter Plätze. Zustände in denen zeitlose Transitionen aktiviert sind, sog. 'vanishing states', verläßt der stochastische Prozeß sofort.
Falls mehrere zeitlose Transitionen nebenläufig aktiviert sind, so wird die feuernde Transition mittels relativer Feuerungshäufigkeiten bestimmt. Diese Feuerungshäufigkeiten werden dabei entsprechend normiert und bestimmen so die Wahrscheinlichkeit des Zustandswechsels.

Zeitbehaftete Zustände (tangible states) Falls keine zeitlosen Transitionen aktiviert sind, erfolgt ein Zustandswechsel durch Feuern einer zeitbehafteten Transition oder durch eine Zustandsänderung innerhalb einer Station eines zeitbehafteten Platzes. Dieser Zustandswechsel erfolgt erst nach einer gewissen Zeit.

Der stochastische Prozeß ist dann mit Angabe eines Initialzustandes vollständig beschrieben. Dieser ergibt sich aus der Anfangsmarkierung des zugrundeliegenden CPNs, wobei zeitlose Plätze wie üblich markiert und zeitbehaftete Plätze nur auf ihren Ablageplätzen mit der entsprechenden Markenanzahl belegt werden.

Um QPNs in der Praxis einsetzen zu können, ist eine entsprechende Toolunterstützung erforderlich. Im folgenden Kapitel werden wir ein dementsprechendes Tool (QPN-Tool), welches am Lehrstuhl Informatik IV der Universität Dortmund entwickelt wurde, beschreiben und einen Einblick in die kombinierte qualitative und quantitative Analyse von QPNs geben.

3 QPN-Tool

Die Modellierung realer Systeme erfordert eine angemessene Unterstützung durch ein Spezifikations- und Analyse-Tool. Mit QPN-Tool [5] liegt eine prototypische Implementierung für ein solches Tool vor. QPN-Tool ist in C implementiert und lauffähig auf Sun3- und Sun4-Rechnern unter SunView und OpenWindows. QPN-Tool verfügt über eine graphische Benutzerschnittstelle und bietet verschiedene Algorithmen zur qualitativen und quantitativen Analyse von QPNs an. Abb. 4 zeigt den modularen Aufbau des Tools. Auf die Aufgaben einzelner Module soll im folgenden eingegangen werden.

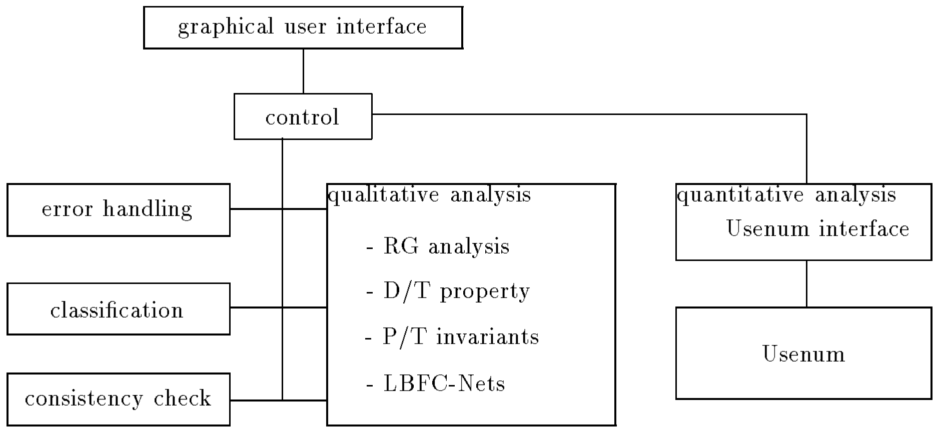

Abb. 4. Modularer Aufbau von QPN-Tool

3.1 Graphische Benutzerschnittstelle

Über die graphische Benutzerschnittstelle wird die Kommunikation mit dem Anwender vollständig abgewickelt. Diese umfaßt:

- Spezifikation eines QPN,
- Spezifikation der Analyseaufgaben, Auswahl von Analysealgorithmen und der zu berechnenden Leistungsmaße,
- Präsentation der Ergebnisse aus der Klassifikation des QPN, der qualitativen und quantitativen Analyse,
- Aufbereitung von Detailinformation für den Fall unerwünschter Netzeigenschaften, z.B. Darstellung der Feuerungsfolge mit der ein Deadlock erreicht werden kann.

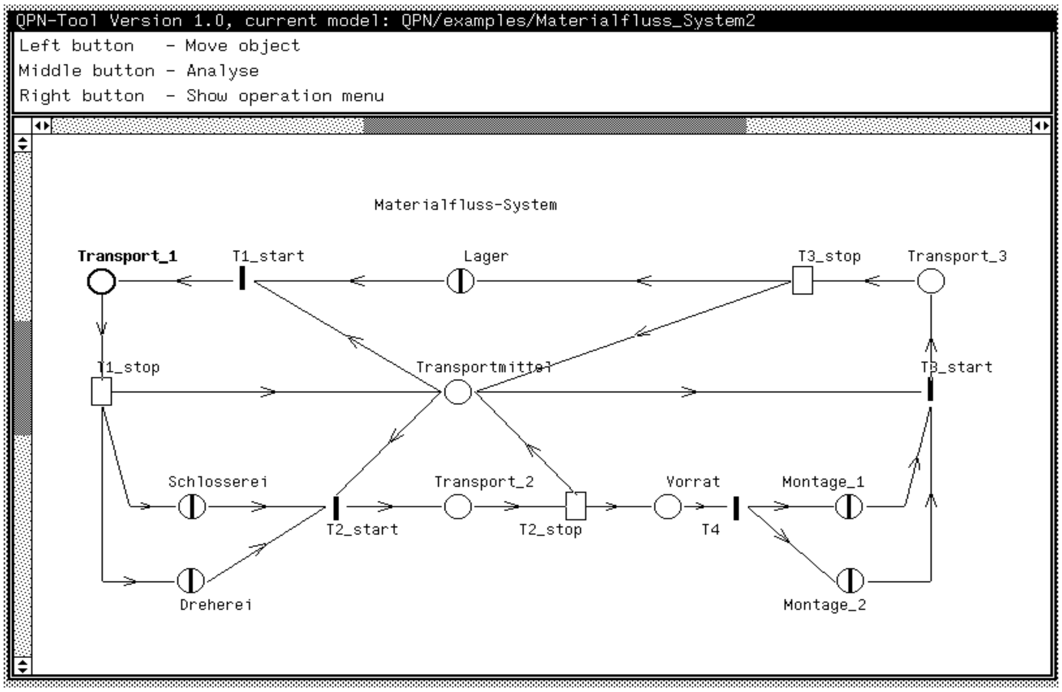

Abb. 5. Materialfluss-System

Abb. 5 zeigt das QPN-Modell zu Beispiel 1 in der Darstellung im QPN-Tool. Zusätzliche Informationen werden über Attribute der Plätze und Transitionen angegeben. Abb. 6 zeigt Attribute des zeitbehafteten Platzes "Schlosserei". Neben dem Namen des Platzes und den Namen

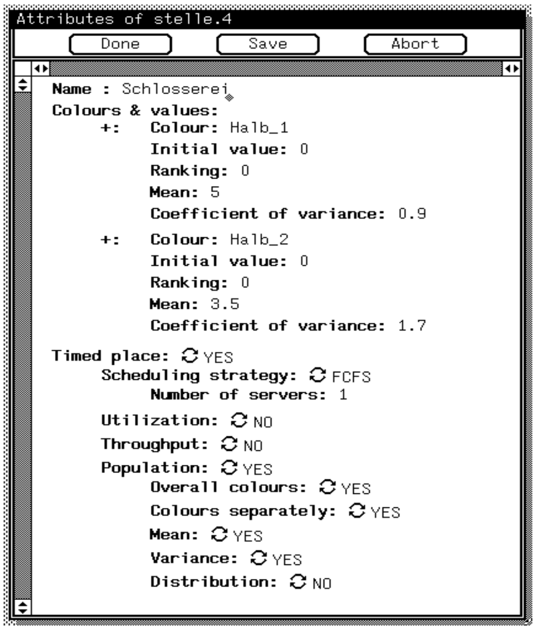

Abb. 6. Attribute des Platzes "Schlosserei"

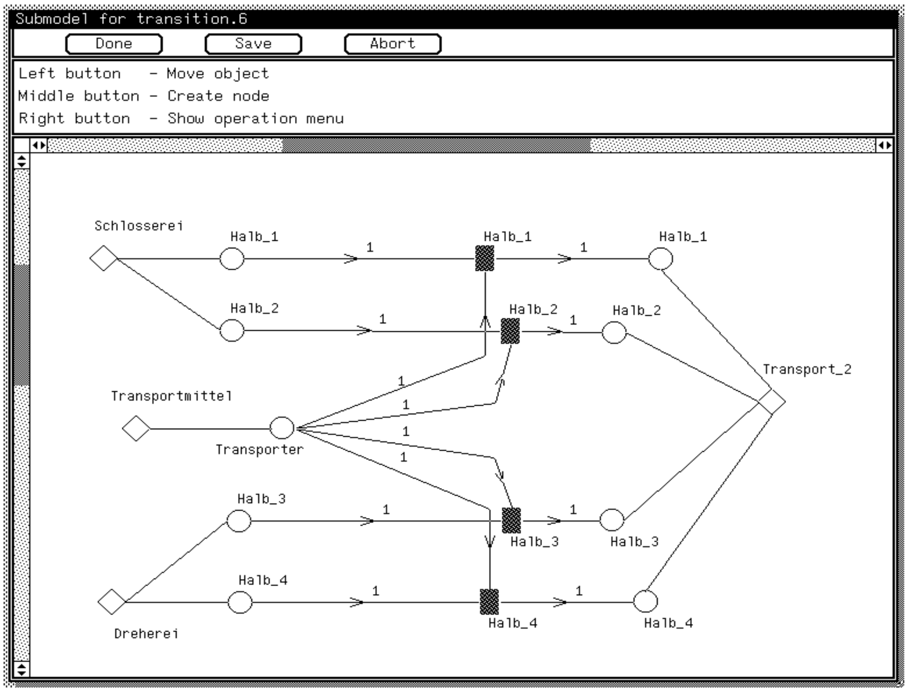

Abb. 7. Lokal entfaltete Transition "T2-start"

der einzelnen Farben wird die Anfangsmarkierung der einzelnen Farben festgelegt. Für die Farben wird ein sog. "Ranking" angegeben, nach dem die Ankunftsreihenfolge im Falle gleichzeitiger Ankünfte bestimmt wird. Mittelwert und Variationskoeffizient spezifizieren die Bedienzeitverteilung. Intern wird eine Cox-Phasenverteilung bestimmt, die eine Bedienzeitverteilung mit diesen Parametern approximiert. Bei zeitbehafteten Plätzen ("Timed place = Yes") steht eine Auswahl an Scheduling-Strategien (FCFS, LCFS, PS, IS)[1] zur Verfügung und es kann die Anzahl der Bedieneinheiten spezifiziert werden. An zeitlosen Plätzen kann als zu berechnendes Leistungsmaß die Population, an zeitbehafteten Plätzen darüberhinaus auch Durchsatz und Auslastung angegeben werden.

Die Beschreibung einer Transition erfolgt nur zum Teil über Attribute. Analog zur Platzspezifikation werden durch Attribute der Name der Transition und die Namen der Farben festgelegt. Bei zeitbehafteten Transitionen wird der Mittelwert der exponentiell-verteilten Feuerungszeit, bei zeitlosen Transitionen eine Feuerungshäufigkeit relativ zu anderen aktivierten Transitionen angegeben. Feuerungszeiten, bzw. -häufigkeiten werden für die Abbildung auf einen Markov-Prozeß in der quantitativen Analyse verwendet. Bedingungen für die Aktivierung und die Feuerung einer Transition bzgl. einer Farbe wird innerhalb eines lokal entfalteten Netzes spezifiziert. Abb. 7 zeigt das lokal entfaltete Netz für die Transition "T2-start" des Beispielnetzes aus Abb. 5. Rauten symbolisieren Plätze des farbigen Netzes, während Kreise die Farben der Plätze und Rechtecke die Farben der Transition repräsentieren. Diese Objekte können zusammen mit den Verbindungslinien zwischen Kreisen und Rauten automatisch erzeugt werden, so daß der Anwender lediglich die Pfeilverbindungen zwischen den Platzfarben und den Transitionsfarben erzeugen und mit einem numerischen Wert (default: 1) versehen muß. Die lokale Entfaltung des Netzes bietet einige Vorteile:

[1] FCFS = First-Come-First-Served, LCFS = Last-Come-First-Served, PS = Processor sharing, IS= Infinite Server

1. Sie ermöglicht eine detaillierte Sicht auf die aktiven Komponenten des Netzes.
2. Die Beschreibungsweise innerhalb des Gesamtnetzes und des lokal entfalteten Netzes ist homogen.
3. Die Handhabung ist wegen der automatischen Generierung von Netzteilen für die lokale Entfaltung komfortabel.
4. Inkonsistente Spezifikationen werden vermieden, da automatisch alle Farben der Plätze und Transitionen angezeigt werden, welche in der Beschreibung der Inzidenzfunktionen berücksichtigt werden müssen. Default-Positionen für Eingangsplätze befinden sich auf der linken Seite. Transitionsfarben werden mittig positioniert, Ausgabeplätze rechtsseitig. Dies entspricht der üblichen Leserichtung.
5. Bei identischen Transitionen kann das lokal entfaltete Netz kopiert werden oder mehrere Transitionen können sich eine Beschreibung teilen.

Die im QPN-Tool angebotene Form der Spezifikation farbiger Petrinetze durch lokale Entfaltung ist eine Darstellungsform, die eine komfortable Beschreibung mit einer übersichtlichen Darstellung verbindet.

3.2 Analyseverfahren

Mögliche Ziele einer Analyse können in qualitativen Aussagen bestehen, z.B. Deadlockfreiheit, Lebendigkeit, Beschränktheit, oder in der Bestimmung von Leistungskenngrößen liegen. Innerhalb QPN-Tool werden erstere mittels bekannter Verfahren aus der Petri-Netz-Theorie als sog. qualitative Analyse untersucht. Leistungskenngrößen des Modells werden dagegen durch Abbildung auf einen Markov-Prozeß, sog. quantitative Analyse, ermittelt. Auf diese Analysetechniken soll im folgenden eingegangen werden.

3.2.1 Qualitative Analyse Abb. 8 zeigt die Auswahl der Analysealgorithmen im QPN-Tool. Neben "klassischen" Algorithmen wie etwa der Erreichbarkeitsanalyse und der Berechnung der S- und T-Invarianten werden auch neuere Algorithmen für spezielle Netztypen

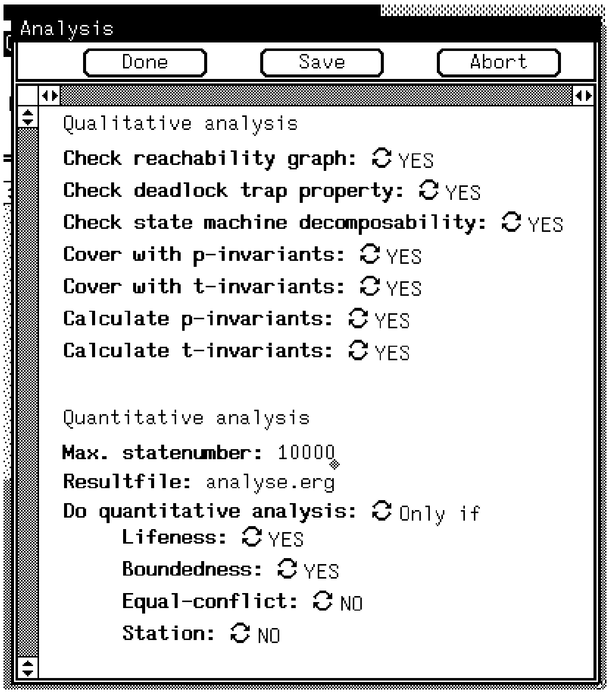

Abb. 8. Auswahlfenster mit Analysealgorithmen

angeboten. Ziele der Analyse sind Beschränktheit und Lebendigkeit des vorliegenden QPN zu zeigen. Gelingt dies nicht, werden aus den Berechnungen innerhalb der Algorithmen diejenigen Informationen extrahiert, an denen die Unbeschränktheit oder Nicht-Lebendigkeit des QPN deutlich wird. Alle Verfahren entstammen der Petri-Netz-Theorie, d.h. das QPN wird unter Vernachlässigung von Feuerungshäufigkeiten, -zeiten und zeitbehafteten Plätzen als "zeitloses" CPN interpretiert. Die auf Basis des "zeitlosen" CPN gewonnenen Aussagen lassen sich unter gewissen Bedingungen auf das "zeitbehaftete" QPN übertragen, vgl. [4]. Zu den Algorithmen im einzelnen:

Erreichbarkeitsanalyse Der Erreichbarkeits-/Überdeckungsgraph wird berechnet. Innerhalb dieser Berechnung werden Feuerungsfolgen, die zu unbeschränkten Markierungen führen, entdeckt. Ferner wird der Erreichbarkeitsgraph auf starken Zusammenhang geprüft. Falls das Netz unbeschränkt ist, wird eine Feuerungsfolge ausgegeben, die zu einer Markierung führt, an der dies erkennbar wird. Gleiches gilt für die Erkennung partieller und totaler Deadlocks.

Berechnung von S- oder T-Invarianten Es wird ein Erzeugendensystem positiver S- oder T-Invarianten nach dem Verfahren in [13] berechnet und in einem Fenster ausgegeben.

Überdeckung mit S- oder T-Invarianten Die Überdeckbarkeit des Netzes mit S- oder T-Invarianten wird geprüft, indem ein Erzeugendensystem aus positiven S- oder T-Invarianten berechnet und aggregiert wird. Falls das Netz nicht überdeckbar ist, werden diejenigen Plätze, bzw. Transitionen ausgegeben, die nicht überdeckt werden.

Prüfung der Deadlock/Trap-Bedingung Für die Klasse der Simple-Netze erlaubt die Deadlock/Trap-Bedingung die Lebendigkeit eines Netzes unabhängig von der Beschränktheit festzustellen. Das Verfahren nach [12] bestimmt die Menge der minimalen Deadlocks und prüft, ob diese einen markierten Trap enthalten.

Prüfung der State-Machine-Decomposibility (LBFC-Test) Dieses Verfahren nach [11] erlaubt die Erkennung von lebendigen und beschränkten Free-Choice Netzen (LBFC-Netzen) bereits anhand der Netzstruktur. Dieses Spezialverfahren für Free-Choice Netze weist im Vergleich zu den obigen Verfahren eine besonders geringe Laufzeit auf.

Die Auswahl der Verfahren erlaubt es, die jeweiligen Vorteile einzelner Verfahren im speziellen Anwendungsfall zu nutzen.

3.2.2 Quantitative Analyse Ziel der quantitativen Analyse ist es, Leistungskenngrößen aus der Dynamik des QPN abzuleiten. Im QPN-Tool erfolgt dies durch Abbildung auf einen Markov-Prozeß, Bestimmung der stationären Zustandsverteilung und Aggregierung der Zustands- und Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten zu Kenngrößen der gewünschten Leistungsmaße. Typische Leistungsmaße an zeitbehafteten Plätzen sind Durchsatz, Auslastung und Population. Abb. 9 zeigt Kenngrößen für den zeitbehafteten Platz “Schlosserei” des Beispielnetzes aus Abb. 5. An "zeitlosen" Plätzen kann die Population als Kenngröße bestimmt werden. Die Auswahl der Plätze, für die Leistungsmaße ermittelt werden sollen, erfolgt durch Setzen entsprechender Attribute, z.B. in Abb. 6 für den Platz "Schlosserei" des Beispielnetzes. Innerhalb der quantitativen Analyse werden die Informationen über Feuerungshäufigkeiten, -zeiten und über zeitbehaftete Plätze verwendet. Ferner werden aus der qualitativen Analyse Schätzwerte für die maximale Warteschlangenlänge an zeitbehafteten Plätzen mit FCFS oder LCFS-Scheduling Disziplin abgeleitet.

```
Results of quantitative analysis
Measure POPULATION_Schlosserei
mean                          4.83997e-01
variance                      6.19264e-01
standard deviation            7.86933e-01
coefficient of variation      1.62591e+00

Measure POPULATION_Schlosserei_COLOUR_Halb_1
mean                          2.59978e-01
variance                      3.69392e-01
standard deviation            6.07777e-01
coefficient of variation      2.33780e+00

Measure POPULATION_Schlosserei_COLOUR_Halb_2
mean                          2.24018e-01
variance                      2.26434e-01
standard deviation            4.75850e-01
coefficient of variation      2.12416e+00
```

Abb. 9. Leistungskenngrößen für den Platz "Schlosserei"

Realisiert wird die quantitative Analyse im QPN-Tool mittels Usenum, einem Tool zur Bestimmung der stationären Zustandsverteilung endlicher Markov-Ketten, z.B. [6]. Dazu wird das QPN in ein Usenum-Modell transformiert. Usenum selbst arbeitet im Hintergrund, so daß bei ausreichenden Hardware-Ressourcen die weitere Bearbeitung eines QPN, etwa für Versuchsreihen, unabhängig von laufenden quantitativen Analyseläufen erfolgen kann.

Für die Leistungsfähigkeit der quantitativen Analyse bildet die häufig zu beobachtende Zustandsraumexplosion von Modellen eine bekannte Hürde.

3.3 Konsistenzprüfung

Das Modul zur Konsistenzprüfung dient der Erkennung von Spezifikationsfehlern. Dies sind typischerweise inkonsistente Bezeichner für Plätze, Transitionen oder deren Farben auf der Ebene des lokal entfalteten Netzes und der Attribute von Plätzen und Transitionen im Gesamtnetz. Die automatische Generierung von Netzteilen bei der lokalen Entfaltung verringert das Auftreten dieser Fehler.

Ein weiteres Kriterium für ein konsistentes Modell bildet der Zusammenhang des Netzes. Obwohl das QPN als solches zusammenhängend erscheint, kann es doch sein, daß Farben an einem Platz oder Transition als Quelle oder Senke auftreten. Dies hat unmittelbare Konsequenzen auf die Lebendigkeit, bzw. Beschränktheit des QPN und wird daher dem Anwender deutlich gemacht.

3.4 Klassifikation

Die Klassifikation betrachtet das eingebettete CPN. Dieses Netz wird zu einem einfarbigen Stellen/Transitions-Netz entfaltet und auf die Zugehörigkeit zu einer der Netzklassen: Marked-Graph, State-Machine, Free-Choice, Extended-Free-Choice, Simple und Extended-Simple geprüft. Diese Klassifizierung unterstützt die Auswahl geeigneter Verfahren zur qualitativen Analyse, da diese für bestimmte Netzklassen Spezialverfahren bereithält.

4 Fazit

Durch die einfache Darstellung von sowohl Konkurrenz- und Nebenläufigkeitsaspekten als auch Wartesituationen eignen sich QPNs gerade zur Modellierung moderner Automatisierungssysteme.

Die einfache Beschreibung von Wartesituationen erleichtert dem Benutzer, im Gegensatz zu bisherigen zeitbehafteten Petri-Netz Modellwelten, die Modellierung seines Systems. Zeitbehaftete Plätze können hierbei als eine einfach zu parametrisierende Klasse von Subnetzen innerhalb eines hierarchisch spezifizierten Modells gesehen werden.

Mit QPN-Tool liegt eine komfortable Toolunterstützung in prototypischer Form vor. Insbesondere die graphische Eingabe mittels lokaler Entfaltung von Transitionen bietet auch dem ungeübten Benutzer die Möglichkeit, sich schnell einzuarbeiten und so mit den Feinheiten der QPN-Modellwelt vertraut zu werden. Die Vielzahl von zur Verfügung stehenden Analysealgorithmen erlauben eine effiziente qualitative und quantitative Analyse von QPN-Modellen. Eine hierarchische Modellierung mittels QPNs ist derzeit noch nicht möglich, aber als zukünftige Erweiterung geplant.

Literaturliste

1. M. Ajmone-Marsan, G. Balbo, G. Conte. *Performance models of multiprocessor systems.* MIT Press, London, 1986.
2. F. Bause. *Funktional und quantitativ analysierbare Rechensystemmodelle; über Verbindungen von Petrinetz- und Warteschlangen-Modellwelten.* Diplomarbeit, Fachbereich Informatik der Universität Dortmund, 1986.
3. F. Bause, H. Beilner. *Eine Modellwelt zur Integration von Warteschlangen- und Petri-Netz-Modellen.* Proceedings of the 5. GI/ITG-Fachtagung "Messung, Modellierung und Bewertung von Rechensystemen und Netzen", Braunschweig, 1989, pp. 190-204.
4. F. Bause, H. Beilner: *Analysis of a Combined Queueing-Petri-Network World.* Informatik Fachberichte 383 der Universität Dortmund, 1991.
5. F. Bause, P. Kemper. *QPN-Tool USERS's GUIDE.* LS Informatik 4, Universität Dortmund, 1991.
6. P. Buchholz. *Die strukturierte Analyse Markovscher Modelle.*

Informatik-Fachberichte 286, 1991.

7. Fachtagung *Effizientes Engineering komplexer Automatisierungssysteme – Methoden, Anwendungen und Tools auf der Basis von Petri-Netzen.* Braunschweig, April 1991.
8. Fachtagung *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme – Methoden, Anwendungen und Tools auf der Basis von Petri-Netzen.* Braunschweig, Mai 1992.
9. K. Jensen. *Coloured Petri Nets.* in *Petri Nets. Central Models and Their Properties. Advances in Petri Nets.* Proceedings of an Advanced Course, Bad Honnef, Sept. 1986, Part I, G. Rozenberg (ed.), Lecture Notes in Computer Science 254, pp. 248-299.
10. P. Kemper. *Untersuchung einer kombinierten Warteschlangen-Petrinetz-Modellwelt.* Diplomarbeit, Fachbereich Informatik der Universität Dortmund, 1991.
11. P. Kemper, F. Bause. *An Efficient Polynomial-Time Algorithm to Decide Liveness and Boundedness of Free-Choice Nets.* 13th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Sheffield, 1992.
12. K. Lautenbach. *Linear Algebraic Calculation of Deadlocks and Traps* in K.Voss, H.J.Genrich, G.Rozenberg „Concurrency and Nets, Advances in Petri Nets" Springer, Berlin 1987
13. J. Martinez, M. Silva. *A simple and fast Algorithm to obtain all Invariants of a generalized Petri Net.* in C.Girault, W.Reisig „Application and Theory of Petri Nets" Informatik-Fachberichte 52, 1982
14. T.G. Robertazzi. *Computer Networks and Systems: Queueing Theory and Performance Evaluation.* Springer-Verlag, 1990.