# Modellierungstechniken für Fertigungssysteme auf der Grundlage von Petri-Netzen

# Vergleich der Verfahren

Gemeinsamer Bericht der Arbeitsgruppe
„Fuzzy-Petri-Netze“ im Schwerpunktprogramm
Modellierung der Produktion

Berlin, Juli 1997


| Teilnehmer der Arbeitsgruppe | Vorhaben | Professor |
|---|---|---|
| Dr. Khaled Ben Achour, TU Ilmenau | Fe 373/2-4 | Fengler |
| Silvio Bachmann, FH Schmalkalden | Li 532/2-3 | Lipp |
| Markus Hummel, ISW Uni Stuttgart | Pr 239/38-3 | Pritschow |
| Karsten Sonnenschein, WZL RWTH Aachen | We 550/139-3 | Weck |
| Armin Zimmermann, Jörn Freiheit, TU Berlin | Ho 1257/4-4 | Hommel |

# Inhaltsverzeichnis

# 1 Einleitung

Der vorliegende Bericht entstand in der Arbeitsgruppe „Fuzzy-Petri-Netze“ innerhalb des Schwerpunktprogramms Modellierung der Produktion der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Diese Arbeitsgruppe wurde 1994 auf Anraten der Gutachter gebildet, um Synergien zu nutzen und Abgrenzungen zu verdeutlichen. Bindeglied zwischen den teilnehmenden Projektgruppen ist die jeweils eingesetzte Modellierungsmethode, die alle auf Petri-Netzen basieren.
In den Gutachten zum Verlängerungsantrag für das Jahr 1996 wurde der Projektgruppe von Prof. Hommel empfohlen, den in seinem Vortrag auf der Sitzung der Gutachtergruppe gemachten Vorschlag für ein Anwendungsbeispiel in die Tat umzusetzen. Anhand eines selbst gewählten Beispiels sollten dann die in der Arbeitsgruppe „Fuzzy-Petri-Netze“ verwendeten Modellierungstechniken miteinander verglichen werden.
Daraufhin wurde durch die Berliner Projektgruppe Kontakt zu einer Firma aufgenommen, die Fertigungssysteme produziert und darum ein besonderes Interesse an einer methodischen Unterstützung des Fertigungssystementwurfs hat. Im Verlauf der Zusammenarbeit wurde eine durch den Praxispartner realisierte Fertigungsanlage modelliert und untersucht.
Anschließend wurde durch die Gruppe von Prof. Hommel ein Treffen der Arbeitsgruppe „Fuzzy-Petri-Netze“ in Berlin organisiert. Ziel dieses Treffens war die Einigung auf ein gemeinsames Beispiel. Leider stellte es sich beim Treffen der Arbeitsgruppe heraus, daß die Teilnehmer sich nicht auf das Praxisbeispiel einigen konnten. Da bei den Anwendungsbeispielen der anderen Teilnehmer Vorbehalte der Praxispartner in bezug auf die Offenlegung des Modells zu beachten waren, wurde beschlossen, doch ein — möglichst anwendungsnahes — Beispiel ohne realen Hintergrund zu entwerfen. Damit wurde auf dem Treffen begonnen; Herr Sonnenschein erklärte sich für die Projektgruppe von Prof. Weck bereit, es genauer zu spezifizieren.

Nachdem das Beispiel beschrieben und den Teilnehmern der Arbeitsgruppe zugesendet worden war, fand das dritte Treffen der Arbeitsgruppe „Fuzzy-Petri-Netze“ im Juni 1997 auf Einladung der Gruppe von Prof. Weck in Aachen statt. Hauptthema des Treffens war neben der gegenseitigen Information über die Fortschritte in den Projekten die Vorbereitung des vorliegenden Berichts.
Zunächst wurde das gemeinsame Anwendungsbeispiel genauer besprochen. Das gewählte Fertigungssystem ist am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen aufgebaut und wurde während des Treffens zur Klärung von Detailfragen besichtigt.
Danach wurde durch die Teilnehmer dargestellt, wie das Beispiel mit den in den Projekten entwickelten Modellierungstechniken abgebildet werden kann. Außerdem wurden Kriterien aufgestellt, anhand deren die Methoden miteinander verglichen und voneinander abgegrenzt werden können. Die entsprechenden Erläuterungen der Teilnehmer zu diesen Punkten bilden

die Grundlage für den in Kapitel 6 dargestellten Vergleich. Außerdem wurden die Aufgaben zur Fertigstellung des vorliegenden Berichts verteilt sowie die Gliederung festgelegt. Da die Projekte der ehemaligen Mitglieder der Arbeitsgruppe von Prof. Lipp und Prof. Pritschow zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen waren, konnte kein Vertreter dieser Projektgruppen am Treffen teilnehmen. Anhand des Informationsaustausches in der Folgezeit konnte die in beiden Projekten verwendete Modellierungstechnik jedoch trotzdem in den Vergleich mit einbezogen werden.

Ziel dieses Berichtes ist es, die in der Arbeitsgruppe eingesetzten Methoden anhand eines Beispiels systematisch miteinander zu vergleichen. Dadurch soll das gegenseitige Verständnis der Modellierungstechniken verbessert werden. Der Bericht soll außerdem die thematische Abgrenzung der Projekte durch die Darstellung ihrer Unterschiede und Besonderheiten verdeutlichen. Er ist insofern auch als Ergänzung der Berichte bzw. Fortsetzungsanträge der teilnehmenden Antragsteller zu betrachten.

Der weitere Inhalt ist wie folgt gegliedert: Das zweite Kapitel beschreibt das gemeinsame Beispiel, und ist dem von Herrn Sonnenschein verfaßten Arbeitspapier zur Beschreibung des integrierten Fertigungs- und Montagesystems am WZL Aachen entnommen.
Im Anschluß daran wird in jeweils einem Kapitel geschildert, wie das Beispiel mit den in den Projekten entwickelten Modellierungsmethoden abgebildet und untersucht werden kann. Dabei lag das Ziel vorrangig in der Verdeutlichung der Funktionsweise und der Besonderheiten der Methoden. Eine detailliertere Beschreibung würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen und kann den in den Projekten verfaßten Berichten und Veröffentlichungen entnommen werden. Diese Kapitel wurden durch die in den Projekten tätigen Mitarbeiter Dr. Achour, Herrn Sonnenschein, Herrn Zimmermann und Herrn Freiheit verfaßt.
Im folgenden sechsten Kapitel werden die Modellierungsmethoden anhand der gewählten Kriterien miteinander verglichen, bevor der Bericht mit einer Zusammenfassung schließt. Für diesen Teil sowie die Zusammenstellung des Berichts war die Projektgruppe von Prof. Hommel verantwortlich.

# 2 Beschreibung des gemeinsamen Beispiels

Das im folgenden beschriebene Szenario eines Integrierten Fertigungs- und Montagesystems (IFMS) basiert auf einer Testumgebung, die am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen als reales Fertigungssystem installiert ist. Die in Kapitel 1.1 vorgestellte Beschreibung ist teilweise aus [WEC95] entnommen. Die Beschreibung der Namenskonventionen in Kapitel 1.2 stellt einen Ausschnitt aus dem 2. Zwischenbericht des Vorhabens We 550/139-2 dar [SON96].

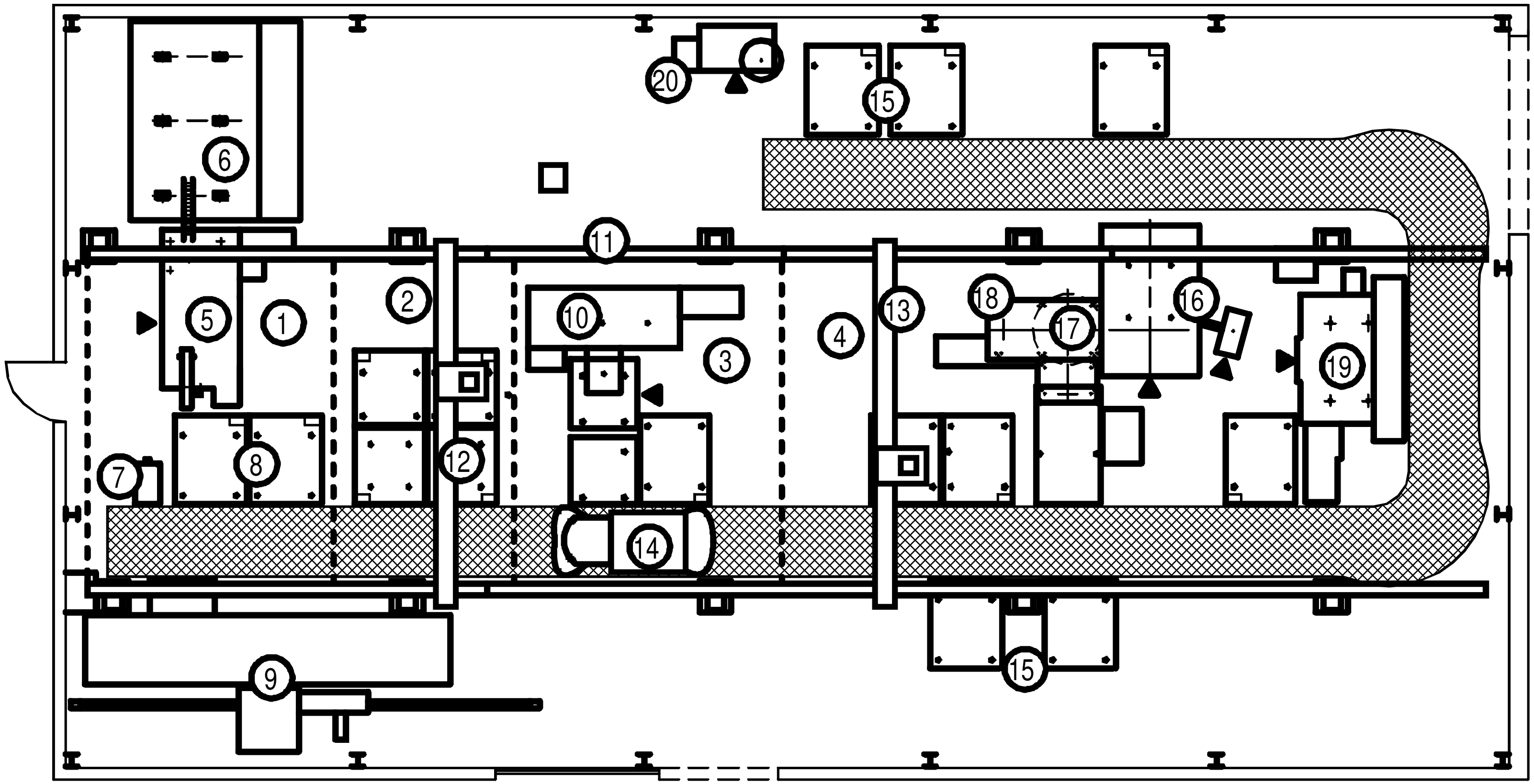
Zur Erprobung und Demonstration der am WZL entwickelten mechanischen und informationstechnischen Systeme wurde bereits 1984 ein integriertes Fertigungs- und Montagesystem (IFMS) am WZL installiert. Das IFMS dient einzig und alleine zu Forschungszwecken und ist nicht als produktive Beispielanlage anzusehen, die in dieser Form in einem Unternehmen einsetzbar wäre. Das IFMS ist in acht nachfolgend näher erläuterte Funktionsbereiche aufgeteilt, die jeweils eine spezifische Aufgabe erfüllen und von einem eigenen Zellenrechner verwaltet und gesteuert werden (Abbildung 2.1). Ein sechsachsiger Portalroboter mit zwei unabhängig voneinander gesteuerten Querbalken mit Laufkatzen wird zellenübergreifend zum Be- und Entladen von Maschinen, Kommissionieren von Rohteilen und für Montageaufgaben eingesetzt.

Aufgabe der *Sägezelle* ist die Lagerung und Bereitstellung von Stangenmaterial und Rohteilen, die nach dem Absägen vom Portalroboter auf einer Palette kommissioniert werden. Am Sägezentrum befinden sich 2 Pufferplätze für Transportpaletten.

Ein fahrerloses *Transportsystem* (FTS) führt den Transport von Transportpaletten zwischen den einzelnen Zellen durch. Das FTS ist mit einem Rollenförderer zur Aufnahme von unterschiedlich aufgebauten Paletten im Europa-Format (120 cm x 80 cm) ausgestattet und befördert Paletten zu Übergabeeinheiten an den jeweiligen Zellen bzw. nimmt von dort Paletten mit bearbeiteten Werkstücken auf. Auf den Transportpaletten können entweder Leisten montiert sein, um Werkstücke zu transportieren, die dann zur Bearbeitung einzeln abgenommen werden, oder Maschinenplatten bzw. Spannvorrichtungen montiert sein, die komplett zur Fräsbearbeitung in die Bearbeitungsposition gefahren werden (z. B. Getriebegehäuse).

Die *Montagezelle* besteht aus vier Palettenstellplätzen. Dort montiert ein Portalroboter sowohl Spannelemente auf Maschinenpaletten als auch Werkstückträger auf Transportrahmen. Ein universelles Greifer- und Fingerwechselsystem ermöglicht dem Portalroboter, die unterschiedlichen Montageaufgaben selbständig durchzuführen.

In der *Drehzelle* werden alle Drehoperationen an Werkstücken durchgeführt. Mit Hilfe eines Doppelgreifers kann der Portalroboter fertig bearbeitete Werkstücke entnehmen und gleichzeitig ein neues Rohteil einlegen. Die Drehzelle hat einen Pufferplatz für Transportpaletten.




1 Sägezelle
2 Montagezelle
3 Meßzelle
4 Fertigungszelle
5 NC-Säge
6 autom. Stangenlager
7 Entgratstation
8 Palettenstellplatz
9 Hochregallager
10 Meßmaschine
11 Portalroboteranlage
12 Brücke A
13 Brücke B
14 fahrerloses Transportsystem
15 Handarbeitesplätze
16 Bearbeitungszentrum
17 Palettenwechsler
18 Parkplatz f. M.-Paletten
19 Drehmaschine
20 Werkzeugvoreinstelllung

Abbildung 2.1: Integriertes Fertigungs- und Montagesystem (IFMS)

Kern der *Fräszelle* ist ein Bearbeitungszentrum, das auf zwei verschiedene Arten mit Werkstücken versorgt wird. Während bereits auf Maschinenpaletten aufgespannte Werkstücke direkt vom Bereitstellplatz in die Maschine transportiert werden, müssen die auf Transportpaletten angelieferten Teile vom Roboter in Spannvorrichtungen eingelegt bzw. von diesen entnommen werden. Dieser Vorgang vollzieht sich hauptzeitparallel, so daß eine kontinuierliche Bearbeitung sichergestellt ist. Die Fräszelle hat zwei Pufferplätze sowie einen Übergabeplatz.
Die fertig bearbeiteten Werkstücke können in der *Meßzelle* stichprobenartig geprüft werden. Die dort eingesetzte NC-gesteuerte Meßmaschine arbeitet die vorgegebenen Prüfprogramme vollautomatisch ab und liefert auch in der rauhen Fertigungsumgebung hochgenaue Meßergebnisse. Maßabweichungen führen zu Korrekturen bei den entsprechenden Bearbeitungsoperationen in der Dreh- und Fräszelle. Die Meßzelle hat einen Pufferplatz sowie einen Übergabeplatz.
Ein *Hochregallager* mit Regalbediengerät lagert neben Paletten auch Werkstücke und Vorrichtungselemente und dient gleichzeitig als Fertigungspuffer für Werkstücke, die nicht sofort zur nächsten Bearbeitungsstation transportiert werden können. Die Aufnahmekapazität beträgt 12.
Am *Handarbeitsplatz* des IFMS werden Werkstücke und Paletten ein- und ausgeschleust und manuelle Spannoperationen durchgeführt. Es stehen zwei Pufferplätze zur Verfügung.
Das Rohteilspektrum der prismatischen und runden Werkstücke zur NC-Bearbeitung ist durch seine variablen Abmessungen sowie die unterschiedlichen Werkstoffe gekennzeichnet. Die möglichen Abmessungen liegen in einem Kubus oder Zylinder mit einem Kantenlängen- bzw. einem Durchmesserbereich zwischen 50 mm und 300 mm. Es können sowohl Stahl- als auch Aluminiumrohteile bearbeitet werden. Hierbei sind als Beispielprodukte „Schachfiguren“, „Stövchen“ und „Flöten“ definiert worden. Darüber hinaus kann eine Serienproduktfamilie gefertigt werden. Es handelt sich dabei um Varianten von Getrieben, bestehend aus Getriebegehäuse, -deckel und -wellen.

## 2.1 Namenskonventionen

Im folgenden werden kurz die verwendeten Begriffe zur Modellbildung erläutert, um eine einheitliche Begriffsverwendung zu ermöglichen.

### 2.1.1 Arbeitspläne

Jedem Werkstücktyp ist losgrößenabhängig ein Arbeitsplan zugewiesen, der exakt beschreibt, in welchen Arbeitsgängen an welchen Arbeitsplatzgruppen mit welchen Fertigungshilfsmitteln ein Werkstück zu fertigen ist. Neben der Beschreibung der einzelnen Arbeitsgänge (Bearbeitungsdauer pro Werkstück, reihenfolgeunabhängige Rüstzeit, feste Liegezeiten vor und nach der Bearbeitung usw.) ist hier auch die Reihenfolge festgelegt, in der diese Arbeitsgänge im System abgearbeitet werden müssen. Zudem weist der Arbeitsplan jedem Arbeitsgang eine Arbeitsplatzgruppe zu, an der er bearbeitet werden muß. Die endgültige Auswahl des physikalischen Arbeitsplatzes ist Aufgabe der Simulation.

### 2.1.2 Fertigungsaufträge

Zur Simulation und Optimierung des Anlagenlayouts ist in der Regel keine Definition von Aufträgen erforderlich. Die Auswahl von Fertigungsaufträgen ist ausschließlich zur Reihenfolgeoptimierung und -simulation während der Betriebs der Anlage nötig.
In einem Fertigungsauftrag werden unter einer eindeutigen Auftragsidentnummer eine bestimmte Anzahl von Werkstücken eines Typs bzw. einer Variante zusammengefaßt. Die Aufträge werden in der Regel von der Planungsebene (z. B. PPS-System) erzeugt oder am Leitsystem direkt eingegeben. Neben der Teilesollmenge des Auftrags und dem frühestmöglichen Starttermin enthält der Datentyp „Auftrag“ den spätesten Fertigstellungstermin und eine externe Priorität, welche die Dringlichkeit eines Auftrags gegenüber anderen repräsentiert (z. B. Eil- oder Chefauftrag).

### 2.1.3 Arbeitsplätze und -platzgruppen

Ein Arbeitsplatz ist ein Teilsystem innerhalb eines Fertigungssystems, an dem ein Arbeitsgang eines Auftrags durchgeführt werden kann. Beispiele für Arbeitsplätze sind Einzelmaschinen, Handarbeitsplätze aber auch flexible Fertigungszellen und Transferstraßen. Für die Modellbildung ist von Bedeutung, daß ein Palettenauftrag als Bestandteil eines Arbeitsgangs an einem Arbeitsplatz während seiner Bearbeitung nicht unterbrochen werden darf, um beispielsweise einen anderen Palettenauftrag dazwischen zu schieben. Ein Arbeitsplatz ist im Rahmen der Modellierung die Hauptressource für einen Arbeitsgang, dessen Stillstandszeiten möglichst minimiert werden sollen. Andere Ressourcen wie Werkzeuge (s. u.) werden nur sekundär, hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit betrachtet, d. h. deren Auslastung wird bei der Optimierung nicht verbessert.
Mehrere identische Arbeitsplätze werden zu einer Arbeitsplatzgruppe (Arbeitsplatztyp) zusammengefaßt. Ein Arbeitsgang eines Werkstücktyps ist im Arbeitsplan einer Arbeitsplatzgruppe zugeordnet, so daß erst im Rahmen der Online-Feinplanung bzw. Optimierung entschieden wird auf welchem physikalischen Arbeitsplatz der Arbeitsgang gefertigt werden soll. Hierbei kann - wie bereits erwähnt - ein Splitting der einzelnen Palettenaufträge auf unterschiedliche Arbeitsplätze stattfinden. Die einzelnen Arbeitsplätze einer Gruppe unterscheiden sich nur hinsichtlich ihres aktuellen Rüstzustandes.

### 2.1.4 Sonderfertigungshilfsmittel

Sonderfertigungshilfsmittel stellen eine weitere wichtige Randbedingung bei der Modellierung von Produktionsabläufen dar. Neben Arbeitsplätzen und Personal sind diese häufig auch nur in begrenzter Anzahl vorhanden und können somit als Engpaßressource den Produktionsablauf maßgeblich beeinflussen. Bei den Fertigungshilfsmitteln (FHM) ist zwischen Standardfertigungshilfsmitteln (Standard-FHM) und Sonderfertigungshilfsmitteln (Sonder-FHM) zu unterscheiden. Standard-FHM wie einfache Bohr-, Fräs- und Drehwerkzeuge, Universalpaletten (Standardpaletten) usw. sind im Fertigungssystem ausreichend vorhanden und müssen von der Simulation nicht als Engpaßressource berücksichtigt werden. Sonder-FHM werden für spezielle Anwendungsfälle benötigt oder liegen aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten nur in begrenzter Anzahl vor und stellen daher neben den Arbeitsplätzen Engpaßressourcen dar. Da bei der Fertigung einer Auftragseinheit nicht davon ausgegangen werden kann, daß sämtliche vom Arbeitsgang benötigten Hilfsmittel an einem Arbeitsplatz vorhanden sind, müssen diese simultan berücksichtigt und für den Zeitraum der Arbeitsgangdauer an dem Arbeitsplatz reserviert werden. Eine entsprechende Einplanung und Reservierung muß für Paletten über mehrere Arbeitsgänge erfolgen.

## 2.2 Szenariobeschreibung

### 2.2.1 Arbeitsplätze bzw. -stationen

Als Arbeitsplatzgruppen stehen die im folgenden genannten Arbeitsplatzgruppen zur Verfügung (Die Montagezelle wird im Szenario nicht berücksichtigt):

- Sägen (Sägezelle),
- Fräsen (Fräszelle),
- Drehen (Drehzelle),
- Messen (Meßzelle),
- Handarbeitsplatz zum Auf- und Abspannen bzw. Ablegen der Teile.
- Transportsystem

Im IFMS existiert zu jeder Arbeitsplatzgruppe nur ein reeller Arbeitsplatz. Zur Simulation können jedoch auch mehrere Arbeitsplätze eines Typs definiert werden. Ferner kann jedem Arbeitsplatz optional ein individuelles Schichtmodell (Liste von Pausenzeiten und Wartungsintervallen) zugeordnet werden.

### 2.2.2 Beispielwerkstücke

Als Beispielwerkstücke werden die folgenden Teiletypen definiert:

| **Teiletyp** | **Arbeitsgangreihenfolge der Bearbeitungsoperationen** |
|---|---|
| Schachfigur | Sägen ⇒ Drehen ⇒ Ablegen (Handarbeitsplatz) |
| Flöte | Sägen ⇒ Drehen ⇒ Ablegen (Handarbeitsplatz) |
| Welle | Sägen ⇒ Drehen ⇒ Fräsen ⇒ Ablegen (Handarbeitsplatz) |
| Getriebegehäuse | Aufspannen1 ⇒ Fräsen1 ⇒ Abspannen1 ⇒ Aufspannen2 ⇒ Fräsen2 ⇒ Abspannen2 |
| Stövchen | Sägen ⇒ Fräsen ⇒ Abspannen |

Zwischen jeder Bearbeitungsoperation ist ein Transport erforderlich, der eine Minute dauert. Die Anzahl der Transportsysteme kann optional verändert werden, jedoch sind in diesem Fall Transportblockierung zu berücksichtigen. Im Anhang sind die einzelnen Arbeitspläne der unterschiedlichen Teiletypen aufgelistet.

## 2.3 Simulationsstudien

Die Modellbildung der oben beschriebenen Anlage im Rahmen der Arbeitsgruppe „Fuzzy-Petri-Netze“ kann zwei unterschiedliche Zielsetzungen haben:

1. Planung bzw. Optimierung des Anlagenlayouts vor dem eigentlichen Betrieb der Anlage: Optimierung der Pufferplätze, des Transportsystems, Anzahl Maschinen usw.
2. Feinplanung der Fertigungsabläufe während des Betriebs der Anlage: Optimierung der Fertigungsabläufe und Benutzerunterstützung bei der Auftragsauswahl (Vorhaben Prof. M. Weck).

Zur Simulation können die folgenden Kriterien verändert werden:

- Anzahl der Teiletypen und Aufträge (Teile);
- Anzahl der Arbeitsplätze innerhalb einer Arbeitsplatzgruppe, Arbeitsplatzgruppen und Transportgeräte;
- Anzahl der Paletten und arbeitsgangbezogenen Fertigungshilfsmittel pro Typ (Werkzeuge etc.);
- Variation der Fertigungsfolgen (Anzahl der Alternativen pro Arbeitsplan);
- Variation der Schichtmodelle (Anzahl unterschiedlicher Schichtmodelle);
- Variation der Pufferplätze und Pufferkapazitäten;
- Streuung der Arbeitsgangdauern, Transport- und Rüstzeiten;
- Veränderung der Anzahl Störungen (Arbeitsplatzausfälle, Eilaufträge etc.).

## 2.4 Literatur

[WEC95] *Weck, M.*: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme, Band 3.2, Automatisierung und Steuerungstechnik, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.

[SON96] *Sonnenschein, K.:* Modellierung der Fertigungsabläufe mittels Fuzzy-Petri-Netzen zur Entwicklung eines Online-Feinplanungssystems, We 550/139-2, 2. Zwischenbericht im DFG-Schwerpunktprogramm „Modellierung der Produktion“, 1996.

### 2.5 Anhang: Arbeitsplaninformationen der Beispielwerkstücke

Die im folgenden aufgeführten Informationen stellen nur einen begrenzten Ausschnitt aus den realen Arbeitsplaninformationen dar, die für eine detaillierte Simulation erforderlich wären. Sie sind jedoch zum Vergleich der unterschiedlichen Modellierungsweisen im Rahmen der Arbeitsgruppe ausreichend. Die Arbeitsplannummer entspricht hier dem Teiletyp.
Die Bedeutung der Attribute ist in der folgenden Tabelle aufgelistet. Sämtliche Dauern sind in Minuten angegeben. Der Typ besagt, ob eine Berücksichtigung des Attributs unbedingt erforderlich ist (not null) oder eine Berücksichtigung bei der Simulation optional ist.

| **Arbeitsgangnr** | **Typ** | **Eindeutige Identifikation des Arbeitsgangs** |
|---|---|---|
| Arbeitsplatzgruppe | not null | Eindeutige Identifikation der Arbeitsplatzgruppe mit der der Arbeitsgang gefertigt werden soll. |
| Bearbeitungszeit pro NC-Programm. | not null | Dauer in Minuten (hier vereinfacht auf ein Teil bezogen) |
| Rüstzeit | optional | Hier vereinfacht: Rüstzeit die bei Wechsel des Teiletyps an einem Arbeitsplatz anfällt. |
| maximale Weitergabemenge | optional | Anzahl gleicher Teile, die hintereinander an einem Arbeitsplatz gefertigt werden müssen, um eine Transporteinheit zum nächsten Arbeitsplatz bilden zu können. Entspricht in der Regel der Transportkapazität. |
| Liegezeit vor der Bearbeitung | optional | technisch bedingte Liegezeit vor einer Bearbeitung, die für ein Werkstück einzuhalten ist. |
| Liegezeit nach der Bearbeitung | optional | technisch bedingte Liegezeit nach einer Bearbeitung, die für ein Werkstück einzuhalten ist. |

Für jeden Teiletyp ist in der Regel ein bestimmter Palettentyp mit einer bestimmten Kapazität zum Transport erforderlich. Die Anzahl der Paletten eines Typs ist ein möglicher Parameter zur Simulation.

## Arbeitsplan WELLE

| | |
|---|---|
| **1 Arbeitsgangnr** | SAEG |
| Arbeitsplatzgruppe | SAEGEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 6 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 1/0/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 6 |
| **2 Arbeitsgangnr** | DREH |
| Arbeitsplatzgruppe | DREHEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 6 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 1/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 6 |
| **3 Arbeitsgangnr** | AUFSP |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 4 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 6 |
| **4 Arbeitsgangnr** | FRAES |
| Arbeitsplatzgruppe | FRAESEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 12 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 1/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 6 |
| **5 Arbeitsgangnr** | ABSP |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 4 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | |
| max. Weitergabemenge | |

## Arbeitsplan GETRIEBE

| | |
|---|---|
| **1 Arbeitsgangnr** | AUFSP1 |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 4 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 1 |
| **2 Arbeitsgangnr** | FRAES1 |
| Arbeitsplatzgruppe | FRAESEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 7 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 1 |
| **3 Arbeitsgangnr** | ABSP1 |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 4 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 1 |
| **4 Arbeitsgangnr** | AUFSP2 |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 4 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/0/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 1 |
| **5 Arbeitsgangnr** | FRAES2 |
| Arbeitsplatzgruppe | FRAESEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 12 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 1/0/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 1 |
| **6 Arbeitsgangnr** | ABSP2 |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |

| | |
|---|---|
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 4 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/0/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | |
| max. Weitergabemenge | |

## Arbeitsplan STOEVCHEN

| | |
|---|---|
| **1 Arbeitsgangnr** | SAEGEN |
| Arbeitsplatzgruppe | SAEGEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 6 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 1/0/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 3 |
| **2 Arbeitsgangnr** | FRAES |
| Arbeitsplatzgruppe | FRAESEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 8 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 1/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | |
| max. Weitergabemenge | 3 |
| **3 Arbeitsgangnr** | ABSP |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 3 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | |
| max. Weitergabemenge | |

## Arbeitsplan SCHACH

| | |
|---|---|
| **1 Arbeitsgangnr** | SAEGEN |
| Arbeitsplatzgruppe | SAEGEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 2 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/0/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 8 |
| **2 Arbeitsgangnr** | DREHEN |
| Arbeitsplatzgruppe | DREHEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 3 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 8 |
| **3 Arbeitsgangnr** | ABSP |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 2 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | |
| max. Weitergabemenge | |

## Arbeitsplan FLOETE

| | |
|---|---|
| **1 Arbeitsgangnr** | SAEGEN |
| Arbeitsplatzgruppe | SAEGEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 3 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/0/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 8 |
| **2 Arbeitsgangnr** | DREHEN |
| Arbeitsplatzgruppe | DREHEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 7 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/1 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | 1 |
| max. Weitergabemenge | 8 |
| **3 Arbeitsgangnr** | ABSP |
| Arbeitsplatzgruppe | SPANNEN |
| Bearbeitungszeit pro NC-P. | 3 |
| Rüstzeit/Liegezeit vor/nach d. Bearb. | 0/1/0 |
| Transportzeit zur nächsten Zelle | |
| max. Weitergabemenge | |

# 3 Schnelle Voraussimulation mit farbigen Fuzzy-Petri-Netzen (Vorhaben Prof. Fengler)

Im folgenden Abschnitt wird das im Kapitel 2. beschriebene Beispiel mit der im Projekt von Prof. Fengler entwickelten Methode modelliert. Grundlage sind dabei Coloured Stochastic Deterministic Petri Nets (CSDPN) unter Integration von Fuzzy-Bewertungen, Datenstrukturen und hierarchischer Strukturen sowie von Zeit- und Wahrscheinlichkeitsbewertungen. Unterstützendes Tool ist das Petri-Netz-Entwurfssystem PENECA Chromos.

Für die Modellierung sollen folgende allgemeine Grundsätze gelten:

- Lager werden als Plätze dargestellt. Dies resultiert aus der Gegebenheit, daß nur Plätze Marken sammeln können.
- Der Transport zwischen zwei Lagern erfolgt über eine Transition. Es erscheint nicht sinnvoll, hier noch einen Zwischenplatz einzufügen. Soll der Transport mehr als einen Schaltschritt andauern, so muß dies über eine Zeitbewertung, in diesem Fall die Zeitdauer dt, geregelt werden.
- Alle Bearbeitungsstationen sollen über ein Eingangs- und ein Ausgangslager verfügen.
- Die Bearbeitung eines Auftrages innerhalb einer Bearbeitungsstation ist normalerweise zeitbewertet. Deshalb wird in der Regel eine Bearbeitungsstation als Transition dargestellt. In diesem Fall wird aber entschieden, einen Platz und eine Zeitbewertung, die Zeitverzögerung tv, zu verwenden, da dadurch der Aufenthalt eines Auftrages innerhalb einer Bearbeitungsstation für den Betrachter sichtbar wird.
- Für die einzelnen Netzelemente und Funktionssymbole empfiehlt es sich, möglichst „sprechende“ Namen zu vergeben. Dies verbessert die Übersichtlichkeit erheblich. Außerdem ist eine farbliche Abgrenzung der verschiedenen Einheiten sinnvoll.
- Fuzzy-Bewertungen können nur an den Transitionen im Feld „Bewertungsfunktion“ angebracht werden, da sie den Schaltvorgang einer Transition beeinflussen.

Die verschiedenen Möglichkeiten, die modellierte Fertigungs- und Montageanlage zu durchlaufen, werden aus den gegebenen Arbeitsplänen entnommen, wobei einige Modifikationen vorgenommen wurden. So wird beispielsweise auf eine Meß-Zelle verzichtet, jedoch eine Montage-Zelle in das Modell aufgenommen.
Jede Zelle verfügt über ein kleines Eingangslager. Dort sind die Warteplätze sehr beschränkt, so daß ein Auftrag nur dann weitertransportiert werden kann, wenn das Eingangslager der nachfolgenden Zelle die Palette aufnehmen kann. Jede Zelle verfügt desweiteren über ein beschränktes Ausgangslager. Sind bei einer Zelle das Ausgangslager und bei der nachfolgenden Zelle das Eingangslager belegt, so stoppt die Produktion.

Ein Engpaß in diesem Modells ist durch das Fahrerlose Transportsystem (FTS) gegeben. Hier stehen nur fünf Transporteinheiten zur Verfügung, welche sämtliche Transportvorgänge ausführen müssen.

### 3.1 Modellerstellung

Zunächst sollen die einzelnen verwendeten Funktionssymbole erläutert werden. Dabei ist zu beachten, daß einige Symbole identisch sind, durch die unterschiedliche Namensgebung erhöht sich aber die Verständlichkeit des Modells. Funktionssymbole werden bei Kantenbeschriftungen benutzt, um ganze Tabellen von Farbbeschriftungen einer einzigen Kante zuzuordnen. Die Symbole werden als Farbkonvertierungstabellen so dargestellt, daß in der Spalte *Schaltmodus* jeweils die Transitions-Farben stehen. Die weiteren Spalten der Tabelle enthalten die Funktionssymbole, die sich an den die Transition umgebenden Kanten befinden. So wird der Zusammenhang zwischen den einzelnen Symbolen an einer Transition deutlich.

Für das Verständnis seien folgende Abkürzungen erläutert:
- A_Lager Ausgangslager
- D Dreh-Zelle
- E_Lager Eingangslager
- F Fräs-Zelle
- FTS Fahrerloses Transportsystem
- Ha Handarbeitsplatz
- Ho Hochregallager
- Mo Montage
- S Säge-Zelle

### 3.2 Übersicht über das Gesamtmodell

Als prinzipielle Herangehensweise wird eine Draufsicht auf die Produktionsanlagen gewählt. Dies entspricht von der optischen Anordnung der einzelnen Zellen nicht der Anordnung der zugrundegelegten Spezifikation des Beispiels, hat aber auf die Funktionalität des Modells keinen Einfluß. Mit die Modellierung der einzelnen Zellen und der Durchlaufwege der verschiedenen Werkstücke wird eine Faltung der verschiedenen Arbeitspläne erreicht, die sich in den unterschiedlichen Markenfarben für unterschiedliche Werkstücke widerspiegelt. Durch diese Herangehensweise erscheinen Engpässe, z.B. nur begrenzt vorhandene Arbeitsgeräte wie Maschinen oder Transporteinrichtungen, auch als solche.
Es wird hier ein hierarchischer Ansatz gewählt, um das Modell so übersichtlich wie möglich zu gestalten. So erscheint das Grobmodell auf der obersten Ebene als einfache Draufsicht auf die Produktionsanlagen. Die einzelnen Bearbeitungs-Zellen werden dabei als Platz-Unternetze dargestellt. Der Transport zwischen den Zellen erfolgt über die entsprechenden Transitionen, beispielsweise die

Transition „S_nach_F“ für den Transport von der Säge-Zelle zur Fräs-Zelle. Da nur eine begrenzte Anzahl Transportmittel zur Verfügung steht, wird in der Mitte des Modells der Platz „Transport_Ressourcen“ eingefügt, in welchem fünf Marken initialisiert werden. Für jeden Transportvorgang wird dann eine solche Marke benötigt, die anschließend wieder in diesen Platz zurückfließt. Dadurch entsteht eine sternförmige Struktur zur Verwaltung und Steuerung der Transportvorgänge (siehe Abbildung 3.1).

In Abbildung 3.1 sind die Platz-Unternetze als graue Kreise dargestellt. Alle hinführenden Kanten gehen dabei zu dem in jedem Unternetz enthaltenen Platz „*E_Lager*“, alle wegführenden beginnen am in jedem Unternetz enthaltenen Platz „*A_Lager*“. Auf diese Beschriftungen wird zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

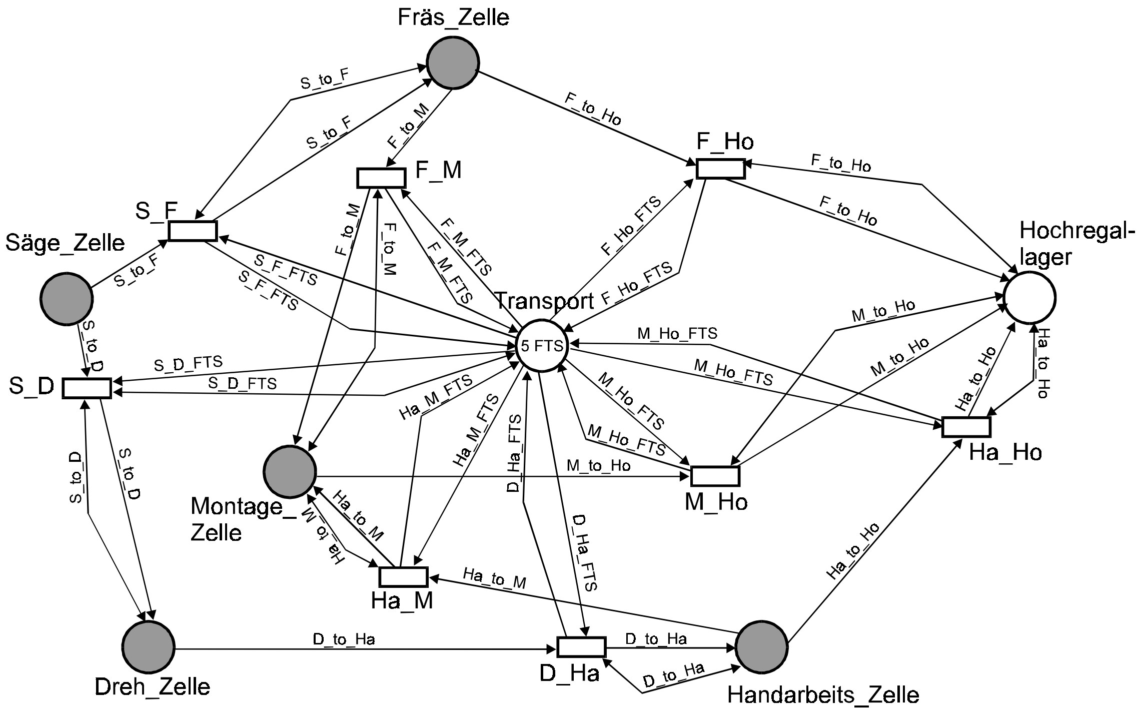



Abbildung 3.1: Das Gesamtnetz - oberste Hierarchie-Ebene

### 3.3 Die Funktionssymbole für den Transport zwischen den einzelnen Zellen

Hier sollen nur beispielhaft die Funktionssymbole an den die Säge-Zelle umgebenden Transitionen erläutert werden, die restlichen Funktionssymbole werden analog aufgebaut. Die Säge-Zelle wird deshalb gewählt, da hier außer den Getriebegehäusen alle zu fertigenden Werkstücke vertreten sind. Auch kann die Problematik des Eingangslagers anhand der beschränkten Eingangslager-Kapazitäten der nachfolgenden Zellen ausgeführt werden.
Damit können folgende Farbkonvertierungstabellen für den Transport definiert werden, wobei hier immer die Transitionen aufgeführt sind.

- Transition *S_nach_F:*

| **Schaltmodus** | **S_to_F** | **S_F_FTS** |
|---|---|---|
| Stoevchen | Stoe 1 , Palette 1 | FTS 1 |

Tabelle 3.1: Farbkonvertierungstabelle der Transition S_nach_F

- Transition *S_nachD*:

| **Schaltmodus** | **S_to_D** | **S_D_FTS** |
|---|---|---|
| Floete_klein1 | Floe5 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Floete_klein2 | Floe10 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Floete_mittl1 | Floe15 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Floete_mittl2 | Floe20 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Floete_gross1 | Floe25 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Floete_gross2 | Floe30 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Schachfigur | Schach 1 , Palette 1 | FTS 1 |
| Welle | Welle 1 , Palette 1 | FTS 1 |

Tabelle 3.2: Farbkonvertierungstabelle der Transition S_nach_D

### 3.4 Die Bearbeitungseinheit Säge-Zelle

Es soll nun die Säge-Zelle detailliert beschrieben werden, alle anderen Zellen weisen äquivalente Ansätze auf. Beschreibung der Transition *t1:*

| **Schaltmodus** | aus_Lager | aus_Lager1 | aus_Lager_test | Palette |
|---|---|---|---|---|
| Floete_klein1 | Rohr 1 | Floe5 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Floete_klein2 | Rohr 2 | Floe10 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Floete_mittl1 | Rohr 3 | Floe15 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Floete_mittl2 | Rohr 4 | Floe20 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Floete_gross1 | Rohr 5 | Floe25 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Floete_gross2 | Rohr 6 | Floe30 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Schachfigur | Rohr 1 | Schach 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Stoevchen | Rohr 1 | Stoe 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |
| Welle | Rohr 1 | Welle 1 | Floe5 1, Floe10 1, Floe15 1, Floe20 1, Floe25 1, Floe30 1, Schach 1, Stoe 1, Welle 1 | Palette 1 |

Tabelle 3.3: Farbkonvertierungstabelle der Transition S1

Transitionen *t5* und *t6:*
Diese Transitionen werden jeweils von nur einem Funktionssymbol, *saegen*, umgeben. Dieses ist identisch mit dem Symbol *aus_Lager1* und soll deshalb nicht weiter erläutert werden.

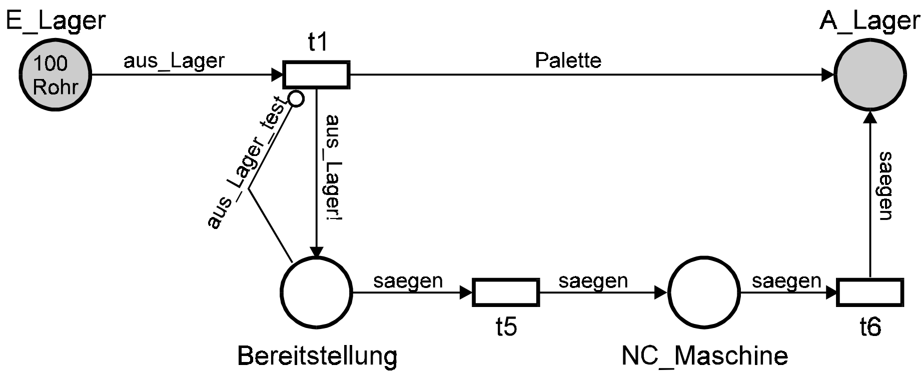


Abbildung 3.2: Das Unternetz Säge_Zelle

Abbildung 3.2 zeigt das detaillierte Modell der Säge-Zelle. Es besteht aus einem Eingangslager „E_Lager“, einem Platz „Bereitstellung“, einem Platz „NC-Maschine“ und einem Ausgangslager „A_Lager“. Die beiden grau gefärbten Plätze stellen die Schnittstelle zur höheren Netz-Ebene dar.
Im E_Lager befindet sich eine Anzahl Rohre, welche die Grundlage für alle hier zu bearbeitenden Aufträge darstellen. An der Transition t1 wird nun zufällig (über eine Fuzzy-Bewertung) ein Auftrag generiert. Entsprechend dieses Auftrages wird eine Anzahl Rohre aus dem E_Lager entfernt. Dann wird eine Auftragsmarke mit auftragsspezifischen Daten erzeugt und in den Platz „Bereitstellung“ transportiert. Der Einfachheit halber wird für dieses Modell entschieden, zunächst nur Marken zu generieren, die einen gesamten Auftrag beschreiben, also nicht die einzelnen Werkstücke eines Auftrages zu betrachten. Da die Simulation der Produktionsanlagen hauptsächlich über die Zeit erfolgt, wird diese Genauigkeit als ausreichend angesehen. Entsprechend dieser Annahme werden die auftragsspezifischen Daten generiert. Die Gesamtbearbeitungsdauer dieses Auftrags errechnet sich z.B. aus der Bearbeitungsdauer eines einzelnen Werkstückes multipliziert mit der Anzahl der Werkstücke an der Säge. Zunächst werden für die Auftragsart Flöte Auftragsgrößen von 5, 10, 15, 20, 25 und 30 Stück definiert. Die Transition t1 kann außerdem nur dann schalten, wenn im A_Lager Platz für eine Palette ist. Ist dies der Fall, so wird dieser Platz durch eine Marke der Farbe Palette reserviert.
Der Platz „Bereitstellung“ stellt einen Pufferplatz direkt vor der Maschine dar. Hier kann bereits der nächste Auftrag warten, auch wenn sich noch ein Auftrag in Bearbeitung auf der Maschine befindet. Das ist nötig, um das Generieren der Aufträge zu verdeutlichen.

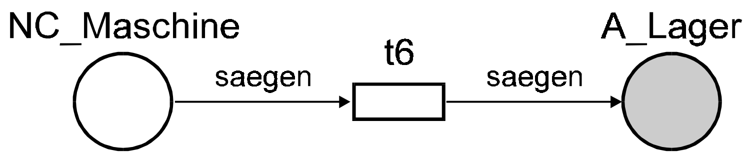
### 3.5 Fuzzifizierung des Modells

Dieses Modell ist darauf ausgelegt, daß die Steuerung des Modells - wo es möglich ist - durch Fuzzy-Bewertungen an den Transitionen erfolgt.
In einer Fuzzy-Bewertungsfunktion müssen allgemein folgende Teile enthalten sein:
- eine Regelmenge für die Bewertung
- die Fuzzy-Sets für die einzelnen Attribute
- der Bewertungsalgorithmus
- eine Defuzzifizierungskomponente.

Es gibt prinzipiell zwei unterschiedliche Arten von Fuzzy-Bewertungen an den Transitionen:

- Farb-Funktionen

  Diese Bewertungsfunktionen werden nur für diejenige Schaltfarbe wirksam, für die sie definiert sind. So ist es möglich, an einer Transition verschiedenen Farben auch sehr unterschiedliche Bewertungen, die auch unterschiedliche Attribute betreffen können, zuzuordnen. Abbildung 3.3 stellt dies am Beispiel (Ausschnitt aus dem Unternetz Säge_Zelle) erklärend dar.

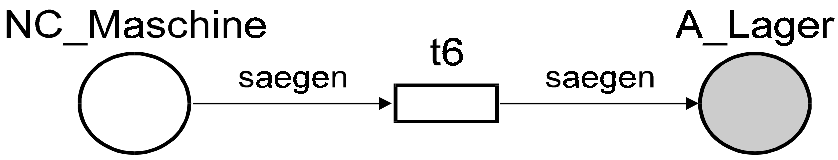



| Schaltmodus | t6 | $w_x$ | saegen |
|---|---|---|---|
| Floete_klein1 | Floete_klein1 | X | Floe5 1 |
| Floete_klein2 | Floete_klein2 | X | Floe10 1 |
| Floete_mittl1 | Floete_mittl1 | X | Floe15 1 |
| Floete_mittl2 | Floete_mittl2 | X | Floe20 1 |
| Floete_gross1 | Floete_gross1 | X | Floe25 1 |
| Floete_gross2 | Floete_gross2 | X | Floe30 1 |
| Schachfigur | Schachfigur | X | Schach 1 |
| Stoevchen | Stoevchen | X | Stoe 1 |
| Welle | Welle | X | Welle 1 |

Abbildung 3.3: Beispiel der Transition t6 mit Farb-Funktion

- Transitions-Funktionen

  Diese Bewertungsfunktionen werden auf alle an der Transition anliegenden Farben gleich angewandt, sie kommen also bei jedem Schalten der Transition genau einmal zur Ausführung. Beispielsweise kann durch solche Bewertungen sichergestellt werden, daß aus allen möglichen Aufträgen derjenige mit der größten Dringlichkeit bearbeitet wird, ohne daß die Transition in verschiedenen Farben parallel schalten kann. Es ist also möglich, zusätzliche Ressourcen-Plätze in Verbindung mit dt-Zeitbewertungen, die das parallele Schalten einer Transition ebenfalls verhindern sollen, durch solche globalen Fuzzy-Bewertungen zu ersetzen. Um dies realisieren zu können, muß es möglich sein, an einer Transition eine „Universalfarbe“ zu definieren. Diese Farbe muß dann in keiner Kantenanschrift verwendet werden, ist aber immer dann schaltfähig, wenn die Transition in mindestens einer Farbe schaltfähig ist. Besitzt diese „Universalfarbe“ eine Fuzzy-Bewertung, so wird diese dann für alle Farben gültig. Dieses Prinzip soll in Abbildung 3.4 verdeutlicht werden.




| Schaltmodus | t6 | $w_x$ | saegen |
|---|---|---|---|
| Floete_klein1 | Floete_klein1 | | Floe5 1 |
| Floete_klein2 | Floete_klein2 | | Floe10 1 |
| Floete_mittl1 | Floete_mittl1 | | Floe15 1 |
| Floete_mittl2 | Floete_mittl2 | | Floe20 1 |
| Floete_gross1 | Floete_gross1 | | Floe25 1 |
| Floete_gross2 | Floete_gross2 | | Floe30 1 |
| Schachfigur | Schachfigur | | Schach 1 |
| Stoevchen | Stoevchen | | Stoe 1 |
| Welle | Welle | | Welle 1 |
| Werkstueck | | X | |

Abbildung 3.4: Beispiel der Transition t6 mit Transitions-Funktion

Für das Aufstellen einer Regelmenge, muß zuerst festgelegt werden, welche Einflußgrößen bei welchen Entscheidungen eine Rolle spielen und wie sie als Attribute mitgeführt werden können. Da es für das Prinzip der Fuzzifizierung nicht wichtig ist, welche Regeln verwendet werden, wird für das betrachtete Beispiel auf eine konkrete Regelmenge verzichtet. Es wurden bereits viele Fuzzy-Regeln aus Interviews mit Praxispartnern ermittelt und aufgestellt, die sehr praxisrelevant sind.

Die Fuzzy-Sets für die ausgewählten Attribute sollen eine Dreiecksform aufweisen und drei bis fünf Terme (z.B. klein, mittel und groß) beinhalten. In unserem Projekt werden sie mit dem Maximum- oder Minimum-Operator verknüpft.

Nach Aufruf der Tcl-Funktion werden die benötigten Attribute aller Einträge der beteiligten Datenspeicher - also die Marken aller Vorplätze - entsprechend der Fuzzy-Sets fuzzifiziert. Anschließend werden anhand der Regelmenge verschiedene Berechnungen durchgeführt, die dann zu einem entsprechenden Ergebnis führen. Ist keine Schwelle angegeben, so wird das beste Ergebnis ausgewählt, wieder defuzzifiziert und in den nächsten Datenspeicher bewegt. An das Tool PENECA *Chromos* wird zurückgemeldet, daß die Transition schalten kann. Ist eine Schwelle implementiert, so muß das beste Ergebnis auch über dieser Schwelle liegen. Ist dies nicht der Fall, wird keine Marke bewegt, und es erfolgt die Rückmeldung, daß die Transition nicht schalten kann.

## 3.6 Modellierungsablauf - Zusammenfassung

Aus den bisherigen Vorarbeiten abgeleitet, gliedert sich die Modellierung eines FBPN nach folgendem Ablauf:

1. Aufstellung des Modells
   Das Modell muß zunächst im gewünschten Detaillierungsgrad erstellt werden. Dazu wird einer Strategie der Aufteilung in Topologien gefolgt.
2. Bedienersteuerung
   Soll die Besetzung der verschiedenen Stationen mit Bedienern flexibel sein, so muß diese Steuerung nun in das Modell eingefügt werden.
3. Bestimmung der linguistischen Variablen
   Es muß festgestellt werden, welche Größen auf die Steuerung der Fertigung Einfluß nehmen. Diese Größen werden als linguistische Variable definiert und mit verbalen, unscharfen Werten belegt.
4. Ermittlung der Transitionen mit Fuzzy-Bewertung
   Welche Transitionen mit Fuzzy-Bewertungen belegt werden müssen, wird zunächst durch das Vorliegen von Konflikten im Modell entschieden.
   - Überall, wo ein äußerer Konflikt vorliegt, muß die Transition mit einer Fuzzy-Bewertung ausgestattet werden.
   - Dort, wo sich Marken ansammeln können, also eine Auswahl aus mehreren vorhandenen Marken getroffen werden muß, liegt eine Art innerer Konflikt vor. Dieser ist ebenfalls durch eine Fuzzy-Bewertung zu entscheiden, da sonst der Durchlauf der Marken nicht effektiv gesteuert werden kann.

   Eine weitere Möglichkeit für eine Fuzzy-Bewertung an einer Transition liegt außerdem dort vor, wo unscharfe Größen die Aufenthaltsdauer einer Marke in einem Platz bestimmen. Dort ist eine Fuzzy-Bewertung, die eine Zeit zurückliefert, anzubringen.
5. Festlegung des Datenstrings
   Dabei wird festgelegt, welche Atribute in einem Datenstring vorhanden sein sollen, außerdem muß die Reihenfolge festgelegt werden. Linguistische Variable können auch Größen repräsentieren, die erst berechnet werden. Die entsprechenden Algorithmen müssen ebenfalls definiert werden.
   In diesem Abschnitt muß auch festgelegt werden, welche Markenfarben Farb-Klassen und welche Instanzen von Farb-Klassen darstellen.
6. Aufstellen der Fuzzy-Bewertungsfunktionen
   Es ist nun notwendig, für jede fuzzybewertete Transition festzustellen, welche Einflußgrößen dort vorhanden sind und wie sie zusammenwirken. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist für jede Bewertungs-Funktion eine Regelbasis aufzustellen, nach welcher die Funktion arbeitet. Zusätzlich sind die Fuzzy-Sets für die linguistischen Variablen zu spezifizieren. Dies ist nötig, da die-

selbe linguistische Variable an einer anderen Transition durch ein anderes Fuzzy-Set repräsentiert werden kann.

7. Initialisierung
   Es muß nun noch ermittelt werden, welche Marken mit welchen Werten initialisiert werden sollen, wenn sie in das Modell eintreten. Dies kann sich entscheidend auf den Verlauf der Simulation auswirken, weshalb dies mit großer Sorgfalt zu erledigen ist.

Der Ablauf der Modellierung nach der oben vorgestellten Konzeption ist noch einmal grafisch in Abbildung 3.5 dargestellt. Wie man sieht, liegt hier kein sequentieller Ablauf vor. Die Punkte drei und vier sowie die Punkte fünf und sechs sind jeweils parallel, eigentlich sind sie gekoppelt zu bearbeiten. Es ist keine scharfe Trennung der einzelnen Modellierungsschritte möglich, da sich die jeweils parallel gezeichneten Punkte gegenseitig beeinflussen. Auch liegt eine Beeinflussung des Punktes sechs durch Punkt drei vor, es sind in diesem Bereich auch Rückkopplungen möglich.

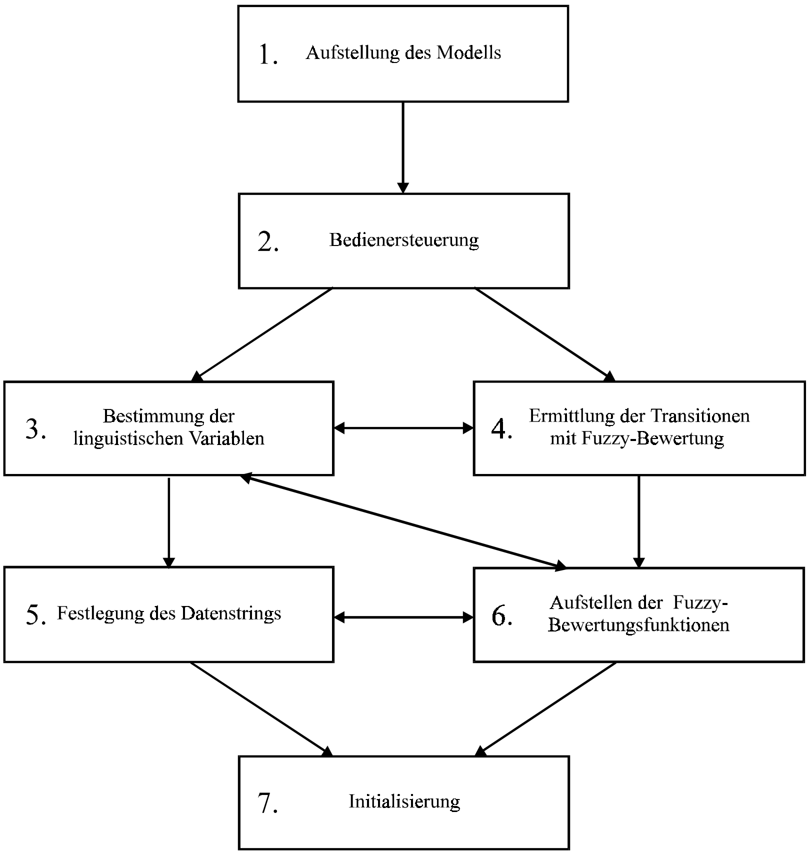



Abbildung 3.5: Allgemeine Modellierungskonzeption

# 4 Online-Feinplanung mit farbigen Petri-Netzen (Vorhaben Prof. Weck)

## 4.1 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens wurde unter anderem eine Modellierungsmethode zur Entwicklung eines Online-Feinplanungssystems entwickelt. Die Methode besteht aus einem Beschreibungsmittel auf Basis erweiterter Fuzzy-Petri-Netze und einer Abbildungsvorschrift zur automatischen Netzerzeugung aus einem entwickeltem Referenzdatenmodell. Ziel der folgenden Ausführungen ist eine grobe Darstellung des Beschreibungsmittels und der Methode zur Netzerzeugung. Weitere Schwerpunkte des Vorhabens, wie z. B. die Konzeption eines Referenzdatenmodells zur Feinplanung, die Entwicklung eines Schedulers (Netzinterpreters) auf Basis einer Fuzzy-Entscheidungskomponente, eines Simulators sowie einer Reihenfolgeoptimierung zur Kostenminimierung sind Inhalt des Abschlußberichtes.

Die erweiterten Fuzzy-Petri-Netze sind aus einer Kombination der Theorie der farbigen Petri-Netze, versehen mit diversen Erweiterungen, und der Theorie der Fuzzy-Logik hervorgegangen. Dabei wurde so verfahren, daß auf der Netzstruktur eine Fuzzy-Komponente aufgesetzt wurde, die im Falle einer Konfliktsituation eine möglichst optimale Entscheidung treffen kann. Die Fuzzy-Komponente selbst ist als Fuzzy-Regler konzipiert, der auf der Auswertung von Produktionsregeln, die in „Wenn ... Dann ...“-Form formuliert werden, basiert. Die Methode wurde so konzipiert, daß die Netzgenerierung *automatisch* aus einem Referenzdatenmodell erfolgt, ohne daß eine graphisch-interaktive Netzeingabe durch den Benutzer erforderlich ist. Allein dieses Leistungsmerkmal grenzt die Online-Feinplanung von bestehenden Systemen auf Basis von Fuzzy-Petri-Netzen ab, da diese in der Regel eine graphische Netzeingabe verlangen. Zur Realisierung dieser automatischen Netzgenerierung wurden die Netzobjekte in verschiedene Klassen eingeteilt und die genaue Vorgehensweise definiert, wobei auch die Modellierung nichtlinearer Arbeitspläne (Netzzweige) berücksichtigt wurde.

## 4.2 Eingangsdaten und Umgebung

Abbildung 4.1 zeigt die wichtigsten Komponenten der Methode, welche die Grundlage für die eigentliche Feinplanung darstellen. Die für die *Netzgenerierung* erforderlichen Eingangsdaten werden aus einer Datenbank (ORACLE V7) entnommen. Die verwendete Datenbankschnittstelle ist in diesem Fall *embedded SQL*. Das Referenzdatenmodell besteht im einzelnen aus:

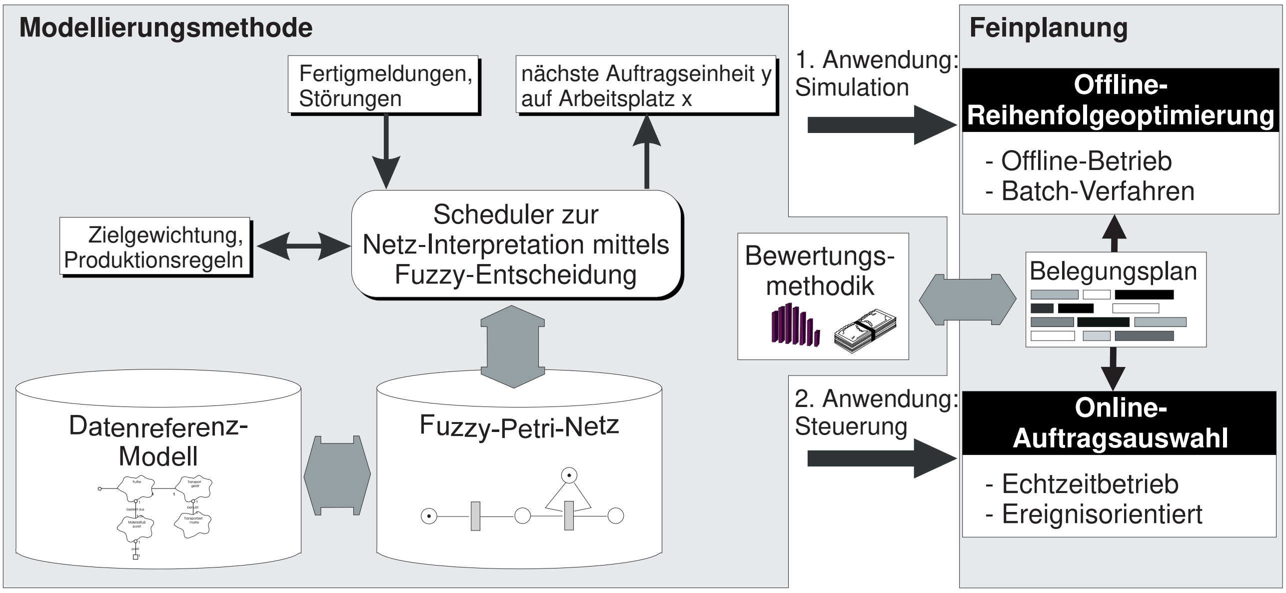
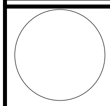
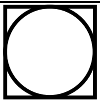
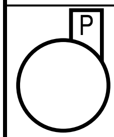
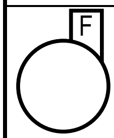
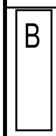
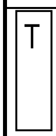



Abbildung 4.1: Modellierungsmethode als Grundlage der Online-Feinplanung

Auf der Grundlage der Daten aus der Datenbank und den vordefinierten Netzobjekten, die im nächsten Abschnitt erläutert werden, generiert der *Netzgenerator* beim Start der Feinplanung das erweiterte Fuzzy-Petri-Netz zur Auftragsauswahl (Steuerung) oder Reihenfolgeoptimeirung (Simulation). Auf diesem Modell agiert der *Scheduler*, der die erforderlichen Entscheidungen unter Einbeziehung der spezifischen Produktionsziele in Form von Zielvorgaben und dem in Produktionsregeln formulierten empirischen Prozeßwissen trifft. In den Zielvorgaben sind die unterschiedlichen Kriterien, nach denen man eine Fertigungsanlage betreiben kann, gemäß ihrer Wichtigkeit zueinander in Relation gesetzt. Nachdem der Netzinterpreter die vorliegende Situation analysiert und eine Entscheidung getroffen hat, veranlaßt er die zur Durchsetzung seiner Entscheidung erforderlichen Aktionen (z. B. Start der Bearbeitung einer Auftragseinheit). Diese Aktionen steuern den Fertigungsprozeß, der wiederum in Form von Rückmeldungen über einen Nachrichten-Mechanismus mit der Online-Feinplanung kommuniziert. Die Online-Feinplanung wertet die angezeigten Veränderungen im Fertigungsprozeß aus und nimmt eine Anpassung des Netzmodells vor. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um das Weiterschieben einiger Netzmarken. Diese Anpassung ist rein *ereignisorientiert*, da Maßnahmen zur Netzmodifikation bei konstanter Situation in der Fertigung nicht sinnvoll sind. Anschließend analysiert der Scheduler wiederum die neue Situation und trifft daraufhin neue Entscheidungen, so daß der Regelkreis geschlossen ist.

## 4.3 Netzobjekte zur Feinplanung

Zur besseren Identifizierbarkeit der unterschiedlichen Objekte in den Petri-Netzen ist jedem (abstrakten) Netzobjekt ein eigenes Icon zugeordnet worden, welches als Synonym für die jeweils repräsentierte Funtkionalität anzusehen ist. So entfallen durch die Zuordnung der Netzobjekte zu bestimmten Klassen viele Kontextüberprüfungen in der Netzumgebung, die alleine dazu dienen würden, die gegebene Situation genau zu verstehen. Der Schedduler arbeitet das Netz gemäß den ihm zur Verfügung stehenden Abarbeitungsregeln ab, indem er die Netzobjekte in einer bestimmten, von ihrer Klasse abhängigen, optimierten Reihenfolge analysiert.
Die Verwendung der Petri-Netz-Theorie als Modellierungsmethode in der Produktionstechnik erfordert die Abbildung der Zustände und Übergänge des realen Systems auf Konstrukte der Petri-Netze. Die Abbildung kann unter Einhaltung der Petri-Netz-Definitionen je nach Ansatz und Gewichtung der abzubildenden Systemeigenschaft unterschiedlich ausfallen. In der Regel werden Zustände des realen Systems, die für eine gewisse Zeit bestand haben, zu *Stellen* und Zustandsübergänge bzw. nicht zeitbehaftete Ereignisse zu *Transitionen* assoziiert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dynamischen zustandsverändernden Vorgängen Transitionen und statischen Systemzuständen Stellen zuzuordnen. Die zweite Möglichkeit, die im folgenden weiterverfolgt werden soll, erfordert zwar die Erweiterung zu *zeitbehafteten* Transitionen, da der Zustandsübergang, wie z. B. die Bearbeitung eines Werkstücks, eine gewisse Dauer hat; durch diese Erweiterung sind jedoch wesentlich weniger Netzobjekte erforderlich, so daß die Netze übersichtlicher bleiben und der Scheduler zur Interpretation effizienter ausgelegt werden kann.
In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten definierten Netzobjekte aufgelistet. Allgemein werden Ressourcenklassen jeglicher Art als *Stellen* modelliert. Für jeden Ressourcentyp, wie z. B. eine Maschinengruppe oder ein Werkzeugtyp, wird im gesamten System genau eine *Stelle* definiert. Die einzelnen Ressourcen werden als *Marken* innerhalb einer Stelle abgebildet. Die Auftragseinheiten werden als *Auftrags-Marken* dargestellt und durch das Petri-Netz geschleust. Zur Abbildung der Arbeitspläne werden *Arbeitsplan-Stellen* definiert, die den aktuellen Bearbeitungszustand einer in ihr befindlichen *Auftrags-Marke* beschreiben. Es wurde darauf geachtet, nur die Auftragszustände mittels Stellen zu modellieren, d. h. eine Vermischung zwischen Zielen und Zuständen in den Stellen zu vermeiden. Zur Beschreibung eines Zustandswechsels stehen *Bearbeitungs-* und *Transport-Transitionen* zur Verfügung, die in abwechselnder Reihenfolge den Durchfluß einer *Auftrags-Marke* beschreiben. Bearbeitungs-Transitionen benötigen als notwendige Schaltbedingung eine freie *Arbeitsplatz-Marke*, wohingegen *Transport-Transitionen* keine anliegenden Stellen besitzen, sondern nur zur reinen Simulation der Transportdauer dienen. Stellt ein Transportmittel einen Engpaß im Gesamtsystem dar, muß es als *Arbeitsplatzgruppen-Stelle* modelliert werden, um berücksichtigt zu werden.

| Symbol | Netz-Objekt | Abgebildete Produktionssystemgrößen | Merkmale |
|---|---|---|---|
|  | **Arbeitsplan -Stelle** | Bearbeitungszustand innerhalb eines Arbeitsplans (z. B. Rohzustand, bearbeitet, transportiert, fertiggestellt etc.) | Eine Stelle kann mehrere Auftrags-Marken aufnehmen. Ein- und auslaufende Kanten gehen zu Bearbeitungs- und Transport-Transitionen. |
|  | **Arbeits-platzgruppen-Stelle** | Arbeitsplatzgruppe (Maschinengruppe, Handarbeitsplätze, Engpaßtransportmittel, Roboter etc.) | Als Arbeitsplatzgruppen-Stelle werden die Engpaßressourcen des Fertigungssystems modelliert. Sie werden vom Scheduler speziell behandelt. Ein- und auslaufende Kanten gehen nur zu Bearbeitungs-Transitionen. |
|  | **Paletten-Stelle** | Mitgeführte Engpaß-Fertigungshilfsmittel (Palettengrundkörper, Vorrichtungen, Greifer usw.) eines bestimmten Typs | Ein- und auslaufende Kanten gehen nur zu Transport-Transitionen (Gewicht gleich 1). |
|  | **FHM-Stelle** | Lokale Engpaß-Fertigungshilfsmittel (Sonderwerkzeuge, Greifer, NC-Programm usw.) eines bestimmten Typs | Ein- und auslaufende Kanten gehen nur zu Bearabeitungstransitionen (Gewicht größer 1 möglich). |
|  | **Bearbei-tungs-Transition** | Bearbeitung einer kleinsten Auftragseinheit (Palettenauftrag) | Externe Schaltbedingungen, evtl. Auslösen einer Aktion, Kantengewichte der ein- und ausgehenden Kanten ist 1 |
|  | **Transport-Transition** | Transport ein oder mehrerer Auftrags-Marken | Externe Schaltbedingung, evtl. Auslösen einer Aktion, Kantengewichte entsprechend der Transportmenge an Auftrags-Marken, keine Verbindung zu einer Arbeitsplatzgruppen-Stelle, Verfeinerung zur Abbildung von Materialflußvorgängen möglich. |

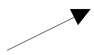
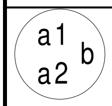
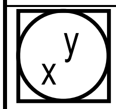
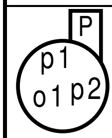
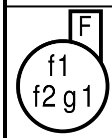
| | | | |
|---|---|---|---|
|  | **Kante** | Zustandsübergang eines Auftrages, alternative Arbeitspläne, Bedarf an Ressourcen (Arbeitsplatz-Marke, Paletten-Marke, FHM-Marke) | Typ und Menge der erlaubten Marken, alternative priorisierbare Kanten |
|   | **Auftrags-Marke** | Identifikation der kleinsten Auftragseinheit: Paletten-/Werkstückauftrag | Durch den Aufenthalt in einer bestimmten Arbeitsplan-Stelle wird der Bearbeitungszustand beschrieben, genaue Beschreibung der Auftragseinheit (Priorität, Solltermine, Stückzahl...) |
|   | **Arbeitsplatz-Marke** | Arbeitsplätze (Maschinen, Tansportgeräte etc.) innerhalb einer Arbeitsplatzgruppe | Genaue Beschreibung des Arbeitsplatzes (Schichtmodell, Zustand, Rüstzustand ...). Arbeitsplatz-Marken sind die Hauptressourcen, für die ein Belegungsplan erstellt wird. |
|   | **Paletten-Marke** | mitgeführte Engpaß-Fertigungshilfsmittel (Paletten, Vorrichtungen) in einer bestimmten Konfiguration | Anzahl der Paletten-Marken in einer Stelle entspricht den zur Verfügung stehenden Paletten mit demselben Grundkörper. Die Konfiguration ist jedoch individuell und kann bei Bedarf geändert werden. |
|   | **FHM-Marke** | lokale Engpaß-Fertigungshilfsmittel (Sonderwerkzeuge etc.) | Anzahl der Marken in einer Stelle entspricht den zur Verfügung stehenden Schwester-Fertigungshilfsmittel. |

Tabelle 4.1: Liste der wesentlichen Netzobjekte

Das Netz wird mittels Anfangs- und Endestellen vom Typ *Arbeitsplan-Stelle* begrenzt (in Tabelle 4.1 nicht aufgeführt). Über die Anfangsstellen werden *Auftrags-Marken* in das Netz eingelastet; die Endestellen markieren, daß die *Auftrags-Marken* fertig bearbeitet bzw. komplett eingeplant worden sind. Sämtliche Marken sind in Erweiterung zu klassischen Petri-Netzen vollständige Objekte, die sämtliche Informationen aus dem Datenmodell beinhalten. Die definierten Netzobjekte sind auf der einen Seite sehr mächtig, stellen aber auf der anderen Seite die wesentlichen Fertigungsobjekte dar, die zur Feinplanung erforderlich sind. Da neben den Netzobjekten der erweiterten Petri-Netze ein erheblicher Anteil des Datenmodells, wie z. B. Arbeitsgang-Maschinen-Zuordnungen und auch Randbedingungen, wie z. B. Vorgänger-/Nachfolger-Relationen, implizit im Netz abgebildet werden, ergibt sich auch für relativ komplexe Spezifikationsaufgaben ein Netz mit einer aktzeptablen Größe, so daß eine effektive und auf die Aufgabenstellung zugeschnittene Abbildung der Fertigungsabläufe ermöglicht wird.

## 4.4 Abbildung der Fertigungsabläufe im erweiterten Petri-Netz

Für jeden Arbeitsplan wird ein Netzzweig angelegt, so daß in der Netzstruktur nur Änderungen vorzunehmen sind, wenn neue Arbeitspläne hinzukommen oder Modifikationen vorgenommen werden müssen. Für jeden Arbeitsgang im Arbeitsplan wird eine *Bearbeitungs-Transition* angelegt, die mit einer *Arbeitsplan-Stelle* im Vorbereich (Zustand vor der Bearbeitung) und einer *Arbeitsplan-Stelle* im Nachbereich (Zustand nach der Bearbeitung) verknüpft wird (siehe Abbildung 4.2). Um zwischen den Bearbeitungen eine Transportzeit abbilden zu können, wird vor jeder *Bearbeitungs-Transition* eine *Transport-Transition* eingefügt. Diese simuliert jedoch nur die reine Transportdauer und berücksichtigt weder das Transportmittel noch Paletten als Randbedingung. Stellt das Transportmittel ungewöhnlicherweise einen Engpaß dar, muß es als *Arbeitsplatzgruppen-Stelle* modelliert werden. Durch diese Maßnahme wird eine effizientere Interpretation des Netzes ermöglicht.

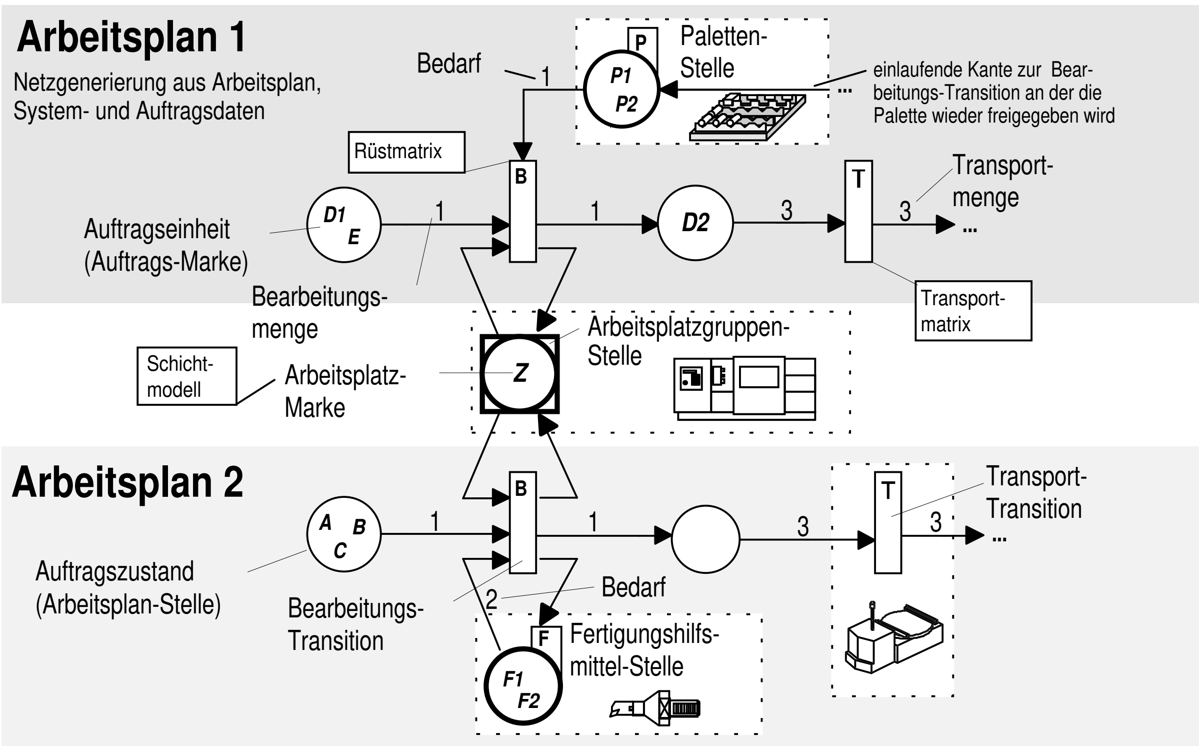



Abbildung 4.2: Abbildung der Fertigungsabläufe im erweiterten Petri-Netz

Jeder *Bearbeitungs-Transition* wird genau eine *Arbeitsplatzgruppen-Stelle* zugeordnet, die eine oder mehrere *Arbeitsplatz-Marken* enthält. Die einzelnen Aufträge werden durch einzeln identifizierbare *Auftrags-Marken* in die entsprechende Anfangsstelle eingelastet. Hierbei werden für einen Auftrag eventuell mehrere *Auftrags-Marken* entsprechend der zu fertigenden Teilesollstückzahl und der zur Verfügung stehenden Palettenkapazität erzeugt. Jede *Auftrags-Marke* entspricht einem Paletten-/Werkstückauftrag, d. h. einer kleinsten Auftragseinheit. *FHM-Stellen* arbeitsgangbezogener Fertigungshilfsmittel wie Werkzeuge erhalten jeweils eine ein- und auslaufende Kante zu einer *Bearbeitungs-Transition*, da sie auch nur für einen Arbeitsgang zur Bearbeitung an einer Maschine angefordert werden. Aufgrund des Standzeitverbrauches von Werkzeugen können mehrere Schwesterwerkzeuge (*FHM-Marken*) zur Bearbeitung einer *Auftrags-Marke* erforderlich sein. *Paletten-Stellen* bilden mitgeführte Fertigungshilfsmittel wie Paletten oder Vorrichtungen ab, die in der Regel für mehrere Arbeitsgänge benötigt werden. Dieser Stellentyp hat aus diesem Grund eine auslaufende Kante zur Anforderung und eine einlaufende Kante zur Freigabe an unterschiedliche *Bearbeitungs-Transitionen*.

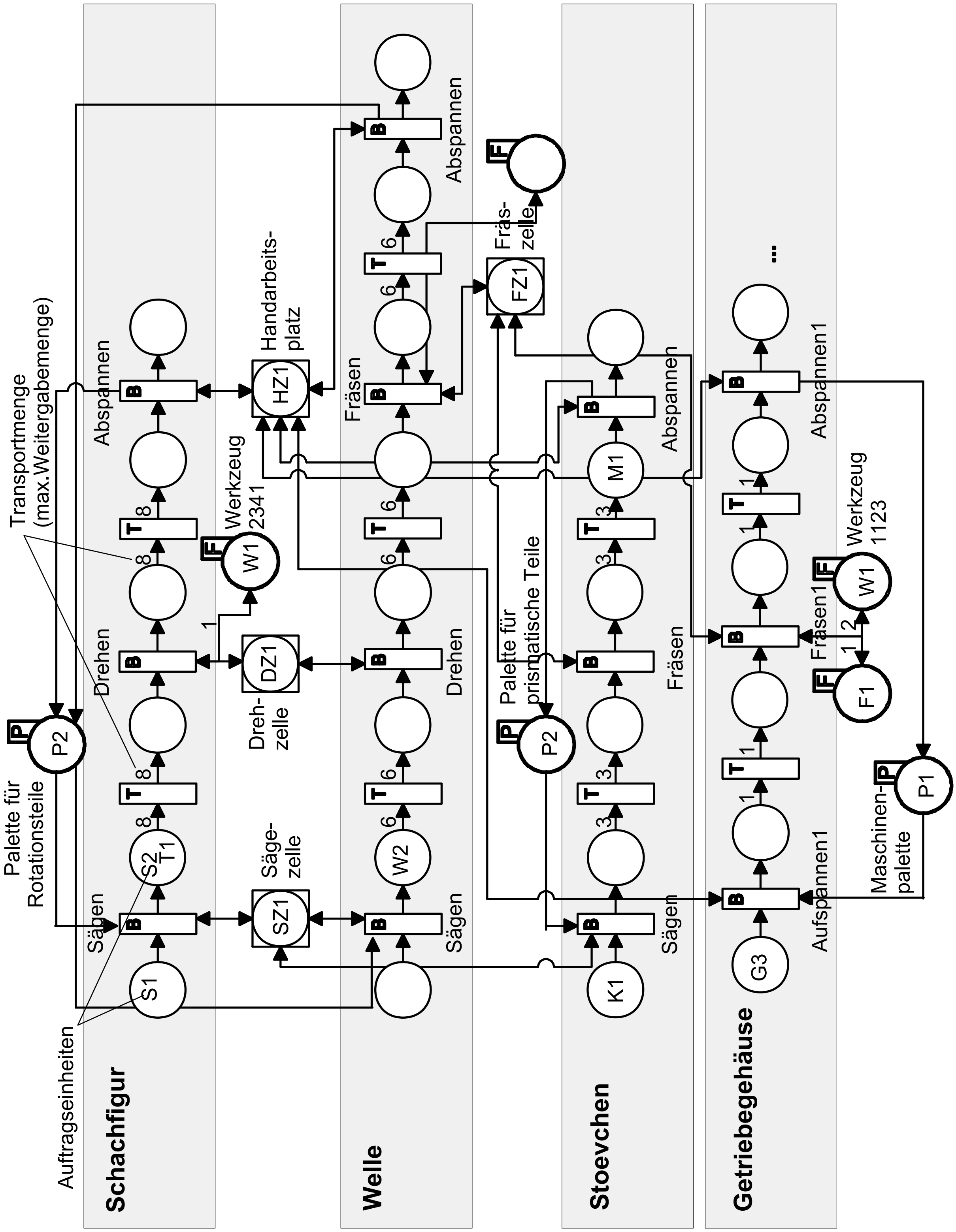



Abbildung 4.3: Grobe Abbildung der Beispielwerkstücke im Petri-Netz

Der Vorteil dieser Modellierungsweise liegt darin, daß das Petri-Netz mit seinen Transitionen, Stellen und Kanten nur einmal zum Systemstart erzeugt wird und während des Betriebs strukturell nicht mehr verändert werden muß. Die Ausnahme stellt hier das Hinzufügen oder Ändern eines Arbeitsplans oder einer Arbeitsplatzgruppe dar. Aufträge werden somit einfach entsprechend des zugehörigen Arbeitsplans mittels *Auftrags-Marken* eingelastet. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise verbirgt sich in der komplexeren Interpretation des Netzes, da hier Konflikte innerhalb einer *Arbeitsplan-Stelle* auftreten können, d. h. in einer Stelle können sich mehrere *Auftrags-Marken* unterschiedlich zu behandelnder Aufträge befinden. In Abbildung 4.3 ist ein Auszug der graphischen Darstellung des Petri-Netzes zum Beispieszenario gegeben. Zusätzlich zu den Arbeitsplatzgruppen-Stellen sind weitere Restriktionen durch Paletten- und FHM-Stellen bei den Bearbeitungs-Transitionen eingefügt worden. In Abbildung 4.4 sind beispielhaft die Abbildung eines nichtlinearen Arbeitsplans sowie der überlappenden Fertigung illustriert. Andere Fertigungsfolgen werden durch alternative Kanten zu und von Transport-Transitionen nachgebildet. Eine überlappende Fertigung wird indirekt durch die Aufteilung eines Auftrags in mehrere Auftrags-Marken realisiert. Dadurch kann eine Auftragseinheit, obwohl der Vorgängerarbeitsgang noch nicht vollständig abgeschlossen ist, in Abhängigkeit von der minimalen Weitergabemenge schon zur nächsten Bearbeitungsstation transportiert werden.

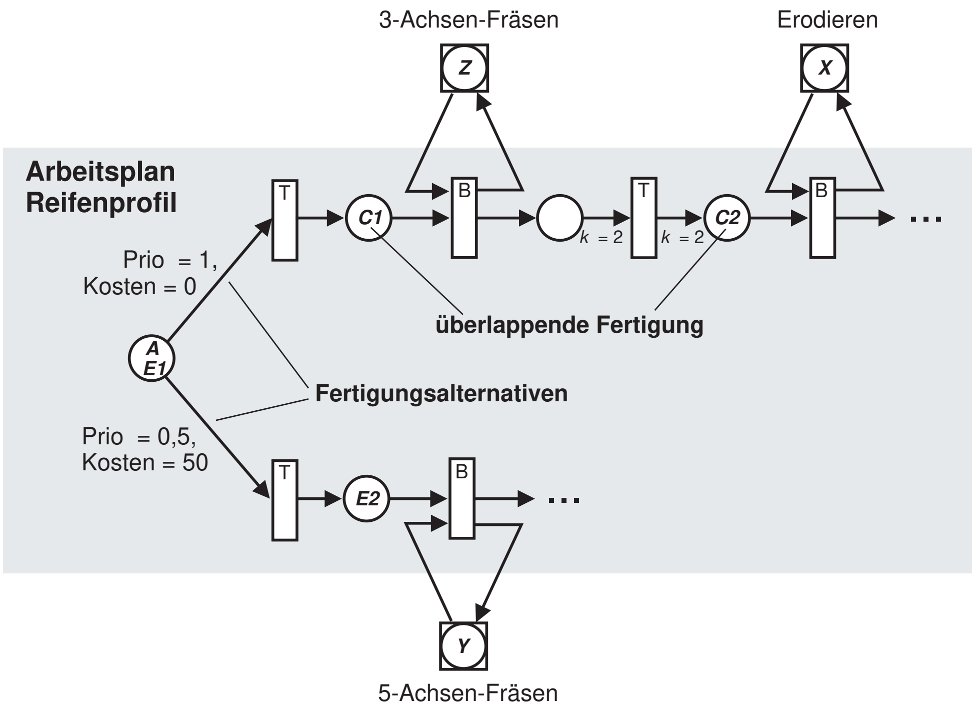



Abbildung 4.4: Modellierung alternativer Fertigungsfolgen und der überlappenden Fertigung

## 4.5 Automatische Netzgenerierung aus dem Referenzdatenmodell

Ein wesentliches Merkmal des Feinplanungssystems stellt die automatische Erzeugung der erweiterten Petri-Netze aus dem Referenzdatenmodell dar. Die automatische Generierung ist eine wichtige Systemanforderung, um den Benutzer von einer etwaigen manuellen Modellierung der Petri-Netze zu entlasten. Zu Beginn der Konfigurationsphase werden die Systemdaten eingelesen und die korrespondierenden Petri-Netz-Objekte angelegt. Hierzu gehören die Arbeitsplatzgruppen und Arbeitsplätze, Palettengrundkörper und Paletten sowie Fertigungshilfsmitteltypen und Fertigungshilfsmittel. Dabei werden auch der aktuelle Status und die zur Feinplanung relevanten Attribute eingelesen. Zu den einzelnen Arbeitsplätzen wird zusätzlich der frühest mögliche Verfügbarkeitszeitpunkt anhand der aktuell bearbeitenden Auftragseinheit sowie das aktuelle Schichtmodell ausgelesen und in Form einer Pausenliste jeder Arbeitsplatz-Marke zugewiesen. Ferner werden die in der Zukunft bereits freigegeben Auftragseinheiten als Pausenzeiten in die Pausenliste der *Arbeitsplatzgruppen-Stelle* eingekettet.

In einem zweiten Schritt werden die Arbeitspläne ausgelesen, wobei für jeden Arbeitsgang ein eigener Netzzweig erzeugt wird. Die einzelnen Netzzweige werden mittels Vorgänger-Nachfolgerrelationen zu einen kompletten Netz zusammengefügt. Hierbei sind auch alternative Kanten zur Abbildung nichtlinearer Fertigungsfolgen möglich.

In Abbildung 4.5 ist beispielhaft die Erzeugung von Netzkanten zu den Ressourcen-Stellen aus den Tabellen der relationalen Datenbank dargestellt. Aus der Datenbank werden die Informationen zur Erzeugung der einzelnen Netz-Objekte via embedded SQL-Anweisungen ausgelesen. Ferner werden die Rüst- und Transportmatrix ausgelesen und im Hauptspeicher entsprechend verwaltet, so daß schnell darauf zugegriffen werden kann.

Schließlich werden die *Auftrags-Marken* aus den Auftragsdaten erzeugt und entsprechend ihres Status in die zugehörige *Arbeitsplan-Stellen* eingelastet. Hierzu werden für die Aufträge, die den Status „einplanbar“ besitzen, aus der zu produzierenden Teilesollmenge und der Palettenkapazität entsprechende *Auftrags-Marken* generiert und in die Anfangsstellen des zugehörigen Arbeitsplans eingelastet. Jeder „Palettenauftrag“ entspricht somit einer *Auftrags-Marke*, der kleinsten Planungs- und Durchsetzungseinheit im System. Für Aufträge, die bereits eingeplant worden sind und somit schon Auftragseinheiten existieren bzw. die noch nicht komplett freigegeben worden sind, werden die *Auftrags-Marken* direkt in die entsprechende *Arbeitsplan-Stelle* eingefügt. Nach der Konfigurationsphase liegt das Petri-Netz komplett im Hauptspeicher vor und die einfache Einplanung mittels Prioritätsregeln oder die Reihenfolgeoptimierung können angestoßen werden.

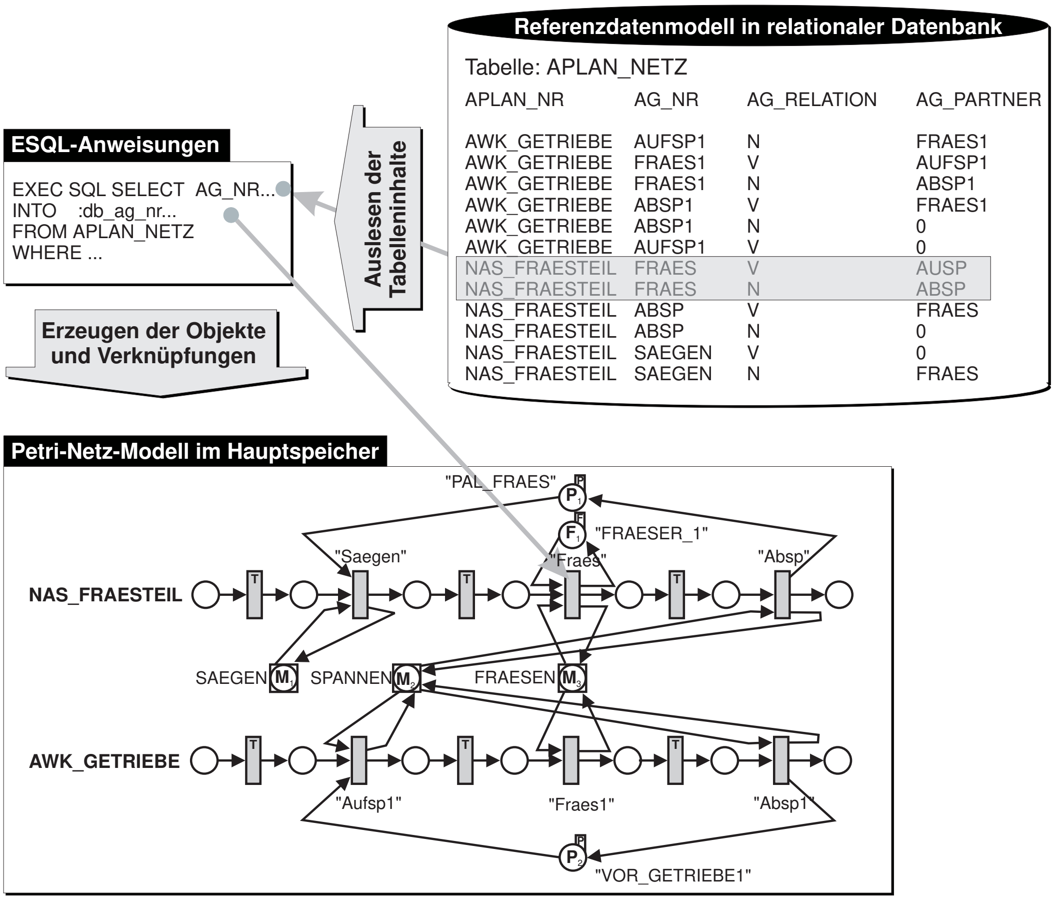



Abbildung 4.5: Netzgenerierung aus Arbeitsplänen, Auftrags- und Systemdaten

# 5 Leistungsbewertung mit farbigen stochastischen Petri-Netzen (Vorhaben Prof. Hommel)

Dieses Kapitel beschreibt die im Projekt von Prof. Hommel entwickelte Modellierungsmethode und ihre Anwendung auf das gemeinsame Beispiel der Arbeitsgruppe Fuzzy-Petri-Netze.
Innerhalb dieses Vorhabens wurde eine Modellierungs- und Analysetechnik auf der Basis zeiterweiterter farbiger Petri-Netze entwickelt, mit denen Fertigungsprozesse abgebildet und untersucht werden können. Dabei wird insbesondere auch die Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fertigungsanlagen unter Berücksichtigung ihres Ausfallverhaltens beachtet. Die entwickelte Methode sowie das im Projekt realisierte Softwarewerkzeug sind besonders für den Einsatz beim Entwurf oder der Änderungsplanung eines Fertigungsprozesses geeignet. Die Leistungsbewertung erfolgt mit Hilfe numerischer Analyseverfahren oder mit Simulation.
Das Kapitel ist wie folgt gegliedert: Der erste Abschnitt erläutert den Ablauf der Modellierungsmethode. Im Anschluß daran werden nach der Struktur des Fertigungssystems die Arbeitspläne modelliert. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der Analyseverfahren sowie der aus dem Modell zu erhaltenden Ergebnisse sowie Hinweisen auf Literaturstellen.

## 5.1 Modellierungsmethode

Ziel des Projekts ist eine durchgängige Modellierungs- und Analysemethode. Insbesondere mit Hilfe der Leistungsbewertung der entstehenden Modelle soll eine schnelle und sichere Vorhersage von Leistungsparametern des geplanten Systems möglich sein. Verschiedene Varianten können dann miteinander verglichen und die beste ausgewählt werden. Damit ist indirekt eine Optimierung möglich, die ohne Modellierung und Bewertung nicht oder nur mit hohem Aufwand erreichbar ist.
Abbildung 5.1 zeigt den Ablauf der Modellierung und Untersuchung eines Fertigungssystems mit der vorgeschlagenen Methode. Ausgangspunkt sind die für die Modellierung notwendigen Daten, die z.B. aus einer Layoutskizze des Fertigungssystems, einer Beschreibung der Eigenschaften der Betriebsmittel und den Arbeitsgängen bestehen können. Auf der linken Seite ist der funktionale und auf der rechten Seite der strukturelle Teil der Beschreibung dargestellt.
Für die einfache und komfortable Modellierung von Fertigungssystemen wurde eine spezielle Art farbiger Petri-Netze definiert [ZIM94, ZB95, ZIM95]. Damit ist der Modellierer in der Lage, Modelle der Struktur und der Arbeitspläne zu entwerfen. Durch die Beschränkung der verwendbaren Typen (Farben) von Marken ist es nicht mehr notwendig, umfangreiche textuelle Beschriftungen und programmähnliche Konstrukte anzugeben. Die Verständlichkeit und Übersichtlichkeit der Modelle wird dadurch verbessert. Mit diesen Petri-Netzen können die Modelle der Struktur und der Arbeitspläne direkt erstellt werden.

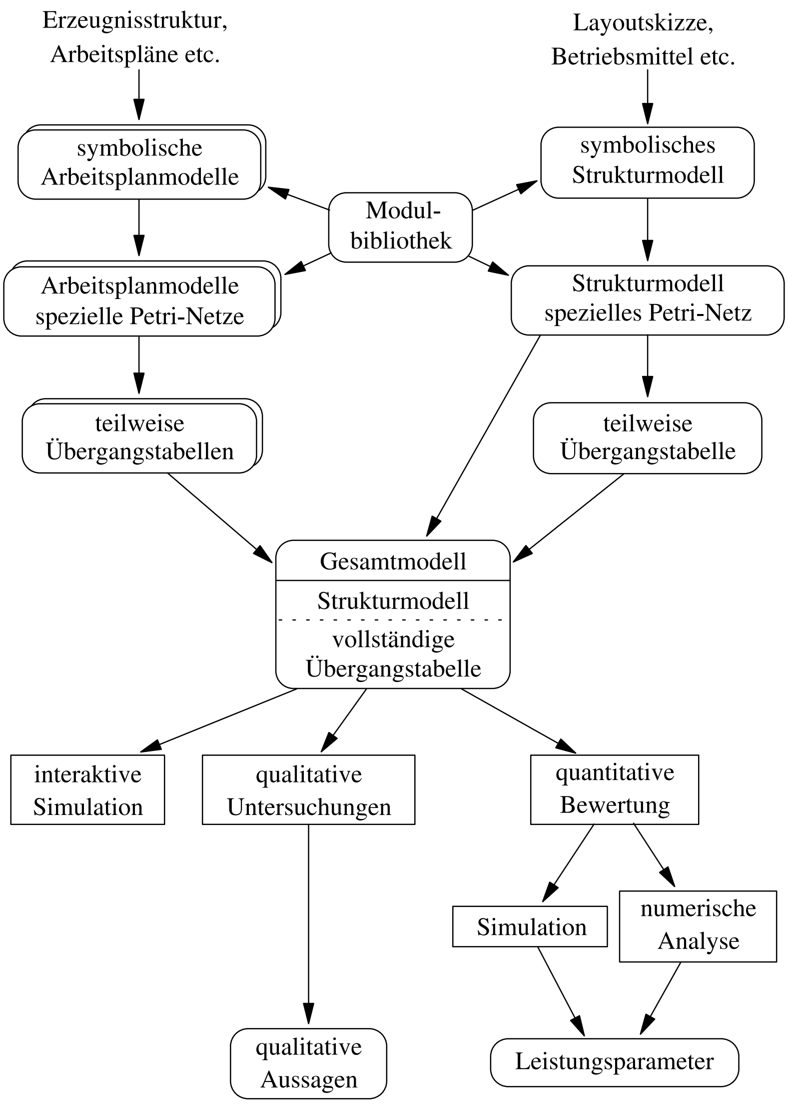



Abbildung 5.1: Überblick über die Modellierungs- und Bewertungsmethode

Die alternative Modellierung eines Fertigungssystems mit Funktionssymbolen ermöglicht es jedoch auch Entwicklern ohne die Kenntnis von Petri-Netzen, die entwickelte Methode zu verwenden. Dabei wird ebenfalls zwischen Struktur des Fertigungssystems und den Arbeitsplänen getrennt. Diese symbolischen Modelle können automatisch in ein spezielles Petri-Netz umgewandelt werden.

Um oft auftretende Modellteile nicht immer wieder neu spezifizieren zu müssen, wird eine erweiterbare Modulbibliothek zur Verfügung gestellt. Einander ähnliche Teilmodelle können aus demselben Grundmodell abgeleitet werden. Dazu werden die in der Bibliothek enthaltenen Modelle mit den gewünschten Parametern instanziiert und in das Modell eingesetzt. Die Modulbibliothek wird außerdem für die Erzeugung von speziellen Petri-Netzen aus symbolischen Modellen verwendet.

Aus den Modellen der Struktur und der Arbeitspläne wird dann automatisch ein Gesamtmodell berechnet. Dies enthält neben dem Strukturmodell die Informationen aus den verschiedenen Arbeitsplänen, die in sogenannten Übergangstabellen vom Modellierer versteckt enthalten sind. Es entsteht ein das gesamte Verhalten modellierendes spezielles Petri-Netz, welches im Anschluß qualitativ

und quantitativ untersucht werden kann. Dazu wurden existierende Methoden für die spezielle Modellart angepaßt [ZBH96].
Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Methode wurden die entwickelten Verfahren in einem Softwarewerkzeug als Teil von TimeNET [GZKH94, ZGKHZ97] realisiert sowie in Zusammenarbeit mit einem Praxispartner eine reale Fertigungsanlage untersucht [ZDH96].

### 5.2 Modellierung der Struktur des Fertigungssystems

Eine zentrale Anforderung an die Modellierung eines Fertigungssystems ist die Trennung zwischen Ressourcen- und Arbeitsplanbeschreibung im Modell. Dies dient nicht nur der besseren Verständlichkeit, sondern ist vorteilhaft, weil Arbeitspläne sehr viel häufiger geändert werden als z.B. das Layout eines Fertigungssystems. Eine grundlegende Eigenschaft der in diesem Projekt entwickelten Modellierungsmethode ist darum die getrennte Modellierung beider Aspekte mit spezialisierten Petri-Netzen.
Die Beschreibung eines Fertigungssystems setzt sich aus je einem speziellen Petri-Netz der Struktur und denen der Arbeitspläne zusammen. Jedes der Modelle besitzt eine Primärseite, von der aus durch Vertretertransitionen eine hierarchische Verfeinerung möglich ist. Das Strukturmodell beschreibt die strukturellen, arbeitsplanunabhängigen Eigenschaften des zu modellierenden Fertigungssystems. Die Modelle der Arbeitspläne beschreiben die zur Fertigung eines Produktes notwendigen Arbeitsschritte mit einem Pfad durch die Struktur.
Damit wird eine klare Trennung zwischen Struktur und Funktion des Fertigungssystems eingeführt, wobei für beide Modellteile die im Projekt entwickelten Petri-Netze verwendet werden. Für die Netzklasse werden die erlaubten Farbtypen der farbigen Petri-Netze eingeschränkt. Als Farben bzw. Typen von Marken werden nur zwei Arten zugelassen: ungefärbte, ununterscheidbare Marken für logische Zustände und die Farbe „Produkt“. Diese entsprechen z.B. einem Werkstück oder einem Werkstückträger im Fertigungssystem. Damit kann der Materialfluß getrennt von den Zustandsübergängen der Betriebsmittel modelliert werden.
Elementarstellen können nur elementare Marken aufnehmen und werden wie in klassischen Petri-Netzen durch dünne Kreise dargestellt. Mit ihnen können z.B. das Ausfallverhalten von Betriebsmitteln, die Verfügbarkeit von Hilfsstoffen sowie ganz allgemein Zustände von Ressourcen abgebildet werden. Produktstellen sind dementsprechend den Produktmarken vorbehalten und werden zur sichtbaren Unterscheidung als dicke Kreise gezeichnet. Sie repräsentieren Orte, an denen sich Objekte im Fertigungsprozeß befinden können. Beiden Stellenarten können Kapazitäten zugeordnet werden, die ihre maximale Aufnahmefähigkeit für Marken beschränken.
Transitionen modellieren Ereignisse bzw. Aktivitäten, die den Zustand des Modells verändern. Sie können dabei Marken von ihren Eingangsstellen abziehen und (möglicherweise andere) Marken auf ihren Ausgangsstellen ablegen. Zeitlose Transitionen schalten ohne Zeitverzögerung und werden als dünne gefüllte Rechtecke dargestellt. Wird dagegen eine zeitbehaftete Transition schaltfähig, muß zunächst eine von der Schaltzeitverteilung abhängige Zeit vergehen, bevor die Transition schaltet.

Diese Transitionen werden als dicke Rechtecke dargestellt. Aus den durch die Transitionen beschriebenen lokalen Zustandsänderungen im Modell ergibt sich das Verhalten des Modells, das einen stochastischen Prozeß beschreibt. Transitionen können Schaltbedingungen besitzen. Dabei handelt es sich um logische, markierungsabhängige Ausdrücke, die Wahr sein müssen, damit die Transition schalten kann.

In der verwendeten Art Petri-Netze sind ausschließlich Kanten zugelassen, auf denen sich tatsächlich Marken „bewegen“ können, also keine hemmenden oder Testkanten. Dies erhöht die Verständlichkeit der Modelle, denn nur Bewegungen von Objekten bzw. Zustandsänderungen werden grafisch dargestellt. Andere Kanten sind nicht notwendig, da logische Bedingungen ohne Einschränkung der Modellierungsmächtigkeit in Schaltbedingungen und Kapazitäten angegeben werden können. Die verwendeten Kanten verbinden jeweils genau eine Transition mit einer Stelle und werden als Linien mit einem Pfeil am Ende dargestellt. Der Typ der Kante entspricht immer dem verbundenen Stellentyp. Dementsprechend werden Elementar- und Produktkanten auch grafisch unterschieden.

Die hierarchische Modellierung ermöglicht es, ein komplexes Modell aus Teilmodellen zusammenzufügen, die Teile der Beschreibung auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen enthalten. Dazu sind die verwendeten Petri-Netze aus Seiten aufgebaut. Ausgehend von der zentralen obersten Primärseite können Seiten Vertretertransitionen enthalten, die als Platzhalter für Seiten auf der nächstniedrigeren Hierarchiestufe dienen.

Wie in Abbildung 5.2 zu sehen, werden einfache Maschinen durch normale Transitionen modelliert (im Beispiel die Be- und Entladevorrichtungen der Stationen). Kompliziertere Betriebsmittel wie beispielsweise das fahrerlose Transportsystem (Transition *FTS*) sind als Vertretertransition modelliert, denn ihr Verhalten läßt sich nicht allein durch das Schalten einer Transition modellieren. Das gezeigte Strukturmodell orientiert sich soweit wie möglich am Layout der tatsächlichen Anlage, um das Verständnis zu erleichtern.

Die Orte, an denen sich Werkstücke bzw. Paletten auf dieser Betrachtungsebene aufhalten können, werden mit dick gezeichneten Produktstellen modelliert. Dazu gehören die Palettenpuffer und die Bearbeitungsstellen innerhalb der Stationen. Jede Kante im Modell steht für einen möglichen Weg eines Produktes im Fertigungssystem in Pfeilrichtung (z.B. die Kante zwischen *Stangenlager* und *StangenP*) oder für die Möglichkeit, den Zustand einer Marke in einer Stelle als Ergebnis einer Bearbeitung zu verändern (z.B. die Kanten zwischen *FraesStation* und *FraesPlatz*). Kanten des zweiten Typs treten typischerweise doppelt auf, also als Verbindung in beiden Richtungen zwischen Transition und Stelle. Durch die Darstellung beider Richtungspfeile übereinander entstehen Doppelpfeile, die aber in Wirklichkeit zwei eigenständige Kanten sind.

Mit dem Strukturmodell werden alle „Fähigkeiten“ des Fertigungssystems dargestellt. Betriebsmittel, die hier nicht beschrieben wurden, sind im Modell nicht bekannt und können später nicht in den Arbeitsplänen verwendet werden. Die Attribute von Objekten im Strukturmodell beschreiben die unabhängig von den Arbeitsplänen geltenden Standardwerte, z.B. für Bearbeitungszeiten.

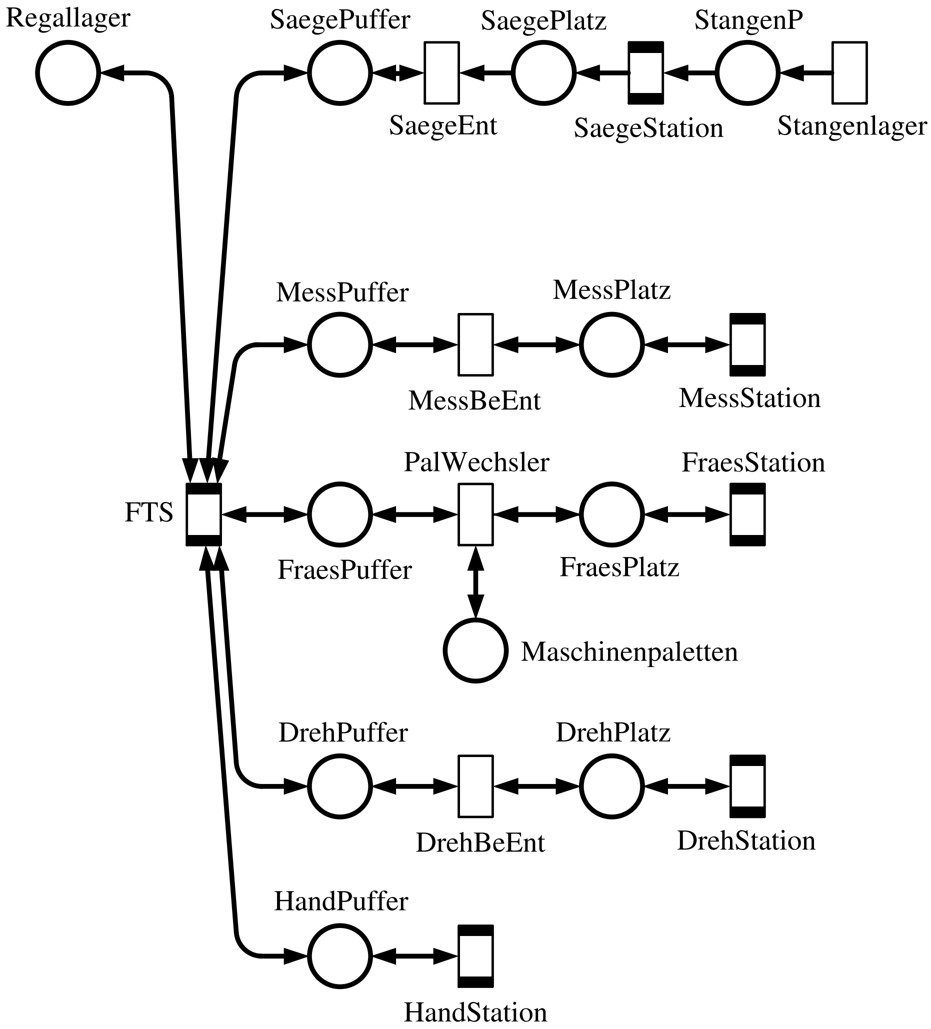



Abbildung 5.2: Primärseite des Beispiel-Fertigungssystems

In unserem Beispiel müssen auf der Primärseite die Schaltzeitverteilungen und die Schaltbedingungen für die einfachen Transitionen angegeben werden.

Für komplexe technische Systeme wie Fertigungssysteme ist die gemeinsame Darstellung aller notwendigen Informationen ab einer gewissen Größe nicht mehr möglich. Dementsprechend werden Techniken zur Abstraktion und Verfeinerung benötigt, die durch die hierarchische Modellierung eröffnet werden. Vertretertransitionen stehen dabei für Unterseiten eines Modells, also Beschreibungen auf einer tieferen Ebene.

Die Vertretertransition *SaegeStation* auf der Primärseite entspricht der Sägestation, die das aus dem Lager angelieferte Stangenmaterial auf die jeweils benötigte Länge absägt. Abgesägte Werkstücke werden von der Stelle *SaegePlatz* aus auf eine Palette gelegt, die sich im Modell in der Stelle *SaegePuffer* befindet.

Auf der in Abbildung 5.3 dargestellten Unterseite befinden sich darum die gestrichelt gezeichneten Anschlußstellen *StangenP* und *SaegePlatz*, die die Verbindung zu den die Vertretertransition *SaegeStation* umgebenden Stellen auf der Primärseite herstellen. Die zeitbehaftete Transition *Bearbeitung* modelliert den eigentlichen Bearbeitungsschritt.

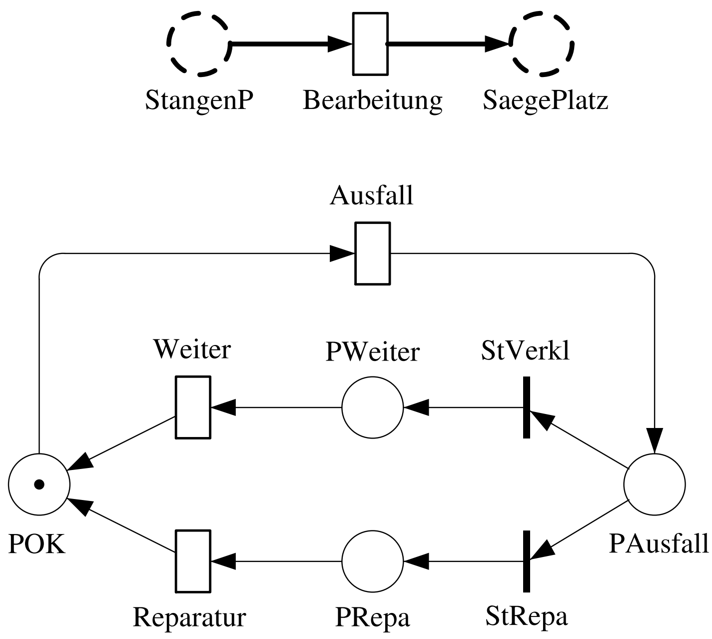



Abbildung 5.3: Unterseite Sägestation

Im unteren Teil des Bildes ist das (angenommene) Ausfall- und Reparaturverhalten der Sägestation modelliert. Dazu werden dünn gezeichnete Elementarstellen und –kanten verwendet. Normalerweise ist die Station funktionstüchtig (Marke in *POK*). Fällt sie aus (Transition *Ausfall* schaltet), kann es sich entweder um eine kurze Störung oder einen längeren Ausfall handeln, der den Eingriff eines Maschinenwarts erfordert. Die Wahrscheinlichkeiten für diese beiden Möglichkeiten werden an den zeitlosen Transitionen *StVerkl* (Störung ist nur eine kurze Verklemmung) und *StRepa* (eine Reparatur ist notwendig) spezifiziert. Sie schalten die Elementarmarke in eine der beiden Folgestellen *PWeiter* oder *PRepa*. Die Reparatur (Transition *Reparatur*) oder das Ende der Störung (Transition *Weiter*) bringt die Station wieder in einen funktionstüchtigen Zustand (Marke in *POK*). Durch eine Schaltbedingung wird erreicht, daß die Transition *Bearbeitung* nur dann aktiviert werden kann, wenn sich eine Marke in *POK* befindet.

Um einmal definierte Teilmodelle mehrfach in ein Modell einsetzen zu können, wird eine entsprechende Bibliothek zur Verfügung gestellt. Ein solches Teilmodell sollte ein relativ abgeschlossenes Objekt eines realen Fertigungssystems sein, wie etwa eine Maschine oder ein Lager eines bestimmten Grundtyps. Fertigungssysteme sind dafür recht gut geeignet, da einige Typen von Bausteinen immer wieder mit unterschiedlichen Parametern auftauchen. Durch die Verwendung von vordefinierten Bibliotheksmodulen wird die Erstellung insbesondere von großen Modellen einfacher und weniger fehleranfällig.

Ein Bibliotheksmodul kann eine ganze Klasse einander ähnlicher Maschinen, Transporteinrichtungen o.ä. beschreiben, da durch verschiedene zusätzliche Konstrukte eine Art generisches Modell erstellt wird. Zur Beschreibung eines solchen Teils eines Fertigungssystems gehört neben dem Strukturmodell auch eine generische Beschreibung der möglichen Arbeitspläne für dieses Strukturmodell. Diese werden mit einem speziellen assoziierten Petri-Netz abgebildet, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben sind. Struktur- und Arbeitsplanmodell eines Bibliotheksmoduls können aus mehreren hierarchisch angeordneten Seiten bestehen.

## 5.3 Abbildung der Arbeitspläne

Nun werden die Arbeitspläne mit den speziellen Petri-Netzen modelliert. Dabei wird wie bei der Struktur mit den Primärseiten begonnen und dann die Verfeinerung der Vertretertransitionen vorgenommen. Die Modelle der Arbeitspläne beschreiben den bei der Fertigung eines Produktes zu durchlaufenden Pfad durch das Strukturmodell.

Daraus ergeben sich einige Besonderheiten für die Modelle zur Beschreibung der Arbeitspläne. Für jeden Arbeitsplan eines Fertigungsystems muß ein eigenes Arbeitsplanmodell erstellt werden. Jedes dieser Modelle beschreibt ausschließlich Fertigungsschritte, die zur Herstellung eines Produktes notwendig sind. Ein solches Modell enthält nur Stellen, Transitionen und Kanten, zu denen es eine Entsprechung im Strukturmodell gibt. Diese Zuordnung beginnt mit den Primärseiten und setzt sich auf allen untergeordneten Seiten fort. Die Attribute der Transitionen in den Arbeitsplanmodellen beschreiben Eigenschaften von Betriebsmitteln, die von dem ausgeführten Arbeitsschritt abhängen. Sie überschreiben dabei die Standardwerte aus dem Strukturmodell.

Da jedes assoziierte Petri-Netz einen Pfad durch die Struktur beschreibt, darf das Modell nur aus einer linearen Abfolge von Transitionen und Stellen bestehen, damit die Reihenfolge der Fertigungsschritte eindeutig festgelegt ist. Davon ausgenommen sind lediglich alternative Fertigungsabläufe sowie Montage- und Demontagevorgänge, für die spezielle Konstrukte zur Verfügung stehen. An den Produktkanten ist der Typ der transportierten oder bearbeiteten Marken (Werkstücke) verzeichnet.

In Abbildung 5.4 ist von den verschiedenen Arbeitsplänen die Primärseite des Arbeitsplanmodells für das Werkstück „Flöte“ dargestellt. Es wurde aus dem in der Beispielbeschreibung tabellarisch dargestellten Arbeitsplan gewonnen. Dabei muß das Strukturmodell (Abbildung 5.2) beachtet werden, um die gleichen Transitionen und Stellen zu verwenden. Die an den Kanten eingezeichneten Werkstückarten und Bearbeitungsschritte sind frei gewählt. Sie geben Aufschluß über den Werkstücktyp („F“ für Flöte) und seinen Bearbeitungszustand (beispielsweise „Gedreht“).

Neue zu bearbeitende Werkstücke werden dadurch erzeugt, daß eine Stange aus dem Stangenlager in die Sägestation transportiert wird. Dies wird durch die Transition *Stangenlager* im Arbeitsplanmodell abgebildet. Mit ihren Attributen kann festgelegt werden, wie oft ein solcher Auftrag eingelastet werden soll. In der *Saegestation* wird eine solche Stange in sechs Teile zersägt, die dann an anderen Stationen weiterbearbeitet werden können. Die sechs gesägten Flöten werden zusammen auf einer Transportpalette durch das System transportiert. Diese Transportkapazität kann, wie im Bild sichtbar, an den Kanten spezifiziert werden.

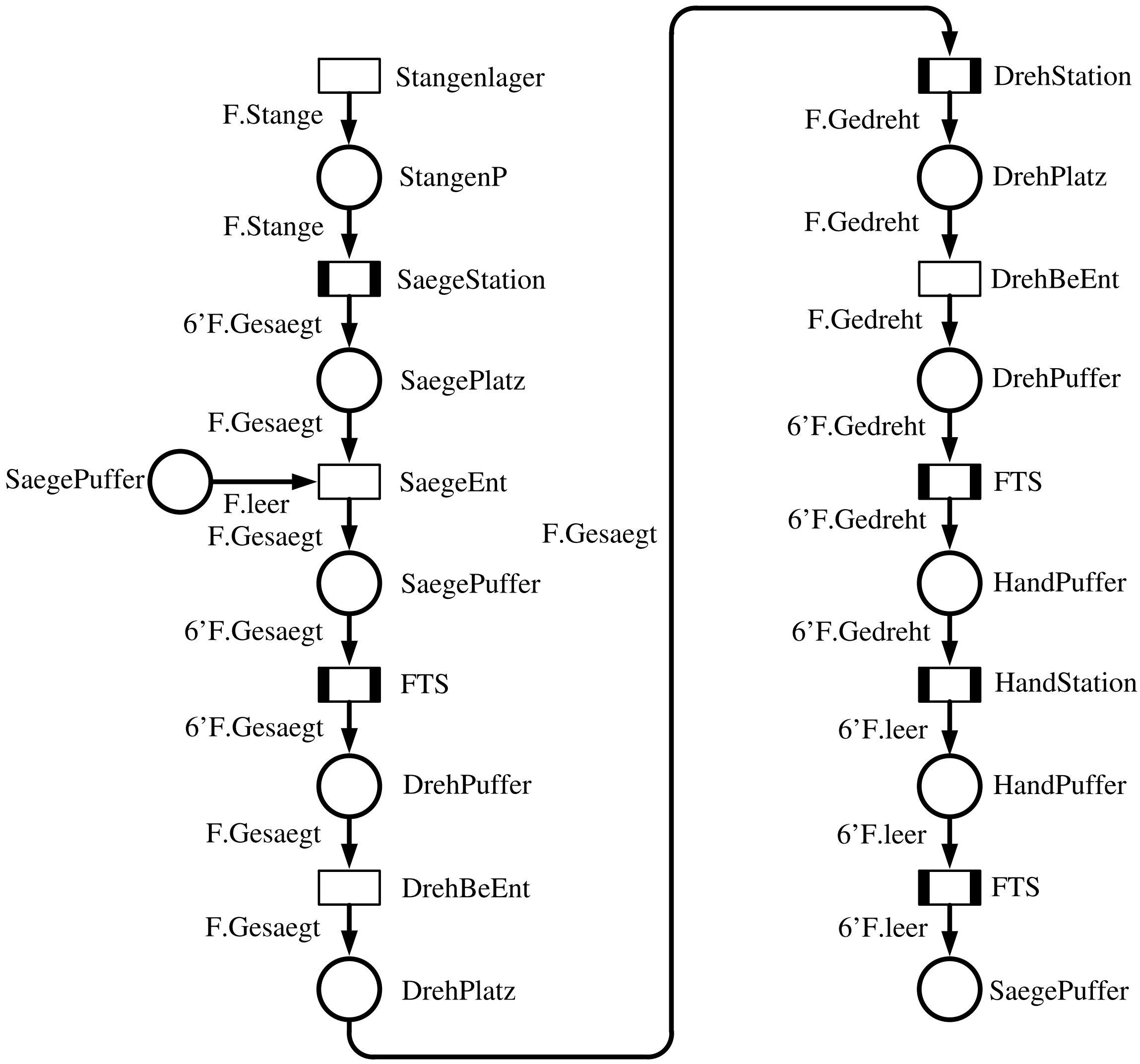



Abbildung 5.4: Modell des Arbeitsplans für das Werkstück „Flöte“

Die Entladevorrichtung der Sägestation (Transition *SaegeEnt*) plaziert die Werkstücke auf einer Transportpalette. Dies wird durch die Montage mit einer leeren Palette nachgebildet, die für Flöten vorgesehen ist (Markentyp *F.leer*). Gemeinsam werden sie dann vom FTS-Fahrzeug zum Puffer der Drehstation transportiert. Am Ende des Arbeitsplans werden die fertigen Flöten am Handarbeitsplatz (Transition *HandStation*) von der Transportpalette genommen und „verschwinden“ aus Sicht des Systems. Der Weg der leeren Transportpaletten zurück zur Sägestation wird durch den Rest des Arbeitsplanmodells beschrieben.

### 5.4 Untersuchung des Modells

In den vorherigen Abschnitten wurde beschrieben, wie jeweils ein Modell eines Fertigungssystems und der Arbeitspläne als spezielles Petri-Netz erzeugt wird. Nun muß aus diesen Teilen ein Gesamtmodell generiert werden, welches das Verhalten des Fertigungssystems bei der Produktion der beschriebenen Werkstücke spezifiziert. Im Projekt wurde eine automatisch ablaufende Methode entwickelt, die das Strukturmodell um die in den Arbeitsplanmodellen vorhandenen Informationen anreichert. Dadurch bleibt äußerlich das Modell der Struktur erhalten, was der Verständlichkeit dient. Letztlich werden durch diesen Vorgang die allgemeinen strukturellen Einschränkungen und Standardwerte des Fertigungssystems mit den arbeitsplanabhängigen Eigenschaften der Betriebsmittel verknüpft, die in den Arbeitsplänen angegeben sind.

Im Anschluß daran kann das Modell untersucht werden, was letztendlich zu Aussagen über das modellierte Fertigungssystem führt. Mit Hilfe des Markenspiels kann das Verhalten interaktiv simuliert werden, um ein besseres Verständnis des Modells zu erlangen oder dessen Funktionsweise zu überprüfen.

Im Anschluß kann eine Leistungsbewertung des modellierten Fertigungssystems stattfinden. Die für die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Fertigungssystems wichtigsten Aussagen sind quantitativer Art. Sie geben z.B. Auskunft über den Durchsatz oder die Auslastung. Ihre Bestimmung kann mit Hilfe von numerischer Analyse oder Simulation erfolgen. Mit dem Vergleich der Leistungsparameter für verschiedene Auslegungen oder Arbeitsplanvariationen kann z.B. die Produktivität erhöht oder die Pufferfüllstände verringert werden.

Die Berechnung von Kennzahlen des Modells oder ihre simulative Bestimmung erfolgt über eine Abbildung des Modellverhaltens auf einen stochastischen Prozeß. Dabei wird auf verschiedene Arbeiten am Institut von Prof. Hommel zurückgegriffen, die sich mit Simulation und Analyse allgemeiner Petri-Netze beschäftigen.

Bei der numerischen Analyse wird das gesamte Verhalten des Modells berechnet, welches durch den Erreichbarkeitsgraphen gegeben ist, und daraus dann die interessierenden Werte abgeleitet. Prinzipiell können also aus einer einmal berechneten Lösung später weitere Aussagen bestimmt werden. Im Unterschied dazu werden bei der Simulation nur die angegebenen Leistungsparameter während des Simulationslaufs beobachtet. Das Ende des Simulationsexperiments ist erreicht, wenn alle Leistungsparameter mit der geforderten Genauigkeit bestimmt wurden, so daß die Laufzeit eines Experiments im Gegensatz zur Analyse stark von der Wahl der Leistungsparameter abhängt.

Während die statistisch abgesicherte Bestimmung der Leistungsparameter aus einem Simulationslauf komplexer als ihre Berechnung aus einer numerisch erhaltenen analytischen Lösung ist, müssen innerhalb des Modells weniger Beschränkungen als bei der Analyse beachtet werden. Da der Erreichbarkeitsgraph und sich daraus ergebende Matrizen nicht aufgestellt werden, sind keine größeren Anforderungen an den verfügbaren Hauptspeicher zu stellen. Insbesondere lassen sich auch manche Modelle mit unendlich großem Zustandsraum untersuchen.

Dafür ist hier die Laufzeit eines Simulationsexperiments und die gesicherte Bestimmung der Leistungsparameter aus dem Simulationsverlauf problematisch. Beide Techniken sind darum als einander ergänzende Methoden zur Lösung derselben Aufgabe anzusehen, wobei jede ihre spezifischen Vorteile unter bestimmten Voraussetzungen hat. Die numerische Analyse sollte angewendet werden, solange es aufgrund der Einschränkungen möglich ist, da sie gesicherte Ergebnisse oft schneller als die Simulation ermittelt.

Beide Techniken sind in einem Softwarewerkzeug realisiert worden, so daß im Zusammenspiel mit der für die Modellierungsmethode entwickelten Benutzungsoberfläche ein komfortables Experimentierfeld für die Bewertung der Leistung und Zuverlässigkeit von Fertigungssystemen zur Verfügung steht.

## 5.5 Literatur


[GZKH94] R. German, A. Zimmermann, C. Kelling, G. Hommel. Modellierung und Bewertung von flexiblen Fertigungssystemen mit TimeNET. *CIM Management*, Heft 3, 1994, S. 24–27.

[ZB95] A. Zimmermann, S. Bode. Modellierung von Fertigungssystemen und Arbeitsplänen mit farbigen Petrinetzen. *4. Fachtagung Entwurf komplexer Automatisierungs-systeme*, Braunschweig 1995, S. 249–262.

[ZBH96] A. Zimmermann, S. Bode, G. Hommel. Performance and Dependability Evaluation of Manufacturing Systems Using Petri Nets. *1st Workshop on Manufacturing Systems and Petri Nets, 17th Int.Conf. on Application and Theory of Petri Nets*, Juni 1996, Osaka, Japan, S. 235–250.

[ZDH96] A. Zimmermann, K. Dalkowski, G, Hommel. A Case Study In Modeling And Performance Evaluation Of Manufacturing Systems Using Colored Petri Nets. *Proc. 8th European Simulation Symposium*, Genua, Italien, 1996, S. 282–286.

[ZIM94] A. Zimmermann. A Modeling Method for Flexible Manufacturing Systems based on Colored Petri Nets. in: *Proc. Int. Workshop on New Directions of Control and Manufacturing*, Hong Kong, 1994, S. 147–154.

[ZIM95] A. Zimmermann. Modeling of Manufacturing Systems and Production Routes Using Colored Petri Nets. *3rd IASTED Int. Conf. on Robotics and Manufacturing*, Cancún, Mexico, 1995, S. 380–383.

[ZIM97] A. Zimmermann. *Modellierung und Bewertung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen.* Eingereicht als Dissertation an der TU Berlin, März 1997.

[ZGKHZ97] A. Zimmermann, R. German, Ch. Kelling, G. Hommel, R. Zijal. TimeNET 2.0 – ein Werkzeug zur Modellierung mit zeiterweiterten Petri-Netzen. *5. Fachtagung Entwicklung komplexer Automatisierungssysteme,* Braunschweig, Mai 1997, S. 733.

# 6 Vergleich der Verfahren

Nach der Modellierung des gemeinsamen Beispiels mit Hilfe der einzelnen Modellierungsmethoden werden diese im folgenden Abschnitt miteinander verglichen. Im Interesse einer systematischen und übersichtlichen Darstellung wurden zunächst die Kriterien ausgewählt, anhand deren die Methoden verglichen werden. Die Teilnehmer der Arbeitsgruppe legten dazu folgende Punkte fest:

1. Das zugrundeliegende Beschreibungsmittel bzw. die verwendete Art Petri-Netze,
2. die Methode der Gewinnung des Modells eines Fertigungssystems,
3. der Zeithorizont der Voraussagen bzw. der Bewertung des Modells,
4. das spezielle Anwendungsgebiet innerhalb der Fertigungssysteme,
5. der Personenkreis im Lebenszyklus eines Fertigungssystems, den die Methode unterstützt,
6. die Art der Kennzahlen bzw. Eigenschaften des Fertigungssystems, die durch die Anwendung der Modellierung und Untersuchung verbessert werden, sowie
7. die grundsätzliche Zielrichtung der Verfahren sowie Besonderheiten.

Jeder Teilnehmer gab auf dem letzten Treffen der Arbeitsgruppe für die von ihm eingesetzte Methode Erläuterungen zu den genannten Punkten. Mit Hilfe der Angaben werden im folgenden die Methoden einander gegenübergestellt. Dies geschieht nacheinander für die aufgelisteten Kriterien.

## 6.1 Art des Beschreibungsmittels

Die im Projekt von Prof. Fengler eingesetzte Modellklasse basiert auf farbigen Petri-Netzen, bei denen Marken Attribute besitzen. Diese Attribute können bestimmte, von ihrem Typ abhängige Werte annehmen. Abhängig von den Attributwerten der zum Schalten einer Transition notwendigen Marken wird die Entscheidung getroffen, welche Transition mit welcher Markenkombination zuerst schaltet. Dabei werden die Attributwerte einer Fuzzy-Bewertung unterzogen. Damit ist es möglich, Aussagen wie „sehr dringliche Aufträge haben Vorrang" in Schaltregeln abzubilden, wenn die Dringlichkeit eines Auftrags in der Marke beispielsweise als Zahl dargestellt wird. Marken und das Schalten von Transitionen sind weiterhin „scharf" wie in normalen Petri-Netzen. Fuzzy-Konzepte werden lediglich eingesetzt, um Konflikte zwischen verschiedenen Schaltmöglichkeiten einer Transition so aufzulösen, daß bestimmten Regeln gefolgt wird. Damit wird beispielsweise entschieden, welcher Auftrag zuerst durch eine Maschine bearbeitet wird bzw. welche Maschine bevorzugt durch einen besonders qualifizierten Arbeiter bedient wird. Durch diese Modellklasse wird erreicht, daß auch ungenaue oder schwer formalisierbare Regeln abgebildet werden können.

Den Transitionen sind feste Schaltzeiten zugeordnet, so daß eine zeitabhängige Bewertung ermöglicht wird. Marken müssen eine bestimmte Zeit warten, bevor sie durch das Schalten einer Transition weitergereicht werden. Das Modell kann hierarchisch durch Stellen- oder Transitionsverfeinerung gegliedert werden.

Die Modellklasse im von Prof. Hommel bearbeiteten Projekt basiert auf zeiterweiterten farbigen Petri-Netzen, die speziell für das Anwendungsgebiet der Fertigungssysteme angepaßt wurden. Eine

Beschränkung auf die bei der Modellierung von Fertigungssystemen typischen Elemente führt zu einfachen Modellen, die ohne umfangreiche Textbeschriftungen auskommen. Dazu wurden zwei Arten von Stellen und Markentypen eingeführt, wobei eine für Werkstücke und andere bewegte Objekte im Fertigungsprozeß eingesetzt wird, während die andere zur Abbildung von Betriebsmittelzuständen verwendbar ist. Es werden keine Fuzzy-Konzepte eingesetzt.
Transitionen sind Schaltzeiten zugeordnet, die neben festen Werten auch zufällig verteilt sein können. Dabei kann aus einer Vielzahl von Verteilungen ausgewählt werden. Dies ist insbesondere für die Abbildung von Ausfällen notwendig, die Voraussetzung für die Bewertung der Zuverlässigkeit ist.
Eine Hierarchisierung ist über die Verfeinerung von Transitionen möglich. Die Transitionen wurden ausgewählt, da sie erfahrungsgemäß als aktive Betriebsmittel die entscheidenderen Elemente eines Fertigungssystems darstellen.
Im von Prof. Weck verfolgten Forschungsvorhaben werden spezielle farbige Petri-Netze eingesetzt. Die Schaltvorgänge sowie Marken und ihre Attribute sind diskret. Den Transitionen sind feste Schaltzeiten zugeordnet, mit denen beispielsweise Transport- oder Bearbeitungszeiten abgebildet werden.
Zur besseren Abbildbarkeit der Fertigungsprozesse wurden eine Reihe spezieller Stellen und Transitionen entwickelt. Dazu gehören Stellen, die speziell in Arbeitsplänen eingesetzt werden, als auch solche für Arbeitsplatzgruppen, Paletten oder Fertigungshilfsmittel. Marken, die sich auf diesen Stellen befinden, modellieren jeweils ein entsprechendes Betriebsmittel bzw. einen Auftrag und haben eine angepaßte Attributmenge. Bei den Transitionen wird zwischen Bearbeitungs- und Transporttransitionen unterschieden.
In dieser Modellart konsumieren die Transitionen zu Beginn des Schaltvorgangs ihre Eingangsmarken und geben sie nach einer Schaltzeit wieder ab. Die Schaltzeiten sind fest. Da das Modell automatisch erzeugt wird (siehe weiter unten), ist keine Hierarchisierung notwendig.
Es ist möglich, als zusätzliche Information ein Schichtmodell an Betriebsmittel zu koppeln. Außerdem werden Kosteninformationen zu einzelnen Vorgängen abgebildet, die eine spätere Kostenoptimierung ermöglichen. Zur unscharfen Auflösung von Konflikten werden Fuzzy-Konzepte eingesetzt, beispielsweise um die Dringlichkeit eines Auftrags abzubilden.
Die in dem gemeinsamen Vorhaben von Prof. Lipp und Prof. Pritschow eingesetzte Modellierungsmethode läßt sich als zeitbewertete Fuzzy-Petri-Netze einordnen. Das Schalten der Transitionen wird aus unscharfen Bewertungen aus den Stellen und Transitionen abgeleitet, wobei sowohl statische (Schaltstellung der Transitionen oder Anzahl von Marken in der Stelle) als auch dynamische Merkmale (Änderung der Markenanzahl in den Stellen bzw. die Solländerung an Transitionen) berücksichtigt werden. Durch den Einsatz von sogenannten Potentialeigenschaften an Stellen sind damit Zeitvorgänge darstellbar, die zu einem nicht vorher bekannten Zeitpunkt unterbrochen werden können. Auf diese Weise kann man Montageabschnitte beschreiben, die in Abhängigkeit von der Auftragslage bzw. bei zusätzlichen Eilaufträgen unterbrochen werden

können. Das in der Fertigung übliche Splitten von Aufträgen kann somit durch ein zusätzliches Splitting der Operationen in Montageaufträgen ergänzt werden.
In der entwickelten Modellklasse sind im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Modellarten sowohl Bedingungen als auch Ereignisse unscharf. Insbesondere sind Fuzzy-Bewertungsfunktionen auch mit Stellen verknüpft. Diese werden während der Modellsimulation verwendet, wobei die sich in ihnen befindlichen Marken mit Fuzzy-Funktionen bewertet werden. Dies beeinflußt dann die Auswahl der nächsten zu schaltenden Transition. Es wird die Transition ausgewählt, durch die die Zugehörigkeit der Marken zu den Bewertungsfunktionen der Stellen am meisten verbessert wird. Dadurch läßt sich beispielsweise erreichen, daß Zwischenlager immer einen bestimmten Füllstand haben oder daß Werkstücke möglichst ohne Zeitverzug weiterbearbeitet werden.

## 6.2 Gewinnung des Modells

Das Modell eines Fertigungssystems wird im Projekt von Prof. Fengler durch den Modellierer eingegeben. Dabei wird nach Möglichkeit die Struktur bzw. die Topologie der Fertigungsanlage abgebildet. Dazu steht eine grafische Benutzungsoberfläche zur Verfügung. Über die hierarchische Verfeinerung ausgewählter Stellen oder Transitionen kann das Modell mit mehr Details abgebildet werden.
Arbeitsplaninformationen sind wie folgt in das Modell integriert: Transitionen enthalten Angaben über grundsätzliche Eigenschaften der modellierten Betriebsmittel, wie beispielsweise Transportzeiten oder Bearbeitungszeiten. Zusätzliche Informationen sind in den Attributen der Marken enthalten. Sie geben Auskunft über spezielle Eigenschaften des Fertigungssystems in Bezug auf diese Marken, wie die Dringlichkeit eines Auftrags (Marke modelliert Auftrag bzw. Werkstück) oder die speziellen Fähigkeiten eines Arbeiters (Marke modelliert Arbeiter).
Auch im von Prof. Hommel durchgeführten Vorhaben wird das Modell von Hand eingegeben. Dabei wird zwischen den Modellen der Arbeitspläne und der Struktur unterschieden. Das Strukturmodell entspricht der Struktur bzw. Topologie der Fertigungsanlage. Arbeitsplanmodelle werden getrennt davon angegeben und beziehen sich auf Elemente der Struktur. Beide Modellteile verwenden die im Projekt entwickelte Art spezieller zeiterweiterter farbiger Petri-Netze. Im Strukturmodell werden die arbeitsplanunabhängigen Eigenschaften wie Transportdauern, Standardbearbeitungszeiten oder Zwischenausfallzeiten angegeben. Im Arbeitsplanmodell finden sich die vom Werkstück abhängigen Daten wieder, wie spezielle Bearbeitungszeiten, alternative Bearbeitungsmöglichkeiten sowie Montagevorgänge.
Die Modellierer wird durch eine grafischen Benutzungsoberfläche beim Prozeß der Modellerstellung unterstützt. Dabei kann er auf eine Modulbibliothek mit generischen Modellen zurückgreifen, die jeweils für eine Klasse ähnlicher Fertigungseinrichtungen stehen und parametrisierbar sind. Alternativ ist das Modell auch mit Funktionssymbolen beschreibbar, die danach automatisch in ein Petri-Netz-Modell umgewandelt werden und den Übergang zur Modellierung mit diesen so erleichtern.

Im Projekt von Prof. Weck wird im Unterschied zu allen anderen Vorhaben das Modell vollständig automatisch erzeugt. Dies geschieht, indem ein im Projekt entwickeltes Softwarewerkzeug an einen existierenden Fertigungsleitstand gekoppelt wird. Die Software des Leitstands beinhaltet ein Referenzdatenmodell in einer relationalen Datenbank, in der alle relevanten Daten zur Beschreibung des Fertigungsprozesses abgelegt sind. Dadurch kann zur Laufzeit des Prozesses für jede neue Untersuchung automatisch ein Petri-Netz-Modell aus den Daten gewonnen werden, welches dann den aktuellen Zustand des Fertigungssystems widerspiegelt. Auf diesen kann über eine Datenbankschnittstelle zugegriffen werden.

Die Struktur des Modells orientiert sich zunächst an den Arbeitsplänen, die als lineare Abfolge von Stellen und Transitionen abgebildet werden. Diese werden aus den tabellarisch vorliegenden Arbeitsplandaten erzeugt. Durch die gemeinsame Benutzung von Betriebsmitteln entstehen Verzögerungen gegenüber einem unabhängigen Fertigungsprozeß für jedes Werkstück.

Die verfügbaren Betriebsmittel werden durch Stellen abgebildet. Verbindungen zwischen Transitionen im Arbeitsplan und diesen Stellen modellieren die gegenseitige Beeinflussung der gefertigten Aufträge untereinander. Dabei kann von Betriebsmitteln abstrahiert werden, die keinen Engpaß darstellen, wie beispielsweise unkritische Transportmittel.

Der aktuelle Zustand des untersuchten Fertigungsprozesses beeinflußt die Markierung des Modells, also die Belegung der Stellen mit Marken. Diese Markierung wird als Startzustand für die folgende Simulation des Verhaltens verwendet.

In den Projekten von Prof. Lipp und Prof. Pritschow wird das Modell zum Teil manuell mit Hilfe einer grafischen Benutzungsoberfläche erstellt. Das Modell eines Fertigungssystems besteht hierbei aus zwei Teilen. Die statisch vorhandenen Ressourcen im System werden mit Hilfe einer Modellbibliothek modelliert. Dazu gehören beispielsweise Maschinen, Transportgeräte und Fertigungshilfsmittel. Die dynamisch in das System eingelasteten Aufträge werden in Form von Stellen-Transitions-Ketten automatisch aus den Auftragsdaten des übergeordneten Systems generiert und in das Modell eingefügt (bzw. gelöscht). Dabei findet eine Verknüpfung mit den Modellelementen der Ressourcen statt. Dafür wurde im Rahmen des Vorhabens eine Entwurfssprache entwickelt.

Die Modellerstellung erfolgt in der Regel direkt aus den Planungsdaten mittels einer objektorientierten Fachsprache oder im Dialog mit dem leitenden Ingenieur während der Laufzeit des Fuzzy-Petri-Netzes (FPN). Die Fachsprache entwirft also aus den Planungsdaten ein FPN, so daß ein Netzabwickler oder Problemlöser auf dieser Datenstruktur arbeiten kann. Die strikte Trennung zwischen der Datenstruktur des Netzes und der Inferenzkomponente sichert, daß zwischen den Inferenzschritten die Daten des Netzes beliebig verändert, optimiert oder angepaßt werden können. Für diese online-Anpassung der Netz-Datenstruktur werden Neuronale Netze verwendet, z.B. für die Auswahl gleichzeitig zu bearbeitender Aufträge (Projekt: Produktionsregler im Stahlwerk der Hüttenwerke Krupp Mannesmann), oder ein hierarchisches FPN aus zwei Ebenen, wo im oberen Netz die veränderlichen Auftragsstrukturen und im unteren Netz die relativ konstanten Bearbeitungsabschnitte angeordnet sind), oder über Koppelwerte aufrufbare Prozeduren (z.B. um vom Schaltzustand oder von individuellen Marken abhängig Parameter des Netzes zu verändern).

### 6.3 Zeithorizont der gewonnenen Aussagen

Innerhalb des durch Prof. Fengler bearbeiteten Projekts wird eine schnelle Voraussimulation des untersuchten Fertigungsprozesses vorgenommen, beispielsweise vor Schichtbeginn. Die gewonnenen Aussagen beziehen sich demnach vorwiegend auf einen Bereich von einer Schicht bis zu einer Woche im Voraus. Darüber hinaus kann bei Notwendigkeit einer Neuplanung die Simulationsmethode zu Rate gezogen werden, um Auswirkungen auf den laufenden Betrieb zu untersuchen.

Die Zielrichtung des Projektes von Prof. Hommel liegt im Design eines Fertigungsprozesses, also normalerweise lange vor der tatsächlichen Produktion. Für den Fall der Untersuchung einer geplanten Änderung beispielsweise der Auslegung einer Anlage läuft diese zwar schon, die gewonnenen Aussagen beziehen sich aber erst auf den veränderten Fertigungsprozeß. Dementsprechend werden mit der Methode Eigenschaften des Fertigungssystems berechnet, die einen eher langfristigen Charakter haben. Dabei kann zwischen zwei Arten von Aussagen unterschieden werden. Zum einen werden die Kennzahlen berechnet, wenn sich das System im Gleichgewicht (eingeschwungenen Zustand) befindet. Zum anderen wird bestimmt, was innerhalb einer bestimmten Zeitspanne nach Start des Systems geschieht. Die erforderlichen Rechenzeiten sind sehr unterschiedlich und von Modellgröße sowie gewünschter Genauigkeit abhängig. Sie liegen maximal im Bereich mehrerer Stunden, was aber während der Designphase akzeptabel ist.

Im von Prof. Weck verfolgten Projekt wird eine Online-Feinplanung und Optimierung durchgeführt. Wie oben bereits beschrieben, wird dazu in gewissen Abständen der Zustand des Fertigungsprozesses aus einer Datenbank ausgelesen und daraus automatisch ein Modell generiert. Dieses wird dann während des weiteren Ablaufs des untersuchten Prozesses simuliert, um einen optimalen Plan für die zukünftigen Fertigungsabläufe zu erhalten. Dementsprechend ist der Zeithorizont sehr kurzfristig, und reicht in Abhängigkeit vom Auftragsvolumen und der Fertigungsart von einer Minute bis zu mehreren Schichten.

Das Softwarewerkzeug zur Modellgenerierung und Online-Feinplanung ist direkt mit dem Leitstand des Fertigungssystems gekoppelt, und die Rechenzeit für eine Optimierung liegt aufgrund der einzuhaltenden Reaktionszeiten bei maximal 15 Minuten.

Der Zeithorizont der Untersuchungen in den Projekten von Prof. Lipp und Prof. Pritschow kann im Bereich von einer Schicht bis zu mehreren Schichten und Tagen liegen. Die Bewertung des Modells erfolgt je nach Komplexität des Modells (Anzahl Aufträge und Ressourcen) sowie der Vorgangsdauer der Fertigungsoperationen zyklisch in einem Raster von wenigen Minuten bis zu einer oder mehreren Stunden. Alternativ kann eine Untersuchung auch mit jeder Änderung im Auftragsbestand oder bei Bedarf manuell ausgelöst werden.

## 6.4 Spezielles Anwendungsgebiet

Als Anwendungsgebiet des von Prof. Fengler bearbeiteten Vorhabens ist vorrangig die Werkstattfertigung für Einzel- und Kleinserien vorgesehen. Beispielsweise besteht eine Kooperation mit einer Firma des Spezialmaschinenbaus. Aufgrund der dabei auftretenden sehr kleinen Losgrößen sowie einem hohem Anteil an manuellen Arbeitsgängen bietet die Abbildung mit den Fuzzy-erweiterten Petri-Netzen Vorteile. Die Modellierung menschlicher Einflüsse, unscharfer Regeln sowie unvollständigen Wissens über den Fertigungsprozeß ist hiermit besonders gut möglich.
Im Projekt von Prof. Hommel werden allgemeine Fertigungs- und Montagesysteme abgebildet und untersucht. Es werden von der Modellierungstechnik her keine grundsätzlichen Einschränkungen des Anwendungsgebiets vorgenommen. Erfahrungsgemäß erweisen sich die entwickelten Techniken aber als besonders für automatisierte Fertigungsabläufe mit komplexen Arbeitsabläufen geeignet. Dabei wird insbesondere Wert auf die einfache Modellierung des Ausfall- und Reparaturverhaltens von Betriebsmitteln gelegt, um deren Einfluß auf die Kennzahlen untersuchen zu können.

Aufgrund der Notwendigkeit einer Kopplung des entwickelten Softwarewerkzeugs an einen vorhandenen Fertigungsleitstand ist die im Projekt von Prof. Weck entwickelte Modellierungstechnik für automatisierte Fertigungssysteme mit automatisiertem Materialfluß anwendbar. Dies ist darin begründet, daß das Fertigungsleitsystem zu jedem Zeitpunkt alle Informationen über den aktuellen Zustand des Fertigungssystems besitzen muß, die dann über eine Datenbankschnittstelle an das Softwarewerkzeug übertragen werden. Dabei werden nur Fertigungs-, aber keine Montagevorgänge berücksichtigt.

Das Anwendungsgebiet des von Prof. Lipp und Prof. Pritschow entwickelten Modellkonzeptes liegt im Bereich der Echtzeit-Entscheidungen in der operativen Produktionssteuerung. Es befindet sich demnach zwischen einer Offline-Reihenfolgeoptimierung (z.B. im Fertigungsleitstand) und dem operativen Produktionsprozeß. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Gebiet der Werkstattsteuerung, in dem das Erfahrungswissen und die Flexibilität der dort tätigen Werker eine Rolle spielt.
Der Ansatz konnte sowohl in verfahrenstechnischen als auch in fertigungstechnischen Produktionsprozessen eingesetzt werden. Einige Beispiele, die in Zusammenarbeit mit Praxispartnern bearbeitet wurden: Dispatchersteuerung im Zellstoffwerk Rosenthal, Steuerung eines Glaspreßautomaten in Hosena und Dampfkoordinierung bei einer Zellstoffkocherei.

## 6.5 Unterstützter Personenkreis

Das Projekt von Prof. Fengler hilft dem Werkstattleiter oder dem für die Planung und Durchführung des täglichen Produktionsablaufes verantwortlichen Meister, Entscheidungen innerhalb des täglichen Betriebs sicherer zu treffen. Eine Voraussimulation ermöglicht es, Probleme und Engpässe frühzeitig zu erkennen und darauf geeignet zu reagieren.

Die im Projekt von Prof. Hommel entwickelte Modellierungs- und Untersuchungsmethode soll in der Designphase einer Fertigungsanlage, zur Engpaßbestimmung oder vor einer Umgestaltung eingesetzt werden. Dementsprechend werden die mit der Planung dieser Vorgänge betrauten Ingenieure unterstützt, die beispielsweise in der Fabrik- oder Fertigungsplanung tätig sind, oder entsprechende Berater.

Das im Projekt von Prof. Weck entwickelte Werkzeug wird als Erweiterung eines Fertigungsleitstandes betrieben. Dadurch wird der Fertigungssteuerer bzw. Anlagenbetreiber unterstützt. Schnelle Umplanungen zur Laufzeit des Fertigungsprozesses, die durch Störungen häufig auftreten können, werden so automatisiert und müssen nicht mehr manuell durchgeführt und in den Leitstand eingegeben werden.

Die in den Projekten von Prof. Lipp und Prof. Pritschow entwickelte Methode unterstützt die Personen, die mit der operativen Steuerung des Produktionsprozesses im Fertigungssystem betraut sind. Dazu zählen beispielsweise der Meister oder auch Werker.
Den Einsatz der Modelle erfolgt überwiegend für Produktionsregler, die mit einer feed-forward Komponente, also mit einer gewissen Vorwärtsbetrachtung (1 Stunde bis Tage) ergänzt werden. Dieses Vorwärtsspiel soll bei diskreten Prozessen präventive Entscheidungen ermöglichen, da bei diesen Systemen infolge großer Totzeiten die Steuerentscheidungen sonst viel zu spät ausgelöst werden könnten. Da Regler immer nur auf eine vorhandene Regelabweichung reagieren können, muß also während der Totzeit die Regelabweichung berechnet werden.

## 6.6 Verbesserte Kennzahlen und Eigenschaften

Abhängig vom Anwendungsfall werden durch die von Prof. Fengler entwickelte Simulationstechnik Kennzahlen wie beispielsweise Durchsatz oder Durchlaufzeit untersucht. Neben statistischen Kenngrößen wird außerdem bestimmt, ob das geplante Arbeitspensum ausführbar ist und wie hoch die Auslastung der Werker und Betriebsmittel ist.

In dem von Prof. Hommel durchgeführten Projekt werden durch numerische Analyse oder Simulation aus dem Modell vorrangig quantitative Kenngrößen wie Durchlaufzeiten, Durchsatz, Auslastung usw. berechnet. Diese sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines geplanten Fertigungsprozesses und darum während des Fabrikdesigns von besonderem Interesse. Dabei wird immer der Einfluß von Ausfällen beachtet, und es sind Aussagen über die Zuverlässigkeit des geplanten Systems möglich. Der Vergleich der Kennzahlen für verschiedene Auslegungen führt zu einer Optimierung.

Innerhalb des Projekts von Prof. Weck wird eine Online-Feinplanung mit Optimierung durchgeführt. Eine Optimierung zielt immer auf die Verbesserung einer Kennzahl, für die hier die Kosten des Fertigungsprozesses gewählt wurden. Im Interesse einer sehr fein abstimmbaren Verbesserung in bestimmten Richtungen können zum Beispiel Rüst-, Stillstands-, Fertigungs- und Terminabweichungskosten entsprechend eingestellt werden. Über eine Parameteranpassung und Gewichtungsfaktoren kann so die Zielrichtung der Optimierung beeinflußt werden, beispielsweise für eine stärkere Beachtung der Termintreue. Auf diesem Wege lassen sich auch Durchlaufzeiten und andere Faktoren verbessern.

Durch die Methoden der Projekte von Prof. Lipp und Prof. Pritschow wird die Erreichung der Produktionsziele wie z.B. Durchlaufzeiten, Termintreue, Bestand, Auslastung und anderer verbessert.

### 6.7 Zielrichtung der Verfahren und Besonderheiten

Ziel des von Prof. Fengler durchgeführten Projekts ist die Unterstützung des Werkstattleiters bei der täglichen Planung des Schichtablaufs. Dabei wird insbesondere auf die durch Einzel- und Werkstattfertigung auftretenden Besonderheiten Rücksicht genommen. Der gewählte Fuzzy-Petri-Netz-Ansatz ermöglicht aus diesem Grund die Berücksichtigung menschlicher Faktoren, unscharfer Regeln, Eilaufträge sowie die Änderung der Bedienerverfügbarkeit.

Die Unterstützung des Designprozesses von Fertigungsanlagen ist die Zielrichtung des von Prof. Hommel verfolgten Projekts. Dabei werden stochastisch zeiterweiterte Petri-Netze eingesetzt, die Aufschluß geben über Leistung und Zuverlässigkeit der untersuchten Anlagen. Im Unterschied zu den anderen Methoden sind die entstehenden Modelle außer durch Simulation auch mit Hilfe der direkten numerischen Auswertung untersuchbar. Dies ermöglicht die schnelle Berechnung genauerer Ergebnisse.

Im von Prof. Weck geleiteten Forschungsvorhaben wird eine Online-Feinplanung sowie Optimierung zur Laufzeit des Fertigungsprozesses durchgeführt. Die Besonderheit besteht hier darin, daß das Modell automatisch aus den Daten eines Fertigungsleitstands gewonnen wird. Danach kann es simuliert werden, wobei Feinplanungsregeln eingesetzt werden. Dabei gibt es oft alternative Möglichkeiten, beispielsweise das Vorziehen von demnächst eintreffenden, wichtigeren Aufträgen gegenüber unwichtigeren, die sofort bearbeitet werden könnten. Eine Bewertung der

Ergebnisse unterschiedlicher Simulationsläufe und damit der verschiedenen Auswahlmöglichkeiten führt zu verbesserter Planung. Die Optimierung erfolgt in Richtung Kostenminderung.

Mit der durch die Arbeitsgruppen von Prof. Lipp und Prof. Pritschow entwickelten Methode soll grundsätzlich die Flexibilität der Abläufe im Produktionsprozeß durch die unscharfe Bewertung sowie die Integration von Erfahrungswissen besser genutzt werden. Dadurch kann auf Abweichungen vom optimalen Reihenfolgeplan kurzfristig so reagiert werden, daß die Produktionsziele möglichst gut erreicht werden. Das Besondere am Ansatz ist die unscharfe Bewertung der Elemente im Petri-Netz, die ein situationsangepaßt flexibles Schalten erlaubt.

# 7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht der Arbeitsgruppe „Fuzzy-Petri-Netze“ innerhalb des Schwerpunktprogramms Modellierung der Produktion wurden die eingesetzten Modellierungstechniken anhand eines gemeinsamen Beispiels miteinander verglichen.
Zusammenfassend läßt sich einschätzen, daß die Methoden aufgrund der ähnlichen Basis der Petri-Netze eine Reihe von Ähnlichkeiten aufweisen. Die Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe und der regelmäßige Informationsaustausch fördern die Anpassung und Weiterverwendung von Herangehensweisen und grundsätzlichen Erkenntnissen durch die verschiedenen Projekte. Über die Zeit der Zusammenarbeit ist so eine Ausnutzung von Synergien zu verzeichnen.
Auf der anderen Seite sind aufgrund der unterschiedlichen Anwendungs- und Zielrichtungen recht unterschiedliche Lösungen in den Projekten entstanden, die jeweils auf die bearbeiteten Probleme speziell zugeschnitten sind. Dies ist zum Teil auch auf die Kontakte mit Praxispartnern und das Aufgreifen ihrer aktuellen Probleme zurückzuführen.

Aufgrund der genannten Eigenschaften der Modellierungsmethoden wird die Zusammenarbeit durch die Teilnehmer der Arbeitsgruppe auch weiterhin als sinnvoll und wichtig für die Arbeit in den Projekten empfunden. Der vorliegende Bericht kann als Grundlage dafür dienen. Bereits durch die Arbeit daran konnte ein tieferes Verständnis der anderen Modellierungsmethoden durch die anderen Mitglieder der Arbeitsgruppe erreicht werden.
Es ist geplant, in jedem Antragszeitraum mindestens ein Treffen zu organisieren. Dabei steht die gegenseitige Information über die Forschungsrichtung der Projekte sowie über erzielte Ergebnisse im Vordergrund. Auch die Forschungsgruppen der aus dem Schwerpunktprogramm ausgeschiedenen Projekte werden dabei soweit wie möglich eingebunden.

Die Projektgruppe von Prof. Hommel bedankt sich bei allen, die an der Verfassung dieses Berichts mitgewirkt haben, für die gute Zusammenarbeit.