

UNIVERSITÄT LEIPZIG

**Institut für Produktionswirtschaft
und Industrielle Informationswirtschaft**

Marschnerstraße 31, 04109 Leipzig

Tel.: 0341/4941-182, Fax: -125

Arbeitsbericht Nr. 12

**Petrinetzbasierte Modellierung
komplexer Produktionssysteme**

Band 7: Fallstudie

von

Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski

<zelewski@hpswifa.wifa.uni-leipzig.de>

Leipzig 1995

Alle Rechte vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis zu Band 7

Seite

7	Eine Fallstudie zur Prozeßkoordinierung in Flexiblen Fertigungssystemen	1
7.1	Übersicht	1
7.2	Modellierung von Systemkomponenten	7
7.2.1	Modellierung von konkreten Objektarten	7
7.2.1.1	Modellierung mobiler Objektarten	7
7.2.1.1.1	Modellierung durch Marken	7
7.2.1.1.1.1	Modellierung von Werkstücken	7
7.2.1.1.1.2	Modellierung von Werkzeugen	20
7.2.1.1.2	Modellierung durch Netze	23
7.2.1.1.2.1	Modellierung von Transportmitteln	23
7.2.1.1.2.2	Modellierung von Arbeitskräften	94
7.2.1.2	Modellierung immobiler Objektarten	111
7.2.1.2.1	Modellierung von Bearbeitungsstationen	111
7.2.1.2.2	Modellierung von Lagerstationen	246
7.2.2	Modellierung der abstrakten Objektart "Aufträge"	277
7.3	Integration der Systemkomponenten	376
	Literaturverzeichnis zu Band 7	400

7 Eine Fallstudie zur Prozeßkoordinierung in Flexiblen Fertigungssystemen

7.1 Übersicht

Das Modellierungspotential des Petrinetz-Konzepts wird anhand einer Fallstudie verdeutlicht. Sie befaßt sich mit der Prozeßkoordinierung in Flexiblen Fertigungssystemen¹⁾. Im Vordergrund stehen dabei das Kernkonzept Synthetischer Netze und dessen Erweiterungen, die in den voranstehenden Kapiteln vorgestellt wurden. Hinzu kommen als Modellierungshilfe Kanal/Instanz-Netze.

Es liegt in der Natur von Fallstudien, daß sie nur exemplarischen Charakter besitzen²⁾. Dennoch sind in das anschließend präsentierte Koordinierungsmodell einige generell anwendbare Modellierungsstrategien eingeflossen. Dazu gehören im wesentlichen³⁾:

- die modulare Zerlegung des Netzmodells in Teilmodelle (modulare Modellierungsstrategie);
- die Verknüpfung von Teilmodellen durch Synchronisationsstellen (integrative Modellierungsstrategie);
- die hierarchische Netzverfeinerung oder -vergrößerung, bei der Makroknoten einer höheren Repräsentationsebene und Teilnetze einer tieferen Repräsentationsebene miteinander korrespondieren (vertikale Modellierungsstrategie);
- die inkrementelle Netzerweiterung auf derselben Repräsentationsebene (horizontale Modellierungsstrategie).

Die modulare Modellierungsstrategie⁴⁾ lehnt sich an das produktionswirtschaftliche Konzept der Baukastensysteme⁵⁾ an. Ein Flexibles Fertigungssystem wird daher nicht als Einheit modelliert, sondern zunächst in charakteristische Komponenten (Subsysteme) zerlegt⁶⁾. Als Systemkomponenten werden in der Fallstudie behandelt: Werkstücke, Werkzeuge, Transportmittel, Arbeitskräfte, Bearbeitungsstationen, Lagerstationen und Aufträge. Diese "Bausteine" werden als bewegliche Objekte (Marken) oder als Teilnetze (Netzmodule) repräsentiert.

Die integrative Modellierungsstrategie⁷⁾ gestattet es, die zuvor eingeführten Netzmodule⁸⁾ systematisch miteinander zu verknüpfen. Diese Modulintegration geschieht mit der Hilfe von Synchronisationsstellen. Eine Synchronisationsstelle bildet die Schnittstelle zwischen mindestens⁹⁾ zwei Netzmodulen. Es werden zwei verschiedene Arten von Synchronisationsstellen benutzt: Puffer- und Kommunikationsstellen. Eine Pufferstelle repräsentiert den Austausch materieller Objekte zwischen den modellierten Systemkomponenten. Dazu gehören vor allem die Ein- und Ausgangspuffer von Bearbeitungsstationen, an denen Werkstücke aus dem Transportsystem entnommen bzw. an das Transportsystem abgegeben werden. Eine Kommunikationsstelle dient dem Austausch von Informationen über die aktuellen Zustände der jeweils verknüpften Netzmodule¹⁰⁾. Besondere Bedeutung erlangen Kommunikationsstellen für die Einbettung des Auftragsmoduls in die Repräsentation des Produktionssystems. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, den Fortschritt der Auftragsabwicklung im Auftragsmodul einerseits und den Fluß der auftragszugehörigen Werkstücke durch das modellierte Flexible Fertigungssystem andererseits wechselseitig aufeinander zu beziehen.

Die vertikale Modellierungsstrategie umfaßt die Verfeinerung und die Vergrößerung von Netzen¹¹⁾. Dabei wird zunächst von dem Kanal/Instanz-Netz ausgegangen, das bereits an früherer Stelle als Grobcharakterisierung Flexibler Fertigungssysteme vorgestellt wurde. Es wird in Abb. 151 auf der nächsten Seite in Erinnerung gerufen¹²⁾. Dieses Kanal/Instanz-Netz wird durch die Netzmodule der Fallstudie verfeinert¹³⁾. In diese Netzverfeinerung fließen auch andere graphische Repräsentationsmittel ein, die verfeinerungsunterstützende Informationen bereitstellen.

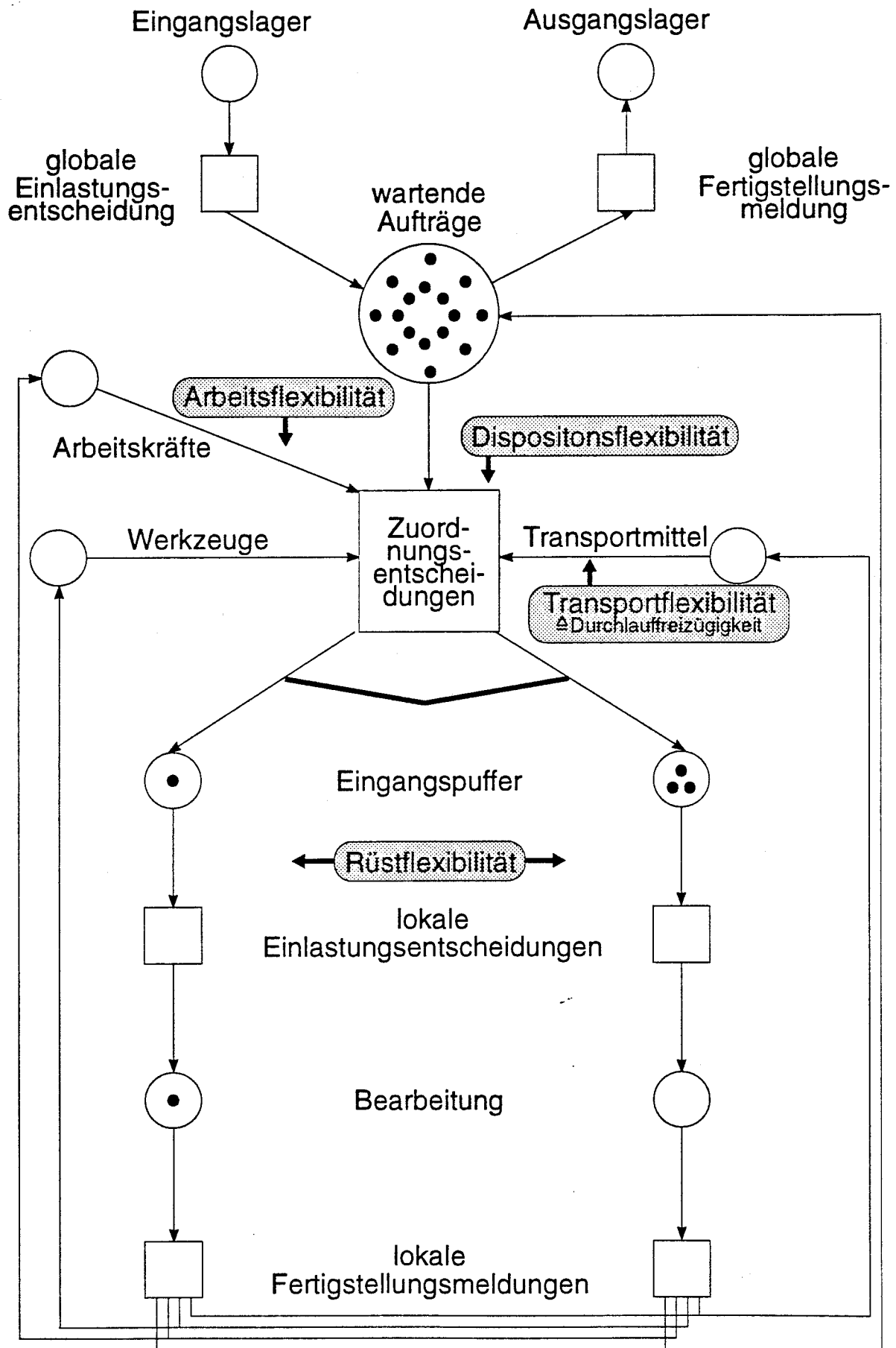


Abb. 151: Kanal/Instanz-Netz für ein Flexibles Fertigungssystem

Dazu gehören z.B. Transport- und Präzedenzgraphen. Auf ihnen beruht die Konstruktion der Netzmodule für Transportmittel bzw. Produktionsaufträge. Ein Netzmodul kann seinerseits weiter verfeinert werden. Dies wird ebenso anhand der Modellierung von Transportmitteln und Produktionsaufträgen demonstriert. Dabei werden die Verfeinerungsmöglichkeiten, die Subnetze bieten, intensiv genutzt. Dies gilt z.B. für die Repräsentation atomarer Transport- und Bearbeitungsoperationen. Auch die entgegengesetzte Richtung der Netzvergrößerung wird betrachtet. Eine Makrostelle für die Arbeitsgangausführung an einer Bearbeitungsstation dient als Exempel für die Netzvergrößerung¹⁴⁾.

Die horizontale Modellierungsstrategie¹⁵⁾ dient der sukzessiven Netzerweiterung. Dabei werden - im Gegensatz zum vertikalen Strategiependant - keine vorhandenen Netzkomponenten verfeinert. Vielmehr gesellen sich neue Komponenten zu den bereits vorliegenden Netzkomponenten hinzu¹⁶⁾. Diese Vorgehensweise wird z.B. anhand der Übergabepunkte im Transportnetz verdeutlicht. Horizontale Netzerweiterungen lassen sich mit vertikalen Netzverfeinerungen kombinieren, um beliebig komplexe Netzmodule zu entwerfen. Auch diese Möglichkeit wird bei der Gestaltung des Transportnetzes genutzt.

Die Fallstudie schöpft das Modellierungspotential des Petrinetz-Konzepts bei weitem nicht aus. Insbesondere beschränkt sie sich auf konstruktive Modellierungsaspekte¹⁷⁾. Die Auswertungsmöglichkeiten des Netzmodells werden dagegen nicht betrachtet. Dies entspricht einerseits der thematischen Festlegung zu Beginn dieser Arbeit, daß die Lösung konkreter Koordinierungsprobleme keine Beachtung fände. Andererseits lassen sich auf das Netzmodell alle Auswertungstechniken anwenden, die im Rahmen der Erreichbarkeitsanalyse skizziert oder detailliert dargelegt wurden¹⁸⁾.

In konstruktiver Hinsicht wird die Fallstudie auf die Modellierung eines bewußt einfach strukturierten Flexiblen Fertigungssystems beschränkt. Sie stellt keineswegs das vollständige Modell eines real existierenden Flexiblen Fertigungssystems dar¹⁹⁾. Statt dessen werden nur die Grundzüge eines solchen Produktionssystems modelliert. Absicht dieser Vereinfachung ist es, diejenigen Aspekte besonders deutlich hervortreten zu lassen, die nach Einschätzung des Verf. für die realitätsadäquate Modellierung Flexibler Fertigungssysteme die größte Rolle spielen²⁰⁾. Dazu gehören beispielsweise²¹⁾ die Modellierung des Transportsystems und die nebenläufige Repräsentation der Ablaufstruktur von Aufträgen. Zugleich handelt es sich dabei um Modellierungsaspekte, die bei konventionellen Modellierungen Flexibler Fertigungssysteme oftmals unbeachtet bleiben²²⁾.

In der Fokussierung der Fallstudie auf einige wenige, aber wesentliche Modellierungsaspekte sieht der Verf. keine unzulässige Einschränkung des Modellierungspotentials von Netzen. Denn die oben skizzierten Modellierungsstrategien gestatten es, die Fallstudie als eine Keimzelle²³⁾ zu behandeln: Aus ihr lassen sich komplexere Netzmodelle für reale Flexible Fertigungssysteme ohne größere konzeptionelle Schwierigkeiten ableiten, indem auf die oben dargelegten Modellierungsstrategien zurückgegriffen wird. Beispielsweise ist es möglich, das Netzmodul der Bearbeitungsstation zu vervielfachen und die Stationsmodule über die Synchronisationsstellen ihrer Ein- und Ausgangspuffer in das Netzmodul des Transportsystems einzubetten. Hierbei werden die modulare und die horizontale Modellierungsstrategie zugleich benutzt²⁴⁾. Die Strategie der hierarchischen Modellverfeinerung, die in der Fallstudie nur exemplarisch angewandt wird, gestattet es, Teilmodelle der Fallstudie im Prinzip beliebig zu verfeinern²⁵⁾. Dadurch lassen sich die Netzmodule an die Spezifika realer Flexibler Fertigungssysteme anpassen. Schließlich können im Rahmen der modularen Modellierungsstrategie auch neuartige Netzmodule konstruiert werden, um Aspekte abzudecken, die außerhalb des Verfeinerungsbereichs der hier präsentierten Netzmodule liegen. Dazu gehört z.B. der Entwurf eines Netzmoduls, das einen Leitstand modelliert²⁶⁾. Auf diese Weise ist es möglich, auch das Informationssystem, in dem die Produktionsprozesse des zugrundeliegenden Flexiblen Fertigungssystems koordiniert werden, in das Netzmodell der Prozeßkoordinierung einzubeziehen.

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Bereits in der Einleitung dieser Arbeit wurden Beiträge erwähnt, die sich mit der Modellierung Flexibler Fertigungssysteme befassen. Ebenso wurde schon auf produktionswirtschaftliche Anwendungen von Petrinetzen hingewiesen. Die Gestaltungsanregungen dieser Quellen sind in die nachstehende Fallstudie eingeflossen. Gleiches gilt für Modellierungen Flexibler Fertigungssysteme - oder auch "einfacher" Werkstattfertigungen, die sich zwar nicht auf Petrinetze beziehen, aber in ihrer Konstruktionsweise mit den hier vorgelegten Netzmodulen partiell übereinstimmen. Vgl. zu solchen verwandten Modellierungsvorschlägen für Produktionssysteme HARTLEY (1984), S. 255 (nur am Rande); KNOOP (1986), S. 127ff.; KOCHAN, D. (1986), S. 136ff.; LEWIS, W. (1987) S. 177ff., insbesondere S. 180ff.; OW (1988c), S. 43ff., insbesondere S. 46ff., und KOTSCHENREUTHER (1991), S. 121ff. Insbesondere der Beitrag von KOTSCHENREUTHER, den der Verf. bei der Konstruktion seiner Fallstudie noch nicht kannte, weist eine Vielzahl konzeptioneller Übereinstimmungen mit der Modellierungsweise des Verf. auf. Allerdings hat KOTSCHENREUTHER seine bemerkenswerten Ideen leider nur in der Gestalt einer rein natürlichsprachlichen Gedankenskizze präsentiert.
- 2) Die hier vorgelegte Fallstudie soll lediglich das Leistungsvermögen einer Prozeßkoordinierung auf Netzbasis in exemplarischer Weise *verdeutlichen*. Dabei geht es nur um die *grundlegenden konzeptionellen* Aspekte, nicht aber um die konkrete Konzeptverwirklichung unter realen Anwendungsbedingungen. Deshalb ist es nicht notwendig, in extenso alle Details zu berücksichtigen, die für ein praktisch einsatzfähiges PPS-System beachtet werden müßten. Statt dessen reicht es aus, auf der hier betrachteten konzeptionellen Ebene die Modellierung eines Flexiblen Fertigungssystems so offen zu gestalten, daß sich im Falle einer praktischen Konzeptanwendung die entsprechenden Details ohne Schwierigkeiten ergänzen lassen. Auf solche Erweiterungsoptionen wird in den folgenden Kapiteln mitunter ausdrücklich hingewiesen.
- 3) Zu den weiteren, hier nicht als wesentlich empfundenen Strategien gehört die Verknüpfung von Teilnetzen über gemeinsame, identisch duplizierte Stellen.
- 4) Sie spiegelt die zunehmende modulare Realisierung von Flexiblen Fertigungssystemen wider, die besonders von KOCHAN, D. (1986), S. 34f., herausgestellt wird.
- 5) Vgl. zum Konzept der Baukastensysteme ROPOHL (1971), S. 201ff., insbesondere S. 203; ROPOHL (1979), Sp. 293ff.; ARNING (1987), S. 12ff.; SPUR (1988d), S. 504f.; KERN, W. (1990a), S. 101f.
- 6) Die Zerlegung richtet sich nach dem objektorientierten Ansatz. Die nachfolgend genannten Komponenten Flexibler Fertigungssysteme wurden dort bereits vorgestellt und erläutert. Vgl. auch die objekt- und bausteinbezogene Konstruktion von Netzmodellen für Produktionssysteme bei LIPP (1991), S. 110f.
- 7) Die Integration von Modulen, die im Rahmen eines modularen Modellierungskonzepts konstruiert worden sind, findet zumeist keine nähere Würdigung. Zwar wird die Modulintegration durch Beiträge zur Softwareentwicklung intensiv behandelt. Aber dort spielen nur informationstechnische Gestaltungsaspekte eine Rolle. Die hier interessierenden konzeptionellen Probleme auf der Modellierungsebene werden dagegen nicht gelöst. Auch die Ausarbeitungen, die sich mit der Aufgabe des "Schnittstellenmanagements" beschäftigen, bleiben zu abstrakt. Sie lassen für die hier beabsichtigte Integration konkret ausformulierter Netzmodule keine fruchtbaren Ratschläge erkennen. Daher wird der integrativen Modellierungsstrategie in dieser Arbeit größeres Gewicht zugemessen. Sie wird zunächst anhand der nachstehend skizzierten Synchronisationsstellen angedeutet. Bereits bei der anschließenden Präsentation der einzelnen Netzmodule werden diese Synchronisationsstellen konkretisiert. Gleiches gilt für die Marken(kopien), die zwischen Netzmodulen mittels der Synchronisationsstellen ausgetauscht werden können. In einem abschließenden Kapitel werden die Kerngedanken des hier entfalteten Integrationskonzepts vertieft. Ein konkreter Ansatz für die systematische Verknüpfung von Netzmodulen findet sich dagegen bei PAGNONI (1990), S. 179, in der Gestalt zweier Kompositionsregeln. Allerdings läßt sich diese Vorgehensweise mit dem hier bevorzugten Konzept der Synchronisationsstellen nicht vereinbaren. Daher wird auf den Ansatz von PAGNONI nicht weiter eingegangen.
- 8) Die Netzmodule können zwischenzeitlich auch noch verfeinert, vergrößert oder erweitert worden sein.
- 9) Zwecks Diktionsvereinfachung wird nachfolgend nur auf den Basisfall von genau zwei verknüpften Netzmodulen Bezug genommen.
- 10) Das Informationsprädikat, das einer Kommunikationsstelle zugeordnet ist, enthält in seiner aktuellen Extension alle Informationen, die in einem Netzmodul über den aktuellen Zustand eines anderen Netzmoduls benötigt werden. Die Kommunikationsstellen entsprechen in ihrer Funktion den "Dialogzellen" von IGEL (1989a), S. 184. Ein Spezialfall der Kommunikationsstellen wurde schon früher eingeführt, ohne ausdrücklich von einer Kommunikationsstelle zu sprechen: Es handelt sich um die Systemzeitstelle, die zur Netzkonstruktion einer zentralen Systemuhr gehört.

11) Netzverfeinerungen und -vergrößerungen werden im Bereich des Petrinetz-Konzepts in vielfachen Varianten thematisiert. Die netzverfeinernde Strategie wurde schon im Kontext von Kanal/Instanz-Netzen näher angesprochen. Die netzvergrößernde Strategie liegt implizit der Reduktionsanalyse zugrunde, die als eine Auswertungstechnik für Netzmodelle vorgestellt wurde. Vgl. darüber hinaus zu Beiträgen, die sich vornehmlich mit der Verfeinerung, seltener auch mit der Vergrößerung von Netzen beschäftigen, OBERQUELLE (1980), S. 488ff.; REISIG (1983a), S. 309ff.; IGEL (1986b), S. 1, 3ff. u. 7ff.; GENRICH (1988b), S. 240 u. Abb. 5 auf S. 241 (dort als "Refinement and Abstraction" von Netzknoten); DITTRICH, G. (1989b), S. 6ff.; FEHLING (1990a), S. 1ff., insbesondere S. 14ff.; VON MARTIAL (1991a), S. 312ff.

Um einem Mißverständnis vorzubeugen, wird darauf hingewiesen, daß die hierarchische Verfeinerung eines Modells keineswegs einer netzartigen Modellstruktur widerspricht. Dieses Mißverständnis könnte aus dem Sachverhalt resultieren, daß bei der Modellierung von Informationsverarbeitungssystemen, insbesondere von Datenbanksystemen, u.a. zwischen baumartig-hierarchischen und netzartigen Systemstrukturen differenziert wird. Diese Unterscheidung läßt sich aber nicht auf die hier vorgenommene Strukturierung von Netzmodellen übertragen. Denn hierarchisch strukturierte Netzmodelle erweisen sich als dreidimensionale Konstrukte: In der einen vertikalen Dimension besitzen sie die charakteristische baumartige Struktur von hierarchisch verfeinerten Modellen. Auf jeder Hierarchieebene - auf jeder Verfeinerungsstufe - erstreckt sich aber ein zweidimensionales, "flaches" Netz. Es besitzt von vornherein eine netzartige Struktur.

12) Zusätzlich enthält es - grau unterlegt - einige verdeutlichende Anmerkungen. Sie gehören zu den freizügigen Beschriftungen für Kanal/Instanz-Netze, die an früherer Stelle erläutert wurden.

13) Für diese Verfeinerung gelten folgende Zuordnungen: Die Werkstücke, die das Kanal/Instanz-Netz als unstrukturierte Marken(kopien) durchsetzen, werden als Kopien einer tief strukturierten Werkstückmarke modelliert. In ähnlicher, aber weniger detaillierter Weise werden auch die Werkzeuge als Kopien einer strukturierten Werkzeugmarke wiedergegeben. Alle Transportmittel und die Topologie ihrer Transportwege werden im Netzmodul des Transportsystems repräsentiert. Ein weiteres Netzmodul dient der verfeinerten Darstellung der ausführenden Arbeitskräfte, die im Produktionssystem tätig sind. Jede Lagerstation wird durch ein eigenständiges Netzmodul repräsentiert. Gleiches gilt für jede Bearbeitungsstation. In den Netzmodulen der Bearbeitungsstationen erfolgen die lokalen Einlastungsentscheidungen. Schließlich sorgt ein Netzmodul für die Abwicklung je eines Produktionsauftrags. Dabei deckt es die globale Einlastungsentscheidung und alle Zuordnungsentscheidungen ab, die für die Auftragsabwicklung gefällt werden müssen.

14) Es handelt sich um die Makrostelle "Bearbeitung". Darüber hinaus erfolgte bereits eine Netzvergrößerung, als die Netzkonstrukte für eine zentrale Systemuhr präsentiert wurden. Denn das Netz, das in Abb. 150 in der Gestalt einer 1-Schleife präsentiert wurde, stellt eine Vergrößerung der beiden Feinnetze aus Abb. 148 u. 149 dar.

15) Vgl. zur horizontalen Strategie der Netzerweiterung REISIG (1983a), S. 312 i.V.m. S. 310 sowie S. 313ff. (dort in umgekehrter Perspektive als "Embedding" thematisiert); DITTRICH, G. (1989b), S. 7f.; VON MARTIAL (1991a), S. 321 (als "Expansion", die allerdings auf S. 323 leider mit einem Verfeinerungsaspekt vermengt wird).

16) Die Modulintegration über Synchronisationsstellen läßt sich als ein Sonderfall der horizontalen Modellierungsstrategie auffassen. Dann wird von einem bereits vorliegenden Netzmodul ausgegangen. Es wird durch ein neu hinzutretendes Netzmodul erweitert, das mit der Hilfe von Synchronisationsstellen hinzugefügt ist.

17) Daneben bleiben auch andere Modellierungsaspekte unberücksichtigt. Dazu gehört z.B. die Umsetzung von Koordinierungsentscheidungen, die im Netzmodell getroffen wurden, in entsprechende Steuerungsanweisungen an das reale Produktionssystem. Statt dessen werden lediglich in der umgekehrten Richtung Systemmeldungen erfaßt, die über koordinierungsrelevante Ereignisse im Produktionssystem informieren. Dies betrifft vor allem Meldungen über Produktionsstörungen.

18) Der Verf. erwartet keinen beachtlichen Erkenntnisbeitrag davon, jene Auswertungstechniken im einzelnen auf das Netzmodell eines Flexiblen Fertigungssystems anzuwenden. Es würde sich lediglich um eine - allerdings aufwendige - Routineapplikation handeln.

19) Es wird also keineswegs behauptet, mit den Netzmodulen der Fallstudie jeden denkmöglichen Modellierungsaspekt Flexibler Fertigungssysteme abzudecken. Vgl. hierzu die gleichlautenden Vorbehalte von ROPOHL (1971), S. 150f. u. 240f., der sich ebenso mit der Modellierung Flexibler Fertigungssysteme befaßt. Allerdings wird in Kürze skizziert, wie sich diese Fallstudie zur Modellierung realer Flexibler Fertigungssysteme erweitern läßt.

20) Die Fallstudie erfüllt eine Demarkationsfunktion im Sinne der Ausführungen, die früher anlässlich der Rahmensegung für diese Arbeit erfolgten: Sie expliziert diejenigen Aspekte, die der Verf. bei der Modellierung Flexibler Fertigungssysteme für besonders wichtig erachtet. Es wäre widersinnig zu fordern, die explizierte Wesentlichkeit der angeführten Aspekte und die dadurch implizierte Unwesentlichkeit aller fehlenden Gesichtspunkte zu rechtfertigen. Denn eine solche Rechtfertigung müßte ihrerseits in einen Bezugsrahmen eingebettet werden, in dem wieder Wesentliches von Unwesentlichem geschieden wird. Dies erforderte abermals eine Rechtfertigung usw. ad infinitum.

tum. Daher wurde das Demarkationskonzept als Durchbrechung des infiniten Regresses eingeführt. Seine Setzungen rechtfertigen zu wollen, würde der Intention seiner Einführung widersprechen. Daher wird darauf verzichtet, das Wesentliche der hier präsentierten Fallstudie als wesentlich zu rechtfertigen.

21) Der Demarkationscharakter der Fallstudie, der in der voranstehenden Anmerkung dargelegt wurde, impliziert, daß die Fallstudie jene Gesichtspunkte repräsentiert, die der Verf. für wesentlich erachtet. Diese Aspekte im einzelnen und vollständig aufzuzählen, bedeutete daher eine unfruchtbare Verdopplung des Fallstudiengehalts.

22) In dieser Hinsicht kann abermals auf die Nebenläufigkeit der Auftragsabwicklung hingewiesen werden. Die Modellierung des Transportsystems wird zwar in konventionellen Simulationsstudien Flexibler Fertigungssysteme häufiger beachtet. In Modellierungen, die als Lineare oder als Ganzzahlige Programme ausgelegt sind, wird das Transportsystem dagegen in der Regel nicht berücksichtigt.

23) Die Gesamtheit aus Netzmodulen und Modellierungsstrategien läßt sich als konzeptionelle Vorstufe eines Modellgenerators vorstellen, mit dessen Hilfe Netzmodelle für beliebige reale Flexible Fertigungssysteme erzeugt werden können. Damit wird ein Weg aufgezeigt, auf dem sich das "Prokrustesbett"-Prinzip konventioneller Modellkonstruktionen überwinden läßt, das an früherer Stelle kritisiert wurde.

Es handelt sich allerdings nur um einen Gedankenentwurf. Denn die Modellierungsstrategien für die Erzeugung, Verfeinerung und Verknüpfung der Netzmodule werden hier nur grob skizziert. Ein echter Modellgenerator läge erst dann vor, wenn die Modellierungsstrategien methodisch verfeinert und in der Gestalt von Modellierungstechniken konkret ausgearbeitet würden. Insbesondere sollten wegen der Aufwendigkeit der Netzkonstruktion Werkzeuge der Automatischen Informationsverarbeitung bereitstehen, um die praktische Anwendung der Modellierungsstrategien zu unterstützen. Die Ausarbeitung eines solchen Modellgenerators übersteigt jedoch bei weitem die Grenzen der hier vorgelegten Untersuchungen.

Der Gedanke des Modellgenerators läßt sich noch ausweiten. Denn das hier umrissene Modellierungskonzept ist keineswegs auf die Konstruktion von Netzmodellen für Flexible Fertigungssysteme beschränkt. Da die o.a. Modellierungsstrategien von vornherein auf kein bestimmtes Modellierungsobjekt bezogen wurden, können sie auf beliebige Netzmodule angewandt werden. Daher brauchen für die Repräsentation andersartiger Modellierungsobjekte lediglich objektartspezifische Netzmodule neu konstruiert zu werden. Auf diese Weise könnte eine Bibliothek von objektartspezifischen Netzmodulen angelegt werden. Durch die unspezifischen Modellierungsstrategien ist es möglich, diese Module im Einzelfall an die Spezifika eines konkreten Modellierungsobjekts anzupassen - zu verfeinern oder zu vergrößern - und zu einem objektrepräsentierenden Gesamtmodell zu verknüpfen. Die Bibliothek der Netzmodule braucht nicht als geschlossenes Baukastensystem angelegt zu sein, sondern kann für inkrementelle Erweiterungen offengehalten werden. Es resultiert als Fernziel ein modularer, gegenüber verschiedenartigen Modellierungsobjekten adaptiver, netzgestützter Modellgenerator.

24) In analoger Weise kann vorgegangen werden, wenn ein vorgegebenes Auftragspaket mehrere Aufträge enthält. Dann läßt sich das Auftragsmodul in entsprechend vielen Varianten entwerfen. Die Einbindung von mehreren Auftragsmodulen in die übrigen Netzmodule, die das Produktionssystem repräsentieren, unterscheidet sich in keiner Weise von der Art, in der das eine Netzmodul der Fallstudie integriert wird.

25) Es ist auch die umgekehrte Richtung der hierarchischen Modellvergrößerung möglich. Darauf wurde schon oben eingegangen.

26) Eine simple Vorstufe für ein solches Netzmodul wird bereits in der Fallstudie präsentiert. Es handelt sich um das Modul für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen.

7.2 Modellierung von Systemkomponenten

7.2.1 Modellierung von konkreten Objektarten

7.2.1.1 Modellierung mobiler Objektarten

7.2.1.1.1 Modellierung durch Marken

7.2.1.1.1.1 Modellierung von Werkstücken

Jedes Werkstück wird durch eine Werkstückmarke¹⁾ repräsentiert. Bei der Werkstückmarke handelt es sich um eine Attributmarke²⁾. Die aktuellen Ausprägungen ihrer Attribute beschreiben diejenigen Eigenschaften, die das jeweils dargestellte Werkstück in der aktuellen Produktionssituation besitzt³⁾. Es läßt sich grundsätzlich zwischen konstanten und variablen Markenattributen unterscheiden⁴⁾. Als konstante Attribute der Werkstückmarke werden berücksichtigt:

- der Name des Werkstücks⁵⁾;
- die Werkstückklasse⁶⁾;
- die Bereitstellungskosten des Werkstücks⁷⁾.

Das erste variable Attribut der Werkstückmarke gibt an, zu welchem Produktionsauftrag das repräsentierte Werkstück gehört⁸⁾. Das nächste variable Attribut beschreibt den Werkstückzustand. Der aktuelle Werkstückzustand wird durch ein Attribut der Sorte "werkstückstatus" ausgedrückt. Als zustandsbeschreibende Attributausprägungen werden hier berücksichtigt⁹⁾:

- vorgelagert: Das Werkstück ist im Eingangslager des Produktionssystems bereitgestellt. Die Werkstückbearbeitung hat noch nicht begonnen.
- auf Einlastung wartend: Das Werkstück wartet im Eingangspuffer einer Bearbeitungsstation darauf, eingelastet zu werden.
- eingelastet: Das Werkstück wurde an einer Bearbeitungsstation eingelastet. Es hält sich aber weiterhin im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation auf, weil es noch nicht in ihren zentralen Arbeitsbereich übernommen worden ist¹⁰⁾.
- in Bearbeitung: Das Werkstück befindet sich zwecks Bearbeitung im zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation. Die Werkstückbearbeitung kann unmittelbar bevorstehen, aktuell geschehen oder bereits abgeschlossen sein¹¹⁾. Auf jeden Fall hat das Werkstück den zentralen Arbeitsbereich noch nicht durch Auslastung auf den Ausgangspuffer verlassen.
- ausgelastet: Das Werkstück befindet sich nach seiner Bearbeitung im Ausgangspuffer einer Bearbeitungsstation. Es wartet dort darauf, einer Folgestation¹²⁾ zugeordnet zu werden.
- auf Einlagerung wartend: Das Werkstück wartet im Eingangspuffer einer Lagerstation¹³⁾ darauf, eingelagert zu werden.
- zwischengelagert: Ein Werkstück befindet sich in einer Lagerstation¹⁴⁾. Es ist weder un- noch fertigbearbeitet.
- auf Transportmittelzuordnung wartend: Das Werkstück befindet sich im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation. Es wartet dort darauf, daß ihm ein freies Transportmittel für den Transport zur nächsten Bearbeitungs- oder Lagerstation zugeordnet wird.
- auf Transportmittelbeladung wartend: Das Werkstück erwartet im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation, daß es von seinem zugeordneten Transportmittel aufgeladen wird¹⁵⁾.

- transportiert: Ein Transportmittel ist mit dem Werkstück beladen worden, hat das Werkstück aber noch nicht an der nächsten Bearbeitungs- oder Lagerstation entladen können.
- nachgelagert: Das Werkstück liegt im Ausgangslager des Produktionssystems vor. Eine weitere Werkstückbearbeitung im Rahmen der modellierten Abwicklung eines Produktionsauftrags unterbleibt¹⁶⁾.

Abb. 152 auf der nächsten Seite verdeutlicht den sachlogischen Zusammenhang der voranstehend aufgeführten zustandsbeschreibenden Attributausprägungen durch eine Graphik. Es handelt sich um den Zustandsgraphen¹⁷⁾ eines Werkstücks.

Das Ausmaß, in dem die Bearbeitung des Werkstücks vorangeschritten ist, erfaßt das Attribut der Sorte "bearbeitungsstatus". Es läßt folgende Attributausprägungen zu:

- unbearbeitet: An dem Werkstück ist noch keine Bearbeitungsoperation ausgeführt worden¹⁸⁾.
- angearbeitet: Die Ausführung mindestens einer Bearbeitungsoperation, die an dem Werkstück als Bearbeitungsobjekt vollzogen wird, ist begonnen worden.
- fertigtbearbeitet: An dem Werkstück sind alle Bearbeitungsoperationen, die das Werkstück bei der Abwicklung eines Produktionsauftrags betrafen, ausgeführt worden¹⁹⁾.
- beschädigt: Bei der Ausführung einer Bearbeitungsoperation ist eine Produktionsstörung eingetreten. Die Störung war so gravierend, daß die Operationsausführung abgebrochen werden mußte und sich das Werkstück - zumindest vorerst - nicht weiterbearbeiten läßt²⁰⁾.

Ein Zuordnungsattribut weist aus, zu welcher Bearbeitungs- oder Lagerstation das Werkstück als nächstes transportiert werden soll. Diese Angabe informiert ein Transportmittel, das das Werkstück im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation²¹⁾ auflädt, welche Zielposition angelaufen werden soll. Weitere variable Attribute der Werkstückmarke dienen dazu, um produktionswirtschaftlich interessante Werkstückeigenschaften²²⁾ zu erfassen. Dazu gehören:

- der Zeitpunkt, in dem das unbearbeitete Werkstück in das Eingangslager des Produktionssystems gelangt²³⁾ (werkstückspezifischer Vorlagerbeginn²⁴⁾);
- der Zeitpunkt, in dem das noch unbearbeitete Werkstück aus dem Eingangslager des Produktionssystems zwecks Bearbeitung abgezogen wird (werkstückspezifischer Bearbeitungsbeginn);
- die Summe aller Zeitspannen, die als Bearbeitungsdauern des Werkstücks seit seinem Bearbeitungsbeginn an den Bearbeitungsstationen des Produktionssystems angefallen sind (werkstückspezifische Bearbeitungsdauer)²⁵⁾;
- die Summe aller Kosten, die als Bearbeitungskosten des Werkstücks seit seinem Bearbeitungsbeginn an den Bearbeitungsstationen des Produktionssystems entstanden sind (werkstückspezifische Bearbeitungskosten)²⁶⁾;
- die Summe aller Zeitspannen, die als Transportdauern von Transportmitteln für Transporte des Werkstücks seit seinem Bearbeitungsbeginn benötigt wurden (werkstückspezifische Transportdauer)²⁷⁾;
- die Summe aller Kosten, die als Transportkosten durch den Einsatz von Transportmitteln für Transporte des Werkstücks seit seinem Bearbeitungsbeginn verursacht worden sind (werkstückspezifische Transportkosten)²⁸⁾;
- die Summe aller Zeitspannen, die während der Aufenthalte des Werkstücks in Lagerstationen des Produktionssystems seit seinem Vorlagerbeginn vergangen sind (werkstückspezifische Lagerdauer)²⁹⁾;

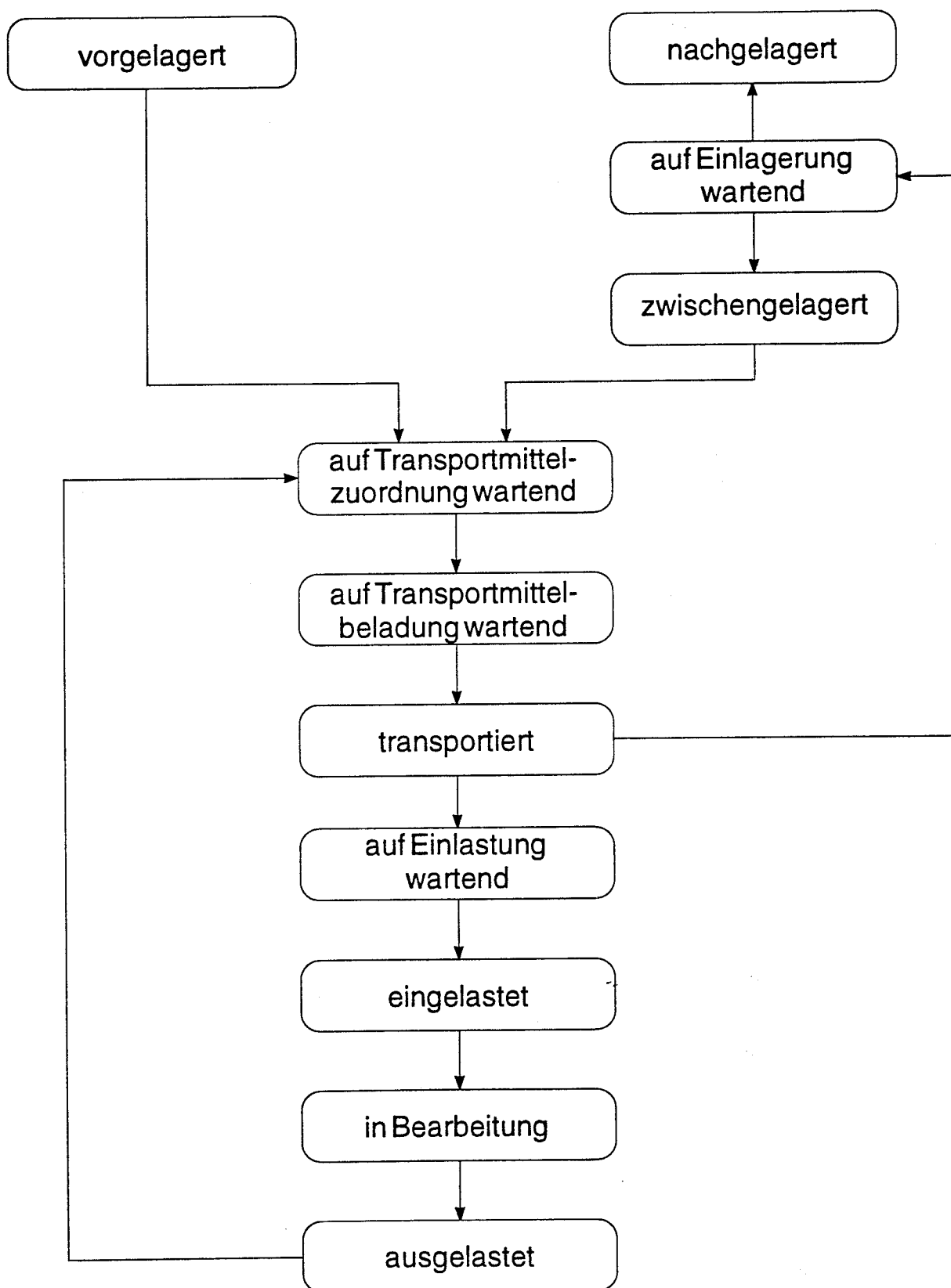


Abb. 152: Zustandsgraph eines Werkstücks

- die Summe aller Kosten, die während der Aufenthalte des Werkstücks in Lagerstationen des Produktionssystems seit seinem Vorlagerbeginn entstanden sind (werkstückspezifische Lagerkosten)³⁰;
- die Summe aller Zeitspannen, die das Werkstück seit seinem Bearbeitungsbeginn im Produktionssystem verbracht hat, ohne daß es auf einer Bearbeitungsstation eingelastet war, von einem Transportmittel transportiert wurde oder sich in einer Lagerstation aufhielt (werkstückspezifische Wartedauer)³¹;
- die Zeitspanne zwischen dem Vorlagerbeginn und dem Bearbeitungsende des Werkstücks (werkstückspezifische Durchlaufzeit)³²;
- die Zeitpunkt, in dem die Produktionskosten des Werkstücks zuletzt ermittelt worden sind³³;
- die Summe aller intervallspezifischen Kapitalbindungszunahmen³⁴, die für das Werkstück seit seinem Vorlagerbeginn aufgelaufen sind (werkstückspezifische Kapitalbindung)³⁵;
- die Summe aller intervallspezifischen Kapitalbindungskosten³⁶, die für das Werkstück seit seinem Vorlagerbeginn entstanden sind (werkstückspezifische Kapitalbindungskosten);
- die Summe aller Kosten, die durch Bereitstellung, Bearbeitung, Transport, Lagerung und Kapitalbindung seit dem Vorlagerbeginn der Werkstücks verursacht worden sind (werkstückspezifische Herstellkosten);
- der Zeitpunkt, in dem das fertigbearbeitete Werkstück in das Ausgangslager des Produktionssystems gelangt (werkstückspezifisches Bearbeitungsende);
- der Zeitpunkt, in dem das fertigbearbeitete Werkstück aus dem Ausgangslager des Produktionssystems zwecks Weitergabe an das Umsystem des Produktionssystems entnommen wird³⁷ (werkstückspezifisches Nachlagerende³⁸).

Die voranstehenden Erläuterungen von Attributen der Werkstückmarke, die produktionswirtschaftlich interessante Werkstückeigenschaften ausdrücken, bedürfen einer weiterführenden Komplizierung. Denn sie beruhen auf der Präsupposition, daß ein Werkstück über das Eingangslager in ein Produktionssystem gelangt, von dort aus durch das Produktionssystem geschleust wird und schließlich das Produktionssystem über dessen Ausgangslager wieder verläßt. Diese Sichtweise unterstellt aber implizit, daß das betroffene Werkstück über alle Produktionsstufen hinweg als eigenständiges physikalisches Objekt fortbesteht³⁹. Dabei werden zwar im Zuge der Werkstückbearbeitung seine Eigenschaften verändert. Aber das Werkstück bleibt *als solches* erhalten: Es bewahrt seine Identität als ein bestimmtes, von allen anderen Objekten unterschiedenes Werkstück während des gesamten Wegs, den es zwischen dem Ein- und dem Ausgangslager des Produktionssystems zurücklegt. Diese Voraussetzung ist aber nur dann erfüllt, wenn die Werkstückbearbeitung eine lineare Produktionsweise darstellt. Denn nur dort durchläuft *dasselbe* Werkstück alle Produktionsstufen vom Vor- bis zum Endprodukt.

Schwierigkeiten ergeben sich jedoch bei synthetischen Produktionen. Sie zeichnen sich dadurch aus, daß mindestens eine Produktionsstufe existiert, auf der mindestens zwei verschiedene Werkstücke gemeinsam bearbeitet werden und dabei in ein neues Werkstück einfließen. Es stellt sich dann die Frage, ob die alten Werkstücke im neuen Werkstück weiterhin fortbestehen oder ob sie bei der Herstellung des neuen Werkstücks untergegangen sind. Für beide Alternativen lassen sich plausible Argumente anführen⁴⁰, die hier aber nicht weiter vertieft werden. Statt dessen wird die Identitätsfrage offengelassen: *Falls* sich die alten Werkstücke als mit sich selbst identische Bestandteile des neuen Werkstücks wiedererkennen lassen, wird das neue Werkstück durch eine komplexe Werkstückmarke repräsentiert. Sie ist aus den Werkstückmarken der alten Werkstücke zusammengesetzt. *Sofern* aber die alten Werkstücke durch Verschmelzen in einem neuen Werkstück ihre Identität verlieren, gehen die Werkstückmarken der alten Werkstücke bei der gemeinsamen Werkstückbearbeitung unter. An ihre Stelle tritt die Werkstückmarke des neuen

Werkstücks. Sie ist nicht aus den Marken der alten Werkstücke zusammengesetzt, sondern wird als eine atomare Werkstückmarke eingeführt⁴¹⁾.

Auf den letztgenannten Fall des Verschmelzens mindestens zweier alter Werkstückmarken in einer neuen Werkstückmarke treffen die Erläuterungen, die oben für die Attribute der Werkstückmarke erfolgten, nicht mehr uneingeschränkt zu. Denn es muß jetzt berücksichtigt werden, daß ein Werkstück noch vor Erreichen des Ausgangslagers physisch untergeht. Dann erreicht es sein oben definiertes Bearbeitungs- und Nachlagerende überhaupt nicht. Ebenso kann ein neues Werkstück aus dem Verschmelzen alter Werkstücke hervorgehen, ohne jemals in das Eingangslager des Produktionssystems gelangt zu sein. Dann haben weder der oben definierte Vorlager- noch der entsprechende Bearbeitungsbeginn für das neue Werkstück jemals stattgefunden. Folglich müssen im Verschmelzungsfall in den Erläuterungen der Attribute der Werkstückmarke alle Bezugnahmen auf Vorlager- und Bearbeitungsbeginn sowie auf Bearbeitungs- und Nachlagerende durch analoge Bezugnahmen auf den Zeitpunkt der Werkstückverschmelzung⁴²⁾ substituiert werden. Diese Modifizierung bereitet keine grundsätzliche Schwierigkeiten⁴³⁾. Sie ist in die Konstruktion des später präsentierten Netzmoduls für die Repräsentation von Produktionsaufträgen eingeflossen.

Die voranstehenden Erläuterungen der Werkstückmarke werden abschließend formal präzisiert. Zu diesem Zweck werden die Markenattribute durch entsprechende Attributsorten, Objektmengen⁴⁴⁾ und Operationssymbole definiert. Die Werkstückmarke selbst wird durch eine Markensorte und ein eigenständiges Operationssymbol aus ihren Attributsorten aufgebaut. In der Fallstudie werden insgesamt 45 Werkstücke berücksichtigt, die zu 7 Werkstückklassen gehören⁴⁵⁾. Die nachfolgenden Festlegungen gelten gemeinsam für die Sektion "Marken/Operationssymbole" in den Netzlegenden der Netzmodule für Transportmittel, Bearbeitungs- und Lagerstationen.

Marken/Operationssymbole:

zeitpunkt:	INTEGER
zeitdauer:	INTEGER
kosten:	REAL
kapitalbindungsbetrag:	REAL
werkstückname:	STRING
	"WS_1", "WS_2", "WS_3", "WS_4", "WS_5",
	"WS_6", "WS_7", "WS_8", "WS_9", "WS_10",
	"WS_11", "WS_12", "WS_13", "WS_14", "WS_15",
	"WS_16", "WS_17", "WS_18", "WS_19", "WS_20",
	"WS_21", "WS_22", "WS_23", "WS_24", "WS_25",
	"WS_26", "WS_27", "WS_28", "WS_29", "WS_30",
	"WS_31", "WS_32", "WS_33", "WS_34", "WS_35",
	"WS_36", "WS_37", "WS_38", "WS_39", "WS_40",
	"WS_41", "WS_42", "WS_43", "WS_44", "WS_45",
	"nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	46)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	47)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	48)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":	→ OB _{werkstücklagername}	
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_wspa(auftragsname); Zuordnung_wspa_ka()		
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()		
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()		
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt); Nachlagerende_ws_ka		
werkstück_bearbeitungsbeginn =	Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsbeginn_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsende =	Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsdauer =	Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_transportdauer =	Transportdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_lagerdauer =	Lagerdauer_ws(zeitdauer)		

```

werkstück_wartedauer =      Wartedauer_ws(zeitdauer)
werkstück_durchlaufzeit =  Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)
werkstückzeiten =          Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                                werkstück_bearbeitungsbeginn
                                werkstück_bearbeitungsdauer
                                werkstück_transportdauer
                                werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                                werkstück_durchlaufzeit
                                werkstück_bearbeitungsende
                                werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt =        Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
werkstückkapitalbindung =  Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten =    Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten =         Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
                                    werkstück_bearbeitungskosten
                                    werkstück_transportkosten
                                    werkstück_lagerkosten
                                    werkstück_kapitalbindungskosten
                                    werkstück_herstellkosten)

«m_ws» ≈ werkstück =      Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
                                werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
                                bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
                                werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
                                werkstückkosten)

```

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Bei präziser Würdigung des Petrinetz-Konzepts müßte davon geredet werden, daß jedes Werkstück durch eine *Kopie* der Werkstückmarke repräsentiert wird. Es wurde jedoch schon vereinbart, die Kopien von Marken in vereinfachter Diktion nur als Marken anzusprechen. Auf diese sprachliche Erleichterung wird in der gesamten Fallstudie zurückgegriffen, ohne dies noch einmal explizit hervorzuheben.
- 2) Auch die später eingeführten Werkzeug-, Transportmittel- und Arbeitskräftemarken gehören zur Kategorie der Attributmarken.
- 3) Strenggenommen handelt es sich nicht um alle, sondern nur um diejenigen Werkstückeigenschaften, die vom Koordinierungsträger für relevant gehalten werden. Dies wird fortan - für alle objektrepräsentierenden Marken - vorausgesetzt.
- 4) Ein Markenattribut wird als konstant bezeichnet, falls es in einem Netz immer dieselbe Ausprägung annehmen muß. Dies gilt sowohl für unterschiedliche Kopien derselben Attributmarke als auch für verschiedene Netzmarkierungen. Allerdings braucht diese konstante Attributausprägung nicht für alle Netze in derselben Weise festzuliegen. Statt dessen kann der Definitionsbereich des Markenattributs eine Vielzahl zulässiger Attributausprägungen umfassen. Die konstante Attributausprägung darf dann von Netz zu Netz variieren. Ein Markenattribut heißt dagegen variabel, wenn seine Ausprägung innerhalb *desselben* Netzes nicht fixiert ist. Sie kann sowohl von Markenkopie zu Markenkopie als auch von Netzmarkierung zu Netzmarkierung variieren. Ob diese Variationsmöglichkeit auch tatsächlich ausgeschöpft wird, bleibt jedoch offen. Daher ist es möglich, daß ein variables Markenattribut in einem Netz - zufällig - stets dieselbe Ausprägung beibehält.
Nachfolgend werden jeweils nur die originär definierten, einfachen Attribute erläutert. Die komplexen Attribute, die daraus mit der Hilfe von Operationssymbolen zusammengesetzt sein können, werden nicht ausdrücklich erwähnt. Ihre derivative Definition findet sich aber in der formalen Präzisierung der Werkstückmarke. Die gleiche Vereinbarung gilt auch für alle anderen Attributmarken, die in dieser Fallstudie noch eingeführt werden.
- 5) Bei allen Namen, die in der Fallstudie als Markenattribute eingeführt werden, handelt es sich um identifizierende Bezeichnungen der jeweils betroffenen Objekte. Daher besitzen keine zwei modellierten Objekte denselben Namen. Falls der Name eines Werkstücks (noch) nicht festlegt, wird dem Attribut "werkstückname" die neutrale Ausprägung "nil" zugeordnet.
- 6) Gleichartige Werkstücke werden zu einer gemeinsamen Werkstückklasse zusammengefaßt. Eine vollständige und disjunkte Klassifizierung aller Werkstücke wird in der Fallstudie als bekannt vorausgesetzt. Daher gehört jedes Werkstück zu genau einer Werkstückklasse.
Die Klassifizierung der Werkstücke erleichtert die spätere Spezifikation eines Produktionsauftrags. Denn es reicht aus, diejenigen Werkstückklassen und klassenspezifischen Werkzeuganzahlen festzulegen, die zu Beginn der Auftragsabwicklung im Eingangslager des Produktionssystems bereitstehen müssen. Es ist dagegen nicht nötig, die erforderlichen Werkstücke im einzelnen zu identifizieren. Statt dessen erfolgt innerhalb des Eingangslagers eine selbständige Prozedur für die "automatische" Zuordnung von individuellen Werkstücken zum Produktionsauftrag. Dabei richtet sich die lagerinterne Werkstückzuordnung nach den vorgeschriebenen Werkstückklassen und -anzahlen.
- 7) Die Bereitstellungskosten umfassen alle Kosten, die der Koordinierungsträger dem Werkstück in demjenigen Zeitpunkt zurechnet, in dem das Werkstück in das Eingangslager des Produktionssystems gelangt. Falls es sich dort schon zu Beginn des Koordinierungsintervalls befindet, erstrecken sich die Bereitstellungskosten auf alle Kosten, die der Koordinierungsträger dem Werkstück im Intervallbeginn zuordnet. In diese Bereitstellungskosten können z.B. Kapitalbindungskosten eingehen, die bereits vor Beginn des Koordinierungsintervalls entstanden sind. Die Bereitstellungskosten überdecken sowohl die Anschaffungskosten, falls das Werkstück unternehmungsextern erworben wurde, als auch die Herstellkosten, falls das Werkstück unternehmungsintern entstanden ist. Im zweiten Fall kann es sich entweder um eine Herstellung des Werkstücks im Umsystem des Produktionssystems - in einem anderen Produktionssystem handeln. Oder das Werkstück wurde innerhalb des betrachteten Produktionssystems, aber während eines früheren Zeitraums hergestellt.
- 8) Das Attribut der Werkstückzugehörigkeit wird so definiert, daß seine aktuelle Ausprägung entweder die Zuordnung des Werkstücks zu genau einem oder aber zu überhaupt keinem Produktionsauftrag anzeigt. Im ersten Fall gehört es zu demjenigen Werkstückkomplex, der zur Auftragsabwicklung bearbeitet werden muß. Der zweite Fall liegt dagegen vor, wenn sich das Werkstück im Eingangslager des Produktionssystems befindet und noch keinem Produktionsauftrag zugeordnet worden ist.
- 9) Vgl. dazu auch ähnliche Ansätze bei SPUR (1980), S. 32 ("Operationsfolge bei der Werkstückbearbeitung") u. S. 36 ("Rohteilzustand"); KNOOP (1986), S. 145 ("Zwangseignisfolge eines Werkstückes"); REFA (1987), S. 314 ("Automatische Werkstückbearbeitung"). Diese Ansätze weichen aber nicht nur im Detail ab. Vielmehr beruhen sie

auch auf der grundsätzlich anderen Aktionsorientierung anstelle der hier vertretenen Zustandsorientierung. Vgl. des weiteren ALDINGER (1985a), S. 87.

10) Beispielsweise kann das Werkstück im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation verharren, während sie für die Bearbeitung des Werkstücks auf- oder umgerüstet wird. Ebenso ist es möglich, daß eine Störung der Handhabungsvorrichtungen an der Bearbeitungsstation verhindert, das Werkstück aus dem Eingangspuffer in den zentralen Arbeitsbereich zu überführen.

11) Daher umfaßt der Werkstückzustand "in Bearbeitung" nicht nur diejenigen Produktionssituationen, in denen Bearbeitungsrichtungen am Werkstück ausgeführt werden. Er schließt vielmehr auch die unmittelbar angrenzenden Situationen ein. Dazu gehört z.B. das Handhaben des Werkstücks innerhalb des zentralen Arbeitsbereichs. Hinzu kommen Situationen, in denen die Werkstückbearbeitung infolge einer Produktionsstörung unterbrochen, das Werkstück aber noch nicht in einen der Puffer der Bearbeitungsstation zurückgelegt worden ist. Ebenso kann das Werkstück im zentralen Arbeitsbereich nach Beendigung seiner Bearbeitung blockiert sein, weil der Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation nicht frei ist. Eine verfeinerte Differenzierung dieser unterschiedlichen Situationen durch entsprechende unterschiedliche Werkzeugzustände wäre grundsätzlich möglich, wird aber in dieser Arbeit nicht ausgeführt.

12) Die Folgestation ist diejenige Bearbeitungs- oder Lagerstation, die das Werkstück als nächste zwecks Bearbeitung bzw. Einlagerung anlaufen soll.

13) Dies gilt strenggenommen nur für das eine Zentrallager der Fallstudie, das so konzeptualisiert wird, daß es über einen Ein- und einen Ausgangspuffer verfügt. Es handelt sich zugleich um das kombinierte Ein- und Ausgangslager des Produktionssystems. Für ein dezentrales Pufferlager wäre dagegen der Eingangspuffer durch den Eingang des Pufferlagers zu ersetzen. In dieser Fallstudie werden aber neben dem Zentrallager keine Pufferlager berücksichtigt.

14) Als einzige Lagerstation wird in der Fallstudie das eine Zentrallager angesetzt, das zugleich das kombinierte Ein- und Ausgangslager des Produktionssystems darstellt.

15) Die Differenzierung zwischen den beiden Zuständen "auf Transportmittelzuordnung wartend" und "auf Transportmittelbeladung wartend" ist erforderlich, damit einem Werkstück, dem bereits ein Transportmittel zugeordnet wurde, nicht bis zu seinem Aufladen noch weitere Transportmittel zugeordnet werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, daß die Transportmittelzuordnung zu einem wartenden Werkstück nur (höchstens) einmal erfolgt.

16) Diese Formulierung läßt bewußt offen, ob es sich entweder um ein fertiggearbeitetes oder aber um ein Werkstück handelt, das aufgrund einer erheblichen Beschädigung vorerst nicht weiter bearbeitet wird.

17) Zustandsgraphen werden des öfteren auch als (graphische Repräsentationen von) "Zustandsmaschinen" oder als Zustands/Transitions-Diagramme behandelt; vgl. dazu KÖNIG, H. (1976), S. 61ff.; BAUDIN (1990), S. 54ff., insbesondere S. 61ff.

18) Dies braucht allerdings nur im Rahmen der jeweils modellierten Produktionsaufgaben zuzutreffen. Denn es ist keineswegs ausgeschlossen, daß ein "unbearbeitetes" Werkstück in früheren Koordinierungszeiträumen oder in anderen Produktionssystemen zur Erfüllung *anderer* Produktionsaufgaben bereits bearbeitet worden ist. Darüber hinaus gilt für die Fallstudie: Ein Werkstück besitzt den Bearbeitungsstatus "unbearbeitet" genau dann, wenn es den Werkstückzustand "vorgelagert" einnimmt. Diese Äquivalenz ist jedoch ein Artefakt der hier vorgenommenen Konzeptualisierung. Sie ist keineswegs denknötwendig. Vielmehr ließe sich ebenso annehmen, daß der Bearbeitungsstatus eines vorgelagerten Werkstücks die neutrale Ausprägung "nil" annimmt, solange es noch keinem Produktionsauftrag fest zugeordnet ist. Erst nach seiner Zuordnung zu einem Produktionsauftrag erhält es den Status "unbearbeitet" zugewiesen. Diese alternative Konzeptualisierungsweise wird hier aber nicht weiterverfolgt.

19) Das Werkstück kann sich dann auf seiner letzten Bearbeitungsstation oder auf seinem Transportweg zum Ausgangslager des Produktionssystems befinden. Ebenso ist es möglich, daß das fertiggearbeitete Werkstück bereits im Ausgangslager des Produktionssystems vorliegt.

20) Näheres dazu bei der Modellierung von Bearbeitungsstationen.

21) Als einzige Lagerstation für Werkstücke wird in dieser Fallstudie ein Zentrallager berücksichtigt. Es stellt zugleich das kombinierte Ein- und Ausgangslager des modellierten Produktionssystems dar.

22) Diese Eigenschaften richten sich nach dem jeweils verfolgten Modellierungszweck und nach den jeweils konzeptualisierten Eigenarten der Modellierungsobjekte. Daher besitzen die anschließend aufgelisteten Attribute der Werkstückmarke nur exemplarischen Charakter. Beispielsweise ließen sich auch zwei Attribute für die Werkstückausmaße und für die Werkstückgewichte - jeweils einschließlich der Werkstückträger sowie aller beteiligten Spann- und Justier Vorrichtungen - erfassen. Dies wäre dann z.B. erforderlich, wenn für die Transportmittel eine dimensionale Transportkapazität in geometrischer bzw. gravitativer Hinsicht berücksichtigt würde. Dies geschieht in der hier präsentierten Fallstudie jedoch nicht. Daher wird auf die beiden vorgenannten Attribute der Werkstückmarke verzichtet. Vgl. aber zur Berücksichtigung solcher technisch ausgerichteten Werkstückeigenschaften SPUR (1980), S.

36. An anderer Stelle wird skizziert, daß für eine verfeinerte Behandlung des Auf- und Abspannens von Werkstücken die Angabe ihrer Gewichte und Abmessungen erforderlich werden kann.

23) Falls sich das Werkstück bereits zu Beginn des Koordinierungsintervalls im Eingangslager befindet, wird sein Vorlagerbeginn in dieser Fallstudie mit dem Intervallbeginn identifiziert. Wenn eine umfangreichere Modellierung erfolgt, kann auch der tatsächliche - "historische" - Vorlagerbeginn berücksichtigt werden. Er darf auch vor dem Beginn des Koordinierungsintervalls liegen. Der Vorlagerbeginn nimmt dann negative Werte an, falls für den Intervallbeginn der Standardwert "Null" gewählt wurde. Diese Möglichkeit wird von vornherein offengehalten, weil für die Attributsorte "vorlagerbeginn" die Objektmenge "INTEGER" gewählt wurde. Sie läßt auch negative Ganzzahlen als Attributausprägungen zu. Ebenso wäre es möglich, den Vorlagerbeginn eines Werkstücks erst dann eintreten zu lassen, wenn es einem Produktionsauftrag im Zeitpunkt seines Abwicklungsbeginns zugeordnet wird. Dann würde diejenige Zeit, die sich das Werkstück bereits im Eingangslager des Produktionssystems befindet, aber noch nicht seinem späteren Produktionsauftrag zugeordnet ist, nicht in die Ermittlung der werkstückspezifischen Lagerdauer und Durchlaufzeit eingehen. Entsprechend bliebe sie bei der Ermittlung jener auftragsbeschreibenden Kenngrößen außer acht, die später auf diese beiden Werkstückeigenschaften zugreifen. Diese alternative Festlegung des Vorlagerbeginns wird aber in der hier präsentierten Fallstudie nicht verwirklicht.

24) Ebenso kann von einem werkstückspezifischen Einlastungszeitpunkt gesprochen werden.

25) Die Bearbeitungsdauern werden als diejenigen Zeitspannen ermittelt, in denen das zu bearbeitende Werkstück an der jeweils betroffenen Bearbeitungsstation zwecks Ausführung von Rüst- und Bearbeitungsoperationen eingelagert ist.

26) Die Bearbeitungskosten umfassen auf jeden Fall die Ausführungskosten derjenigen Bearbeitungsoperationen, die auf das Werkstück an den Bearbeitungsstationen angewendet werden. Hinzu kommen können die Ausführungskosten für die Rüstoperationen, die für die Vorbereitung dieser Bearbeitungsoperation erforderlich waren. Vgl. aber auch die Anmerkungen hinsichtlich der Zurechnungsproblematik von reihenfolgeabhängigen Rüstkosten.

27) Die Transportdauern werden als Ausführungsdauern aller Transportoperationen ermittelt, die bei der Abwicklung eines Transportauftrags für den Werkstücktransport jeweils erforderlich sind. Vgl. zu diesen transportauftragspezifischen Transportdauern die Beschreibung des Netzmoduls für Transportmittel.

28) Die Transportkosten werden als Kosten der Nutzung desjenigen Transportmittels berechnet, das bei der Abwicklung eines Transportauftrags für den Werkstücktransport eingesetzt wird; Näheres zu diesen transportauftragspezifischen Transportkosten bei der Beschreibung des Netzmoduls für Transportmittel.

29) Die Aufenthaltsdauern schließen auch die Vorlagerzeit ein, die das Werkstück zwischen seinem Vorlager- und seinem Bearbeitungsbeginn im Eingangslager des Produktionssystems verbringt. Ebenso wird die Nachlagerzeit umgriffen, die das Werkstück zwischen seinem Bearbeitungs- und seinem Nachlagerende im Ausgangslager des Produktionssystems abwartet. Vgl. zur besonderen Relevanz der Nachlagerzeit von Aufträgen aus der Perspektive ihrer - relativ zur Vorlagerzeit - hohen Kapitalbindungskosten NIEß (1980), S. 19.

30) Die Lagerkosten werden als Kosten der Ausführung von Lageroperationen ermittelt, die an einer Lagerstation zur Ein- und Auslagerung des Werkstücks ausgeführt werden. Eventuell kommen weitere Kosten für Operationen hinzu, die innerhalb der Lagerstation am Werkstück ausgeführt werden. Die vorgenannten Lageroperationen schließen wiederum die Operationen ein, die im Ein- und Ausgangslager des Produktionssystems während der Vor- bzw. Nachlagerzeit des Werkstücks ausgeführt werden. Zu den Lagerkosten gehören aber nur diejenigen Kosten, die durch das Ausführen der Lageroperationen verursacht sind. Sie betreffen hingegen nicht die Kapitalbindungskosten, die durch Zeitablauf während der Werkstücklagerung entstehen. Diese Kapitalbindungskosten werden anschließend separat erfaßt, da ihre Ermittlung spezielle Anforderungen stellt.

31) Diese Zeitspannen fallen vor allem beim Warten auf Bearbeitung in den Eingangspuffern von Bearbeitungsstationen an. Ebenso spielt das Warten auf Transportmittel in den Ausgangspuffern von Bearbeitungsstationen eine bedeutsame Rolle. Andere Wartezeiten können z.B. dadurch entstehen, daß ein Werkstück im Ausgangspuffer einer Bearbeitungsstation auf die Zuordnung einer Folgebearbeitungsstation wartet. Die Wartezeit geht im letzten Fall auf die Dauer derjenigen Informationsverarbeitungsprozesse zurück, die im Informationssystem zum Fällen einer Zuordnungsentscheidung ausgeführt werden.

32) Die werkstückspezifische Durchlaufzeit wird ebenso als Werkstücksdurchlaufzeit bezeichnet.

33) Dieser Zeitpunkt wird mit dem Vorlagerbeginn des Werkstücks initialisiert, in dem die Herstellkosten des Werkstücks mit dessen Bereitstellungskosten gleichgesetzt werden. Danach wird der Betrag der Herstellkosten eines Werkstücks schritthaltend zur Ausführung aller Produktionsprozesse, an denen das Werkstück teilnimmt, erhöht. Dies geschieht jeweils durch das Schalten einer Transition, das dem betrachteten Werkstück arbeitsgangspezifische Bearbeitungs-, transportauftragspezifische Transport- oder lagerauftragspezifische Lagerkosten zurechnet. Um die neuen Herstellkosten zu berechnen, werden zunächst die alten Herstellkosten mit derjenigen Zeitspanne multipliziert, die im Schaltzeitpunkt der o.a. Transition seit der letzten Ermittlung der Kapitalbindung verstrichen ist. Das

Produkt aus den alten Herstellkosten und der verflorenen Zeitspanne liefert die zeitablaufbedingte Kapitalbindungszunahme. Sie wird mit dem kalkulatorischen Zinssatz multipliziert. Dabei muß darauf geachtet werden, daß verflorenne Zeitspanne und kalkulatorischer Zinssatz auf derselben Zeitskala gemessen werden. Das Multiplikationsergebnis stellt die kalkulatorischen Zinskosten dar, die für die zeitablaufbedingte Kapitalbindungszunahme seit der letzten Ermittlung der Herstellkosten angefallen sind. Sie werden als Kapitalbindungskosten zu den alten Herstellkosten addiert. Hinzu kommt der Betrag der Bearbeitungs-, Transport- oder Lagerkosten, der durch das Schalten der betrachteten Transition dem Werkstück neu zugerechnet wird. Danach liegen als Ergebnis die gesuchten neuen Herstellkosten im Zeitpunkt des Schaltens derjenigen Transition vor, die zu den zusätzlichen Bearbeitungs-, Transport- oder Lagerkosten geführt hat. Die zeitpunktbezogene Ermittlung der Herstellkosten und die prozeßbegleitende Erfassung der Kapitalbindungszunahme erlauben es, den zeitlichen Kapitalbindungsverlauf in jedem einzelnen Werkstück explizit abzubilden. Hiernit wird der früher erwähnten Forderung entsprochen, die Kapitalbindung im Umlaufvermögen sachlich detailliert und zeitlich differenziert zu erfassen.

Der Ermittlung von kalkulatorischen Zinskosten (Kapitalbindungskosten) liegt die Prämisse zugrunde, daß die Herstellkosten, die für Bereitstellung, Bearbeitung, Transport und Lagerung des Werkstücks anfallen, kapitalbindende Auszahlungen darstellen. Es wurde jedoch bereits dargelegt, daß die Herstellkosten aus der Perspektive einer streng verursachungsgerechten Kostenrechnung zumeist nicht mit kapitalbindenden Auszahlungen verknüpft sind. Die dort vorgetragenen Vorbehalte werden keineswegs übersehen. Statt dessen wird hier nur an die Gefahr angeknüpft, bei strikter Auslegung des Konzepts der Verursachungsgerechtigkeit auf die Erfassung von Kosten und Leistungen nahezu vollständig verzichten zu müssen. Daher wurde schon früher eingeräumt, auch solche Modellierungen zuzulassen, die sich nicht streng verursachungsgerecht verhalten. Nur aus dieser "freizügigen" Perspektive wird hier die Kapitalbindung durch Herstellkosten betrachtet. Vgl. dazu auch die exemplarische Erörterung an früherer Stelle, an der die Konzeptualisierung von Kapitalbindungskosten ausführlicher behandelt wurde.

Falls hingegen am Gedanken der strengen Verursachungsgerechtigkeit festgehalten werden soll, dürfen bei der Ermittlung der Kapitalbindungszunahme nur solche Anteile der bisher angefallenen Herstellkosten einbezogen werden, die tatsächlich auszahlungswirksam waren. Dieser zahlungsrelevante Kostenanteil wird oftmals Null betragen; vgl. ARNING (1987), S. 143 ("Die Zahlungen, aus denen die Kapitalbindungskosten abgeleitet werden, werden nicht fertigungsauftragsbezogen getätigt."). Es wird in der hier vorgelegten Fallstudie jedoch darauf verzichtet, Herstellkostenbestandteile hinsichtlich ihrer Auszahlungswirksamkeit zu differenzieren. Statt dessen werden alle Bereitstellungs-, Bearbeitungs-, Transport- und Lagerkosten als auszahlungswirksam unterstellt. Dies entspricht der Vorgehensweise in der betrieblichen Praxis. Auch dort wird die Kapitalbindung auf alle erfaßten Herstellkosten bezogen, ohne ihre Auszahlungswirksamkeit näher zu untersuchen; vgl. z.B. FÖRDERKREIS BETRIEBSWIRTSCHAFT STUTTGART (1988), S. 351.

Des weiteren wird unterstellt, daß der kalkulatorische Zinssatz für alle Produktionsaufträge derselbe ist. Auftragspezifische Zinssätze finden daher keine Berücksichtigung. Sie können zwar Bedeutung erlangen, wenn Produktionsaufträge für mehrere Kunden abgewickelt werden, welche die Verwendung unterschiedlicher Kalkulationszinssätze vorschreiben. Daran ist vor allem bei Geschäftsbeziehungen mit öffentlichen Auftraggebern zu denken. Doch wird diese Komplikation in der Fallstudie ausgeklammert. Ebenso wird angenommen, daß die Ermittlungsgrundlagen für den kalkulatorischen Zinssatz entweder innerhalb des koordinierungsrelevanten Zeitraums konstant bleiben. Oder sie verändern sich nur so geringfügig, daß seitens der Kostenrechnung eine Anpassung des Kalkulationszinssatzes für "unwesentlich" erachtet wird. Vgl. aber zur tatsächlichen, zeitabhängigen Variabilität dieses Zinssatzes KÜPPER, WE. (1984), S. 105, 107 u. 110. Auf die weiteren betriebswirtschaftlichen Probleme, die der Ermittlung eines entscheidungsgerechten kalkulatorischen Zinssatzes entgegenstehen könne, wird in dieser Arbeit nicht eingegangen; vgl. statt dessen die detaillierte Problemerkörterung von KÜPPER, WE. (1984), insbesondere S. 11ff., 96ff., 109ff., 213ff., 239ff. u. 293ff.

34) Die intervallspezifische Kapitalbindungszunahme ist die Zunahme der Kapitalbindung zwischen demjenigen Zeitpunkt, in dem die Kapitalbindung des Werkstücks zuletzt ermittelt wurde, und demjenigen Zeitpunkt, in dem diese Kapitalbindung neu festgelegt wird. Diese Kapitalbindungszunahme wird ermittelt als das Produkt aus den zuletzt (nicht aktuell) ermittelten Herstellkosten und aus der Zeitspanne, die zwischen den beiden oben festgelegten Zeitpunkten verstrichen ist.

35) Neben dieser skalaren Kapitalbindung könnte noch ein variabler Kapitalbindungsvektor eingeführt werden. Er nähme die Gestalt einer Liste an, deren Komponenten die aufeinanderfolgenden intervallspezifischen Kapitalbindungszunahmen sind. Parallel zum Fortschritt der Werkstückbearbeitung würde die Länge dieses listenförmigen Kapitalbindungsvektors zunehmen. Durch Aggregation aller werkstückspezifischen Kapitalbindungsvektoren für alle Werkstücke, die zum selben Produktionsauftrag gehören, ließe sich der auftragspezifische Kapitalbindungsverlauf unmittelbar ausdrücken. Auf diese Komplizierung wird in der Fallstudie jedoch verzichtet. Der Verf. sieht hierin keine wesentliche Einschränkung, da eine entsprechende Erweiterung jederzeit ohne größere Schwierigkeiten möglich ist.

36) Die intervallspezifischen Kapitalbindungskosten sind die Kapitalbindungskosten, die als kalkulatorische Zinsen auf die zuletzt ermittelte intervallspezifische Kapitalbindungszunahme anfallen. Diese Kapitalbindungskosten erge-

ben sich als das Produkt aus der zuletzt ermittelten intervallspezifischen Kapitalbindungszunahme und aus dem kalkulatorischen Zinssatz.

37) Falls sich das Werkstück bis zum Ende des Koordinierungsintervalls im Ausgangslager befindet, wird sein Nachlagerende mit dem Intervallende identifiziert.

38) Ebenso kann von einem werkstückspezifischen Auslastungszeitpunkt gesprochen werden.

39) Vgl. dazu die Ausführungen zur Objektpersistenz.

40) Zugunsten des Fortbestehens der alten Werkstücke sprechen Montagearbeitsgänge, nach deren Ausführung die montierten Teile (alte Werkstücke) im Montageprodukt (neues Werkstück) weiterhin als Produktbestandteile identifiziert werden können. Die alten Werkstücke gehen dagegen unter, wenn sie während ihrer Bearbeitung so weit verschmelzen, daß sie sich danach nicht mehr als selbständig existierende Produktbestandteile erkennen lassen. Dieser Fall tritt vor allem bei chemischen Umformungsprozessen ein. Wo die Grenze zwischen Identitätserhaltung und Identitätsverlust konkret gezogen wird, hängt auch von subjektiven Identitätswahrnehmungen des Koordinierungsträgers ab.

41) In der Fallstudie wird der Einfachheit halber stets die zweite Modellierungsalternative verwendet, sobald auf einer Produktionsstufe mindestens zwei alte Werkstücke in ein neues Werkstück eingehen.

42) Der Verschmelzungszeitpunkt ist unterbestimmt. Er kann als jeder beliebige Zeitpunkt aus dem (geschlossenen) Zeitintervall festgelegt werden, das sich zwischen dem Start- und dem Schlußzeitpunkt der verschmelzenden Werkstückbearbeitung erstreckt. In dieser Arbeit wird der vorgenannte Startzeitpunkt ausgewählt. Zugunsten dieser Festlegung spricht, daß sich auf diese Weise die Einlastung der alten Werkstücke an einer Bearbeitungsstation zwecks gemeinsamer Bearbeitung wesentlich einfacher handhaben läßt. Denn beim Schalten der einlastenden Transition braucht nur das eine verschmolzene, neue Werkstück betrachtet zu werden. Diese konstante Werkstückanzahl läßt sich durch die Beschriftung der Eingangskante der Einlastungstransition im Rahmen des Petrinetz-Konzepts unmittelbar berücksichtigen. Die variable Anzahl alter Werkstücke, die auf derselben Bearbeitungsstation von Arbeitsgang zu Arbeitsgang differieren kann, würde dagegen eine variable Beschriftung dieser Eingangskante erfordern. Ihre Realisierung bereitete erhebliche Komplikationen. Sie werden durch die Auswahl des o.a. Verschmelzungszeitpunkts von vornherein vermieden.

43) Im einzelnen gelten für die Verschmelzung mindestens zweier alter Werkstücke, die in einem neuen Werkstück aufgehen, folgende Vereinbarungen:

- Der Vorlagerbeginn des neuen Werkstücks ist der früheste Vorlagerbeginn aller alten Werkstücke.
- Der Bearbeitungsbeginn des neuen Werkstücks ist der früheste Bearbeitungsbeginn aller alten Werkstücke.
- Die Bearbeitungsdauer des neuen Werkstücks ist die Summe der Bearbeitungsdauern aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Transportdauer des neuen Werkstücks ist die Summe der Transportdauern aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Lagerdauer des neuen Werkstücks ist die Summe der Lagerdauern aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Wartedauer des neuen Werkstücks ist die Summe der Wartedauern aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Durchlaufzeit des neuen Werkstücks ist die Summe der Durchlaufzeiten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Bearbeitungskosten des neuen Werkstücks sind die Summe der Bearbeitungskosten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Bearbeitungskosten des neuen Werkstücks sind die Summe der Bearbeitungskosten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Transportkosten des neuen Werkstücks sind die Summe der Transportkosten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Lagerkosten des neuen Werkstücks sind die Summe der Lagerkosten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Kapitalbindung des neuen Werkstücks ist die Summe der Kapitalbindungen aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Kapitalbindungskosten des neuen Werkstücks sind die Summe der Kapitalbindungskosten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.
- Die Herstellkosten des neuen Werkstücks sind die Summe der Herstellkosten aller alten Werkstücke im Verschmelzungszeitpunkt.

Die Werkstückmarken für alle alten Werkstücke existieren ab dem Verschmelzungszeitpunkt nicht weiter. Die Markenattribute und ihre Ausprägungen sind dann nicht mehr definiert. Sie können daher an der Aggregation werkstückspezifischer Attributausprägungen bei der Ermittlung der daraus abgeleiteten auftragspezifischen Attributausprägungen ab dem Verschmelzungszeitpunkt nicht mehr teilnehmen. Im Verschmelzungszeitpunkt werden die

Herstellkosten aller alten Werkstücke ermittelt. Dies gilt auch dann, wenn im Verschmelzungszeitpunkt keine Bearbeitungs-, Transport- oder Lagerkosten neu entstanden sind. Dadurch werden Kapitalbindungskosten festgelegt, die bis zum Verschmelzungszeitpunkt in allen alten Werkstücken angefallen sind.

44) Jeder Sorte eines Attributs, für dessen Ausprägungen beliebige natürlichsprachliche Ausdrücke zulässig sein sollen, wird die globale Objektmenge `STRING` zugeordnet. Dadurch wird sichergestellt, daß die Klein- oder Großschreibung des ersten Buchstabens einer Attributausprägung keine Rolle spielt. Dies trifft z.B. auf die hier eingeführten Werkstücknamen und -klassen zu. Denn der symbolische Ausdruck `WS_1`, der einen Werkstücknamen darstellen soll, würde bei der Implementierung der Netzmodule im Rahmen der Programmiersprache Turbo-PROLOG als eine Variable interpretiert werden. Dies widerspräche aber dem konstanten Charakter eines jeden Werkstücknamens. Daher wird der Werkstückname hier als ein Ausdruck "`WS_1`" aus der Objektmenge `STRING` definiert. Denn jeder Stringausdruck, der in Anführungszeichen eingeschlossen ist, wird von vornherein als eine Konstante interpretiert.

Wenn für die Ausprägungen eines Attributs dagegen nur bestimmte, attributabhängige Ausdrücke zugelassen sein sollen, wird der Attributsorte die globale Objektmenge `SYMBOL` zugeordnet. Alle Attributausprägungen müssen dann als Ausdrücke notiert werden, die jeweils mit einem Kleinbuchstaben beginnen. Dies trifft hier z.B. auf den Werkstückstatus zu.

45) Die Anzahlen sind willkürlich gewählt. Sie könnten auch anders festgelegt werden. Allerdings wurde darauf geachtet, daß sie ausreichen, um den Produktionsauftrag, der in einem späteren Kapitel modelliert wird, abwickeln zu können. An seiner Abwicklung sind insgesamt 42 Werkstücke beteiligt. Die drei zusätzlichen Werkstücke werden benutzt, um zu verdeutlichen, daß sich im Zentrallager des Produktionssystems auch abundante Werkstücke befinden können, die für das aktuell vorgegebene Auftragspaket nicht benötigt werden.

46) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "`PA_1`" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "`auftragsname`" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "`PA_2`", "`PA_3`" usw.

47) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "`nil`" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

48) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

7.2.1.1.2 Modellierung von Werkzeugen

Die Werkzeuge können sowohl in einem zentralen Werkzeugmagazin als auch in den lokalen Werkzeugspeichern der Bearbeitungsstationen vorgehalten werden. Das zentrale Werkzeugmagazin wird als eine besondere Lagerstation modelliert. Dort erfolgt auch die Voreinstellung der Werkzeuge, bevor sie zu denjenigen Bearbeitungsstationen transportiert werden, an denen sie eingesetzt werden sollen. Jede Bearbeitungsstation umfaßt einen Werkzeugpuffer, an dem Werkzeuge von Transportmitteln ent- und aufgeladen werden können.

Jedes Werkzeug wird durch die Kopie einer Werkzeugmarke repräsentiert. Die Werkzeugmarke ist analog zur Werkstückmarke aufgebaut, jedoch wesentlich einfacher strukturiert¹⁾. Zunächst wird ein Werkzeug durch seinen Namen identifiziert. Hinzu kommt die Angabe der Werkzeugklasse, zu der das Werkzeug gehört. Das Statusattribut beschreibt, welchen Zustand das Werkzeug aktuell einnimmt. Als Werkzeugzustände werden unterschieden:

- ❑ gelagert: Das Werkzeug befindet sich im zentralen Werkzeugmagazin.
- ❑ auf Transportmittelzuordnung wartend: Das Werkzeug hält sich im Ausgangspuffer des zentralen Werkzeugmagazins oder am Werkzeugpuffer einer Bearbeitungsstation auf. Es wartet dort darauf, daß ihm ein Transportmittel für den Transport zu einer Bearbeitungsstation hin oder zurück zum zentralen Werkzeugmagazin zugeordnet wird.
- ❑ auf Transportmittelbeladung wartend: Das Werkzeug erwartet im Ausgangspuffer des zentralen Werkzeugmagazins oder am Werkzeugpuffer einer Bearbeitungsstation, daß es von seinem zugeordneten Transportmittel aufgeladen wird.
- ❑ transportiert: Das Werkzeug wird zwischen einer Lager- und einer Bearbeitungsstation transportiert.
- ❑ eingesetzt: Das Werkzeug befindet sich an einer Bearbeitungsstation. Entweder wird es dort im lokalen Werkzeugspeicher für den nächsten produktiven Einsatz vorgehalten. Oder es nimmt an der Ausführung eines Arbeitsgangs produktiv teil²⁾.

Schließlich gibt ein Attribut an, welcher Bearbeitungsstation das Werkzeug zugeordnet ist. Der Stationsname dient vor allem dazu, einem Transportmittel die Zielposition mitzuteilen, wenn das Werkzeug vom zentralen Werkzeugmagazin zum lokalen Werkzeugspeicher einer Bearbeitungsstation transportiert werden soll. Solange das Werkzeug keiner Bearbeitungsstation zugeordnet ist, nimmt das Attribut als Ausprägung den Namen des zentralen Werkzeugmagazins an.

Die voranstehenden Erläuterungen der Werkzeugmarke werden abschließend formal präzisiert. Es wird analog wie bei der Werkstückmarke verfahren. Darüber hinaus wird die Sorte "werkzeugliste" eingeführt³⁾. Sie besitzt eine Listenstruktur, die mit Hilfe der Programmiersprache Turbo-PROLOG leicht implementiert werden kann⁴⁾. Eine Sorte "werkzeugliste" ist die k -fache Iteration der Sorte "werkzeugmarke" mit $k \in \mathcal{N}_0$ ⁵⁾. In der Fallstudie werden insgesamt 30 Werkzeuge berücksichtigt, die zu 9 Werkzeugklassen gehören⁶⁾. Die nachfolgenden Festlegungen gelten gemeinsam für die Sektion "Marken/Operationssymbole" in den Netzlegenden der Netzmodule für Transportmittel, Bearbeitungs- und Lagerstationen.

Marken/Operationssymbole:

werkzeugname:	STRING	
	"WZ_1","WZ_2","WZ_3","WZ_4","WZ_5", "WZ_6","WZ_7","WZ_8","WZ_9","WZ_10", "WZ_11","WZ_12","WZ_13","WZ_14","WZ_15", "WZ_16","WZ_17","WZ_18","WZ_19","WZ_20", "WZ_21","WZ_22","WZ_23","WZ_24","WZ_25", "WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":	→ OB _{werkzeugname}
werkzeugklasse:	STRING	
	"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4", "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":	→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugstatus:	SYMBOL	
	gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:	→ OB _{werkzeugstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING	
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}
werkzeuglagername:	STRING	
	"LS_2":	→ OB _{werkzeuglagername}
werkzeugzuordnung =	Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)	
«m _{WZ} » = werkzeug =	Werkzeugmarke(werkzeugname werkzeugklasse werkzeugstatus werkzeugzuordnung)	
werkzeugliste =	werkzeug*	

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Bei Bedarf kann aber die Attributstruktur der Werkzeugmarke so angereichert werden, wie es für die Werkstückmarke dargelegt wurde. So lassen sich auch für Werkzeuge Zeit- und Kostengrößen spezifizieren. Beispielsweise kommen die Einsatzdauer bzw. die Bereitstellungskosten des Werkstücks in Betracht. Werkzeugname und -klasse stellen - analog zur Werkstückmarke - konstante Attribute dar. Bei Werkzeugstatus und Werkzeugzuordnung handelt es sich dagegen um variable Attribute.
- 2) Dabei beginnt der produktive Werkzeugeinsatz in demjenigen Zeitpunkt, in dem das Werkzeug zum Rüsten der Bearbeitungsstation aus dem lokalen Werkzeugspeicher entnommen wird. Der Werkzeugeinsatz endet, sobald das Werkzeug in diesen Speicher zurückgelegt worden ist. Er endet ebenso, wenn das Werkzeug am Werkzeugpuffer der Bearbeitungsstation bereitgestellt wird, um zu einer anderen Bearbeitungsstation oder aber zurück an das zentrale Werkzeugmagazin transportiert zu werden.
- 3) Jedes formale Objekt der Sorte "werkzeugliste" wird als eine Werkzeugliste bezeichnet.
- 4) Auf die Verwendung von Listen in der Programmiersprache Turbo-PROLOG wurde bereits in einer früheren Anmerkung hingewiesen.
- 5) Die Iteration einer Sorte wird durch das Superskript "*" notiert. Wenn K Kopien $m_{wz,1}, \dots, m_{wz,K}$ der Werkzeugmarke eine Werkzeugliste bilden, so wird dies als $[m_{wz,1}, \dots, m_{wz,K}]$ notiert. Der Sonderfall [] für $K=0$ stellt die leere Werkzeugliste dar. Sie enthält überhaupt keine Kopie der Werkzeugmarke. Zusätzlich wird ein 2-stelliges Prädikatssymbol Enthalten(werkzeugliste werkzeugliste) eingeführt. Es wird vereinbart, daß die Formel enthalten(liste1, liste2) genau dann (un)gültig ist, wenn die Werkzeugliste "liste1" (k)eine Teilliste der Werkzeugliste "liste2" ist. Dieses Prädikatssymbol läßt sich ohne Schwierigkeiten aus dem Prädikat "element(X, Liste)" ableiten, das bei KINNEBROCK (1988), S. 53, definiert ist. Dazu braucht lediglich der Bezug auf ein einzelnes Listenelement auf eine nicht-leere Menge von Listenelementen - die oben angesprochenen Teilliste - erweitert zu werden.
- 6) Die Anzahlen sind willkürlich gewählt. Sie könnten auch anders festgelegt werden. Allerdings wurde darauf geachtet, daß sie ausreichen, um den einen Produktionsauftrag, der später modelliert wird, abwickeln zu können.

7.2.1.1.2 Modellierung durch Netze

7.2.1.1.2.1 Modellierung von Transportmitteln

Jedes Transportmittel wird durch eine Transportmittelmarke repräsentiert. Die Transportwege, die den Transportmitteln im Produktionssystem offenstehen, werden zunächst durch einen Transportgraphen dargestellt. Die Transportmittelmarken und der Transportgraph gehen gemeinsam in ein Transportnetz ein. Dieses Transportnetz stellt ein Synthetisches Netz dar. Es umfaßt alle transportbezogenen Aspekte des Produktionssystems¹⁾.

Der Transportgraph²⁾ repräsentiert die Transporttopologie³⁾ eines Produktionssystems. Seine Knoten und Kanten stellen alle Transportpositionen bzw. -strecken dar, die im Produktionssystem zulässig sind. Bei den Transportpositionen⁴⁾ handelt es sich zunächst um die Übergabepunkte an den Bearbeitungs- oder Lagerstationen, die als Be- oder Entladepositionen für Transportmittel vorgesehen sind. Die Fallstudie umfaßt drei Bearbeitungsstationen⁵⁾ im engeren Sinn. Ihre Übergabepunkte werden als ÜB_1, ÜB_2 und ÜB_3 bezeichnet. Hinzu kommt eine separate Spannstation als Bearbeitungsstation⁶⁾ i.w.S. mit dem Übergabepunkt ÜB_4. Zwei Lagerstationen mit den Übergabepunkten ÜL_1 und ÜL_2 existieren als Zentrallager für Werkstücke bzw. als zentrales Werkzeugmagazin⁷⁾. Weitere 17 Meldepunkte MP_k mit $k \in \{1, \dots, 17\}$ dienen der Transportmittellokalisierung⁸⁾. Schließlich wird eine Parkposition PP_1 als besonderer Ruhepunkt für Transportmittel ausgezeichnet. Insgesamt enthält der Transportgraph daher 24 Transportpositionen TP_o mit $o \in \{1, \dots, 24\}$. Jede Kante des Transportgraphen stellt eine Transportstrecke zwischen zwei benachbarten Transportpositionen dar⁹⁾. Für alle Kanten sind die Längen ihrer Transportstrecken bekannt¹⁰⁾. Die Kanten sind mit den zugehörigen Streckenlängen beschriftet. Abb. 153 auf der nächsten Seite zeigt den Transportgraphen der Fallstudie.

Der Transportgraph läßt sich unmittelbar in ein Kanal/Instanz-Netz transformieren. Die Knoten des Transportgraphen, die Transportpositionen darstellen, werden zu stellenartigen Knoten des Kanal/Instanz-Netzes. Die Kanten des Transportgraphen, die Transportstrecken repräsentieren, werden durch transitionsartige Knoten des Kanal/Instanz-Netzes mit jeweils einer Eingangs- und einer Ausgangskante substituiert. Dabei vertritt jeder transitionsartige Knoten eine atomare Transportoperation, durch deren Ausführung diejenige Transportstrecke zurückgelegt wird, die durch den transitionsartigen Knoten ersetzt worden ist. Die Kantenrichtung im Kanal/Instanz-Netz entspricht der Richtung, in der die atomare Transportoperationen ausgeführt werden kann. Falls sich die atomare Transportoperation bidirektional ausführen läßt¹¹⁾, wird sie im Kanal/Instanz-Netz durch zwei komplementäre transitionsartige Knoten vertreten. Jeder von ihnen repräsentiert genau eine der zwei möglichen Ausführungsrichtungen der atomaren Transportoperation. Zusätzlich wird in den transitionsartigen Knoten einer atomaren Transportoperation die Länge der Transportstrecke eingetragen, die durch die Operationsausführung zurückgelegt wird. Abb. 154 auf der übernächsten Seite zeigt das Kanal/Instanz-Netz, das aus dem zuvor präsentierten Transportgraphen abgeleitet ist.

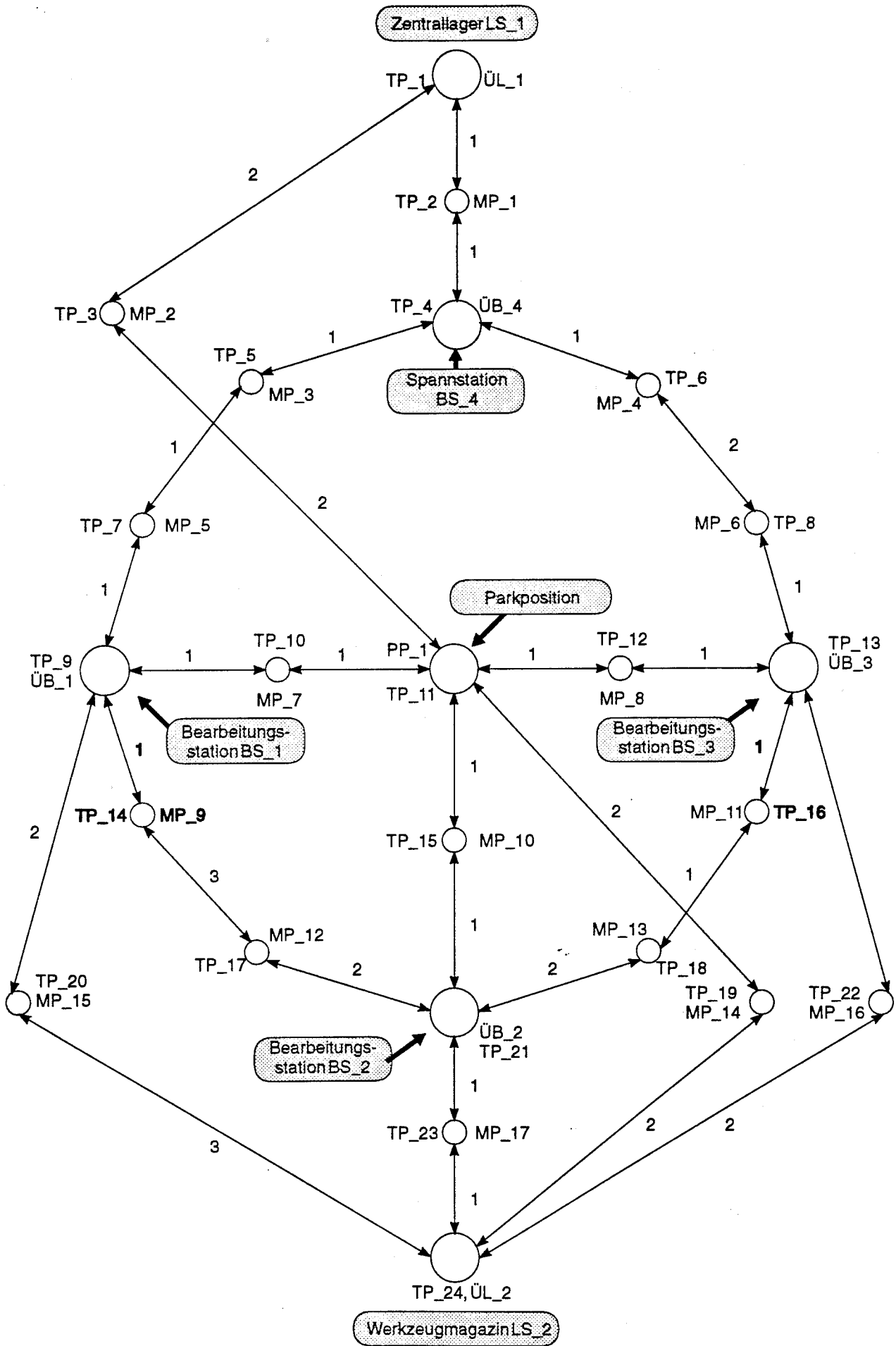


Abb. 153: Transportgraph

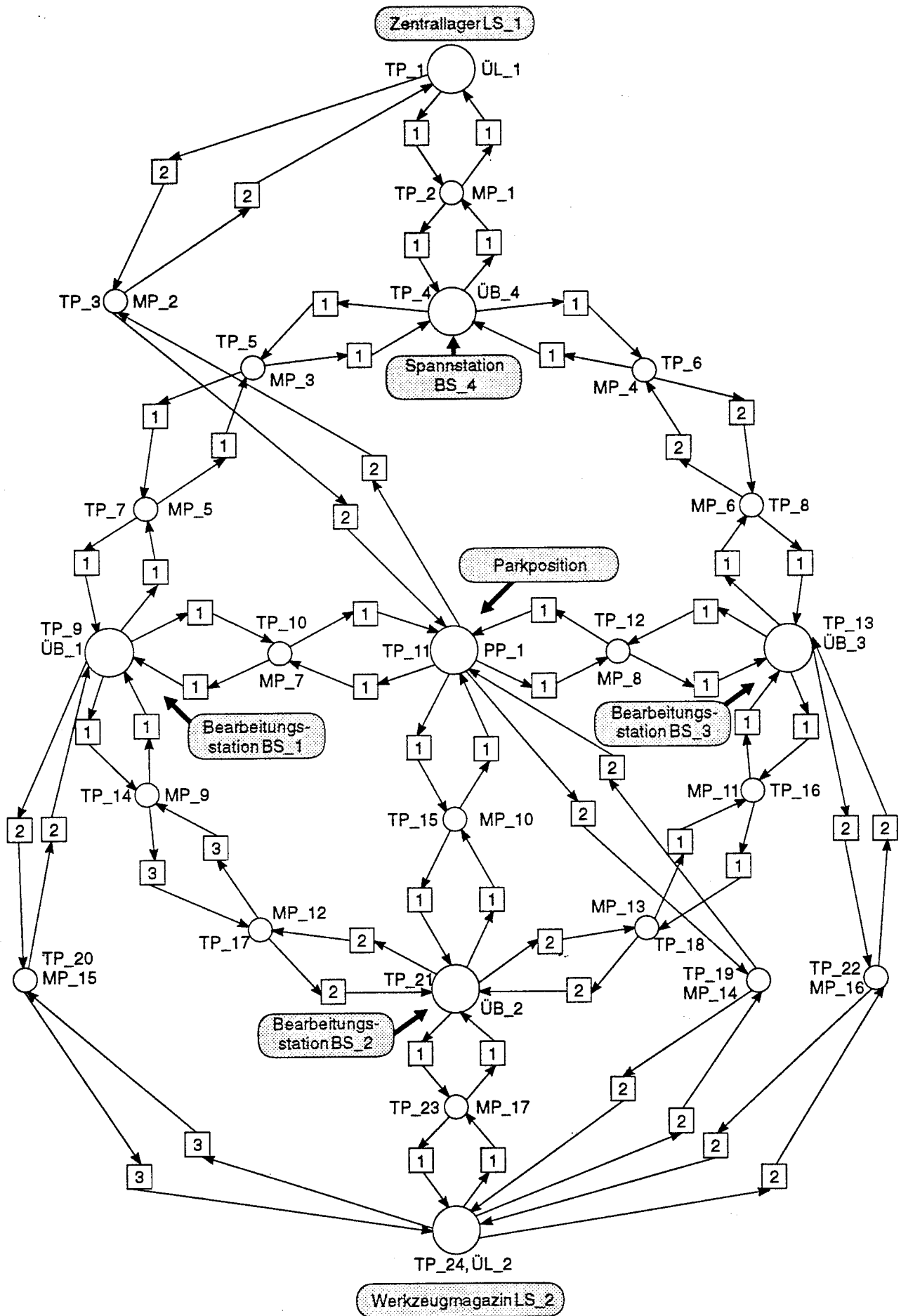


Abb. 154: Kanal/Instanz-Netz für den Transportgraphen aus Abb. 153

Die Transformation des Kanal/Instanz-Netzes in ein Transportnetz fällt so umfangreich aus, daß sich die Netzgraphik nicht mehr auf einer Seite präsentieren läßt. Daher wird zunächst¹²⁾ die hierarchische Verfeinerungstechnik genutzt, um das Netz des Transportmoduls schrittweise mit zunehmender Detaillierung zu entfalten. Dabei werden zwei Hierarchieebenen benutzt. Auf der ersten Ebene wird die graphische Darstellung des Kanal/Instanz-Netzes nahezu unverändert übernommen. Es erfolgt lediglich eine systematische Indexierung der Stellen und Transitionen. Die Transitionen stellen auf dieser ersten Hierarchieebene Makrotransitionen dar. Sie werden erst später auf der zweiten Hierarchieebene - einschließlich ihrer inzidenten Stellen - durch stellenberandete Subnetze verfeinert¹³⁾.

Der wesentliche¹⁴⁾ Informationszuwachs beim Übergang vom Kanal/Instanz-Netz zum Synthetischen Netz der ersten Hierarchieebene besteht in der Einführung einer Transportmittelmarke. Es handelt sich um eine Attributmarke. Jede ihrer Kopien drückt alle transportrelevanten Eigenschaften eines Transportmittels aus. Jede Transportmitteleigenschaft wird durch ein Attribut der Transportmittelmarke repräsentiert. Dabei werden zunächst konstante und variable Markenattribute unterschieden. Die konstanten Attribute erstrecken sich auf:

- den Transportmittelnamen, der das Transportmittel eindeutig identifiziert;
- die durchschnittliche Transportgeschwindigkeit des Transportmittels¹⁵⁾;
- die Transportkosten, die durch das Zurücklegen einer Transportstrecke je Entfernungseinheit verursacht werden (Transportkostensatz)¹⁶⁾.

Variable Attribute drücken zunächst aus, in welchem Zustand sich das repräsentierte Transportmittel aktuell befindet. Die Zustandsbeschreibung erfolgt vierdimensional. Erstens wird die Betriebsbereitschaft des Transportmittels erfaßt. Zweitens wird die Transportphase betrachtet, indem die aktuelle Transportposition des Transportmittels mit seiner Start-, Belade-, Entlade- und Ruheposition verglichen wird. Drittens wird berücksichtigt, in welchem Ausmaß die Transportkapazität des Transportmittels durch ein Transportobjekt beansprucht wird. Viertens wird die Eignung des Transportmittels für die Zuordnung eines neuen Transportauftrags beleuchtet. Aus der Kombination dieser vier Beschreibungsdimensionen lassen sich folgende Ausprägungen für zustandsbeschreibende Markenattribute ableiten¹⁷⁾:

- betriebsbereit: Das Transportmittel befindet sich in Betriebsbereitschaft.
- gestört: Das Transportmittel ist nicht mehr betriebsbereit¹⁸⁾.
- wartend: Das betriebsbereite Transportmittel verharrt an seiner Ruheposition. Ihm ist kein Transportobjekt zugeordnet.
- reserviert: Dem betriebsbereiten Transportmittel ist genau ein Transportobjekt zugeordnet. Das Transportmittel befindet sich entweder auf einem Transportweg zwischen der Start- und der Beladeposition. Es ist hierbei durch kein Transportobjekt beladen. Oder es befindet sich an seiner Beladeposition, hat aber dort sein Transportobjekt noch nicht aufgeladen.
- beladen: Das betriebsbereite Transportmittel befindet sich auf dem Transportweg zwischen Be- und Entladeposition oder an einer der beiden vorgenannten Positionen. Es ist in jedem Fall mit demjenigen Transportobjekt beladen, das ihm zugeordnet wurde.
- zurückkehrend: Das betriebsbereite Transportmittel befindet sich entweder noch an seiner Entladeposition oder bereits auf einem Weg zwischen seiner Entladeposition und seinem Ruhepunkt. In beiden Fällen ist ihm kein Transportobjekt zugeordnet. Diese Attributausprägung kommt nur in Betracht, wenn die Ruheposition des Transportmittels nicht mit dessen Entladeposition zusammenfällt.
- belegt: Das Transportmittel ist entweder reserviert oder beladen. Seine Transportkapazität wird durch ein Transportobjekt vollständig beansprucht.

- ❑ frei: Das Transportmittel ist entweder zurückkehrend oder wartend. Seine Transportkapazität wird von keinem Transportobjekt beansprucht.
- ❑ (zuordnungs-)geeignet: Das Transportmittel ist betriebsbereit und frei¹⁹⁾. Ihm kann daher jederzeit ein neues Transportobjekt zugeordnet werden.
- ❑ (zuordnungs-)ungeeignet: Das Transportmittel ist entweder betriebsbereit, aber belegt. Oder das Transportmittel ist gestört. In beiden Fällen kommt es für die Zuordnung eines neuen Transportobjekts nicht in Betracht.

Abb. 155 auf der nächsten Seite verdeutlicht durch einen erweiterten Zustandsgraphen²⁰⁾, wie die voranstehend aufgelisteten zustandsbeschreibenden Attributausprägungen sachlich voneinander abhängen. In diesem Zustandsgraphen treffen wegen der Multidimensionalität der Zustandsbeschreibung stets mehrere Attributausprägungen auf denselben Transportmittelzustand zu²¹⁾. Insgesamt sind vier Attribute erforderlich, um in einer Transportmittelmarke den aktuellen Zustand des repräsentierten Transportmittels vollständig zu beschreiben. Es handelt sich um die Attribute der Betriebsbereitschaft²²⁾, der Transportphase²³⁾, der Kapazitätsbeanspruchung²⁴⁾ und der Zuordnungseignung²⁵⁾.

Drei weitere variable Attribute dienen dazu, die qualitative Zustandsbeschreibung des Transportmittels in räumlicher und zeitlicher Hinsicht zu ergänzen. Zu diesem Zweck werden Angaben über Transportmittelpositionen und ausgeführte atomare Transportoperationen²⁶⁾ festgehalten. Im einzelnen handelt es sich um:

- ❑ die Transportposition, in der sich das Transportmittel entweder aktuell befindet oder die es zuletzt verlassen hat;
- ❑ den Startzeitpunkt, in dem die letzte Operationsausführung tatsächlich begonnen wurde²⁷⁾;
- ❑ den Schlußzeitpunkt, in dem das Transportmittel seine jeweils nächste Transportposition erreichen soll²⁸⁾.

Darüber hinaus spezifizieren variable Attribute der Transportmittelmarke den jeweils aktuellen Transportauftrag, falls dem Transportmittel ein Transportobjekt zugeordnet worden ist²⁹⁾. Sie gestatten es, durch Zeit- und Kostengrößen zu beschreiben, wie die Abwicklung des Transportauftrags voranschreitet. Dadurch geschieht eine - von Transportposition zu Transportposition - schritthaltende Dokumentation der Auftragsabwicklung³⁰⁾. Im einzelnen werden folgende Markenattribute für die Spezifizierung eines Transportauftrags verwendet:

- ❑ der identifizierende Name des Transportobjekts, das dem Transportmittel zugeordnet ist³¹⁾;
- ❑ der Zuordnungszeitpunkt, in dem die Zuordnung des Transportobjekts zum Transportmittel erfolgte³²⁾;
- ❑ der Übergabepunkt, an dem das Transportobjekt aufgenommen werden soll (Beladeposition);
- ❑ der Beladezeitpunkt, in dem das Transportmittel in der auftragsspezifischen Beladeposition das Transportobjekt übernommen hat;
- ❑ der Übergabepunkt, an dem das Transportobjekt abgeliefert werden soll (Entladeposition);
- ❑ der Entladezeitpunkt, in dem das Transportmittel in der auftragsspezifischen Entladeposition das Transportobjekt abgegeben hat;
- ❑ die Zielposition, die das Transportmittel als nächste ansteuern soll³³⁾;
- ❑ die Ruheposition, an der das Transportmittel nach dem Abladen seines Transportobjekts auf einen neuen Transportauftrag warten soll³⁴⁾;

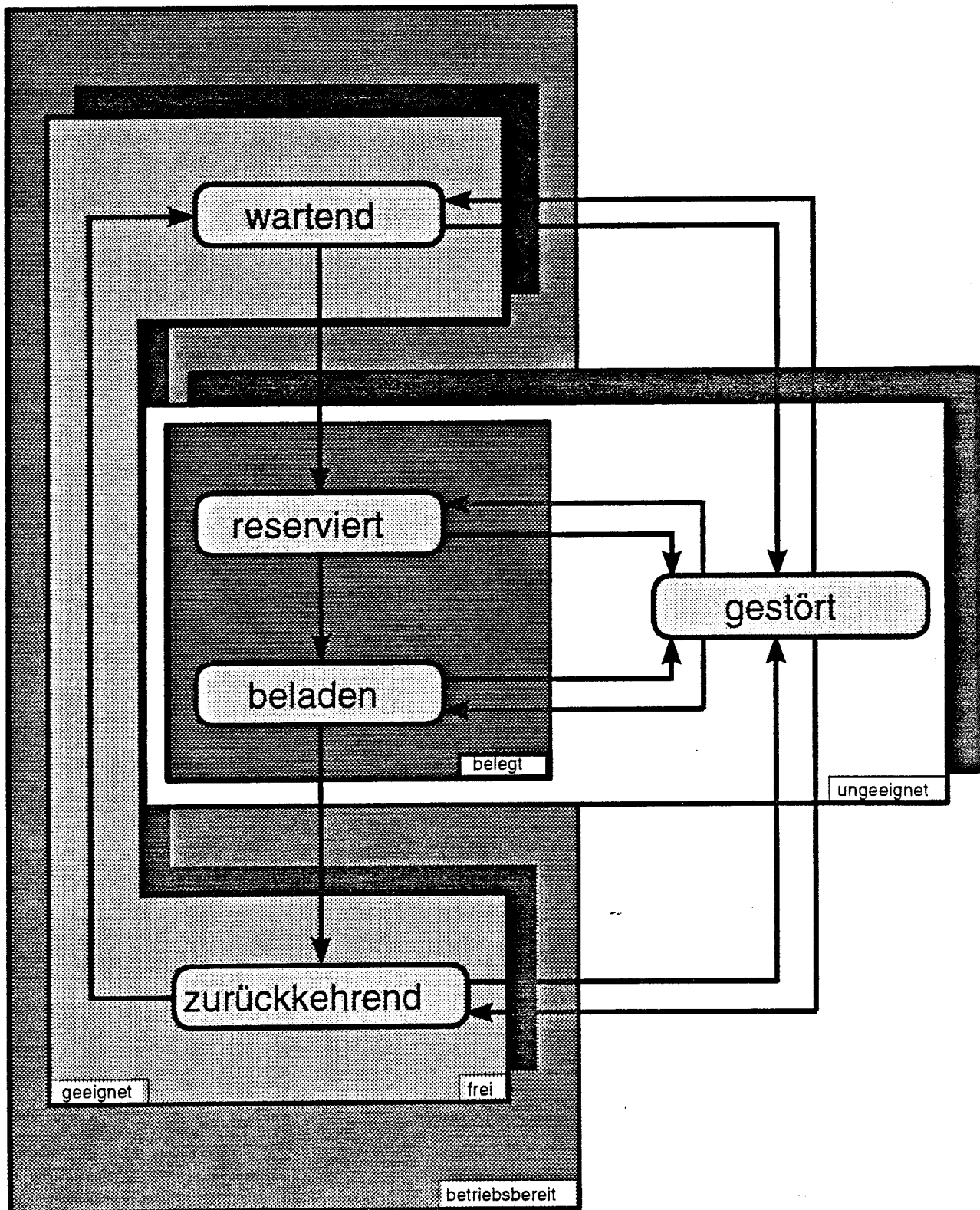


Abb. 155: Erweiterter Zustandsgraph eines Transportmittels

- die Anfahrtdauer, die bei der Abwicklung des Transportauftrags zwischen dem Zuordnungszeitpunkt und dem aktuellen Zeitpunkt vergangen ist (bis zur Ankunft in der Beladeposition³⁵);
- die Transportdauer, die bei der Abwicklung des Transportauftrags zwischen dem Beladepunkt und dem aktuellen Zeitpunkt verstrichen ist (bis zur Ankunft in der Entladeposition³⁶);
- die Rückkehrdauer, die bei der Abwicklung des Transportauftrags zwischen dem Entladezeitpunkt und dem aktuellen Zeitpunkt vergangen ist (bis zur Ankunft in der Parkposition³⁷)³⁸;
- die Transportkosten, die für die Abwicklung des Transportauftrags zwischen dem Zuordnungszeitpunkt und dem aktuellen Zeitpunkt durch das Zurücklegen aller Transportstrecken angefallen sind³⁹ (bis zur Ankunft in der Entladeposition⁴⁰).

Die Attribute der Transportmittelmarke erfassen alle vorgenannten Aspekte. Allerdings berücksichtigen sie nicht die tatsächlich transportierten Objekte, sondern nur die Namen von Transportobjekten. Um in einem Transportnetz auch den Fluß der transportierten Objekte darstellen zu können, wird eine komplementäre Transportobjektmarke⁴¹ eingeführt. Diese Transportobjektmarke kann sowohl aus einer Werkstück- als auch aus einer Werkzeugmarke bestehen. Ebenso kommt eine "Dummymarke" in Betracht. Sie dient dazu anzuzeigen, daß ein Transportmittel in der aktuellen Produktionssituation mit keinem Transportobjekt beladen ist⁴².

Auf dieser Grundlage wird jede Transportposition TP_0 aus dem Kanal/Instanz-Netz im Synthetischen Netz auf der ersten Hierarchieebene durch eine Netzstelle s_0 repräsentiert, der ein zweistelliges Prädikatssymbol zugeordnet ist. Die erste Argumentstelle des Prädikatssymbols kann durch eine Kopie der Transportmittelmarke eingenommen werden. Dies gilt genau dann, wenn sich auf der Transportposition in der aktuellen Produktionssituation mindestens ein Transportmittel befindet⁴³. Sofern dies der Fall ist, wird die zweite Argumentstelle des Prädikatssymbols durch eine Kopie der Transportobjektmarke belegt. Sie gibt an, ob ein Transportobjekt von dem Transportmittel transportiert wird⁴⁴. Wenn dies zutrifft, wird das transportierte Objekt als das jeweils betroffene Werkstück oder Werkzeug konkret ausgewiesen.

Abb. 156 u. 157 auf den beiden nächsten Seiten zeigen die Netzgraphik für das Synthetische Netz des Transportmoduls auf der ersten Hierarchieebene. Wegen seines Umfangs⁴⁵ mußte es in zwei Teilnetze zerlegt werden. Dabei sind die Schnittstellen, die in beiden Teilnetzen gemeinsam vorkommen, grau schraffiert. Alle Transitionen, die durch eine Schattierung gekennzeichnet sind, stellen Makrotransitionen dar. Jede Makrotransition repräsentiert eine atomare Transportoperation, durch deren Ausführung eine Transportstrecke zwischen zwei Transportpositionen zurückgelegt wird⁴⁶. Insgesamt werden für die Operationsausführungen 5 Transportmittel vorgeesehen, die sich unter der Ausgangsmarkierung zunächst an der Parkposition befinden⁴⁷. Auf den anschließenden Seiten ist die Netzlegende aufgeführt, die zu den beiden Teilen der Netzgraphik gehört. Ihre Festlegungen für Transportmittel- und Transportobjektmarken gelten auch in den später präsentierten verfeinernden Subnetzen. Gleiches trifft auf die Stellen und ihre Prädikatssymbole zu⁴⁸.

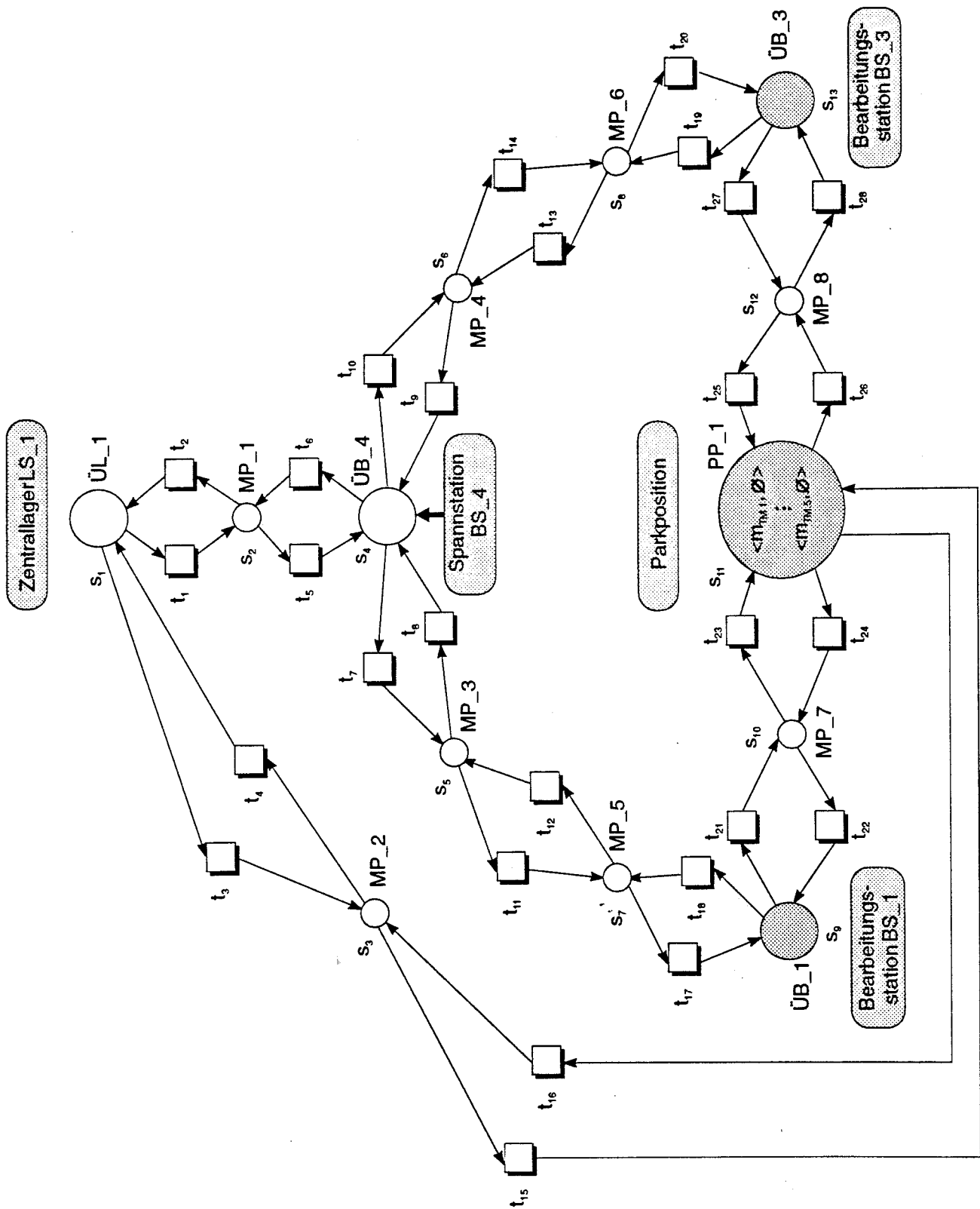


Abb. 156: Netzgraphik des Transportsystems (erste Hälfte)

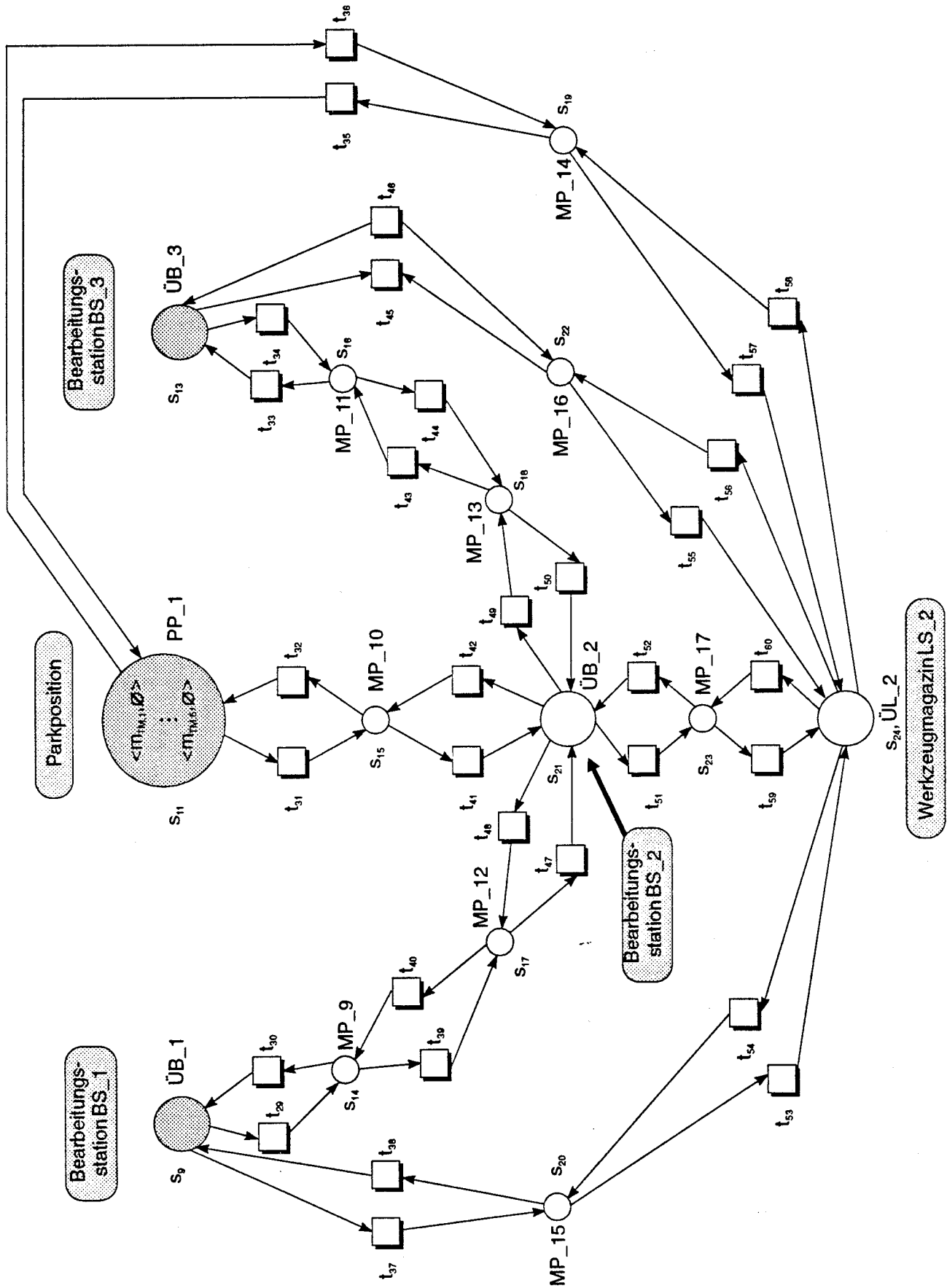


Abb. 157: Netzgraphik des Transportsystems (zweite Hälfte)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

49)

zeitpunkt:	INTEGER	
zeitdauer:	INTEGER	
kosten:	REAL	
kapitalbindungsbetrag:	REAL	
transportposition:	STRING	
"TP_1","TP_2","TP_3","TP_4",		
"TP_5","TP_6","TP_7","TP_8",		
"TP_9","TP_10","TP_11","TP_12",		
"TP_13","TP_14","TP_15","TP_16",		
"TP_17","TP_18","TP_19","TP_20",		
"TP_21","TP_22","TP_23","TP_24":		→ OB _{transportposition}
übergabepunkt:	STRING	
"ÜB_1","ÜB_2","ÜB_3","ÜB_4",		
"ÜL_1","ÜL_2":		→ OB _{übergabepunkt}
parkposition:	STRING	
"PP_1":		→ OB _{parkposition}
transportmittelname:	STRING	
"TM_1","TM_2","TM_3",		
"TM_4","TM_5":		→ OB _{transportmittelname}
transportobjektname:	STRING	
transportmittelgeschwindigkeit:	REAL	50)
transportkostensatz:	REAL	51)
betriebsbereitschaft:	SYMBOL	
betriebsbereit,gestört:		→ OB _{betriebsbereitschaft}
transportphase:	SYMBOL	
wartend,reserviert,beladen,		
zurückkehrend,nil:		→ OB _{transportphase}
kapazitätsbeanspruchung:	SYMBOL	
belegt,frei,nil:		→ OB _{kapazitätsbeanspruchung}
zuordnungseignung:	SYMBOL	
geeignet,ungeeignet:		→ OB _{zuordnungseignung}

werkstückname:	STRING		
	"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5", "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10", "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15", "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20", "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25", "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30", "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35", "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40", "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45", "nil"		
		→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:		
		→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":		
		→ OB _{auftragsname}	52)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:		53)
		→ OB _{werkstückstatus}	
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:		
		→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		
		→ OB _{bearbeitungsstationsname}	54)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":		
		→ OB _{werkstücklagername}	
werkzeugname:	STRING		
	"WZ_1","WZ_2","WZ_3","WZ_4","WZ_5", "WZ_6","WZ_7","WZ_8","WZ_9","WZ_10", "WZ_11","WZ_12","WZ_13","WZ_14","WZ_15", "WZ_16","WZ_17","WZ_18","WZ_19","WZ_20", "WZ_21","WZ_22","WZ_23","WZ_24","WZ_25", "WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":		
		→ OB _{werkzeugname}	

werkzeugklasse:	STRING	
	"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4", "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":	→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugstatus:	SYMBOL	
	gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:	→ OB _{werkzeugstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING	
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}
werkzeuglagername:	STRING	
	"LS_2":	→ OB _{werkzeuglagername}
transportmittelzustand =	Zustand(betriebsbereitschaft transportphase kapazitätsbeanspruchung zuordnungseignung)	
transportmittelposition =	Letzte_position(transportposition)	
startzeitpunkt =	Start(zeitpunkt); Start_ka()	
schlußzeitpunkt =	Schluß(zeitpunkt); Schluß_ka()	
zuordnungszeitpunkt =	Zuordnung_zei(zeitpunkt)	
beladeposition =	Belade_pos(übergabepunkt)	
beladezeitpunkt =	Belade_zei(zeitpunkt); Belade_zei_ka()	
entladeposition =	Entlade_pos(übergabepunkt); Entlade_pos_ka()	
entladezeitpunkt =	Entlade_zei(zeitpunkt); Entlade_zei_ka()	
zielposition =	Ziel_pos_üp(übergabepunkt); Ziel_pos_pp(parkposition)	
ruheposition =	Ruhe_pos_üp(übergabepunkt); Ruhe_pos_pp(parkposition)	
transportauftrag_anfahrtdauer =	Anfahrtdauer_ta(zeitdauer)	
transportauftrag_transportdauer =	Transportdauer_ta(zeitdauer)	
transportauftrag_rückkehrdauer =	Rückkehrdauer_ta(zeitdauer)	
transportauftrag_transportkosten =	Transportkosten_ta(kosten)	

```

transportauftrag = Auftrag_ta(transportobjektname zuordnungszeitpunkt
                               beladeposition beladezeitpunkt
                               entladeposition entladezeitpunkt
                               zielposition ruheposition
                               transportauftrag_anfahrtdauer
                               transportauftrag_transportdauer
                               transportauftrag_rückkehrdauer
                               transportauftrag_transportkosten);
Auftrag_ka() 55)

werkstückzugehörigkeit = Zuordnung_wspa(auftragsname);
                        Zuordnung_wspa_ka()

werkstückzuordnung = Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
                       Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                       Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn = Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                           Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende = Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                           Nachlagerende_ws_ka

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                             Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer = Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer = Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                              werkstück_bearbeitungsbeginn
                              werkstück_bearbeitungsdauer
                              werkstück_transportdauer
                              werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                              werkstück_durchlaufzeit
                              werkstück_bearbeitungsende
                              werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

```

werkstückkapitalbindung =	Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten =	Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten =	Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten =	Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten =	Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten =	Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten =	Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten =	Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten werkstück_bearbeitungskosten werkstück_transportkosten werkstück_lagerkosten werkstück_kapitalbindungskosten werkstück_herstellkosten)
werkstück =	Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückstatus bearbeitungsstatus werkstückzuordnung werkstückzeiten werkstückkapitalbindung werkstückkosten)
werkzeugzuordnung =	Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)
werkzeug =	Werkzeugmarke(werkzeugname werkzeugklasse werkzeugstatus werkzeugzuordnung)
dummy =	Keinobjekt()
«m _{TM} » = transportmittel =	Transportmittelmarke(transportmittelname transportmittelgeschwindigkeit transportkostensatz transportmittelzustand transportmittelposition startzeitpunkt schlußzeitpunkt transportauftrag)
«m _{TO} » = transportobjekt =	Transportobjektmarke_ws(werkstück); Transportobjektmarke_wz(werkzeug); Transportobjektmarke_kt(dummy)

Stellen/Prädikatssymbole:

s₁: Position_ÜL_1(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁ = 1

- s_2 : Position_MP_1(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂ = 1
- s_3 : Position_MP_2(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₃ = 1
- s_4 : Position_ÜB_4(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₄ = 1
- s_5 : Position_MP_3(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₅ = 1
- s_6 : Position_MP_4(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₆ = 1
- s_7 : Position_MP_5(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₇ = 1
- s_8 : Position_MP_6(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₈ = 1
- s_9 : Position_ÜB_1(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₉ = 1
- s_{10} : Position_MP_7(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₀ = 1
- s_{11} : Position_PP_1(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₁ = 5
- s_{12} : Position_MP_8(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₂ = 1
- s_{13} : Position_ÜB_3(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₃ = 1
- s_{14} : Position_MP_9(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₄ = 1
- s_{15} : Position_MP_10(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₅ = 1
- s_{16} : Position_MP_11(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₆ = 1
- s_{17} : Position_MP_12(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₇ = 1
- s_{18} : Position_MP_13(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₈ = 1

- s₁₉: Position_MP_14(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₉ = 1
- s₂₀: Position_MP_15(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂₀ = 1
- s₂₁: Position_ÜB_2(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂₁ = 1
- s₂₂: Position_MP_16(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂₂ = 1
- s₂₃: Position_MP_17(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂₃ = 1
- s₂₄: Position_ÜL_2(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂₄ = 1

Transitionen/Transaktionen:

- | | | | |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| t ₁ : | transport_ÜL_1/MP_1 | t ₂ : | transport_MP_1/ÜL_1 |
| t ₃ : | transport_ÜL_1/MP_2 | t ₄ : | transport_MP_2/ÜL_1 |
| t ₅ : | transport_MP_1/ÜB_4 | t ₆ : | transport_ÜB_4/MP_1 |
| t ₇ : | transport_ÜB_4/MP_3 | t ₈ : | transport_MP_3/ÜB_4 |
| t ₉ : | transport_MP_4/ÜB_4 | t ₁₀ : | transport_ÜB_4/MP_4 |
| t ₁₁ : | transport_MP_3/MP_5 | t ₁₂ : | transport_MP_5/MP_3 |
| t ₁₃ : | transport_MP_6/MP_4 | t ₁₄ : | transport_MP_4/MP_6 |
| t ₁₅ : | transport_MP_2/PP_1 | t ₁₆ : | transport_PP_1/MP_2 |
| t ₁₇ : | transport_MP_5/ÜB_1 | t ₁₈ : | transport_ÜB_1/MP_5 |
| t ₁₉ : | transport_ÜB_3/MP_6 | t ₂₀ : | transport_MP_6/ÜB_3 |
| t ₂₁ : | transport_ÜB_1/MP_7 | t ₂₂ : | transport_MP_7/ÜB_1 |
| t ₂₃ : | transport_MP_7/PP_1 | t ₂₄ : | transport_PP_1/MP_7 |
| t ₂₅ : | transport_MP_8/PP_1 | t ₂₆ : | transport_PP_1/MP_8 |
| t ₂₇ : | transport_ÜB_3/MP_8 | t ₂₈ : | transport_MP_8/ÜB_3 |
| t ₂₉ : | transport_ÜB_1/MP_9 | t ₃₀ : | transport_MP_9/ÜB_1 |
| t ₃₁ : | transport_PP_1/MP_10 | t ₃₂ : | transport_MP_10/PP_1 |
| t ₃₃ : | transport_MP_11/ÜB_3 | t ₃₄ : | transport_ÜB_3/MP_11 |
| t ₃₅ : | transport_PP_1/MP_14 | t ₃₆ : | transport_MP_14/PP_1 |
| t ₃₇ : | transport_ÜB_1/MP_15 | t ₃₈ : | transport_MP_15/ÜB_1 |
| t ₃₉ : | transport_MP_9/MP_12 | t ₄₀ : | transport_MP_12/MP_9 |
| t ₄₁ : | transport_MP_10/ÜB_2 | t ₄₂ : | transport_ÜB_2/MP_10 |
| t ₄₃ : | transport_MP_13/MP_11 | t ₄₄ : | transport_MP_11/MP_13 |
| t ₄₅ : | transport_MP_16/ÜB_3 | t ₄₆ : | transport_ÜB_3/MP_16 |
| t ₄₇ : | transport_MP_12/ÜB_2 | t ₄₈ : | transport_ÜB_2/MP_12 |
| t ₄₉ : | transport_ÜB_2/MP_13 | t ₅₀ : | transport_MP_13/ÜB_2 |

t ₅₁ :	transport_ÜB_2/MP_17	t ₅₂ :	transport_MP_17/ÜB_2
t ₅₃ :	transport_MP_15/ÜL_2	t ₅₄ :	transport_ÜL_2/MP_15
t ₅₅ :	transport_ÜL_2/MP_16	t ₅₆ :	transport_MP_16/ÜL_2
t ₅₇ :	transport_ÜL_2/MP_14	t ₅₈ :	transport_MP_14/ÜL_2
t ₅₉ :	transport_MP_17/ÜL_2	t ₆₀ :	transport_ÜL_2/MP_17

Fakten:

$\langle m_{TM,1}, \emptyset \rangle \approx$ fakt₀(1, position_PP_1(transportmittelmarke("TM_1", 2, 5.40,
zustand(betriebsbereit, wartend, frei, geeignet), letzte_position("PP_1"),
start_ka(), schluß_ka(), auftrag_ka()),
transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

$\langle m_{TM,2}, \emptyset \rangle \approx$ fakt₀(1, position_PP_1(transportmittelmarke("TM_2", 1, 3.00,
zustand(betriebsbereit, wartend, frei, geeignet), letzte_position("PP_1"),
start_ka(), schluß_ka(), auftrag_ka()),
transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

$\langle m_{TM,3}, \emptyset \rangle \approx$ fakt₀(1, position_PP_1(transportmittelmarke("TM_3", 1, 4.55,
zustand(betriebsbereit, wartend, frei, geeignet), letzte_position("PP_1"),
start_ka(), schluß_ka(), auftrag_ka()),
transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

$\langle m_{TM,4}, \emptyset \rangle \approx$ fakt₀(1, position_PP_1(transportmittelmarke("TM_4", 3, 11.00,
zustand(betriebsbereit, wartend, frei, geeignet), letzte_position("PP_1"),
start_ka(), schluß_ka(), auftrag_ka()),
transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

$\langle m_{TM,5}, \emptyset \rangle \approx$ fakt₀(1, position_PP_1(transportmittelmarke("TM_5", 2, 3.00,
zustand(betriebsbereit, wartend, frei, geeignet), letzte_position("PP_1"),
start_ka(), schluß_ka(), auftrag_ka()),
transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

Bisher wurde nur die erste Hierarchiestufe des Transportnetzes präsentiert. Jede seiner Makrotransitionen stellt eine atomare Transportoperation dar, durch deren Ausführung eine Transportstrecke zwischen zwei benachbarten Transportpositionen zurückgelegt wird. Eine solche Makrotransition wird nun auf der zweiten Hierarchieebene durch ein operations- und streckenspezifisches Subnetz verfeinert. Dabei werden die beiden inzidenten Stellen einbezogen, die jeweils eine der beiden benachbarten Transportpositionen wiedergeben. Da die Verfeinerung für alle Makrotransitionen in der gleichen Weise erfolgt, wird sie hier nur einmal exemplarisch ausgeführt.

Eine Transportoperation wird mit der Hilfe der Netzkonstruktion modelliert, die schon an früherer Stelle für die Repräsentation atomarer Operationen eingeführt und erläutert wurde. Der Konstruktionskern besteht wiederum aus je einer Transition für den Beginn und das Ende der Operationsausführung⁵⁶). Dazwischen liegt eine Stelle, die so lange von einer Kopie der Transportmittelmarke belegt ist, wie die Ausführung der atomaren Transportoperation andauert⁵⁷). Der Zeitverbrauch der Operationsausführung wird berücksichtigt, indem das Verstreichen der

Systemzeit über eine entsprechende Synchronisationsstelle s_z eingebunden wird⁵⁸). Das Ausmaß des Zeitverbrauchs, der für das Ausführen der Transportoperation erforderlich ist, wird nicht fixiert. Statt dessen wird die Transportdauer an die Geschwindigkeit des jeweils eingesetzten Transportmittels angepaßt. Zu diesem Zweck wird die Transportstrecke, die für das Ausführen der betrachteten Transportoperation zurückgelegt werden muß⁵⁹), durch die Transportgeschwindigkeit des Transportmittels dividiert. Das Resultat ist die transportstrecken- und transportmittel-spezifische Transportdauer. Die Ausführung der atomaren Transportoperation kann durch das Schalten ihrer Schlußtransition frühestens dann beendet werden, wenn nach dem Schalten ihrer Starttransition die Systemzeit um diese Transportdauer vorangeschritten ist⁶⁰).

Zusätzlich wird berücksichtigt, ob die betroffene Transportstrecke offen oder geschlossen ist. Eine Transportstrecke heißt offen, wenn sie zwar grundsätzlich benutzt werden kann, aber in der aktuellen Produktionssituation von keinem Transportmittel in Anspruch genommen wird⁶¹). Eine Transportstrecke ist dagegen geschlossen, wenn sich auf ihr in der aktuellen Produktionssituation ein Transportmittel befindet. Eine geschlossene Transportstrecke liegt ebenso vor, wenn eine Produktionsstörung bewirkt hat, daß sich die Transportstrecke - zumindest vorübergehend - nicht mehr benutzen läßt⁶²). Ein Transportmittel kann seine aktuelle Transportposition nur dann verlassen, wenn mindestens eine Transportstrecke, die von der Transportposition ausgeht, offen ist⁶³).

Das nachfolgende Subnetz gibt den internen Aufbau einer Makrotransition für eine atomare Transportoperation verfeinert wieder. Exemplarisch herausgegriffen wurde die Makrotransition t_{39} , der in der Netzlegende der Transaktionsname "transport_MP9/MP12" zugeordnet war⁶⁴). Das Schalten der Makrotransition zeigt an, daß sich ein Transportmittel von der Transportposition "Position_MP9" zur Transportposition "Position_MP12" bewegt. Wie dieser Schaltprozeß im Detail abläuft, spezifizieren die Netzgraphik der Abb. 158 und die zugehörige Netzlegende⁶⁵).

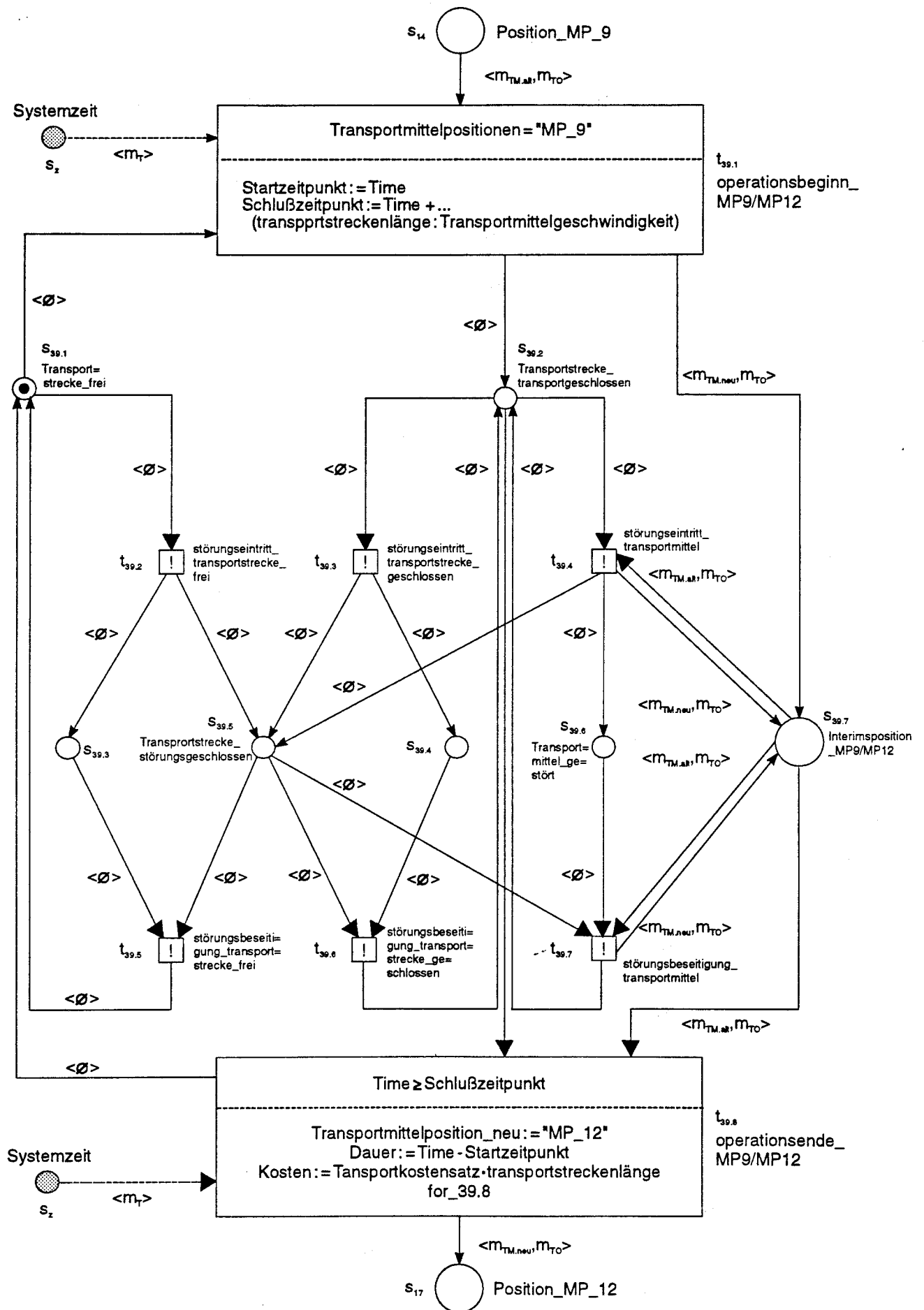


Abb. 158: Netzgraphik zur Verfeinerung der Makrotransition "transport_MP9/MP12"

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

transportstreckenlänge = 3

66)

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

transportposition: STRING

"TP_1", "TP_2", "TP_3", "TP_4",
 "TP_5", "TP_6", "TP_7", "TP_8",
 "TP_9", "TP_10", "TP_11", "TP_12",
 "TP_13", "TP_14", "TP_15", "TP_16",
 "TP_17", "TP_18", "TP_19", "TP_20",
 "TP_21", "TP_22", "TP_23", "TP_24":

→ OB_{transportposition}

übergabepunkt: STRING

"ÜB_1", "ÜB_2", "ÜB_3", "ÜB_4",
 "ÜL_1", "ÜL_2":

→ OB_{übergabepunkt}

parkposition: STRING

"PP_1":

→ OB_{parkposition}

transportmittelname: STRING

"TM_1", "TM_2", "TM_3",
 "TM_4", "TM_5":

→ OB_{transportmittelname}

transportobjektname: STRING

transportmittelgeschwindigkeit: REAL

67)

transportkostensatz: REAL

68)

betriebsbereitschaft: SYMBOL

betriebsbereit, gestört:

→ OB_{betriebsbereitschaft}

transportphase: SYMBOL

wartend, reserviert, beladen,
 zurückkehrend, nil:

→ OB_{transportphase}

kapazitätsbeanspruchung: SYMBOL

belegt, frei, nil:

→ OB_{kapazitätsbeanspruchung}

zuordnungseignung: SYMBOL

geeignet, ungeeignet:

→ OB_{zuordnungseignung}

werkstückname:	STRING		
	"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5", "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10", "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15", "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20", "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25", "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30", "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35", "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40", "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45", "nil"	→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	69)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	70)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	71)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":	→ OB _{werkstücklagername}	
werkzeugname:	STRING		
	"WZ_1","WZ_2","WZ_3","WZ_4","WZ_5", "WZ_6","WZ_7","WZ_8","WZ_9","WZ_10", "WZ_11","WZ_12","WZ_13","WZ_14","WZ_15", "WZ_16","WZ_17","WZ_18","WZ_19","WZ_20", "WZ_21","WZ_22","WZ_23","WZ_24","WZ_25", "WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":	→ OB _{werkzeugname}	

werkzeugklasse:	STRING	
	"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4", "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":	→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugstatus:	SYMBOL	
	gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:	→ OB _{werkzeugstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING	
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}
werkzeuglagername:	STRING	
	"LS_2":	→ OB _{werkzeuglagername}
transportmittelzustand =	Zustand(betriebsbereitschaft transportphase kapazitätsbeanspruchung zuordnungseignung)	
transportmittelposition =	Letzte_position(transportposition)	
startzeitpunkt =	Start(zeitpunkt); Start_ka()	
schlußzeitpunkt =	Schluß(zeitpunkt); Schluß_ka()	
zuordnungszeitpunkt =	Zuordnung_zei(zeitpunkt)	
beladeposition =	Belade_pos(übergabepunkt)	
beladezeitpunkt =	Belade_zei(zeitpunkt); Belade_zei_ka()	
entladeposition =	Entlade_pos(übergabepunkt); Entlade_pos_ka()	
entladezeitpunkt =	Entlade_zei(zeitpunkt); Entlade_zei_ka()	
zielposition =	Ziel_pos_üp(übergabepunkt); Ziel_pos_pp(parkposition)	
ruheposition =	Ruhe_pos_üp(übergabepunkt); Ruhe_pos_pp(parkposition)	
transportauftrag_anfahrtdauer =	Anfahrtdauer_ta(zeitdauer)	
transportauftrag_transportdauer =	Transportdauer_ta(zeitdauer)	
transportauftrag_rückkehrdauer =	Rückkehrdauer_ta(zeitdauer)	
transportauftrag_transportkosten =	Transportkosten_ta(kosten)	

```

transportauftrag = Auftrag_ta(transportobjektname zuordnungszeitpunkt
                               beladeposition beladezeitpunkt
                               entladeposition entladezeitpunkt
                               zielposition ruheposition
                               transportauftrag_anfahrtdauer
                               transportauftrag_transportdauer
                               transportauftrag_rückkehrdauer
                               transportauftrag_transportkosten);
Auftrag_ka() 72)

werkstückzugehörigkeit = Zuordnung_wspa(auftragsname);
                        Zuordnung_wspa_ka()

werkstückzuordnung = Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
                       Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                       Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn = Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                           Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende = Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                           Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                                Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                              Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer = Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer = Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                              werkstück_bearbeitungsbeginn
                              werkstück_bearbeitungsdauer
                              werkstück_transportdauer
                              werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                              werkstück_durchlaufzeit
                              werkstück_bearbeitungsende
                              werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

```

werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
werkstück_bearbeitungskosten
werkstück_transportkosten
werkstück_lagerkosten
werkstück_kapitalbindungskosten
werkstück_herstellkosten)
werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
werkstückkosten)
werkzeugzuordnung = Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname);
Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)
werkzeug = Werkzeugmarke(werkzeugname werkzeugklasse
werkzeugstatus werkzeugzuordnung)
dummy = Keinobjekt()
«Ø» ≈ bas_marke = Marke₀(),
marke₀() = Ø
«m_T» ≈ syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
«m_{TM}» ≈ transportmittel = Transportmittelmarke(transportmittelname
transportmittelgeschwindigkeit
transportkostensatz transportmittelzustand
transportmittelposition startzeitpunkt
schlußzeitpunkt transportauftrag)
«m_{TO}» ≈ transportobjekt = Transportobjektmarke_ws(werkstück);
Transportobjektmarke_wz(werkzeug);
Transportobjektmarke_kt(dummy)

Stellen/Prädikatsymbole:

- s₁₄: Position_MP_9(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₄ = 1
- s_{39.1}: Transportstrecke_frei(bas_marke)
markenkapazität_{39.1} = 1
- s_{39.2}: Transportstrecke_transportgeschlossen(bas_marke)
markenkapazität_{39.2} = 1
- s_{39.3}: Transportstrecke_vormals_frei(bas_marke)
markenkapazität_{39.3} = 1
- s_{39.4}: Transportstrecke_vormals_transportgeschlossen(bas_marke)
markenkapazität_{39.4} = 1
- s_{39.5}: Transportstrecke_störunggeschlossen(bas_marke)
markenkapazität_{39.5} = 1
- s_{39.6}: Transportmittel_gestört(bas_marke)
markenkapazität_{39.6} = 1
- s_{39.7}: Interimposition_MP9/MP12(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität_{39.7} = 1
- s₁₇: Position_MP_12(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₇ = 1
- s_Z: Systemzeit(syszeit)
markenkapazität_Z = 1

Transitionen/Transaktionen:

- t_{39.1}: operationsbeginn_MP9/MP12
- $\langle m_{TM.alt}, m_{TO} \rangle =$ position_MP_9(transportmittelmarke(Transportmittelname,
Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,
Transportmittelzustand,Transportmittelposition,
start_ka(),schluß_ka(),Transportauftrag),Transportobjekt) 73)
- $\langle \emptyset \rangle =$ transportstrecke_frei(\emptyset) 74)
- $\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
- Transportmittelposition = "MP_9" 75)
- Startzeitpunkt := Time
- Schlußzeitpunkt := Time + (transportstreckenlänge : Transportmittelgeschwindigkeit)
- $\langle \emptyset \rangle =$ transportstrecke_transportgeschlossen(\emptyset)

$\langle m_{TM,neu}, m_{TO} \rangle = \text{interimposition_MP9/MP12}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{Transportmittelzustand}, \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{Transportauftrag}), \text{Transportobjekt})$

$t_{39,2}$: störungseintritt_transportstrecke_frei

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_frei}(\emptyset)$

!systemmeldung!: Störungseintritt

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_vormals_frei}(\emptyset)$

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_störungsgeschlossen}(\emptyset)$

$t_{39,3}$: störungseintritt_transportstrecke_geschlossen

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_transportgeschlossen}(\emptyset)$

!systemmeldung!: Störungseintritt

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_vormals_transportgeschlossen}(\emptyset)$

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_störungsgeschlossen}(\emptyset)$

$t_{39,4}$: störungseintritt_transportmittel

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_transportgeschlossen}(\emptyset)$

$\langle m_{TM,alt}, m_{TO} \rangle = \text{interimposition_MP9/MP12}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{zustand}(\text{Betriebsbereitschaft_alt}, \text{Transportphase_alt}, \text{Kapazitätsbeanspruchung_alt}, \text{Zuordnungseignung}), \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{Transportauftrag}), \text{Transportobjekt})$

!systemmeldung!: Störungseintritt

Betriebsbereitschaft_neu := gestört

Transportphase_neu := nil

Kapazitätsbeanspruchung_neu := nil

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_störungsgeschlossen}(\emptyset)$

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportmittel_gestört}(\emptyset)$

$\langle m_{TM,neu}, m_{TO} \rangle = \text{interimposition_MP9/MP12}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{zustand}(\text{Betriebsbereitschaft_neu}, \text{Transportphase_neu}, \text{Kapazitätsbeanspruchung_neu}, \text{Zuordnungseignung}), \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{Transportauftrag}), \text{Transportobjekt})$

- t_{39,5}: störungsbeseitigung_transportstrecke_frei
 <∅> ≈ transportstrecke_vormals_frei(∅)
 <∅> ≈ transportstrecke_störungsgeschlossen(∅)
 !systemmeldung!: Störungsbeseitigung
 <∅> ≈ transportstrecke_frei(∅)
- t_{39,6}: störungsbeseitigung_transportstrecke_geschlossen
 <∅> ≈ transportstrecke_vormals_transportgeschlossen(∅)
 <∅> ≈ transportstrecke_störungsgeschlossen(∅)
 !systemmeldung!: Störungsbeseitigung
 <∅> ≈ transportstrecke_transportgeschlossen(∅)
- t_{39,7}: störungsbeseitigung_transportmittel
 <∅> ≈ transportstrecke_störungsgeschlossen(∅)
 <∅> ≈ transportmittel_gestört(∅)
 <m_{TM.alt},m_{TO}> ≈ interimposition_MP9/MP12(transportmittelmarke(Transportmittelname, Transportmittelgeschwindigkeit, Transportkostensatz, zustand(Betriebsbereitschaft_alt, Transportphase_alt, Kapazitätsbeanspruchung_alt, Zuordnungseignung), Transportmittelposition, start(Startzeitpunkt), schluß(Schlußzeitpunkt), Transportauftrag), Transportobjekt)
 !systemmeldung!: Störungsbeseitigung
 Betriebsbereitschaft_neu := betriebsbereit
 Transportphase_neu := beladen
 Kapazitätsbeanspruchung_neu := belegt
 <∅> ≈ transportstrecke_transportgeschlossen(∅)
 <m_{TM.neu},m_{TO}> ≈ interimposition_MP9/MP12(transportmittelmarke(Transportmittelname, Transportmittelgeschwindigkeit, Transportkostensatz, zustand(Betriebsbereitschaft_neu, Transportphase_neu, Kapazitätsbeanspruchung_neu, Zuordnungseignung), Transportmittelposition, start(Startzeitpunkt), schluß(Schlußzeitpunkt), Transportauftrag), Transportobjekt)
- t_{39,8}: operationsende_MP9/MP12
 <m_{TM.alt},m_{TO}> ≈ interimposition_MP9/MP12(transportmittelmarke(Transportmittelname, Transportmittelgeschwindigkeit, Transportkostensatz, zustand(Betriebsbereitschaft, Transportphase, Kapazitäts-

```

beanspruchung,Zuordnungseignung),Transportmittelposition_alt,
start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),
Transportauftrag_alt),Transportobjekt)
<∅> = transportstrecke_transportgeschlossen(∅)
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
Time ≥ Schlußzeitpunkt
Transportmittelposition_neu := "MP_12"
Dauer := Time - Startzeitpunkt
Kosten := Transportkostensatz • transportstreckenlänge
for_39.8 := ⇔ ...
  ((Transportphase = reserviert
  ∧ Transportauftrag_alt = auftrag_ta(Transportobjektname,
  Zuordnungszeitpunkt,Beladeposition,Beladezeitpunkt,
  Entladeposition,Entladezeitpunkt,Zielposition,Ruheposition,
  anfahrtdauer_ta(Anfahrt_alt),transportdauer_ta(Transport_alt),
  rückkehrdauer_ta(Rückkehr_alt),transportkosten_ta(Kosten_alt)))
→(Anfahrt_neu := Anfahrt_alt + Dauer
  ∧ Transport_neu := Transport_alt
  ∧ Rückkehr_neu := Rückkehr_alt
  ∧ Kosten_neu := Kosten_alt + Kosten))
  ∧ ((Transportphase = beladen
  ∧ Transportauftrag_alt = auftrag_ta(Transportobjektname,
  Zuordnungszeitpunkt,Beladeposition,Beladezeitpunkt,
  Entladeposition,Entladezeitpunkt,Zielposition,Ruheposition,
  anfahrtdauer_ta(Anfahrt_alt),transportdauer_ta(Transport_alt),
  rückkehrdauer_ta(Rückkehr_alt),transportkosten_ta(Kosten_alt)))
→(Anfahrt_neu := Anfahrt_alt
  ∧ Transport_neu := Transport_alt + Dauer
  ∧ Rückkehr_neu := Rückkehr_alt
  ∧ Kosten_neu := Kosten_alt + Kosten))
  ∧ ((Transportphase = zurückkehrend
  ∧ Transportauftrag_alt = auftrag_ta(Transportobjektname,
  Zuordnungszeitpunkt,Beladeposition,Beladezeitpunkt,
  Entladeposition,Entladezeitpunkt,Zielposition,Ruheposition,
  anfahrtdauer_ta(Anfahrt_alt),transportdauer_ta(Transport_alt),
  rückkehrdauer_ta(Rückkehr_alt),transportkosten_ta(Kosten_alt)))
→(Anfahrt_neu := Anfahrt_alt
  ∧ Transport_neu := Transport_alt
  ∧ Rückkehr_neu := Rückkehr_alt + Dauer
  ∧ Kosten_neu := Kosten_alt))

```

\wedge (Transportauftrag_neu := auftrag_ta(Transportobjektname,
 Zuordnungszeitpunkt,Beladeposition,Beladezeitpunkt,
 Entladeposition,Entladezeitpunkt,Zielposition,Ruheposition,
 anfahrtdauer_ta(Anfahrt_neu),transportdauer_ta(Transport_neu),
 rückkehrdauer_ta(Rückkehr_neu),transportkosten_ta(Kosten_neu)))

$\langle \emptyset \rangle = \text{transportstrecke_frei}(\emptyset)$

$\langle m_{TM_neu}, m_{TO} \rangle = \text{position_MP12}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname},$
 Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,
 zustand(Betriebsbereitschaft,Transportphase,Kapazitätsbeanspruchung,
 Zuordnungseignung),Transportmittelposition_neu,
 start_ka(),schluß_ka(),Transportauftrag_neu),Transportobjekt)

Fakten:

$\langle \emptyset \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{transportstrecke_frei}(\emptyset))$

Nach der hierarchischen Netzverfeinerung wird die Technik der horizontalen Netzerweiterung eingesetzt, um die Modellierung des Transportsystems ein letztes Mal anzureichern. Dabei wird die Zuordnung zwischen Objekten (Werkstücken⁷⁶), die an Übergabepunkten auf Abtransport warten, und geeigneten Transportmitteln betrachtet. Zunächst werden die Stellen, die Übergabepunkte an Bearbeitungs- oder Lagerstationen darstellen, zu übergabepunktspezifischen Teilnetzen ausgeweitet. Sie umfassen auch die Ein- und Ausgangspuffer der vorgenannten Stationen, an denen die Übergabe von Transportobjekten geschehen soll. Diese Puffer bilden die Schnittstellen zwischen dem Transportnetz einerseits und den Netzmodulen für Bearbeitungs- und Lagerstationen andererseits⁷⁷.

Die übergabepunktspezifischen Teilnetze werden so ausgestaltet, daß an den Schnittstellen die koordinierungsrelevanten Informationen zwischen Transportmitteln und Transportobjekten bei jedem Be- oder Entladeakt ausgetauscht werden. Diese Informationen betreffen z.B. die Entladestation, die ein gerade beladenes Transportmittel als nächste Zielstation ansteuern soll. Wenn es dort sein Transportobjekt entlädt, werden dem Objekt die transportbedingten Kosten- und Zeitgrößen angelastet. Schließlich werden in die Teilnetze der Übergabepunkte spezielle Anforderungstransitionen eingebunden. Sie sorgen dafür, daß Transportobjekte, die im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation auf ihren Abtransport warten, freie Transportmittel selbständig anfordern⁷⁸. Falls mehrere freie Transportmittel zugeordnet werden können, sorgen Schulprioritäten der Anforderungstransitionen dafür, daß Transportmittel mit minimalen Anfahrtswegen bevorzugt werden⁷⁹.

Die voranstehend skizzierte Erweiterung des Transportnetzes um übergabepunktspezifische Teilnetze läßt sich für jeden Übergabepunkt in nahezu⁸⁰ derselben Weise durchführen. Daher wird - wie schon bei der Verfeinerung der Makrotransitionen - nur ein exemplarischer Übergabepunkt behandelt. Zu diesem Zweck wird der Übergabepunkt "ÜB_2" der zweiten Bearbeitungsstation "BS_2" ausgewählt. Er wurde im Transportnetz bisher durch die Stelle s_{21} und das zugehörige Prädikatssymbol "Position_ÜB_2" repräsentiert. Der Ein- und der Ausgangspuffer dieser Bearbeitungsstation werden im Teilnetz des Übergabepunkts als die beiden Schnittstellen $s_{TE.B2}$ bzw. $s_{TA.B2}$ erfaßt. Anforderungstransitionen verknüpfen die Schnittstelle (Beladestelle) $s_{TA.B2}$ des Ausgangspuffers mit Anforderungsstellen, die im oben präsentierten, noch nicht erweiterten Transportnetz als Stellen von Transport- oder Interimpositionen enthalten sind. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf jeweils 4 exemplarisch ausgewählte Anforderungsstellen und

-transitionen⁸¹⁾. Zwei weitere Schnittstellen $s_{TP,1}$ und $s_{TP,2}$ dienen dem Informationsaustausch zwischen dem Transportnetz einerseits und den Netzen der abzuwickelnden Produktionsaufträge andererseits. Über die beiden Schnittstellen können Kopien einer Informationsmarke⁸²⁾ fließen. Sie zeigen an, daß das Transportmittel entweder am Eingangspuffer der Bearbeitungsstation ein auftragszugehöriges Werkstück entladen hat oder aber an ihrem Ausgangspuffer mit einem solchen Werkstück beladen werden soll⁸³⁾. Abb. 159 u. 161 zeigen die zweigeteilte⁸⁴⁾ Netzgraphik für das Teilnetz des Übergabepunkts "ÜB_2"⁸⁵⁾. Die beiden zugehörigen Netzlegenden befinden sich jeweils hinter den Netzgraphiken.

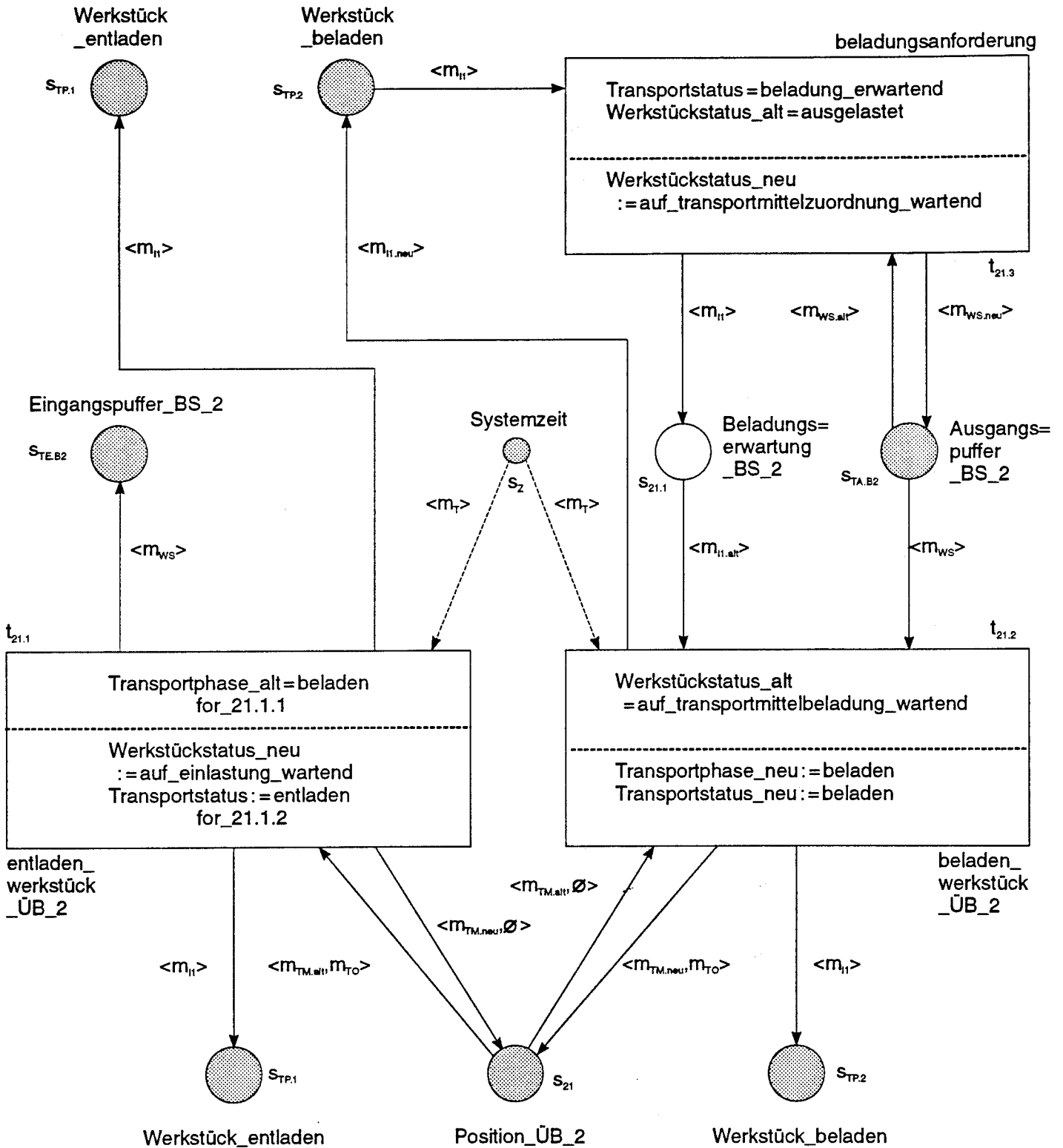


Abb. 159: Netzgraphik für das Be- und Entladen von Werkstücken am Übergabepunkt "ÜB_2" (erste Hälfte)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zinssatz = 0.06		86)
zinszeitverrechnung = 0.0000019		87)
übergabestation_name = "BS_2"		
übergabepunkt_name = "ÜB_2"		
zeitpunkt:	INTEGER	
zeitdauer:	INTEGER	
kosten:	REAL	
kapitalbindungsbetrag:	REAL	
transportposition:	STRING	
"TP_1","TP_2","TP_3","TP_4",		
"TP_5","TP_6","TP_7","TP_8",		
"TP_9","TP_10","TP_11","TP_12",		
"TP_13","TP_14","TP_15","TP_16",		
"TP_17","TP_18","TP_19","TP_20",		
"TP_21","TP_22","TP_23","TP_24":		→ OB _{transportposition}
übergabepunkt:	STRING	
"ÜB_1","ÜB_2","ÜB_3","ÜB_4",		
"ÜL_1","ÜL_2":		→ OB _{übergabepunkt}
parkposition:	STRING	
"PP_1":		→ OB _{parkposition}
transportmittelname:	STRING	
"TM_1","TM_2","TM_3",		
"TM_4","TM_5":		→ OB _{transportmittelname}
transportobjektname:	STRING	
transportmittelgeschwindigkeit:	REAL	88)
transportkostensatz:	REAL	89)
betriebsbereitschaft:	SYMBOL	
betriebsbereit,gestört:		→ OB _{betriebsbereitschaft}
transportphase:	SYMBOL	
wartend,reserviert,beladen,		
zurückkehrend,nil:		→ OB _{transportphase}

kapazitätsbeanspruchung:	SYMBOL		
belegt,frei,nil:		→	OB _{kapazitätsbeanspruchung}
zuordnungseignung:	SYMBOL		
geeignet,ungeeignet:		→	OB _{zuordnungseignung}
übergabestationsname:	STRING		
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4",			
"LS_1","LS_2":		→	OB _{übergabestationsname}
transportstatus:	SYMBOL		
beladung_erwartend,			
beladen,entladen:		→	OB _{transportstatus}
werkstückname:	STRING		
"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",			
"WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",			
"WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",			
"WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",			
"WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",			
"WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",			
"WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",			
"WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",			
"WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",			
"nil"		→	OB _{werkstückname}
werkstückklasse:	STRING		
"WSK_1","WSK_2","WSK_3",			
"WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:		→	OB _{werkstückklasse}
auftragsname:	STRING		
"PA_1":		→	OB _{auftragsname} 90)
werkstückstatus:	SYMBOL		
nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,			91)
eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,			
auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,			
auf_transportmittelzuordnung_wartend,			
auf_transportmittelbeladung_wartend,			
transportiert,nachgelagert:		→	OB _{werkstückstatus}
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
unbearbeitet,angearbeitet,			
fertigbearbeitet,beschädigt:		→	OB _{bearbeitungsstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING		
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→	OB _{bearbeitungsstationsname} 92)

werkstücklagername:	STRING	
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}
werkzeugname:	STRING	
"WZ_1","WZ_2","WZ_3","WZ_4","WZ_5",		
"WZ_6","WZ_7","WZ_8","WZ_9","WZ_10",		
"WZ_11","WZ_12","WZ_13","WZ_14","WZ_15",		
"WZ_16","WZ_17","WZ_18","WZ_19","WZ_20",		
"WZ_21","WZ_22","WZ_23","WZ_24","WZ_25",		
"WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":		→ OB _{werkzeugname}
werkzeugklasse:	STRING	
"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4",		
"WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":		→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugstatus:	SYMBOL	
gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:		→ OB _{werkzeugstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING	
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname}
werkzeuginstanzname:	STRING	
"LS_2":		→ OB _{werkzeuginstanzname}
transportmittelzustand =	Zustand(betriebsbereitschaft transportphase kapazitätsbeanspruchung zuordnungseignung)	
transportmittelposition =	Letzte_position(transportposition)	
startzeitpunkt =	Start(zeitpunkt); Start_ka()	
schlußzeitpunkt =	Schluß(zeitpunkt); Schluß_ka()	
zuordnungszeitpunkt =	Zuordnung_zei(zeitpunkt)	
beladeposition =	Belade_pos(übergabepunkt)	
beladezeitpunkt =	Belade_zei(zeitpunkt); Belade_zei_ka()	
entladeposition =	Entlade_pos(übergabepunkt); Entlade_pos_ka()	
entladezeitpunkt =	Entlade_zei(zeitpunkt); Entlade_zei_ka()	
zielposition =	Ziel_pos_üp(übergabepunkt); Ziel_pos_pp(parkposition)	

```
ruheposition = Ruhe_pos_üp(übergabepunkt);
               Ruhe_pos_pp(parkposition)

transportauftrag_anfahrtdauer = Anfahrtdauer_ta(zeitdauer)
transportauftrag_transportdauer = Transportdauer_ta(zeitdauer)
transportauftrag_rückkehrdauer = Rückkehrdauer_ta(zeitdauer)
transportauftrag_transportkosten = Transportkosten_ta(kosten)
transportauftrag = Auftrag_ta(transportobjektname zuordnungszeitpunkt
                             beladeposition beladezeitpunkt
                             entladeposition entladezeitpunkt
                             zielposition ruheposition
                             transportauftrag_anfahrtdauer
                             transportauftrag_transportdauer
                             transportauftrag_rückkehrdauer
                             transportauftrag_transportkosten);
               Auftrag_ka()

werkstückzugehörigkeit = Zuordnung_ws(auftragsname);
                        Zuordnung_ws_ka()

werkstückzuordnung = Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
                     Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                     Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn = Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                          Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende = Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                          Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                              Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                             Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)
werkstück_transportdauer = Transportdauer_ws(zeitdauer)
werkstück_lagerdauer = Lagerdauer_ws(zeitdauer)
werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)
werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)
```

93)

werkstückzeiten =	Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn werkstück_bearbeitungsbeginn werkstück_bearbeitungsdauer werkstück_transportdauer werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer werkstück_durchlaufzeit werkstück_bearbeitungsende werkstück_nachlagerende)
letzter_zeitpunkt =	Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
werkstückkapitalbindung =	Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten =	Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten =	Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten =	Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten =	Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten =	Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten =	Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten =	Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten werkstück_bearbeitungskosten werkstück_transportkosten werkstück_lagerkosten werkstück_kapitalbindungskosten werkstück_herstellkosten)
werkzeugzuordnung =	Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)
werkzeug =	Werkzeugmarke(werkzeugname werkzeugklasse werkzeugstatus werkzeugzuordnung)
dummy =	Keinobjekt()
«m _{II} » ≈ werkstücktransport =	Informationsmarke_wst(werkstückname werkstückzugehörigkeit werkstückzuordnung übergabestationsname transportstatus)
«m _T » ≈ syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
«m _{TM} » ≈ transportmittel =	Transportmittelmarke(transportmittelname transportmittelgeschwindigkeit transportkostensatz transportmittelzustand transportmittelposition startzeitpunkt schlußzeitpunkt transportauftrag)

$\langle m_{TO} \rangle \approx \text{transportobjekt} =$ Transportobjektmarke_ws(werkstück);
 Transportobjektmarke_wz(werkzeug);
 Transportobjektmarke_kt(dummy)

$\langle m_{WS} \rangle \approx \text{werkstück} =$ Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
 bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
 werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
 werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

$s_{TE.B2}$: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
 markenkapazität_{TE.B2} = 10

$s_{TA.B2}$: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
 markenkapazität_{TA.B2} = 5

$s_{TP.1}$: Werkstück_entladen(werkstücktransport)
 markenkapazität_{TP.1} = 1

$s_{TP.2}$: Werkstück_beladen(werkstücktransport)
 markenkapazität_{TP.2} = 1

s_Z : Systemzeit(syszeit)
 markenkapazität_Z = 1

s_{21} : Position_ÜB_2(transportmittel transportobjekt)
 markenkapazität₂₁ = 1

$s_{21.1}$: Beladungserwartung_BS_2(werkstücktransport)
 markenkapazität₁₁ = 5

94)

Transitionen/Transaktionen:

$t_{21.1}$: entladen_werkstück_ÜB_2
 $\langle m_{TM.alt}, m_{TO} \rangle \approx \text{position_ÜB_2}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname},$
 Transportmittelgeschwindigkeit, Transportkostensatz,
 zustand(Betriebsbereitschaft, Transportphase_alt, Kapazitäts-
 beanspruchung_alt, Zuordnungseignung_alt), Transportmittelposition,
 start(Startzeitpunkt), schluß(Schlußzeitpunkt), auftrag_ta(Transportobjektname,
 Zuordnungszeitpunkt, Beladeposition, Beladezeitpunkt,
 entlade_pos(Entladeposition), entlade_zei(Entladezeitpunkt_alt), Zielposition,
 Ruheposition, Transportauftrag_anfahrtdauer, transportdauer_ta(Tptdauer_ta),
 Transportauftrag_rückkehrdauer, transportkosten_ta(Tptkosten_ta)),

```

transportobjektmarke_ws(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
Werkstück_bearbeitungsdauer,transportdauer_ws(Tptdauer_ws_alt),
Werkstück_lagerdauer,wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),Werkstück_bearbeitungsende,
Werkstück_nachlagerende),kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeit-
punkt_alt),Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereit-
stellungskosten,Werkstück_bearbeitungskosten,
transport_ws(Tptkosten_ws_alt),Werkstück_lagerkosten,
kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),herstellung_ws(Hstkosten_alt))))))

```

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Transportphase_alt = beladen

for_21.1.1 : \Leftrightarrow ...

Entladeposition = übergabepunkt_name

\wedge Bearbeitungsstationsname = übergabestation_name

Werkstückstatus_neu := auf_einlastung_wartend

95)

Transportstatus := entladen

for_21.1.2 : \Leftrightarrow ...

(Ruheposition = ruhe_pos_üp(übergabepunkt_name)

→ (Transportphase_neu := wartend

\wedge Kapazitätsbeanspruchung_neu := frei

\wedge Zuordnungseignung_neu := geeignet

\wedge Transportauftrag_neu := auftrag_ka())

\wedge (Ruheposition = ruhe_pos_pp(Parkposition)

→ (Transportphase_neu := zurückkehrend

\wedge Kapazitätsbeanspruchung_neu := frei

\wedge Zuordnungseignung_neu := geeignet

\wedge Transportobjektname := "nil"

\wedge Entladezeitpunkt_neu := Time

\wedge Zielposition_neu := ziel_pos_pp(Parkposition)

\wedge Transportauftrag_neu := auftrag_ta(Transportobjektname,

Zuordnungszeitpunkt,Beladeposition,

Beladezeitpunkt,Entladeposition,

entlade_zei(Entladezeitpunkt_neu),

ziel_pos_pp(Parkposition),ruhe_pos_pp(Parkposition),

Transportauftrag_anfahrdauer,

transportdauer_ta(Tptdauer_ta),

Transportauftrag_rückkehrdauer,

```

        transportkosten_ta(Tptkosten_ta))))
    ^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt
    ^ Tptdauer_ws_neu := Tptdauer_ws_alt + Tptdauer_ta
    ^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + (Dauer - Tptdauer_ta)
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Tptkosten_ws_neu := Tptkosten_ws_alt + Tptkosten_ta
    ^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Tptkosten_ta
    ^ Übergabestationsname := übergabestation_name
<mWS> = eingangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname, Werkstückklasse,
    Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_neu, Bearbeitungsstatus,
    zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname), zeiten_ws(Werkstück_vor-
    lagerbeginn, Werkstück_bearbeitungsbeginn, Werkstück_bearbeitungsdauer,
    transportdauer_ws(Tptdauer_ws_neu), Werkstück_lagerdauer,
    wartedauer_ws(Wrtdauer_neu), durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
    Werkstück_bearbeitungsende, Werkstück_nachlagerende),
    kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
    Kapitalbindungsbetrag_neu), kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
    Werkstück_bearbeitungskosten, transport_ws(Tptkosten_ws_neu),
    Werkstück_lagerkosten, kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
    herstellung_ws(Hstkosten_neu))))))
<mTM,neu, Ø > = position_ÜB_2(transportmittelmarke(Transportmittelname,
    Transportmittelgeschwindigkeit, Transportkostensatz,
    zustand(Betriebsbereitschaft, Transportphase_neu, Kapazitäts-
    beanspruchung_neu, Zuordnungseignung_neu), Transportmittelposition,
    start(Startzeitpunkt), schluß(Schlußzeitpunkt),
    Transportauftrag_neu), transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))
<mII> = werkstück_entladen(informationsmarke_wst(Werkstückname,
    Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
    Übergabestationsname, Transportstatus))

```

t_{21.2}: beladen_werkstück_ÜB_2

```

<mTM,alt, Ø > = position_ÜB_2(transportmittelmarke(Transportmittelname,
    Transportmittelgeschwindigkeit, Transportkostensatz,

```

```

zustand(Betriebsbereitschaft,Transportphase_alt,
Kapazitätsbeanspruchung,Zuordnungseignung),Transportmittelposition,
start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),auftrag_ta(Transportobjektname,
Zuordnungszeitpunkt,belade_pos(Beladeposition),
belade_zei(Beladezeitpunkt_alt),entlade_pos(Entladeposition_alt),
Entladezeitpunkt,Zielposition_alt,Ruheposition,Transportauftrag_anfahrtdauer,
Transportauftrag_transportdauer,Transportauftrag_rückkehrdauer,
Transportauftrag_transportkosten),transportobjektmarke_kt(keinobjekt())
<m_ws> ≈ ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,Werkstückklasse,
Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,Bearbeitungsstatus,
Werkstückzuordnung,zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,
Werkstück_bearbeitungsbeginn,Werkstück_bearbeitungsdauer,
Werkstück_transportdauer,Werkstück_lagerdauer,
wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transport,Werkstück_lagerkosten,
kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),herstellung_ws(Hstkosten_alt))))
<m_II.alt> ≈ beladungserwartung_BS_2(informationsmarke_wst(Werkstückname,
Werkstückzugehörigkeit,Werkstückzuordnung,Übergabestationsname,
Transportstatus_alt))

```

Werkstückstatus_alt = auf_transportmittelbeladung_wartend

for_21.2.1 :⇔ ...

Transportphase_alt = reserviert

^ Transportstatus_alt = beladung_erwartend

^ Beladeposition = übergabepunkt_name

^ Übergabestationsname = übergabestation_name

Transportphase_neu := beladen

Transportstatus_neu := beladen

for_21.2.2 :⇔ ...

(Werkstückzuordnung = zuordnung_wsbs("BS_1"))

→ Entladeposition_neu := "ÜB_1")

^ (Werkstückzuordnung = zuordnung_wsbs("BS_2"))

→ Entladeposition_neu := "ÜB_2")

^ (Werkstückzuordnung = zuordnung_wsbs("BS_3"))

→ Entladeposition_neu := "ÜB_3")

^ (Werkstückzuordnung = zuordnung_wsbs("BS_4"))

→ Entladeposition_neu := "ÜB_4")


```

^ (Werkstückzuordnung = zuordnung_wsls("LS_1")
  → Entladeposition_neu := "ÜL_1")
^ (Werkstückzuordnung = zuordnung_wsls("LS_2")
  → Entladeposition_neu := "ÜL_2")
^ Zielposition_neu := Entladeposition_neu
^ Beladezeitpunkt_neu := Time
^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt
^ Werkstückstatus_neu := transportiert
^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer
^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
^ Kapitalkostenzunahme := ...
    Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
^ Emtzeitpunkt_neu := Time
^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
    Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
<mTM,neu,mTO> = position_ÜB_2(transportmittelmarke(Transportmittelname,
Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,
zustand(Betriebsbereitschaft,Transportphase_neu,Kapazitätsbeanspruchung,
Zuordnungseignung),Transportmittelposition,start(Startzeitpunkt),
schluß(Schlußzeitpunkt),auftrag_ta(Transportobjektname,
Zuordnungszeitpunkt,belade_pos(Beladeposition),
belade_zei(Beladezeitpunkt_neu),entlade_pos(Entladeposition_neu),
Entladezeitpunkt,ziel_pos_üp(Zielposition_neu),Ruheposition,
Transportauftrag_anfahrdauer,Transportauftrag_transportdauer,
Transportauftrag_rückkehrdauer,Transportauftrag_transportkosten),
transportobjektmarke_ws(werkstückmarke(Werkstückname,Werkstückklasse,
Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,Bearbeitungsstatus,
Werkstückzuordnung,zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,
Werkstück_bearbeitungsbeginn,Werkstück_bearbeitungsdauer,
Werkstück_transportdauer,Werkstück_lagerdauer,
wartedauer_ws(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
herstellung_ws(Hstkosten_neu))))))

```

$\langle m_{I1,neu} \rangle \approx \text{werkstück_beladen}(\text{informationsmarke_wst}(\text{Werkstückname},$
 Werkstückzugehörigkeit, Werkstückzuordnung, Übergabestationsname,
 Transportstatus_neu))

t_{21.3}: beladungsanforderung_BS_2

$\langle m_{I1} \rangle \approx \text{werkstück_beladen}(\text{informationsmarke_wst}(\text{Werkstückname},$
 Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
 Übergabestationsname, Transportstatus))

$\langle m_{WS,alt} \rangle \approx \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse},$
 Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_alt, Bearbeitungsstatus,
 Werkstückzuordnung_alt, Werkstückzeiten, Werkstückkapitalbindung,
 Werkstückkosten))

Transportstatus = beladung_erwartend

Werkstückstatus_alt = ausgelastet

for_21.3.1 : \Leftrightarrow ...

Übergabestationsname = übergabestation_name

\wedge Werkstückzuordnung_alt = zuordnung_ws_ka()

Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelzuordnung_wartend

for_21.3.2 : \Leftrightarrow ...

Werkstückzuordnung_neu = zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)

$\langle m_{WS,neu} \rangle \approx \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 Werkstückklasse, Werkstückzugehörigkeit,
 Werkstückstatus_neu, Bearbeitungsstatus, Werkstückzuordnung_neu,
 Werkstückzeiten, Werkstückkapitalbindung, Werkstückkosten))

$\langle m_{I1} \rangle \approx \text{beladungserwartung_BS_2}(\text{informationsmarke_wst}(\text{Werkstückname},$
 Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
 Übergabestationsname, Transportstatus))

Fakten: ---

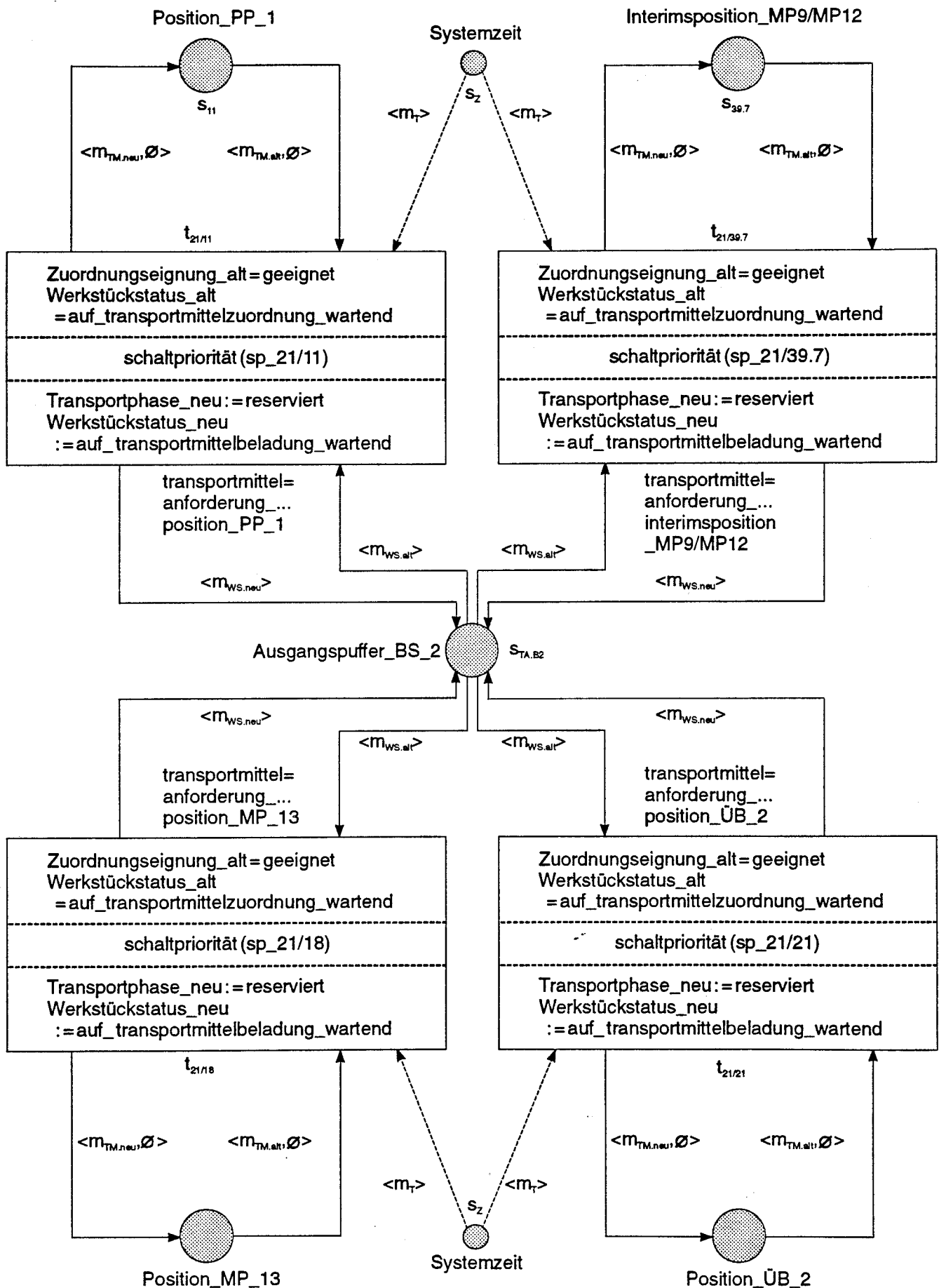


Abb. 160: Teilnetz für das Be- und Entladen von Werkstücken am Übergabepunkt "ÜB_2" (zweite Hälfte)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

übergabepunkt_name = "ÜB_2"

parkposition_name = "PP_1"

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

transportposition: STRING

"TP_1","TP_2","TP_3","TP_4",
 "TP_5","TP_6","TP_7","TP_8",
 "TP_9","TP_10","TP_11","TP_12",
 "TP_13","TP_14","TP_15","TP_16",
 "TP_17","TP_18","TP_19","TP_20",
 "TP_21","TP_22","TP_23","TP_24":

→ OB_{transportposition}

übergabepunkt: STRING

"ÜB_1","ÜB_2","ÜB_3","ÜB_4",
 "ÜL_1","ÜL_2":

→ OB_{übergabepunkt}

parkposition: STRING

"PP_1":

→ OB_{parkposition}

transportmittelname: STRING

"TM_1","TM_2","TM_3",
 "TM_4","TM_5":

→ OB_{transportmittelname}

transportobjektname: STRING

transportmittelgeschwindigkeit: REAL

97)

transportkostensatz: REAL

98)

betriebsbereitschaft: SYMBOL

betriebsbereit,gestört:

→ OB_{betriebsbereitschaft}

transportphase: SYMBOL

wartend,reserviert,beladen,
 zurückkehrend,nil:

→ OB_{transportphase}

kapazitätsbeanspruchung: SYMBOL

belegt,frei,nil:

→ OB_{kapazitätsbeanspruchung}

zuordnungseignung:	SYMBOL		
geeignet, ungeeignet:		→ OB _{zuordnungseignung}	
werkstückname:	STRING		
"WS_1", "WS_2", "WS_3", "WS_4", "WS_5", "WS_6", "WS_7", "WS_8", "WS_9", "WS_10", "WS_11", "WS_12", "WS_13", "WS_14", "WS_15", "WS_16", "WS_17", "WS_18", "WS_19", "WS_20", "WS_21", "WS_22", "WS_23", "WS_24", "WS_25", "WS_26", "WS_27", "WS_28", "WS_29", "WS_30", "WS_31", "WS_32", "WS_33", "WS_34", "WS_35", "WS_36", "WS_37", "WS_38", "WS_39", "WS_40", "WS_41", "WS_42", "WS_43", "WS_44", "WS_45", "nil"		→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
"WSK_1", "WSK_2", "WSK_3", "WSK_4", "WSK_5", "WSK_6", "WSK_7:		→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
"PA_1":		→ OB _{auftragsname}	99)
werkstückstatus:	SYMBOL		
nil, vorgelagert, auf_einlastung_wartend, eingelastet, in_bearbeitung, ausgelastet, auf_einlagerung_wartend, zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert, nachgelagert:		→ OB _{werkstückstatus}	100)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
unbearbeitet, angearbeitet, fertigbearbeitet, beschädigt:		→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
"BS_1", "BS_2", "BS_3", "BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname}	101)
werkstücklagername:	STRING		
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}	
werkzeugname:	STRING		
"WZ_1", "WZ_2", "WZ_3", "WZ_4", "WZ_5", "WZ_6", "WZ_7", "WZ_8", "WZ_9", "WZ_10", "WZ_11", "WZ_12", "WZ_13", "WZ_14", "WZ_15", "WZ_16", "WZ_17", "WZ_18", "WZ_19", "WZ_20", "WZ_21", "WZ_22", "WZ_23", "WZ_24", "WZ_25",			

"WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":	→ OB _{werkzeugname}
werkzeugklasse:	STRING
"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4", "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":	→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugstatus:	SYMBOL
gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:	→ OB _{werkzeugstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}
werkzeuglagername:	STRING
"LS_2":	→ OB _{werkzeuglagername}
transportmittelzustand =	Zustand(betriebsbereitschaft transportphase kapazitätsbeanspruchung zuordnungseignung)
transportmittelposition =	Letzte_position(transportposition)
startzeitpunkt =	Start(zeitpunkt); Start_ka()
schlußzeitpunkt =	Schluß(zeitpunkt); Schluß_ka()
zuordnungszeitpunkt =	Zuordnung_zei(zeitpunkt)
beladeposition =	Belade_pos(übergabepunkt)
beladezeitpunkt =	Belade_zei(zeitpunkt); Belade_zei_ka()
entladeposition =	Entlade_pos(übergabepunkt); Entlade_pos_ka()
entladezeitpunkt =	Entlade_zei(zeitpunkt); Entlade_zei_ka()
zielposition =	Ziel_pos_üp(übergabepunkt); Ziel_pos_pp(parkposition)
ruheposition =	Ruhe_pos_üp(übergabepunkt); Ruhe_pos_pp(parkposition)
transportauftrag_anfahrtdauer =	Anfahrtdauer_ta(zeitdauer)
transportauftrag_transportdauer =	Transportdauer_ta(zeitdauer)
transportauftrag_rückkehrdauer =	Rückkehrdauer_ta(zeitdauer)
transportauftrag_transportkosten =	Transportkosten_ta(kosten)

```

transportauftrag = Auftrag_ta(transportobjektname zuordnungszeitpunkt
                               beladeposition beladezeitpunkt
                               entladeposition entladezeitpunkt
                               zielposition ruheposition
                               transportauftrag_anfahrtdauer
                               transportauftrag_transportdauer
                               transportauftrag_rückkehrdauer
                               transportauftrag_transportkosten);
Auftrag_ka() 102)

werkstückzugehörigkeit = Zuordnung_wspa(auftragsname);
                       Zuordnung_wspa_ka()

werkstückzuordnung = Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
                       Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                       Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn = Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                           Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende = Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                           Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                             Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer = Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer = Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                              werkstück_bearbeitungsbeginn
                              werkstück_bearbeitungsdauer
                              werkstück_transportdauer
                              werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                              werkstück_durchlaufzeit
                              werkstück_bearbeitungsende
                              werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

```

werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
 werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)
 werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)
 werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)
 werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)
 werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)
 werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)
 werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
 werkstück_bearbeitungskosten
 werkstück_transportkosten
 werkstück_lagerkosten
 werkstück_kapitalbindungskosten
 werkstück_herstellkosten)

 werkzeuguordnung = Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname);
 Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)

 werkzeug = Werkzeugmarke(werkzeugname werkzeugklasse
 werkzeugstatus werkzeuguordnung)

 dummy = Keinobjekt()

 «m_T» = syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)

 «m_{TM}» = transportmittel = Transportmittelmarke(transportmittelname
 transportmittelgeschwindigkeit
 transportkostensatz transportmittelzustand
 transportmittelposition startzeitpunkt
 schlußzeitpunkt transportauftrag)

 «m_{TO}» = transportobjekt = Transportobjektmarke_ws(werkstück);
 Transportobjektmarke_wz(werkzeug);
 Transportobjektmarke_kt(dummy)

 «m_{WS}» = werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
 bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
 werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
 werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

ST_A.B₂: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
 markenkapazität_{TB}.A₂ = 5

- s₁₁: Position_PP_1(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₁ = 1
- s_{39.7}: Interimposition_MP9/MP12(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität_{39.7} = 1
- s₁₈: Position_MP_13(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₁₈ = 1
- s₂₁: Position_ÜB_2(transportmittel transportobjekt)
markenkapazität₂₁ = 1
- s_Z: Systemzeit(syszeit)
markenkapazität_Z = 1

Transitionen/Transaktionen:

- t_{21/11}: transportmittelanforderung_ausgangspuffer_BS_2/position_PP_1
- <m_{TM.alt}>∅ = position_PP_1(transportmittelmarke(Transportmittelname,
Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,zustand(Betriebs-
bereitschaft,Transportphase_alt,Kapazitätsbeanspruchung_alt,
Zuordnungseignung_alt),Transportmittelposition,
start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),auftrag_ka()),
transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))
- <m_{WS.alt}> = ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten)))
- <m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
- Zuordnungseignung_alt = geeignet
- Werkstückstatus_alt = auf_transportmittelzuordnung_wartend
schaltpriorität(sp_21/11)
- Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelbeladung_wartend
- Transportphase_neu := reserviert
- for_21/11 :⇔ ...
- Zuordnungseignung_neu := ungeeignet
 - ∧ Kapazitätsbeanspruchung_neu := belegt
 - ∧ Transportobjektname := Werkstückname
 - ∧ Zuordnungszeitpunkt := Time
 - ∧ Beladeposition := übergabepunkt_name
 - ∧ Zielposition := übergabepunkt_name
 - ∧ Parkposition := parkposition_name

- ^ Anfdauer := 0
- ^ Tptdauer := 0
- ^ Rückdauer := 0
- ^ Rückkosten := 0

$\langle m_{WS,neu} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{Werkstückzeiten}, \text{Werkstückkapitalbindung}, \text{Werkstückkosten}))$

$\langle m_{TM,neu}, \emptyset \rangle = \text{position_PP_1}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{zustand}(\text{Betriebsbereitschaft}, \text{Transportphase_neu}, \text{Kapazitätsbeanspruchung_neu}, \text{Zuordnungseignung_neu}), \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{auftrag_ta}(\text{Transportobjektname}, \text{zuordnung_zei}(\text{Zuordnungszeitpunkt}), \text{belade_pos}(\text{Beladeposition}), \text{belade_zei_ka}(), \text{entlade_pos_ka}(), \text{entlade_zei_ka}(), \text{ziel_pos_üp}(\text{Zielposition}), \text{ruhe_pos_pp}(\text{Parkposition}), \text{anfahrdauer_ta}(\text{Anfdauer}), \text{transportdauer_ta}(\text{Tptdauer}), \text{rückkehrdauer_ta}(\text{Rückdauer}), \text{transportkosten_ta}(\text{Rückkosten})), \text{transportobjektmarke_kt}(\text{keinobjekt}()))$

$t_{21/39.7}$: $\text{transportmittelanforderung_ausgangspuffer_BS_2/interimposition_MP9/MP12}$

$\langle m_{TM,alt}, \emptyset \rangle = \text{interimposition_MP9/MP12}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{zustand}(\text{Betriebsbereitschaft}, \text{Transportphase_alt}, \text{Kapazitätsbeanspruchung_alt}, \text{Zuordnungseignung_alt}), \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{auftrag_ka}()), \text{transportobjektmarke_kt}(\text{keinobjekt}()))$

$\langle m_{WS,alt} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_alt}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{Werkstückzeiten}, \text{Werkstückkapitalbindung}, \text{Werkstückkosten}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Zuordnungseignung_alt = geeignet

Werkstückstatus_alt = auf_transportmittelzuordnung_wartend
schaltpriorität(sp_21/39.7)

Transportphase_neu := reserviert

Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelbeladung_wartend
for_21/39.7 : \Leftrightarrow ...

Zuordnungseignung_neu := ungeeignet

- ^ Kapazitätsbeanspruchung_neu := belegt
- ^ Transportobjektname := Werkstückname

- ^ Zuordnungszeitpunkt := Time
- ^ Beladeposition := übergabepunkt_name
- ^ Zielposition := übergabepunkt_name
- ^ Parkposition := parkposition_name
- ^ Anfdauer := 0
- ^ Tptdauer := 0
- ^ Rückdauer := 0
- ^ Rückkosten := 0

$\langle m_{WS,neu} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{Werkstückzeiten}, \text{Werkstückkapitalbindung}, \text{Werkstückkosten}))$

$\langle m_{TM,neu}, \emptyset \rangle = \text{interimposition_MP9/MP12}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{zustand}(\text{Betriebsbereitschaft}, \text{Transportphase_neu}, \text{Kapazitätsbeanspruchung_neu}, \text{Zuordnungseignung_neu}), \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{auftrag_ta}(\text{Transportobjektname}, \text{zuordnung_zei}(\text{Zuordnungszeitpunkt}), \text{belade_pos}(\text{Beladeposition}), \text{belade_zei_ka}(), \text{entlade_pos_ka}(), \text{entlade_zei_ka}(), \text{ziel_pos_üp}(\text{Zielposition}), \text{ruhe_pos_pp}(\text{Parkposition}), \text{anfahrtdauer_ta}(\text{Anfdauer}), \text{transportdauer_ta}(\text{Tptdauer}), \text{rückkehrdauer_ta}(\text{Rückdauer}), \text{transportkosten_ta}(\text{Rückkosten}), \text{transportobjektmarke_kt}(\text{keinobjekt}()))$

$t_{21/18}$: transportmittelanforderung_ausgangspuffer_BS_2/position_MP_13

$\langle m_{TM,alt}, \emptyset \rangle = \text{position_MP_13}(\text{transportmittelmarke}(\text{Transportmittelname}, \text{Transportmittelgeschwindigkeit}, \text{Transportkostensatz}, \text{zustand}(\text{Betriebsbereitschaft}, \text{Transportphase_alt}, \text{Kapazitätsbeanspruchung_alt}, \text{Zuordnungseignung_alt}), \text{Transportmittelposition}, \text{start}(\text{Startzeitpunkt}), \text{schluß}(\text{Schlußzeitpunkt}), \text{auftrag_ka}()), \text{transportobjektmarke_kt}(\text{keinobjekt}()))$

$\langle m_{WS,alt} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_alt}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{Werkstückzeiten}, \text{Werkstückkapitalbindung}, \text{Werkstückkosten}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Zuordnungseignung_alt = geeignet

Werkstückstatus_alt = auf_transportmittelzuordnung_wartend

schaltpriorität(sp_21/18)

Transportphase_neu := reserviert

Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelbeladung_wartend
 for_21/18 : \Leftrightarrow ...

- Zuordnungseignung_neu := ungeeignet
- \wedge Kapazitätsbeanspruchung_neu := belegt
- \wedge Transportobjektname := Werkstückname
- \wedge Zuordnungszeitpunkt := Time
- \wedge Beladeposition := übergabepunkt_name
- \wedge Zielposition := übergabepunkt_name
- \wedge Parkposition := parkposition_name
- \wedge Anfdauer := 0
- \wedge Tptdauer := 0
- \wedge Rückdauer := 0
- \wedge Rückkosten := 0

$\langle m_{WS.neu} \rangle \approx$ ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
 Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
 Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten)))

$\langle m_{TM.neu}, \emptyset \rangle \approx$ position_MP_13(transportmittelmarke(Transportmittelname,
 Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,
 zustand(Betriebsbereitschaft,Transportphase_neu,
 Kapazitätsbeanspruchung_neu,Zuordnungseignung_neu),
 Transportmittelposition,start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),
 auftrag_ta(Transportobjektname,zuordnung_zei(Zuordnungszeitpunkt),
 belade_pos(Beladeposition),belade_zei_ka(),entlade_pos_ka(),
 entlade_zei_ka(),ziel_pos_üip(Zielposition),ruhe_pos_pp(Parkposition),
 anfahrtdauer_ta(Anfdauer),transportdauer_ta(Tptdauer),
 rückkehrdauer_ta(Rückdauer),transportkosten_ta(Rückkosten)),
 transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

$t_{21/21}$: transportmittelanforderung_ausgangspuffer_BS_2/position_ÜB_2

$\langle m_{TM.alt}, \emptyset \rangle \approx$ position_ÜB_2(transportmittelmarke(Transportmittelname,
 Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,
 zustand(Betriebsbereitschaft,Transportphase_alt,Kapazitätsbeanspruchung_alt,
 Zuordnungseignung_alt),Transportmittelposition,start(Startzeitpunkt),
 schluß(Schlußzeitpunkt),auftrag_ka()),transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

$\langle m_{WS.alt} \rangle \approx$ ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
 Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
 Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten)))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

```

Zuordnungseignung_alt = geeignet
Werkstückstatus_alt = auf_transportmittelzuordnung_wartend
schaltpriorität(sp_21/21)
Transportphase_neu := reserviert
Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelbeladung_wartend
for_21/21 :⇔ ...
    Zuordnungseignung_neu := ungeeignet
    ^ Kapazitätsbeanspruchung_neu := belegt
    ^ Transportobjektname := Werkstückname
    ^ Zuordnungszeitpunkt := Time
    ^ Beladeposition := übergabepunkt_name
    ^ Zielposition := übergabepunkt_name
    ^ Parkposition := parkposition_name
    ^ Anfdauer := 0
    ^ Tptdauer := 0
    ^ Rückdauer := 0
    ^ Rückkosten := 0

<mWS.neu> = ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
    Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
    Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten)))

<mTM.neu,∅> = position_ÜB_2(transportmittelmarke(Transportmittelname,
    Transportmittelgeschwindigkeit,Transportkostensatz,zustand(Betriebs-
    bereitschaft,Transportphase_neu,Kapazitätsbeanspruchung_neu,
    Zuordnungseignung_neu),Transportmittelposition,start(Startzeitpunkt),
    schluß(Schlußzeitpunkt),auftrag_ta(Transportobjektname,
    zuordnung_zei(Zuordnungszeitpunkt),belade_pos(Beladeposition),
    belade_zei_ka(),entlade_pos_ka(),entlade_zei_ka(),
    ziel_pos_üp(Zielposition),ruhe_pos_pp(Parkposition),
    anfahrtdauer_ta(Anfdauer),transportdauer_ta(Tptdauer),
    rückkehrdauer_ta(Rückdauer),transportkosten_ta(Rückkosten)),
    transportobjektmarke_kt(keinobjekt()))

```

Schaltprioritäten: sp_21/21 > sp_21/11 > sp_21/18 > sp_21/39.7

Fakten: ---

Weitere Verfeinerungen und Erweiterungen des Transportnetzes lassen sich vorstellen. Sie werden aber im Rahmen dieser Fallstudie nicht mehr detailliert ausgeführt. Denn das Netzmodul, das Transportmittel und Transporttopologie repräsentiert, ist im Vergleich zu den übrigen Netzmodulen ohnehin schon recht umfangreich ausgefallen¹⁰⁴).

Statt dessen wird hier nur eine Erweiterungsmöglichkeit grob skizziert¹⁰⁵). Sie betrifft die Überlagerung des Transportnetzes durch eine Schaltstrategie für konfliktionär aktivierte Transitionen. Dabei wird eine Stelle im Transportnetz betrachtet, die eine Transportposition repräsentiert¹⁰⁶). Falls diese Stelle mehrere Ausgangstransitionen besitzt, können sie konfliktionär aktiviert sein, sobald sich auf der Stelle mindestens eine Kopie der Transportmittelmarke befindet¹⁰⁷). Jede dieser Ausgangstransitionen bedeutet den Ausführungsbeginn einer atomaren Transportoperation. Durch die Operationsausführung würde die Transportposition der betrachteten Stelle auf einer operationsspezifischen Transportstrecke verlassen werden. Wenn nun mehrere Ausgangstransitionen derselben Transportpositionsstelle konfliktionär aktiviert sind, besteht ein besonderer Koordinierungsspielraum: Das Transportmittel, das durch eine Markenkopie auf der Transportpositionsstelle repräsentiert wird, kann seinen bisher eingeschlagenen Transportweg auf unterschiedlichen Transportstrecken fortsetzen¹⁰⁸). Es gilt, sich entweder für genau eine dieser Fortsetzungsalternativen zu entscheiden oder aber das Transportmittel auf seiner aktuellen Position warten zu lassen.

In dieser Konfliktsituation läßt sich z.B. das Schalten einer aktivierten Ausgangstransition so auswählen, daß dadurch zwischen der aktuellen Transportposition des Transportmittels und seiner nächsten Zielposition ein¹⁰⁹) Transportweg minimaler Weglänge¹¹⁰) verwirklicht wird¹¹¹). Die geschaltete Ausgangstransition der Transportpositionsstelle bedeutet dann, daß das Transportmittel durch den Ausführungsbeginn einer atomaren Transportoperation seine letzte Transportposition auf einer transportwegminimierenden Transportstrecke verläßt. Die Auswahlentscheidungen werden so lange wiederholt, bis das Transportmittel seine nächste Zielposition erreicht hat. Auf diese Weise steuert sich das Transportmittel von selbst durch das Transportnetz. Da hierbei in jeder Transportposition neue Entscheidungen über die Fortsetzung des Transportwegs getroffen werden, erfolgt die Selbststeuerung in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Produktionssituation¹¹²).

Hinzu kommt, daß die Transportobjekte, die im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation auf ein Transportmittel warten, mit der Hilfe von Anforderungstransitionen selbstständig nach freien Transportmitteln suchen. Daher steuern sich nicht nur die Transportmittel, sondern auch die Transportobjekte durch das Transportnetz. Das trifft insbesondere auch auf Werkstücke als Transportobjekte zu: Ein Werkstück fordert auf seinem Weg durch das Produktionssystem die benötigten Transportmittel an, die ihrerseits die jeweils nächsten Zielpositionen des aufgeladenen Werkstücks selbstständig ansteuern¹¹³). Auf übergeordnete Koordinierungskomponenten, wie z.B. eine zentrale Transportsteuerung, kann dabei verzichtet werden¹¹⁴). Daher läßt sich auf diese Weise eine dezentrale Transportsteuerung verwirklichen¹¹⁵).

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Die Konzeptualisierung von Transportmitteln und -wegen, die anlässlich der systemtheoretischen Strukturierung von Produktionssystemen erfolgte, wird hier als bekannt vorausgesetzt.
- 2) Vgl. zu solchen Transportgraphen GUNN (1982), S. 95; LONCHAMP (1984), S. 420; KNOOP (1986), S. 131 u. 138 (auf S. 138 als "Ortenetz" angesprochen).
- 3) Vgl. zu einer typisierenden Darstellung der am häufigsten thematisierten Topologien (Verknüpfungsstrukturen) der Transportsysteme Flexibler Fertigungssysteme STUTE (1978a), S. 83ff. Vgl. darüber hinaus die exemplarischen Darstellungen "typischer" Transportsystemstrukturen für Flexible Fertigungssysteme bei WECK (1982), S. 373 (Abb. 19-9).
- 4) Die Transportpositionen werden durch die Symbole TP_o mit $o \in \{1, \dots, O\}$ und $O \in \mathcal{N}_k$ repräsentiert. Die Anzahl "O" aller Transportpositionen, die für das zugrundeliegende Produktionssystem definiert sind, ist die Knotenanzahl des Transportgraphen.
- 5) Es handelt sich um die drei Bearbeitungsstationen BS_1, BS_2 und BS_3, die in einem späteren Kapitel eingeführt werden.
- 6) Sie wird als Bearbeitungsstation BS_4 modelliert werden.
- 7) Vgl. dazu die Beschreibung der beiden Lagerstationen LS_1 und LS_2, die in einem späteren Kapitel modelliert werden. Sie werden der Kürze halber auch nur als Zentrallager bzw. Werkzeugmagazin angesprochen.
- 8) Es wird angenommen, daß die Transportmittel entlang ihres Transportwegs nicht kontinuierlich beobachtet werden. Vielmehr sind an den Transportwegen in diskreten Abständen Meldepunkte angebracht, die über die Anwesenheit oder das Vorüberfahren eines Transportmittels informieren. Dabei kann das Transportmittel entweder von sich aus das Absenden einer entsprechenden Meldung aktiv veranlassen (z.B. durch das Aussenden von Funksignalen). Oder das Transportmittel wird durch Sensoren an den Meldepunkten passiv registriert; vgl. KAISER, K. (1991), S. 44 (seine automatische Werkstück- und Standorterkennung durch Barcodes läßt sich ohne Schwierigkeiten auf Transportmittel übertragen). Vgl. zu einer analogen Diskretisierung der Transportmittelbeobachtung WECK (1991e), S. 124f.
- 9) Eine Transportstrecke wird durch das Ausführen einer atomaren Transportoperation zurückgelegt. Es wird unterstellt, daß sich alle atomaren Transportoperationen bidirektional ausführen lassen. Daher ist es möglich, dem Transportgraphen sowohl die Gestalt eines gerichteten als auch die Form eines ungerichteten Graphen zu geben. Für den gerichteten Transportgraphen gilt: Falls zwei seiner Knoten miteinander verknüpft sind, dann handelt es sich stets um eine bidirektionale Verknüpfung durch zwei entgegengesetzt gerichtete Kanten. Solche Kantenpaare können durch jeweils genau eine, aber ungerichtete Kante ersetzt werden. Wenn diese Kantensubstitution vollständig erfolgt, liegt an ihrem Ende der ungerichtete Transportgraph vor. Durch Umkehrung aller Kantensubstitutionen resultiert wieder der ursprüngliche gerichtete Transportgraph. Dies gilt allerdings nur so lange, wie die eingangs aufgestellte Prämisse bidirektional ausführbarer Transportoperationen erfüllt ist.
Generell braucht die Prämisse bidirektional ausführbarer Transportoperationen jedoch nicht erfüllt zu sein. Daher bevorzugt der Verf. die Benutzung von gerichteten Transportgraphen, die stets die jeweils möglichen Transportrichtungen ausweisen. Allerdings wird als Darstellungsvereinfachung zugelassen, für jede bidirektional ausführbare Transportoperation nur eine Kante zu benutzen, die in beide Transportrichtungen zugleich weist. Vgl. zu dieser Vorgehensweise LONCHAMP (1984), S. 420, Fig. 1.
- 10) Der Transportgraph kann daher als die implizite, kompakte Repräsentation einer quadratischen Wegematrix aufgefaßt werden. Ihre Spalten- und Zeilenzahl ist die Knotenanzahl "O" des Transportgraphen. Die Wegematrix gibt erstens für jedes kombinatorisch möglich Paar zweier Transportpositionen an, ob zwischen diesen mindestens ein Transportweg existiert. Dies ist genau dann der Fall, wenn im Transportgraph die beiden Knoten der beiden Transportpositionen durch mindestens einen Weg verbunden sind. Bei den hier interessierenden Flexiblen Fertigungssystemen, die zum Systemtyp Flexibler Fertigungsnetze gehören, trifft das auf alle Paare von Transportpositionen zu. Falls es keinen Transportweg zwischen zwei Transportpositionen gibt, wird dieser Sachverhalt durch einen unendlich langen "minimalen" Transportweg ausgedrückt. Zweitens enthält die Wegematrix für jedes Paar zweier Transportpositionen, zwischen denen mindestens ein Transportweg existiert, die Länge der jeweils kürzest möglichen Transportwege. Sie läßt sich aus dem Transportgraphen durch die Ermittlung von (mindestens) einem kürzesten Weg zwischen den Knoten der beiden Transportpositionen gewinnen. Solche minimalen Transportwege werden später für das Konzept der Anforderungstransitionen benötigt. Ebenso lassen sie sich benutzen, um zwischen alternativen offenen Transportstrecken auszuwählen. Daher wird die Wegematrix, die sich aus einem Transportgraphen ableiten läßt, fortan als bekannt vorausgesetzt. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie von vornherein expliziert wird oder ob sie zunächst durch den Transportgraphen implizit repräsentiert bleibt.
- 11) Dies trifft in der Fallstudie immer zu.

12) Am Ende dieses Kapitels wird darüber hinaus die Technik der horizontalen Netzerweiterung verwendet, um die Modellierung des Transportsystems zu bereichern. Dabei wird es sich um die Übergabe von Transportobjekten, um die Störung von Transportmitteln sowie um die Selbststeuerung von Transportmitteln und -objekten handeln.

13) An späterer Stelle werden die Kantengewichte expliziert, die auf der obersten Hierarchieebene noch nicht erfaßt werden. Denn die Beziehungen zwischen den Gewichten einer Ein- und einer Ausgangskante, die zur selben Makrotransition gehören, lassen sich erst dann präzise formulieren, wenn die Makrotransitionen in verfeinerten Subnetzen aufgegangen sind.

14) Daneben wird auch eine Transportobjektmarke eingeführt. Aber ihr Informationszuwachs bleibt relativ bescheiden, da sie hauptsächlich aus der Werkstück- und aus der Werkzeugmarke aufgebaut wird, die beide schon vorgestellt worden sind.

15) Da diese Transportgeschwindigkeit ein konstantes Markenattribut darstellt, wird auf jede intensitätsmäßige Anpassung durch Variation der Transportgeschwindigkeit verzichtet. Dies entspricht der analogen Ausgrenzung intensitätsmäßiger Anpassungen. Allerdings besteht hier keine prinzipielle Schwierigkeit, für das Markenattribut der Transportgeschwindigkeit variable Attributausprägungen zuzulassen. Auf diese Option wird lediglich aus Vereinfachungsgründen im Rahmen der hier vorgelegten Fallstudie verzichtet. Denn der anschließend eingeführte Transportkostensatz müßte auf die jeweils aktuelle Transportgeschwindigkeit bezogen werden, falls ihre Variation zugelassen würde. Das bedeutete eine erhebliche Komplikation, weil es erforderlich wäre, die Abhängigkeit der beiden involvierten Markenattribute zu spezifizieren und bei jeder Veränderung der Attributausprägungen zu berücksichtigen.

16) Falls die Verursachungsgerechtigkeit der Kostenermittlung sehr streng aufgefaßt wird, kann dieser entfernungsbezogene Transportkostensatz durchaus Null betragen. Vgl. dazu die Erläuterungen zu der Gefahr, daß sich streng verursachungsgerechte Kostenrechnungen selbst aufheben können. Allerdings wurde dort auch als Konzession an die Kostenrechnungsbedürfnisse der betrieblichen Praxis eingeräumt, vom Ideal strikter Verursachungsgerechtigkeit zugunsten einer mehr pragmatischen Kostenzurechnung abzuweichen. Wenn diese Einstellung geteilt wird, werden die hier angeführten Transportkostensätze für die Koordinierung des Einsatzes von Transportmitteln relevant. Vgl. dazu auch die Feststellung von KNOOP (1986), S. 50, die im Transportsystem verursachten Kosten stellten einen "wesentlichen Anteil" aller entscheidungsrelevanten Kosten für die Maschinenbelegung bei flexiblen Fertigungssystemen dar.

Darüber hinaus kann auch die Perspektive der Prozeßkostenrechnung eingenommen werden, einzelnen Aktivitäten ihre spezifischen Kosten zuzuordnen. Aus diesem Blickwinkel ist der entfernungsbezogene Transportkostensatz durch denjenigen Transportkostenbetrag zu ersetzen, der bei jeder Ausführung einer Transportaktivität anfällt. Daneben muß die Transaktionsvorschrift der Transition $t_{39,8}$ angepaßt werden. Zu diesem Zweck reicht es aus, in der Berechnungsanweisung für die Variable "Kosten" das Produkt aus Transportkostensatz und Transportstreckenlänge durch den Transportkostenbetrag zu substituieren. Bei jedem Schalten der Transition $t_{39,8}$ werden dann die Kosten des Transportauftrags um die Kosten der ausgeführten Transportaktivität erhöht. Der Transportkostenbetrag besitzt daher zwei charakteristische Aspekte: Einerseits läßt er sich als Schaltkosten der Transition $t_{39,8}$ auffassen. Andererseits stellt er Aktivitätskosten im Sinne der Prozeßkostenrechnung dar.

Bei den folgenden Ausführungen zur Konzipierung von Netzmodulen wird darauf verzichtet, die stets analog zutreffenden Anmerkungen hinsichtlich der Verursachungsgerechtigkeit von Kostengrößen wiederaufzurollen. Gleiches gilt für die ebenso immer wieder vorliegende Möglichkeit, die diversen Kostensätze durch aktivitätsbezogene Schaltkosten einzelner Transitionen zu ersetzen. Lediglich bei der Einführung des Bearbeitungskostensatzes wird noch einmal darauf exemplarisch eingegangen.

17) Eine inhaltlich ähnliche Unterscheidung zwischen Transportmittelzuständen findet sich bei KNOOP (1986), S. 152f. Einen abweichenden Ansatz, in den auch Aktivitätsaspekte einfließen, verfolgt BAUDIN (1990), S. 63ff., insbesondere S. 65.

18) In diesem Fall liegt eine Betriebsstörung des Transportmittels - oder kurz: eine Transportmittelstörung - vor. Sie ist von den Transportwegstörungen zu unterscheiden, die einem Transportmittel auf den zurückgelegten Transportstrecken widerfahren können.

19) Es handelt sich zwecks Verdeutlichung um eine pleonastische Formulierung. Denn per definitionem ist jedes freie Transportmittel auch betriebsbereit. Daher eignet sich auch jedes freie Transportmittel für die Zuordnung eines neuen Transportobjekts. Umgekehrt erweist sich jedes Transportmittel, das nicht frei ist, für die Zuordnung eines Transportobjekts als ungeeignet. Daher handelt es sich um äquivalente Redeweisen, wenn entweder von zuordnungsgerechten oder aber von freien Transportmitteln gesprochen wird.

20) Der Zustandsgraph eines Transportmittels entspricht dem Zustandsgraphen für ein Werkstück, der bereits vorgestellt wurde. Vgl. auch die dort angeführte Literatur. Das Konzept der Zustandsgraphen wird hier allerdings durch Einrahmungen und verschiedenartige Rahmenfüllungen zu einer multidimensionalen Zustandsbeschreibung erwei-

tert. Nur so ist es möglich, die Zusammenhänge zwischen den zustandsbeschreibenden Attributausprägungen vollständig zu erfassen.

21) Dies äußert sich darin, daß das Kanal/Instanz-Netz des Zustandsgraphen unter jeder zulässigen Markierung mehrere Marken trägt. Jede solche Netzmarkierung repräsentiert genau einen Zustand des Transportmittels. Sofern das Transportmittel betriebsbereit ist, wird sein Zustand durch vier Attributausprägungen beschrieben. Falls es gestört ist, reduziert sich seine Zustandsbeschreibung auf nur noch zwei Attributausprägungen. Denn die Ausprägungen der beiden Attribute "Transportphase" und "Kapazitätsbeanspruchung" sind nur dann definiert, wenn das Transportmittel betriebsbereit ist. Diese partielle Definiertheit zweier Attribute fällt weder in der oben erfolgten natürlichsprachlichen Auflistung von Attributausprägungen noch im anschließend präsentierten Zustandsgraphen besonders auf. Der Verf. bevorzugt jedoch Attribute, deren Ausprägungen in allen denkmöglichen Produktionssituationen definiert sind. Daher wird in der späteren Spezifikation des Transportnetzes die neutrale Attributausprägung "nil" ergänzt. Sie wurde bereits in einer früheren Anmerkung eingeführt. Für das hier betrachtete Transportmittel gilt: Seine Attribute "Transportphase" und "Kapazitätsbeanspruchung" nehmen die neutrale Ausprägung "nil" genau dann an, wenn das Transportmittel gestört ist. Unter dieser Voraussetzung wird der aktuelle Zustand des Transportmittels in jeder Produktionssituation durch genau vier Attributausprägungen beschrieben.

Wegen der Multidimensionalität der Zustandsbeschreibung von Transportmitteln fällt der transportmittelbezogene Zustandsgraph erheblich komplizierter aus als der werkstückbezogene Zustandsgraph. Denn für die Beschreibung des Werkstückzustands reichte es aus, in der Werkstückmarke nur ein zustandsbeschreibendes Attribut - den Werkstückstatus - zu erfassen. Es erfolgte daher nur eine eindimensionale Zustandsbeschreibung von Werkstücken.

22) Dazu gehören die Attributausprägungen "betriebsbereit" und "gestört".

23) Dazu gehören die Attributausprägungen "reserviert", "beladen", "zurückkehrend" und "wartend".

24) Dazu gehören die Attributausprägungen "belegt" und "frei".

25) Dazu gehören die Attributausprägungen "geeignet" und "ungeeignet".

26) Es wird die jeweils aktuell ausgeführte Transportoperation betrachtet, die bewirkt, daß das Transportmittel eine Transportstrecke zurücklegt. Falls das Transportmittel auf einer Transportposition verharret, weisen die Attribute des Start- und des Schlußzeitpunkts diejenigen Ausprägungen auf, die sie durch die zuletzt ausgeführte atomare Operationsausführung angenommen haben oder die ihnen bei der Ausgangsmarkierung des Transportnetzes als Voreinstellungen zugewiesen wurden.

27) Dieses Attribut ermöglicht, die tatsächliche Ausführungsdauer einer atomaren Transportdauer zu ermitteln. Zu diesem Zweck braucht nur beim Ende der Operationsausführung ihr Startzeitpunkt von der aktuellen Systemzeit subtrahiert zu werden.

28) Der Schlußzeitpunkt wird bereits im Startzeitpunkt der jeweils ausgeführten atomaren Transportoperation ermittelt. Zu diesem alten Zeitpunkt wird der Quotient aus der Länge der Transportstrecke, auf die sich das Transportmittel beim Verlassen seiner letzten Transportposition begeben hat, und aus der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit des Transportmittels addiert. Das Ergebnis der Addition ist der gesuchte Schlußzeitpunkt. Aufgrund dieser Festlegungen stellt der Schlußzeitpunkt keine realisierte, sondern eine geplante Zeitgröße dar. Er besitzt im wesentlichen eine technische Funktion. Denn er gestattet es, denjenigen Zeitpunkt anzugeben, in dem die Transition am Ende einer Transportstrecke aktiviert und geschaltet wird, damit das Transportmittel die jeweils nächste Transportposition einzunehmen vermag. Es handelt sich allerdings nur um einen mutmaßlichen Zeitpunkt. Denn es können Transportstörungen eintreten, die das Transportmittel auf der Transportstrecke behindern. Dann wird entweder der Zeitpunkt, in dem die jeweils nächste Transportposition tatsächlich erreicht wird, gegenüber dem mutmaßlichen Zeitpunkt hinausgeschoben. Oder die nächste Transportposition wird störungsbedingt überhaupt nicht mehr erreicht. Vgl. dazu die Ausformulierung des Transportnetzes. Bei der Verwendung Interpretierter Netze ist dieses Attribut nicht erforderlich, falls dort das Schalten der Transition am Ende einer Transportstrecke durch eine Systemmeldung aus dem zugrundeliegenden Produktionssystem ausgelöst wird.

29) Andernfalls - wenn dem Transportmittel in der aktuellen Produktionssituation kein Transportobjekt zugeordnet ist - nehmen die auftragspezifisierenden variablen Attribute auftragsunspezifische Voreinstellungen an. Vgl. dazu die konkreten Festlegungen in der Netzlegende für das Transportnetz.

30) Diese schritthaltende Dokumentation läßt sich einerseits nutzen, um einem anfragenden Koordinierungsträger jederzeit den aktuellen Status der Abwicklung eines Transportauftrags mitzuteilen. Andererseits können beim Entladen des Transportobjekts die bis dahin kumulierten Zeit- und Kostengrößen dem transportierten Objekt zugerechnet werden. Vgl. dazu die Erläuterungen zu den jeweils betroffenen Markenattributen in den folgenden Anmerkungen.

31) Falls dem Transportmittel kein Transportobjekt zugeordnet ist, nimmt dieses Attribut die neutrale Ausprägung "nil" an. Gleiches gilt für die nachfolgenden Markenattribute. Die neutrale Attributausprägung "nil" stellt eine universelle Voreinstellung (default value) für alle Attribute dar. Sie wird einem Attribut immer dann zugewiesen, wenn es keine andere wohldefinierte Attributausprägung aufweist.

32) Die Transportposition, auf der sich das Transportmittel in seinem Zuordnungszeitpunkt befindet, ist die Startposition des Transportmittels.

33) Dabei handelt es sich entweder um einen Übergabepunkt oder aber um eine Parkposition. Dies wird durch die beiden 1-stelligen Operationssymbole "Ziel_pos_ü(übergabepunkt)" bzw. "Ziel_pos_pp(parkposition)" berücksichtigt.

34) Die Ruheposition darf mit dem Übergabepunkt der Entladeposition zusammenfallen. In diesem Fall kehrt das Transportmittel nach der Erfüllung seines letzten Transportauftrags in keine Parkposition zurück, sondern wartet an der zuletzt erreichten Entladeposition auf einen neuen Transportauftrag.

35) Sobald das Transportmittel an der Beladeposition für sein Transportobjekt angekommen ist, wird die bis dahin angefallene Anfahrtdauer fixiert. Sie läßt sich dem zu transportierenden Objekt nicht zurechnen. Denn das Objekt wurde während der Anfahrtdauer nicht transportiert, sondern mußte auf das Eintreffen des Transportmittels warten.

36) Sobald das Transportmittel an der Entladeposition für sein Transportobjekt angekommen ist, wird die bis dahin angefallene Transportdauer fixiert. Sie wird als transportauftragsspezifische Transportdauer bezeichnet. Sie wird dem transportierten Objekt im Entladezeitpunkt zugeschrieben. Im selben Zeitpunkt wird die Transportdauer auf den Wert "Null" zurückgesetzt. Weder die Zeitspanne zwischen dem Start- und dem Beladezeitpunkt noch die Zeitspanne zwischen dem Entladezeitpunkt und dem Erreichen einer Parkposition werden in die transportauftragsspezifische Transportdauer einbezogen. Denn während dieser Zeitspannen wurde das Objekt nicht transportiert.

37) Sobald das Transportmittel seine Parkposition erreicht hat, wird die bis dahin angefallene Rückkehrdauer fixiert. Sie läßt sich dem zu transportierenden Objekt nicht zurechnen. Denn das Objekt wurde während der Rückkehrdauer nicht mehr transportiert.

38) Falls für das Transportmittel keine Parkposition ausgezeichnet ist, verharrt es in seiner Entladeposition. Die Rückkehrdauer beträgt Null, weil keine Rückkehr erfolgt.

39) Die Transportkosten werden in jeder neu erreichten Transportposition berechnet, indem die Länge der zuletzt zurückgelegten Transportstrecke mit dem entfernungsbezogenen Transportkostensatz des Transportmittels multipliziert wird. Diese streckenspezifischen Transportkosten werden zu den bis dahin bereits angefallenen Transportkosten addiert.

40) Sobald das Transportmittel an der Entladeposition für sein Transportobjekt angelangt ist, werden die bis dahin entstandenen Transportkosten fixiert. Sie stellen die transportauftragsspezifischen Transportkosten dar. Sie werden im Entladezeitpunkt dem transportierten Objekt angelastet. Wenn das Transportmittel die Entladeposition verläßt, werden die Transportkosten auf den Wert "Null" zurückgesetzt. Transportkosten, die für den Weg zwischen der Entlade- und der Parkposition anfallen, werden nicht mehr dem transportierten Objekt zugerechnet. Denn sie sind nicht durch Entscheidungen über den Objekttransport, sondern durch die davon unabhängige Auszeichnung einer besonderen Parkposition verursacht. Demgegenüber werden die Transportkosten, die auf dem Anfahrweg des Transportmittels zwischen dem Verlassen der Start- und dem Erreichen der Beladeposition anfallen, dem transportierten Objekt zugeordnet. Denn sie wurden durch die Entscheidung verursacht, das Transportobjekt dem Transportmittel zuzuordnen.

41) Die Transportobjektmarke wird durch die Sorte "transportobjekt" definiert. Es handelt sich um die Zielsorte von drei verschiedenen Operationssymbolen. Diese multiple Sorteninterpretation ermöglicht es zunächst, Werkstück- und Werkzeugmarken als gemeinsame Subsorten der Transportobjektmarke zu behandeln.

Schwierigkeiten bereitet jedoch der dritte Fall, in dem es auszudrücken gilt, daß ein Transportmittel von *keinem* Transportobjekt belegt ist. Denn es wurde früher in der markenontologischen Fundierung Synthetischer Netze vereinbart, daß sich alle Prädikatssymbole in ihren Argumenten zuerst auf Marken beziehen. Kopien dieser Marken repräsentieren diejenigen Objekte, über die in einer prädikatenlogischen Formel, die aus einem Prädikatssymbol abgeleitet worden ist, etwas ausgesagt wird. Nun interessiert aber hier der entgegengesetzte Sachverhalt, die *Abwesenheit* eines Transportobjekts - also das Fehlen einer Kopie der Transportobjektmarke - explizit festzustellen. Dies kann nicht einfach durch die Negation eines Prädikats geschehen, weil zugleich der affirmative Sachverhalt ausgedrückt werden soll, daß sich auf der betrachteten Transportposition ein freies Transportmittel befindet. Es besteht also die Aufgabe, durch dieselbe prädikatenlogische Formel die Anwesenheit eines Transportmittels auf einer Transportposition und zugleich auch die Abwesenheit eines Transportobjekts zu repräsentieren. Diese Aufgabe läßt nur zwei grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten offen. Entweder wird die markenontologische Konzeptualisierungsprämisse aufgehoben, daß sich die Argumente von Prädikatssymbolen nur auf Marken beziehen dürfen. Oder es wird eine spezielle Marke eingeführt, deren Kopien die Abwesenheit von Objekten auszudrücken vermögen. Der Verf. ergreift die zweite Alternative, weil er an dem klaren Fundament der Markenontologie festhalten möchte.

Daher wird eine Marke *sui generis* eingeführt. Jede ihrer Kopien repräsentiert die Abwesenheit eines Objekts durch die komplementäre Existenz eines "Nichtobjekts". Sie fällt aus dem Rahmen der früher vorgelegten Systematik sortierter Marken heraus. Denn es handelt sich um eine *nullstellige* Attributmarke. (Attributmarken wurden früher so

- 42) Vgl. dazu die voranstehende Anmerkung.
- 43) Andernfalls ist die Faktenmenge des Prädikatssymbols in der aktuellen Produktionssituation die leere Faktenmenge.
- 44) Falls sich auf einer Transportposition ein freies Transportmittel befindet, wird die zweite Stelle des Prädikatssymbols durch eine Kopie der Dummymarke eingenommen. Sie zeigt an, daß das Transportmittel von keinem Transportobjekt belegt ist.
- 45) Aufgrund des Platzmangels wird in der Netzgraphik vollständig darauf verzichtet, die Transaktionsnamen zu den Knoten ihrer Makrotransitionen zuzuordnen. Die Knoten der Stellen werden mit den Namen ihrer Prädikatssymbole in einer Kurznotation beschriftet, die das Präfix "Position_" aus den Prädikatssymbolnamen ausklammert.
- 46) Die Längen der Transportstrecken werden in der Netzgraphik nicht mehr als Beschriftungen der transitionsartigen Knoten verwendet. Denn diese Streckenlängen werden erst auf der zweiten Hierarchieebene eine Rolle spielen.
- 47) Die Ausdruckskraft des eingangs präsentierten Transportgraphen war so gering, daß in ihm weder die Anzahl noch die Positionen der verfügbaren Transportmittel repräsentiert werden konnten.
- 48) Die Makrotransitionen werden dagegen nur oberflächlich beschrieben, weil sie erst auf der zweiten Hierarchieebene detailliert spezifiziert werden können.
- 49) Bereits eingeführte Marken und Operationssymbole werden als bekannt vorausgesetzt. Dies gilt z.B. für die unten benutzten Marken "werkstück" und "werkzeug" sowie für die Operationssymbole "Werkstückmarke" und "Werkzeugmarke".
- 50) Die Transportmittelgeschwindigkeit wird gemessen in der Dimension:

$$m[\text{Transportweg}] : \text{min}[\text{Transportzeit}] \approx \text{m/min}$$

Dabei bedeuten "m" Meter und "min" Minuten.

- 51) Für den Transportkostensatz wird als Dimension gewählt:

$$\text{DM}[\text{Transportkosten}] : m[\text{Transportweg}] \approx \text{DM/m}$$

Dabei stehen "DM" für die deutsche Währungseinheit und "m" für Meter.

- 52) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.
- 53) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.
- 54) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.
- 55) Für die zugehörige nullstellige Operation `auftrag_ka()` wird vereinbart: `auftrag_ka() = nil`.
- 56) Sie werden als die Start- bzw. Schlußtransition der atomaren Transportoperation bezeichnet.
- 57) Die Stelle, die im Subnetz zwischen der Start- und der Schlußtransition liegt, besitzt die Qualität einer Interimsposition. Sie drückt aus, daß sich das Transportmittel, dessen Transportmittelmarke auf der Stelle liegt, zwischen zwei benachbarten Transportpositionen bewegt: Das Transportmittel hat die zuletzt eingenommene Transportposition durch das Schalten der Starttransition verlassen. Aber es hat die nächste Transportposition noch nicht erreicht, weil das Schalten der Schlußtransition der Operationsausführung noch nicht erfolgt ist. Die Interimspositionen, die zu den Subnetzen von atomaren Transportoperationen gehören, ergänzen die Transportpositionen, die schon im Transportgraphen definiert wurden. Die Markierung dieser Interimspositionen veranschaulicht, entlang welcher Transportstrecken sich Transportmittel bewegen, wenn sie sich nicht gerade an einer Transportposition befinden.
- 58) Die Konstrukte für Zeitnetze werden hier als bekannt vorausgesetzt. Dies gilt insbesondere für die Modellierung der zentralen Systemuhr, für die Sorte "zeitpunkt" und für die Zeitmarke mit dem Namen "syszeit". An früherer Stelle wurden unterschiedliche Optionen erläutert, die es gestatten, Systemuhren festzulegen. In der Fallstudie wird der Einfachheit halber die Signatur "GANZZAHL_ZEIT" unterstellt. Sie definiert die Zeitpunktsorte in originärer Weise und ordnet ihr die Menge aller Ganzzahlen als Objektmenge zu. Es könnte aber ebenso eine andere Zeitpunktsorte bevorzugt werden. Vor allem kommen die derivativ definierten Zeitpunktsorten aus der Signatur

"TERMIN" in Betracht, in denen die tief strukturierte Sorte "zeitpunkt" aus anderen Attributsorten zusammengesetzt wurde.

An späterer Stelle wird der Aspekt der Systemzeit noch einmal aus der speziellen Perspektive der hier präsentierten Fallstudie beleuchtet. Dort geht es um die globale Synchronisation aller Netzmodule mittels der zentralen Systemuhr. Hier interessiert zunächst die Synchronisationsstelle s_z , die mit dem Prädikatssymbol "Systemzeit" beschriftet ist. Sie stellt die gemeinsame Schnittstelle dar, die jedes Netzmodul mit der zentralen Systemuhr verknüpft. Um die Transparenz der Netzgraphiken zu fördern, wird diese Schnittstelle s_z jeder zeitverbrauchenden Transition zugeordnet. Es handelt sich dann um mehrere Vorkommnisse derselben Stelle s_z . In einem Gesamtnetz würden alle Vorkommnisse der Schnittstelle s_z miteinander identifiziert und somit zu genau einer Stelle zusammenfallen.

Auf allen Vorkommnissen der Schnittstelle s_z befindet sich jeweils dieselbe Kopie derjenigen Zeitmarke, welche die aktuelle Systemzeit anzeigt. Dies gilt zumindest nach dem Beginn desjenigen Intervalls, in dem die Abwicklung eines Auftragspakets abgewickelt werden soll. Die Zeitmarke ist eine Attributmarke mit dem markenkonstituierenden Operationssymbol "Zeitmarke_sys" und mit der markenspezifischen Zielsorte "systemzeit". Das Operationssymbol "Zeitmarke_sys" besitzt ein einstelliges Argument: die Attributsorte "zeitpunkt". Jeder Term, der zur Sorte "zeitpunkt" gehört, kann durch den Ausdruck "time" notiert werden. Wenn dieser Term im Einzelfall eine Variable darstellt, wird die Standardnotation "Time" verwendet. Kopien der Zeitmarke lassen sich durch den Ausdruck " m_T " notieren. Sie werden als Bilder der Operation "zeitmarke_sys" festgelegt: $\text{zeitmarke_sys}(\text{time}) = m_T$.

Die Synchronisationsstelle s_z stellt nur das erste Exemplar einer Vielfalt von Schnittstellen dar, die im folgenden für die Integration der Netzmodule eingeführt werden. Für alle Schnittstellen werden drei Vereinbarungen getroffen: Erstens werden Schnittstellen in allen Netzgraphiken, in denen sie enthalten sind, grau schattiert dargestellt. Zweitens werden Schnittstellen stets durch einen Ausdruck " s_{index} " notiert, dessen Index mit einem Großbuchstaben beginnt. Für die Schnittstelle s_z der Systemuhr fällt der Index mit dem einen Großbuchstaben "Z" zusammen. Drittens darf der Index einer Schnittstelle bei der Notation keiner anderen Stelle verwendet werden. Daher kann jede Schnittstelle in allen Netzmodulen an ihrem eindeutig identifizierenden Index wiedererkannt werden. Alle anderen Stellen, die keine Schnittstellen sind, werden dagegen durch Ausdrücke " s_{index} " notiert, deren Indizes mit keinem Großbuchstaben beginnen. Diese Indizes brauchen lediglich innerhalb desselben Netzmoduls eindeutig zu sein. Dagegen dürfen Stellen aus unterschiedlichen Netzmodulen dieselben Indizes besitzen, solange es sich um keine Schnittstellen handelt. Denn jede Nichtschnittstelle wird bereits durch ihre Modulzugehörigkeit eindeutig festgelegt. Daher ist es z.B. zulässig, die Nichtschnittstelle s_1 in mehreren Netzmodulen zu verwenden. Gleiches gilt für die Indizierung aller Transitionen. Denn jede Transition kommt nur in genau einem Netzmodul vor.

59) Die Länge der Transportstrecke wird aus dem zugrundeliegenden Transportgraphen oder aus dem daraus abgeleiteten Kanal/Instanz-Netz übernommen. Sie geht in die Definition der Transaktion ein, die der Starttransition des Subnetzes zugeordnet ist.

60) Dieser Zeitpunkt wird durch das Attribut "folgezeitpunkt" in der Transportmittelmarke registriert. Durch Vergleich mit der jeweils aktuellen Systemzeit stellt die Schlußtransition fest, ob dieser Folgezeitpunkt schon erreicht ist. Solange dies noch nicht der Fall ist, bleibt die Schlußtransition deaktiviert.

Das Ende der Operationsausführung kann auch durch Störungen während der Operationsausführung verzögert werden. Daher muß die Schlußtransition nach dem Verstreichen der o.a. Transportdauer nicht notwendig schalten. Auf die Modellierung von Transportstörungen wird in Kürze zurückgekommen. Nur wenn bekannt ist, daß bei der Operationsausführung keine Störung eingetreten ist, muß die Schlußtransition der Transportoperation schalten, nachdem die Transportdauer abgelaufen ist. Dies wird in der Netzgraphik in Abb. 158 durch die dort ausgewiesenen Obliganten sichergestellt.

Eine Schwierigkeit liegt allerdings darin, daß die Systemzeit während einer Transportstörung voranschreitet. Dadurch nähert sich die Systemzeit dem vorausberechneten Folgezeitpunkt für das Schalten der Schlußtransition an, ohne daß die Ausführung der Transportoperation tatsächlich vorangeschritten wäre. Um diese Verzerrung zu beseitigen, müßte der Folgezeitpunkt im Attribut der Transportmittelmarke schritthaltend zum Voranschreiten der Systemzeit so lange erhöht werden, wie die Transportstörung andauert. Dies erforderte aber eine recht aufwendige Korrekturtechnik. Darauf wird im Rahmen dieser Fallstudie verzichtet.

61) Dadurch wird sichergestellt, daß Transportmittel auf derselben Transportstrecke niemals kollidieren können. Auf einer benutzbaren, aber geschlossenen Transportstrecke könnten dagegen zwei Transportmittel entweder bei gleicher Transportrichtung aufeinander auffahren oder aber bei entgegengesetzter Transportrichtung frontal zusammenstoßen.

62) Dies ist z.B. dann der Fall, wenn ein Hindernis auf der Transportstrecke dem Transportmittel den Weg versperrt. Es wird dann von einer Transportwegstörung gesprochen. Zwar ist von der Störung zunächst nur die jeweils betrachtete Transportstrecke unmittelbar betroffen. Doch sind alle Transportwege, zu denen die gestörte Transportstrecke gehört, mittelbar ebenso gestört. Daher wird von vornherein von einer Transportwegstörung gesprochen. Neben Transportwegstörungen können auch Transportmittelstörungen eintreten. Die letztgenannten treten immer dann ein, wenn die Transportmittel ihre Betriebsbereitschaft einbüßen. Transportweg- und Transportmittelstörungen werden gemeinsam als Transportstörungen bezeichnet. Transportstörungen können dazu führen, daß die Ausführung

der Transportoperation durch ein Transportmittel langsamer geschieht, als es aufgrund seiner Transportgeschwindigkeit möglich wäre. Dies bedeutet im Subnetz der Abb. 158, daß die Schlußtransition noch nicht im Zeitpunkt des vorausberechneten Endes der Operationsausführung schaltet. Sobald die Transportstörung beseitigt ist, wird das Schalten der Schlußtransition sofort nachgeholt, falls die vorausberechnete Dauer der Operationsausführung verstrichen ist.

Das Ereignis einer Transportstörung im Produktionssystem wird im Subnetz der betroffenen Transportoperation durch eine entsprechende Systemmeldung angezeigt. Das Eintreffen der Systemmeldung bewirkt im Subnetz, daß eine Transition, die mit "!systemmeldung!: Störungseintritt" beschriftet ist, selbständig schaltet. Wegen dieser Kopplung des Schaltens ausgezeichneter Transitionen an reale Ereignisse gehört das Subnetz, das eine atomare Transportoperation repräsentiert, zur Klasse der Interpretierten Netze.

63) Andernfalls ist das Transportmittel in seiner aktuellen Transportposition blockiert. Dafür müssen drei Bedingungen erfüllt sein. Erstens kommt nur ein Transportmittel in Betracht, dessen Zielposition von seiner aktuellen Transportposition abweicht. Zweitens muß es sich um ein betriebsbereites Transportmittel handeln. Drittens ist es erforderlich, daß alle Transportstrecken, zu deren Endpunkten die aktuelle Position des Transportmittels gehört, geschlossen sind. Unter diesen Voraussetzungen kann das Transportmittel trotz seiner Betriebsbereitschaft seine aktuelle Transportposition nicht verlassen, obwohl dies zur Erreichung seiner Zielposition erforderlich wäre.

Eine solche Blockade stellt keinen Zustand des Transportmittels dar. Denn sie hängt gemäß der dritten Bedingung nicht nur von dem betroffenen Transportmittel ab. Statt dessen wird sie auch durch die Benutzbarkeit von Transportstrecken und durch die aktuelle Befindlichkeit anderer Transportmittel beeinflusst. Es handelt sich daher um eine globale Eigenschaft, die im allgemeinen mehreren Transportmitteln und -strecken gemeinsam zukommt. Daher wurde die Transportmittelblockierung oben nicht zu denjenigen Aspekten gerechnet, die den Zustand eines Transportmittels beschreiben.

64) In dieser exemplarischen Betrachtung liegt keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit. Denn für jede andere Makrotransition läßt sich ein verfeinerndes Subnetz in der gleichen Weise konstruieren. Dazu brauchen lediglich die Beschriftungen der jeweils verknüpften Transportpositionen und die Längen der Transportstrecken entsprechend angepaßt zu werden. Diese triviale Modifizierung der Subnetze für alle restlichen 59 Makrotransitionen durchzuspielen, hält der Verf. jedoch für überflüssig.

65) In der Netzlegende werden nur diejenigen Konstrukte vollständig aufgeführt, die für die Verfeinerung der Makrotransition wesentlich erscheinen. Bezüglich aller anderen Konstrukte wird auf die Netzlegende verwiesen, die für die erste Hierarchieebene des Transportnetzes angeführt wurde. Dort ist z.B. die Sorte "transportobjekt" vollständig definiert, die hier nur noch kurz als Argumentstelle von Prädikatssymbolen in Erinnerung gerufen wird. In der Netzlegende wird auf die früher getroffene Vereinbarung zurückgegriffen, Terme einer Sorte, die Variablen darstellen, wie die Sorte selbst zu notieren, jedoch mit einem Großbuchstaben zu beginnen. Beispielsweise wird eine Variable der Sorte "transportmittelgeschwindigkeit" als Transportmittelgeschwindigkeit notiert.

66) Der Ausdruck "transportstreckenlänge" stellt *keine* Sorte dar. Statt dessen handelt es sich um ein Konstantensymbol. Diesem Konstantensymbol wird durch die Vereinbarung "transportstreckenlänge = 3" der numerische Wert "3" zugewiesen. Dieser Wert wird aus dem zuvor präsentierten Transportgraphen oder aus dem daraus abgeleiteten Kanal/Instanz-Netz übernommen. Der numerische Wert der Transportstreckenlänge besitzt die Dimension "m [Transportweg]" mit "m" für Meter. Es wird vorausgesetzt, daß Transportstreckenlänge, Transportgeschwindigkeit und Systemzeit innerhalb desselben Maßgrößensystems ausgedrückt sind. Für diese Fallstudie werden alle Längenangaben in Metern und alle Zeitangaben in Minuten gemessen.

Die Wertzuweisung bedeutet aus prädikatenlogischer Perspektive eine Interpretation des Prädikatssymbols "transportstreckenlänge" durch die Konstante "3". Im prädikatenlogischen Kontext wurde allerdings vereinbart, Konstantensymbole jeweils mit einem Großbuchstaben einzuleiten, da es sich um 0-stellige Operationssymbole handelt. Daher müßte strenggenommen auf das Konstantensymbol "Transportstreckenlänge" als 0-stelliges Operationssymbol Bezug genommen werden. Die Definition dieses Operationssymbols lautet - einschließlich der oben angeführten Wertzuweisung - in der früher festgelegten ausführlichen Notation einer sortierten Prädikatenlogik:

sorts: entfernung

Ops: Transportstreckenlänge: → entfernung

OBs: $OB_{entfernung} = REAL$

ops: transportstreckenlänge: → $OB_{entfernung}$
→ transportstreckenlänge() = 3

Für diese sortierte prädikatenlogische Definition des Konstantensymbols "Transportstreckenlänge" wird als Kurzschreibweise die oben angeführte Notation "transportstreckenlänge = 3" festgelegt. Diese Kurznotation orientiert

sich an der Version 2.0 der Programmiersprache Turbo-PROLOG. Sie wurde der Implementierung Synthetischer Netze zugrundegelegt. In Turbo-PROLOG 2.0 erfolgen alle Wertzuweisungen zu Konstantensymbolen in einer speziellen Sektion mit der Bezeichnung "constants". Dort werden alle Konstantensymbole durch Ausdrücke der Form: "konstantensymbol = wert" eingeführt; vgl. BRADBURY (1990), S. 330f.

67) Die Transportmittelgeschwindigkeit wird gemessen in der Dimension:

$$m[\text{Transportweg}] : \text{min}[\text{Transportzeit}] \approx m/\text{min}$$

Dabei bedeuten "m" Meter und "min" Minuten.

68) Für den Transportkostensatz wird als Dimension gewählt:

$$\text{DM}[\text{Transportkosten}] : m[\text{Transportweg}] \approx \text{DM}/m$$

Dabei stehen "DM" für die deutsche Währungseinheit und "m" für Meter.

69) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

70) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertiggearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

71) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

72) Für die zugehörige nullstellige Operation `auftrag_ka()` wird vereinbart: `auftrag_ka() = nil`.

73) Die Variable "Transportobjekt" für eine Kopie der Transportobjektmarke kann durch ein transportiertes Werkstück oder ein Werkzeug gebunden werden: `vb_c(Transportobjekt) = transportobjektmarke_ws(werkstückmarke(...))` bzw. `vb_c(Transportobjekt) = transportobjektmarke_wz(werkzeugmarke(...))`. Ebenso ist es möglich, daß sie durch den Ausdruck "transportobjektmarke_kt(keinobjekt())" für das Fehlen eines Transportobjekts gebunden wird: `vb_c(Transportobjekt) = transportobjektmarke_kt(keinobjekt())`.

74) Für Kopien der Basismarke mit der Sorte "bas_marke" werden die früheren Festlegungen übernommen: `Marke_0: → bas_marke` und `marke_0() = ∅`.

75) Die Haupttestbedingung "Transportposition = "MP_9"" ist grundsätzlich nicht notwendig. Denn das Netzmodul des Transportsystems wird so konstruiert, daß alle Kopien der Transportmittelmarke, die sich auf der Stelle einer Transportposition befinden, als Ausprägung ihres Attributs "transportmittelposition" den Namen der Transportposition ausweisen. Daher ist die o.a. Haupttestbedingung immer erfüllt. Dennoch wird sie hier aus zwei Gründen angeführt. Erstens besitzt sie verdeutlichenden Charakter: Sie läßt sofort erkennen, daß die Markenkopie, die durch das Schalten der Transition $t_{39.1}$ auf der Stelle $s_{39.7}$ abgelegt wird, als Ausprägung ihres Attributs "transportmittelposition" ebenfalls den Namen der soeben verlassenen Transportposition "MP_9" annimmt. Zweitens erfüllt die Haupttestbedingung die Qualität eines "Integritätswächters". Denn es ist möglich, daß sich im Transportnetz aufgrund eines Spezifizierungsfehlers auf der Stelle einer Transportposition eine Kopie der Transportmittelmarke befindet, deren Ausprägung des Attributs "transportmittelposition" nicht den Namen der aktuell eingenommenen Transportposition ausweist. Dann sorgt die Haupttestbedingung in den Starttransitionen für alle atomaren Transportoperationen dafür, daß solche fehlerhaften Transportmittelmarken nicht fortgeschaltet werden.

76) Bei der Netzerweiterung eines Übergabepunkts muß strenggenommen unterschieden werden, ob es sich bei den zu transportierenden Objekten um Werkstücke oder Werkzeuge handelt. Diese Differenzierungsnotwendigkeit beruht auf zwei Gründen. Erstens wurden am Übergabepunkt einer Bearbeitungsstation sowohl ein Ein- als auch ein Ausgangspuffer für Werkstücke vorgesehen. Die Werkzeugübergabe geschieht dagegen an einem Werkzeugpuffer, der nicht in separate Ein- und Ausgangspuffer aufgespalten wird. Zweitens beziehen sich die Anforderungstransitionen, die in einer früheren Anmerkung erläutert werden, auf die interne Attributstruktur der Marken der zu transportierenden Objekte. Die Strukturen der Attributmarken für die Repräsentation von Werkstücken einerseits und Werkzeugen andererseits wurden aber unterschiedlich ausgestaltet. Daher müssen werkstück- und werkzeugspezifische Anforderungstransitionen spezifiziert werden.

Die Teilnetzkonstruktionen für die Übergabe von entweder Werkstücken oder aber Werkzeugen unterscheiden sich darüber hinaus jedoch nicht. Auch die beiden voranstehend skizzierten Differenzen besitzen nur marginale Bedeutung, weil sie die grundlegende Idee der Netzerweiterung an einem Übergabepunkt nicht tangieren. Daher verzichtet der Verf. darauf, die Teilnetzkonstruktion sowohl für Werkstücke als auch für Werkzeuge konkret auszuführen.

Statt dessen beschränkt er sich auf die Werkstücke. Die entsprechenden Teilnetze für die Übergabe von Werkzeugen ließen sich ohne größere Schwierigkeiten analog erstellen.

77) Als Schnittstellen werden diese Puffer im Transportnetz wieder grau schraffiert dargestellt. Diese Schnittstellen werden auch als Ent- oder Beladestellen bezeichnet je nachdem, ob sie die Eingangs- bzw. Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation darstellen. Denn im Eingangspuffer können Transportobjekte warten, die von einem Transportmittel entladen werden sollen. Analog dazu bietet der Ausgangspuffer Platz für Transportobjekte, mit denen ein Transportmittel beladen werden soll.

78) Jeder Ausgangspuffer wird im übergabepunktspezifischen Teilnetz durch eine Beladestelle repräsentiert (vgl. die voranstehende Anmerkung). Jeder Beladestelle ist wiederum eine eigene Gruppe von Anforderungstransitionen zugeordnet. Bei den Anforderungsgruppen aller Beladestellen handelt es sich um disjunkte Transitionenmengen. Daher gehört jede Anforderungstransition zu genau einer Beladestelle. Die Beladestelle eines Ausgangspuffers wird mit jeder Stelle des Transportnetzes, die entweder eine Transport- oder aber eine Interimsposition darstellt, durch jeweils genau eine Anforderungstransition verknüpft. Dazu gehört auch die Transportposition des jeweils betrachteten Übergabepunkts. Die verknüpften Stellen des Transportnetzes heißen Anforderungsstellen in bezug auf die jeweils verknüpfenden Anforderungstransitionen. Eine Anforderungstransition ist genau dann aktiviert, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind. Erstens muß sich auf ihrer Beladestelle eine Marke befinden, die ein wartendes Transportobjekt repräsentiert. Zweitens muß auf ihrer Anforderungsstelle im Transportnetz zugleich eine Marke liegen, die ein freies Transportmittel darstellt. Falls sich auf der Beladestelle mindestens ein wartendes Transportobjekt befindet und genau eine Anforderungstransition aus der Anforderungsgruppe des Beladepunkts aktiviert ist, wird diese Transition geschaltet. Dadurch wird ein Transportobjekt, das im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation auf Abtransport wartet, einem Transportmittel zugeordnet, das von der Anforderungstransition auf ihrer Anforderungsstelle als freies Transportmittel erkannt worden ist. Das Transportmittel ist dann für das Transportobjekt reserviert.

Wenn für denselben Übergabepunkt mehrere Anforderungstransitionen aktiviert sind, so sorgen eine Prioritätsordnung und - gegebenenfalls - eine Indifferenzregel dafür, daß wiederum genau eine der aktivierten Anforderungstransitionen geschaltet wird. Für diesen Zweck wird für jede Beladestelle s_b des Transportnetzes über ihrer Anforderungsgruppe eine stellenspezifische Prioritätsordnung PO_b definiert. Aus der Perspektive dieser Prioritätsordnung bildet die Gesamtheit der Anforderungstransitionen $t_{b/m(h)}$ der Beladestelle s_b eine Prioritätsgruppe PG_b mit $PG_b = \{t_{b/m(h)}; h=1, \dots, H\}$ und $H \in \mathcal{N}$. H ist hier die Anzahl aller Anforderungsstellen $s_{m(h)}$, die im Transportnetz als Transport- oder Interimspositionen definiert sind. Jede Anforderungstransition $t_{b/m(h)}$ aus dieser Gruppe erhält eine gruppenspezifische, aber nicht notwendig singuläre Schaltpriorität $sp_{b/m(h)}$. Die Schaltpriorität einer Anforderungstransition fällt um höher aus, je kleiner die Länge des kürzesten Anfahrweges zwischen der Anforderungsstelle der Anforderungstransition und der Beladestelle s_b ist. Diese Anfahrweglänge läßt sich unmittelbar aus dem zugrundeliegenden Transportgraphen gewinnen, sofern die Anforderungsstelle eine Transportposition darstellt. Die Anforderungsstelle kann sich auch auf die Transportposition desjenigen Übergabepunkts erstrecken, der durch das konstruierte Teilnetz repräsentiert wird (s.o.). Für diese Anforderungsstelle beträgt die Anfahrweglänge immer Null, weil diese Transportposition in unmittelbarer Nachbarschaft des betrachteten Ausgangspuffers liegt. Falls es sich bei der Anforderungsstelle jedoch um eine Interimsstelle handelt, ist die Anfahrweglänge nicht präzise definiert. Denn das betroffene Transportmittel bewegt sich entlang einer Transportstrecke *irgendwo* zwischen zwei Transportpositionen. Ein pragmatischer Ausweg besteht darin, in solchen Fällen zu unterstellen, das Transportmittel habe jeweils die Hälfte der Transportstrecke zurückgelegt. Unter dieser Voraussetzung sind die Längen der kürzesten Anfahrwege zwischen Anforderungs- und Beladestelle für alle Anforderungstransitionen aus der Anforderungsgruppe der Beladestelle bekannt. Entsprechend zu diesen Anfahrweglängen werden die Schaltprioritäten der Anforderungstransitionen bestimmt (s.o.). Falls zwei Anforderungstransitionen zufällig dieselbe Anfahrweglänge besitzen, erhalten sie auch dieselbe Schaltpriorität. Die Prioritätsordnung über einer Prioritätsgruppe aus Anforderungstransitionen braucht daher nicht vollständig geordnet zu sein. Vielmehr handelt es sich im allgemeinen nur um eine halbgeordnete Prioritätsgruppe. Falls zwischen zwei Anforderungstransitionen mit derselben Schaltpriorität ausgewählt werden muß, so kann hierfür eine beliebige Indifferenzregel ("tie breaking rule") eingesetzt werden. Beispielsweise läßt sich ein solcher Prioritätskonflikt dadurch auflösen, daß die Anforderungstransition $t_{b/m(h)}$ mit dem kleinsten Index "m(h)" ausgewählt wird. Denn die Indizes von Transitionen wurden als identifizierende Transitionskennzeichnungen eingeführt. Nachdem - gegebenenfalls - alle Prioritätskonflikte beseitigt worden sind, steht genau eine Anforderungstransition fest, die in der aktuellen Produktionssituation aktiviert ist und unter allen aktivierten Anforderungstransitionen aus der Anforderungsgruppe der Beladestelle die höchste Schaltpriorität besitzt.

Die hier skizzierte Anforderung von freien Transportmitteln durch wartende Transportobjekte führt zu einer Besonderheit, wenn für Transportmittel besondere Parkpositionen als Ruhepositionen ausgezeichnet sind. Denn des öfteren wird einem Transportmittel, das nach dem Entladen des zuletzt transportierten Objekts zu seiner Parkposition zurückkehrt, durch das Schalten einer Anforderungstransition ein neues Transportobjekt zugeordnet, noch bevor das Transportmittel seine Parkposition erreicht hat. Dies sollte jedoch nicht als ein Koordinierungsdefizit mißverstanden werden. Denn Transportmittel werden ihrer Transportfunktion am besten dadurch gerecht, daß sie Objekte transportieren - und nicht ungenutzt geparkt werden. Die Rückkehr zur Parkposition dient daher nur als "Residualstrategie":

Sie wird zwar von vornherein als Koordinierungsoption vorgesehen, jedoch nur dann realisiert, wenn für das betroffene Transportmittel kein Nutzungsbedarf besteht. Vgl. zu diesem Residualcharakter von Parkpositionen auch KNOOP (1986), S. 153 (im Rahmen einer komplizierter angelegten Steuerstrategie).

79) Vgl. dazu die Erläuterungen in der voranstehenden Anmerkung. Das Konzept der Anforderungstransitionen ist auf diesen Bevorzugungsmodus aber keineswegs fixiert. Statt dessen lassen sich auch beliebige andere Prioritätsordnungen über den Anforderungstransitionen errichten. Beispielsweise lassen sich solche Transportmittel bevorzugen, die eine Beladestelle am schnellsten erreichen können. Dann werden neben den Entfernungen zwischen Start- und Beladepositionen ebenso die Transportgeschwindigkeiten der freien Transportmittel berücksichtigt. Es wäre aber auch möglich, die Transportkosten der Transportmittel als Grundlage der Prioritätsordnungen auszuwählen. Allerdings würden die beiden Beispiele die formale Spezifizierung der Prioritätsordnungen erheblich erschweren. Denn die Schaltprioritäten der Anforderungstransitionen könnten nicht mehr statisch festgelegt werden. Vielmehr müßten sie dynamisch an die jeweils freien Transportmittel und deren Transportgeschwindigkeiten bzw. Transportkosten angepaßt werden.

80) Die Modellierungen der Übergabepunkte unterscheiden sich hinsichtlich der Benennungen der jeweils betroffenen Bearbeitungs- oder Lagerstationen. Dies ist trivial. Darüber hinaus besteht nur eine geringfügige Abweichung bei der Konstruktion der Werkstückbeladung. Sie fällt bei Lagerstationen etwas einfacher aus, als es bei Bearbeitungsstationen der Fall ist. Da Bearbeitungs- und Lagerstationen aus der Transportperspektive im wesentlichen gleich behandelt werden, lassen sie sich unter die Bezeichnung "Übergabestation" subsumieren. Diese Sprachregelung wird bei der Definition der Informationsmarke "werkstücktransport" genutzt, um nicht zwischen den Namen von Bearbeitungs- und Lagerstationen differenzieren zu müssen.

81) Insgesamt existieren 84 Anforderungsstellen ($H=84$). Dabei handelt es sich einerseits um die 24 Stellen $s_{m(h)}$ mit $m(h)=h$ und $h \in \{1, \dots, 24\}$. Sie repräsentieren im Transportnetz jeweils eine Transportposition. Andererseits sind 60 Stellen $s_{m(h)}$ mit $m(h) = h - 24.7$ und $h \in \{25, \dots, 84\}$ betroffen, die in den verfeinernden Subnetzen von Makrotransitionen jeweils eine Interimposition darstellen. Der Übersichtlichkeit halber werden aber von diesen 84 Anforderungsstellen in der Netzgraphik und -legende nur die vier Anforderungsstellen s_{11} , $s_{39.7}$, s_{18} und s_{21} explizit angeführt. Sie sind mit der Beladestelle $s_{TA,B2}$ des Ausgangspuffers der Bearbeitungsstation "BS_2" durch die Anforderungstransitionen $t_{21/11}$, $t_{21/39.7}$, $t_{21/18}$ bzw. $t_{21/21}$ verknüpft. Die kürzest möglichen Verbindungswege zwischen der Beladestelle und jeder ihrer drei vorgenannten Anforderungsstellen betragen $1+1=2$ bzw. $(0,5 \cdot 3)+2=3,5$ bzw. 2 bzw. 0 Längeneinheiten. Dabei wurde auf die Längen der Transportstrecken zurückgegriffen, die im zugrundeliegenden Transportgraphen oder Kanal/Instanz-Netz ausgewiesen sind. Da sich die Schaltprioritäten der Anforderungstransitionen nach den Längen der kürzest möglichen Verbindungswege richten, besitzt die vierte Anforderungstransition $t_{21/21}$ die höchste - und zugleich maximal mögliche - Schaltpriorität. Diese Anforderungstransition wird also mit Sicherheit geschaltet, falls sich an der Transportposition des betrachteten Übergabepunkts "ÜB_2", die durch die (Anforderungs-)Stelle s_{21} repräsentiert wird, mindestens ein freies Transportmittel befindet. Andernfalls kommen die anderen Anforderungstransitionen zum Zuge. Für die oben explizit angesprochenen Anforderungstransitionen gilt: Die erste und die dritte Anforderungstransition mit derselben Weglänge "2" weisen dieselbe höhere Schaltpriorität auf, während die zweite Anforderungstransition mit der Weglänge "3,5" eine niedrigere Schaltpriorität besitzt. Daher gilt für die Schaltprioritäten der hier berücksichtigten vier Anforderungstransitionen: $sp_{21/21} > sp_{21/11} = sp_{21/18} > sp_{21/39.7}$. Durch eine zusätzliche Indifferenzregel, die Anforderungstransitionen bevorzugt, wenn zu ihnen Anforderungsstellen mit kleineren (größeren) Indizes gehören, wird der Prioritätskonflikt zwischen den beiden Transitionen $t_{21/11}$ und $t_{21/18}$ der erstgenannten (letztgenannten) aufgelöst: $sp_{21/11} > sp_{21/18}$ ($sp_{21/18} > sp_{21/11}$). Die Anforderungsstellen und Anforderungstransitionen aus dem Teilnetz für den Übergabepunkt "ÜB_2" werden in der anschließenden Netzgraphik und -legende also nur partiell ausgewiesen. Denn von den insgesamt 84 Anforderungsstellen werden - wie zuvor dargelegt - nur die 4 exemplarisch ausgewählten Stellen s_{11} , $s_{39.7}$, s_{18} und s_{21} angeführt. Darüber hinaus gehören zu den 84 Anforderungsstellen 84 Anforderungstransitionen für Werkstücke und noch einmal 84 Anforderungstransitionen für Werkzeuge. Von diesen insgesamt 168 Anforderungstransitionen werden explizit nur die 4 werkstückbezogenen Anforderungstransitionen $t_{21/11}$, $t_{21/18}$, $t_{21/239.7}$ und $t_{21/21}$ berücksichtigt. Aus dem vollständigen Teilnetz des Übergabepunkts "ÜB_2" werden deshalb insgesamt 80 Anforderungsstellen und 184 Anforderungstransitionen übergangen. Der Verf. sieht darin jedoch keine wesentliche Einschränkung. Denn alle ausgeblendetten Anforderungsstellen lassen sich in genau derselben Weise konstruieren wie die 4 angesetzten Exemplare. Gleiches gilt für die 80 übergangenen werkstückbezogenen Anforderungstransitionen. Die 84 vernachlässigten werkzeugbezogenen Anforderungstransitionen lassen sich analog zu ihren werkstückbezogenen Pendanten formulieren. Es brauchen lediglich zwei Substitutionen zu erfolgen: Die Variable "Werkstückname" muß durch die Variable "Werkzeugname" ersetzt werden. Die Operation "transportmittelmarke_ws" ist durch die Operation "transportmittelmarke_wz" zu ersetzen. Die vorgenannten Ergänzungen erscheinen dem Verf. so trivial - und zugleich in ihrer Ausführung so aufwendig, daß er darauf verzichtet hat, ein vollständiges, aber monströses Teilnetz für den Übergabepunkt "ÜB_2" mit insgesamt 84 Anforderungsstellen und 168 Anforderungstransitionen zu präsentieren. Alleine die Netzgraphik würde bei der hier gewählten Darstellungsweise (4 werkstückbezogenen Anforderungstransition mit 4 Anforderungsstellen) mindestens 80 (!) zusätzliche Skriptseiten erfordern. Auf jeder Seite müßten 4 werkstück- und 4 werkzeugbezogene Anforderungstransitionen mit 4 Anforderungsstellen visualisiert

werden. Dennoch würden diese 80 weiteren Netzgraphikteile keine neuartigen Einsichten in die Konstruktion des Teilnetzes für den Übergabepunkt vermitteln. Daher hat sich der Verf. darauf festgelegt, auf solche aufgeblähten vollständigen Netzdarstellungen in der Fallstudie zu verzichten. Sie sind erst dann erforderlich, wenn die Netzmodule der Fallstudie auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem konkret implementiert werden. Dies geschieht in der hier vorgelegten Fallstudie jedoch nicht.

82) Es handelt sich um die Informationsmarke der Sorte "werkstücktransport". Da es sich um die zuerst eingeführte Informationsmarke handelt, werden ihre Kopien durch den Ausdruck "m₁₁" notiert. Alle später vorgestellten Informationsmarken werden entsprechend zur Reihenfolge ihrer Erwähnung als zweite, dritte usw. Informationsmarken behandelt.

Die Informationsmarken verdeutlichen, daß der hier modellierten Fallstudie objektorientierte Gestaltungsideen zugrundeliegen. Der objektorientierte Ansatz wurde bereits bei der einleitenden systemtheoretischen Konzeptualisierung von Koordinierungsproblemen herausgestellt. Dort klang auch schon die Besonderheit an, die Verhaltensweise eines Systems intern durch den Austausch von Nachrichten zwischen systemzugehörigen Objekten zu koordinieren. Hier wird nun der Aspekt des Nachrichtenaustauschs durch den Fluß von (Kopien der) Informationsmarken konkretisiert. Die Attributausprägungen einer Informationsmarkenkopie repräsentieren dabei den Informationsgehalt einer koordinierungsrelevanten Nachricht. Die oben eingeführte erste Informationsmarke betrifft speziell den Austausch von Koordinierungsnachrichten zwischen Transportmitteln und Produktionsaufträgen. Die Informationsmarken entsprechen darüber hinaus den "Telegrammen", die WECK (1991d), S. 20f., beschreibt. Dort wird die informationstechnische Realisierung eines verteilten PPS-Systems für die Prozeßkoordinierung in Flexiblen Fertigungssystemen vorgestellt (S. 8ff.).

83) Eine Kopie der Informationsmarke "werkstücktransport" wird zunächst vom Netzmodul für die Auftragsabwicklung abgesandt, um einem ausgelasteten Werkstück, das sich im Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation "BS_2" befindet, die nächste anzulauende Bearbeitungs- oder Lagerstation zuzuordnen. Um welche Station es sich dabei handelt, wird durch die aktuelle Ausprägung des Attributs "werkstückzuordnung" angezeigt. Dabei besitzt das Attribut "transportstatus" die Ausprägung "beladung_erwartend". Die Zuordnung der nächsten Station leistet das Schalten der Transition $t_{21,3}$. Erst danach wartet das Werkstück im Ausgangspuffer auf die Zuordnung eines Transportmittels. Wie dies im einzelnen geschieht, wird an anderer Stelle dargelegt. Anschließend wartet das Werkstück darauf, daß das zugeordnete Transportmittel am Übergabepunkt der Bearbeitungsstation "BS_2" eintrifft. Sobald das Transportmittel mit dem Werkstück beladen worden ist, nimmt das Attribut "transportstatus" der eingangs angesprochenen Informationsmarkenkopie die Ausprägung "beladen" an. Diese Information kann vom Netzmodul der Auftragsabwicklung zur Kenntnis genommen werden. Das Transportmittel steuert nun seine Zielposition an, die dem Werkstück als dessen nächste Bearbeitungs- oder Lagerstation zugeordnet worden war. Sobald das Werkstück dort entladen ist, wird dies von einer zweiten Kopie der Informationsmarke "werkstücktransport" angezeigt. Ihr Attribut "transportstatus" besitzt dann die aktuelle Ausprägung "entladen". Diese Information steht wiederum dem Netzmodul für die Auftragsabwicklung zur Verfügung. Zugleich kann der Ausprägung des Attributs "übergabestationsname" entnommen werden, an welcher Bearbeitungs- oder Lagerstation das Werkstück entladen worden ist.

Die voranstehend skizzierte Konstruktion erfolgt aber nur für die Eingangspuffer von Bearbeitungs- oder Lagerstationen sowie für die Ausgangspuffer von Bearbeitungsstationen. Sie unterbleibt dagegen für die Ausgangspuffer von Lagerstationen. Denn allen Werkstücken, die sich im Ausgangspuffer einer Lagerstation befinden, ist schon von vornherein die nächste anzulauende Bearbeitungsstation fest zugeordnet. Dies geschieht jeweils durch denjenigen Lagerauftrag, der die Auslagerung des betroffenen Werkstücks veranlaßt hat. Daher wartet das ausgelagerte Werkstück auf die Zuordnung eines Transportmittels sofort dann, wenn es in den Ausgangspuffer der Lagerstation gelangt ist. Infolgedessen entfallen bei den Übergabepunkten aller Lagerstationen die Stelle $s_{TP,2}$ und $s_{21,1}$ sowie die Transition $t_{21,3}$ ersatzlos.

84) Die beiden Teile der Netzgraphik werden über ihre gemeinsamen Stellen s_{21} und $s_{TA,B2}$ miteinander verknüpft.

85) Strenggenommen handelt es sich nur um den werkstückspezifischen Ausschnitt des Teilnetzes für diesen Übergabepunkt.

86) Der Ausdruck "zinssatz" stellt wiederum ein Konstantensymbol dar. Diesem Konstantensymbol wird durch die Vereinbarung "zinssatz = 0.06" der numerische Wert "0.06" (für: 6%) zugewiesen. Er besitzt die Dimension:

$$DM[\text{Zinsen}] : (DM[\text{Kapitalbindung}] \cdot a[\text{Bindungsdauer}]) = a^{-1}$$

Dabei stehen "DM" für die deutsche Währungseinheit und "a" für Jahre (anno).

87) Beim Ausdruck "zinszeitverrechnung" handelt es sich abermals um ein Konstantensymbol. Eine Zinszeitverrechnung wird erforderlich, weil eine dimensionale Diskrepanz zwischen dem Zeitmaß des Zinssatzes einerseits und dem Zeitmaß von Systemuhr und Transportgeschwindigkeit andererseits besteht. Denn der Zinssatz wurde in der allgemein üblichen Weise auf die Zeiteinheit "Jahr" bezogen. Alle anderen Zeitgrößen der Fallstudie werden

dagegen auf die Zeiteinheit "Minute" ausgerichtet. Daher muß der jahresbezogene Zinssatz durch den Wert der Zinszeitverrechnung in einen minutenbezogenen Zinssatz transformiert werden. Dabei wird lediglich berücksichtigt, daß ein Jahr aus 525600 Minuten besteht (bei 365 Tagen). Das Konstantensymbol "zinszeitverrechnung" erhält daher den gerundeten Wert $1,9 \cdot 10^{-6}$ mit der Dimension "a/min". Von zwischenzeitlich eintretenden Zinseszinswirkungen wird der Einfachheit halber vollständig abgesehen. Ihre Einbeziehung bereitet jedoch keine Schwierigkeiten. Denn es braucht lediglich einmal dem Konstantensymbol "zinszeitverrechnung" ein entsprechend korrigierter Wert zugewiesen werden.

88) Die Transportmittelgeschwindigkeit wird gemessen in der Dimension:

$$m[\text{Transportweg}] : \text{min}[\text{Transportzeit}] = m/\text{min}$$

Dabei bedeuten "m" Meter und "min" Minuten.

89) Für den Transportkostensatz wird als Dimension gewählt:

$$\text{DM}[\text{Transportkosten}] : m[\text{Transportweg}] = \text{DM}/m$$

Dabei stehen "DM" für die deutsche Währungseinheit und "m" für Meter.

90) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

91) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

92) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

93) Für die zugehörige nullstellige Operation `auftrag_ka()` wird vereinbart: `auftrag_ka() = nil`.

94) Die Markenkapazität der Stelle $s_{21.1}$ wird genau so groß wie die Markenkapazität derjenigen Stelle festgelegt, die den Ausgangspuffer der betrachteten Bearbeitungsstation repräsentiert. Denn mehr Werkstücke, als durch diese Ausgangspufferkapazität zugelassen sind, können sich im Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation ohnehin nicht befinden.

95) In dieser Werkstückstatusbestimmung liegt der einzige wesentliche Unterschied zwischen den Teilnetzen, die entweder die Übergabepunkte an Bearbeitungs- oder aber die analogen Übergabepunkte an Lagerstationen erweitern. Denn im Falle einer Lagerstation wäre die o.a. Statuszuordnung zu ersetzen durch: `Werkstückstatus_neu := auf_einlagerung_wartend`.

96) Am Rande wird darauf hingewiesen, daß die Größenordnung der Kapitalkostenzunahme, die während der Ausführung eines Transportauftrags entsteht, äußerst gering ausfällt. Für die Abschätzung dieser Größenordnung wird der Transport eines Werkstücks betrachtet, dessen Herstellkosten 100 DM betragen, als es auf ein Transportmittel geladen wurde. Das Transportmittel hat bis zum Erreichen seiner Entladeposition 12 min benötigt. Es wurden ein kalkulatorischer Zinssatz von 6% und eine Zinszeitverrechnung mit dem Wert von $1,9 \cdot 10^{-6}$ vorausgesetzt. Daraus folgt für die transportbedingte Zunahme der Kapitalkosten der gerundete Wert: $100 \cdot 12 \cdot 0,06 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6} = 0,00228$ DM. Die Kapitalkostenzunahme beträgt also weniger als 1 Pfennig.

Erwägungen, die in der Wirtschaftlichkeit des Rechnungswesens fußen, können nahelegen, solche verschwindend geringe Beträge überhaupt nicht zu berücksichtigen. Dennoch werden sie in der Fallstudie aus drei Gründen erfaßt. Erstens wird mit ihrer Hilfe demonstriert, welch hohes Detaillierungsniveau mit verfeinerten Netzmodellen für flexible Fertigungssysteme erreicht werden kann. Zweitens sollen die Konsequenzen vor Augen geführt werden, die aus der Forderung nach einer verursachungsgerechten und zeitnahen Kostenrechnung resultieren können. Dieses Postulat wurde bereits ausführlicher diskutiert. Dabei wurde auch speziell auf Kosten der Kapitalbindung eingegangen. Wenn die dort angesprochenen Kapitalbindungs- oder Wertzuwachskurven nicht nur intuitiv skizziert, sondern konkret und lückenlos ermittelt werden sollen, müssen die transportbedingten Kapitalkosten beachtet werden. Ob angesichts des dafür erforderlichen Detaillierungsniveaus an dem Postulat verursachungsgerechter und zeitnaher Kostenerfassung tatsächlich festgehalten wird, möchte der Verf. in der hier präsentierten Fallstudie nicht entscheiden. Er bietet nur die konkrete und lückenlose Ermittlung der Kapitalkosten an, falls dies vom Modellierungsträger gewünscht wird. Andernfalls lassen sich die Netzmodule ohne Schwierigkeiten dadurch vereinfachen, daß auf alle Attribute und Formeln ersatzlos verzichtet werden, die der Berechnung von Kapitalbindungskosten dienen. Drittens ist es möglich, das Niveau der ausgewiesenen Kapitalkostenbeträge dadurch zu erhöhen, daß eine größere Zeiteinheit gewählt wird. Der Fallstudie liegt eine Systemzeit zugrunde, die in der Einheit "Minute" gemessen wird. Z.B. werden die Kapitalkostenbeträge versechzigfach, sobald ein stündliches Zeitraster benutzt wird. Allerdings

muß dann in Kauf genommen werden, daß das Detaillierungsniveau der Prozeßkoordinierung in zeitlicher Hinsicht entsprechend abnimmt. Denn die Systemuhr schaltet nur noch jede Stunde. Daher stehen auch die Schaltakte aller zeitverbrauchenden Transitionen nur noch jede Stunde zur Disposition.

97) Die Transportmittelgeschwindigkeit wird gemessen in der Dimension:

$$m[\text{Transportweg}] : \text{min}[\text{Transportzeit}] \approx \text{m/min}$$

Dabei bedeuten "m" Meter und "min" Minuten.

98) Für den Transportkostensatz wird als Dimension gewählt:

$$\text{DM}[\text{Transportkosten}] : m[\text{Transportweg}] \approx \text{DM/m}$$

Dabei stehen "DM" für die deutsche Währungseinheit und "m" für Meter.

99) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

100) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

101) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

102) Für die zugehörige nullstellige Operation `auftrag_ka()` wird vereinbart: `auftrag_ka() = nil`.

103) Als zusätzliche Haupttestbedingungen könnten berücksichtigt werden:

Betriebsbereitschaft = betriebsbereit

Transportphase_alt ∈ {wartend, zurückkehrend}

Kapazitätsbeanspruchung_alt = frei

Es handelt sich aber um redundante Tests. Denn sie sind notwendig erfüllt, falls die o.a. Haupttestbedingung "Zuordnungseignung_alt = geeignet" zutrifft. Daher werden sie hier nicht gesondert angeführt.

104) Dieses "Ungleichgewicht" reflektiert die erhebliche Bedeutung, die dem Transportsystem in Flexiblen Fertigungssystemen zukommt.

105) Darüber hinaus könnte z.B. auch die Störung von Transportmitteln ausführlicher berücksichtigt werden. Denn in der Fallstudie werden sie nur unvollständig erfaßt. Im verfeinerten Subnetz, das in der Netzgraphik der Abb. 158 und der zugehörigen Netzlegende präsentiert wurde, finden nur Transportstörungen Beachtung, die sich während der Ausführung einer Transportoperation zwischen zwei Transportpositionen ereignen. Dabei kann es sich sowohl um eine Transportstrecken- als auch um eine Transportmittelstörung handeln. Die Störung des Transportmittels, das sich auf der Transportstrecke zwischen den beiden betrachteten Transportpositionen befindet, wird in der Netzgraphik von Abb. 158 durch eine Kopie der Basismarke auf der Stelle $s_{39,6}$ angezeigt. Dagegen bleiben alle Störungen von Transportmitteln, die in der aktuellen Produktionssituationen an einer Transportposition verharren, von vornherein außer acht. Sie ließen sich z.B. in der Weise erfassen, wie es später für Störungen von Betriebsmitteln erheblichen Aufwand bereitet. Daher erfolgt sie in dieser Fallstudie nur für Bearbeitungsstationen. Dagegen unterbleibt sie für die hier betrachteten Transportmittel. Denn das Netzmodul für Transportmittel hat ohnehin schon ein beträchtliches Volumen angenommen. Darüber hinaus würde es keine neuartigen Erkenntnisse vermitteln, die Behandlung von Störungen bei Bearbeitungsstationen in analoger Weise auf Transportmittel anzuwenden.

106) Die Stelle wird daher als Transportpositionsstelle angesprochen.

107) Die konflikthafte Aktivierung von Ausgangstransitionen einer gemeinsamen Transportpositionsstelle besteht genau dann, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind. Erstens muß sich ein Transportmittel auf einer Transportposition befinden, die von seiner Zielposition verschieden ist. Zweitens müssen mehrere Transportstrecken offen sein, über die das Transportmittel seine aktuelle Transportposition verlassen kann, um seine nächste Zielposition anzusteuern. Falls von der aktuellen Transportposition, die von der nächsten Zielposition verschieden ist, nur höchstens eine offene Transportstrecke ausgeht, kann keine Auswahlentscheidung zwischen alternativen offenen Transportstrecken getroffen werden. Dann ist die zweite der beiden o.a. Bedingung verletzt, während die erste weiterhin erfüllt wird. Unter diesen Voraussetzungen gilt: Wenn genau eine Transportstrecke offen ist, ist auch nur eine Ausgangstransi-

tion der Transportpositionsstelle aktiviert. Es wird dann diese eine aktivierte Ausgangstransition geschaltet, so daß die eine offene Transportstrecke benutzt wird. Sofern überhaupt keine offene Transportstrecke zur Verfügung steht, ist das Transportmittel blockiert. Auf diese Situation wurde bereits eingegangen. Andernfalls - wenn die aktuelle Transport- mit der nächsten Zielposition übereinstimmt - ist die erste der beiden o.a. Bedingungen verletzt. Dann besteht überhaupt kein Anlaß mehr, den Transportprozeß fortzusetzen. Statt dessen verharrt das Transportmittel in seiner aktuellen Transportposition, bis es eine neue Zielposition zugeordnet erhält.

108) Die Transportstrecken werden in bezug auf die nachfolgenden Transportwege, die sie einleiten, als Startstrecken bezeichnet.

109) Es ist möglich, daß mehrere Transportwege zwischen der aktuellen Transport- und der nächsten Zielposition mit derselben minimalen Weglänge existieren. Diese Transportwege können mit derselben Transportstrecke beginnen, aber ebenso auch von verschiedenen Transportstrecken eingeleitet werden.

110) Die minimale Weglänge zwischen der aktuellen Transport- und der nächsten Zielposition ergibt sich aus dem oben eingeführten Transportgraphen. Dazu braucht lediglich auf die Transportwegematrix zurückgegriffen werden, die aus dem Transportgraphen abgeleitet werden kann. Sie gibt für je zwei Transportpositionen die kürzeste Länge aller Transportwege an, die zwischen diesen beiden Positionen grundsätzlich möglich sind.

Anstelle der Transportwegminimierung kann auch ein anderes Entscheidungskriterium benutzt werden. Auf die Transportdauern bis zum Erreichen der Zielposition und die entsprechenden Transportkosten wurde schon in einer früheren Anmerkung hingewiesen. Ebenso lassen sich kompliziertere Entscheidungskriterien benutzen, die auf einer begrenzten Vorausschau beruhen.

111) Die Auswahlentscheidung läßt sich anhand des Erreichbarkeitsgraphen des Transportnetzes realisieren. Dies wird hier nur kurz skizziert, weil darauf verzichtet wird, für die Fallstudie den Erreichbarkeitsgraphen des Transportnetzes konkret zu präsentieren. Denn der Erreichbarkeitsgraph würde so groß ausfallen, daß er sich nicht mehr auf einer Seite visualisieren ließe.

Es wird ein beliebiges Subnetz betrachtet, das eine Transportstrecke zwischen zwei benachbarten Transportpositionen und die zugehörige atomare Transportoperation repräsentiert, durch deren Ausführung die Transportstrecke zurückgelegt wird. Für jede Richtung der Operationsausführung besitzt das Subnetz eine Starttransition t_n , durch deren Schalten die Operationsausführung beginnt. Diejenige Transportposition, von der die Starttransition t_n bei ihrem Schalten eine Transportmarke abzieht, wird als Referenzposition der Starttransition bezeichnet. Der Starttransition t_n ist ein Schaltwert $sw(t_n) = \underline{sw}_n$ zugeordnet. Es handelt sich um einen 0-stelligen Schaltwertvektor mit $\underline{sw}_n^T = (sw_{n,1}, \dots, sw_{n,0})$. Die Komponentenanzahl "0" ist die Anzahl aller Transportpositionen TP_o , die durch den vorgegebenen Transportgraphen mit $o \in \{1, \dots, 0\}$ und $O \in \mathcal{N}$, definiert wurden. Sie fällt mit der Spalten- und Zeilenzahl der Wegematrix zusammen, die sich aus dem Transportgraphen ableiten läßt (vgl. die vorgenannte Anmerkung). Jede Komponente $sw_{n,o}$ mit $o \in \{1, \dots, 0\}$ ist die Länge aller kürzest möglichen Wege, die zwischen der Referenzposition und der Transportposition TP_o existieren. Transportwege und Transportweglängen lassen sich aus dem Transportgraphen ermitteln oder aus der daraus berechneten Wegematrix unmittelbar entnehmen. Für die Transportposition TP_o , die mit der Referenzposition zusammenfällt, beträgt die minimale Transportweglänge $sw_{n,o} = 0$. Für Transportpositionen TP_o , die sich von der Referenzposition aus nicht erreichen lassen, wird eine unendlich große minimale Transportweglänge angesetzt ($sw_{n,o} = \omega$). In Flexiblen Fertigungsnetzen tritt dieser Fall jedoch im allgemeinen nicht ein. Allenfalls besteht kein Transportweg, der vom Übergabepunkt des Ausgangslagers des Produktionssystems aus zum Übergabepunkt seines Eingangslagers führt. Die Marke desjenigen Transportmittels, das sich auf der Referenzposition befindet, informiert durch die aktuelle Ausprägung des Attributs "Zielposition" über diejenige Transportposition TP_z , die als nächste angesteuert werden soll. Ein entsprechender Zielpositionsvektor $\underline{zp}_{n,z}$ mit $\underline{zp}_{n,z}^T = (zp_{n,z,1}, \dots, zp_{n,z,0})$ spezifiziert die Zielposition TP_z . Für seine Komponenten $zp_{n,z,o}$ mit $o \in \{1, \dots, 0\}$ gilt genau dann $zp_{n,z,o} = 1$, wenn die Transportposition TP_o die nächste Zielposition TP_z darstellt ($TP_o = TP_z$). Andernfalls gilt $zp_{n,z,o} = 0$ ($TP_o \neq TP_z$). Dieser Zielpositionsvektor kann durch ein zusätzliches Attribut in der Transportmittelmarke selbst vorgehalten oder durch die Übergangsprozedur der Starttransition ermittelt werden. Der zielpositionsspezifische Schaltwert der Starttransition t_n ergibt sich als Wert $sw(t_n, TP_z)$ des Skalarprodukts von Schaltwertvektor und Zielpositionsvektor: $sw(t_n, TP_z) = \underline{sw}_n^T \cdot \underline{zp}_{n,z}$. Dieser zielpositionsspezifische Schaltwert der Starttransition t_n stellt einen dynamischen Schaltwert dar: Er ist nur für solche Produktionssituationen definiert, in denen sich auf der Referenzposition mindestens ein Transportmittel befindet. Falls diese Voraussetzung erfüllt ist, gibt er für jedes dort befindliche Transportmittel den kürzesten Transportweg zwischen der Referenzposition und der Zielposition des Transportmittels an. Mit diesen dynamischen Schaltwerten werden im Erreichbarkeitsgraphen des Transportnetzes alle Schaltkanten bewertet, die mit Starttransitionen für den Ausführungsbeginn von atomaren Transportoperationen beschriftet sind. Falls ein Schaltkonflikt derart besteht, daß unter derselben Netzmarkierung mehrere Starttransitionen für dieselbe Transportmittelmarke aktiviert sind, wird von diesen Starttransitionen genau eine mit minimalem dynamischem Schaltwert ausgewählt. Auf diese Weise wird die oben angesprochene Auswahlentscheidung zwischen alternativen Ausgangstransitionen derselben Transportpositionsstelle konkret geleistet.

112) Daher leistet diese Selbststeuerung von Transportmitteln einen Beitrag zur opportunistischen Prozeßkoordination, die in einem früheren Kapitel skizziert wurde. In jeder Transportposition wird der dort vorhandene Anpas-

sungsspielraum, der durch alternative offene Transportstrecken konstituiert wird, vollständig identifiziert. Dadurch wird dem Gebot größtmöglicher Auswahlfreiheit entsprochen. Zugleich wird dieser Anpassungsspielraum durch eine Entscheidung über die Transportfortsetzung in wirkungsminimaler Weise geschlossen. Denn es wird nur die jeweils nächste Transportstrecke ausgewählt. Hinsichtlich aller späteren Transportstrecken, die bis zum Erreichen der Zielposition eventuell noch durchlaufen werden müssen, erfolgt in der aktuellen Transportposition keine Festlegung. Daher werden keine vorzeitigen und unnötigen Entscheidungsbindungen eingegangen. Infolgedessen läßt sich der Transportweg jederzeit an unerwartete Produktionsstörungen anpassen.

Beispielsweise kann der Fall eintreten, daß der Transportweg minimaler Weglänge, dessen Startstrecke in der aktuellen Transportposition ausgewählt wurde, in einer späteren Produktionsstörung von einer Transportwegstörung heimgesucht wird. Dann ist mindestens eine Transportstrecke auf diesem gestörten Transportweg geschlossen. Auf seinem ursprünglich eingeschlagenen Transportweg erreicht das Transportmittel irgendwann diejenige Transportposition, von der die geschlossene Transportstrecke ausgeht. Dort sorgt die oben skizzierte Selbststeuerung dafür, daß das Transportmittel nicht mehr die geschlossene Transportstrecke, sondern eine andere - aber offene - Transportstrecke wählt. Falls in der aktuellen Produktionssituation an der betroffenen Transportposition keine offene Transportstrecke zur Auswahl steht, muß das Transportmittel so lange warten, bis sich erstmals eine Transportstrecke wieder öffnet.

Diese Anpassung an Transportwegstörungen ließe sich dadurch verfeinern, daß die Transportstreckenauswahl an jeder Transportposition durch eine Vorausschau auf spätere Transportstrecken erweitert wird (vgl. dazu den früheren Hinweis auf "look ahead"-Regeln). Das Transportmittel wählt dann nicht nur eine offene Transportstrecke, die einen Transportweg zur nächsten Zielposition mit minimaler Weglänge einleitet. Vielmehr kann auch überprüft werden, ob die nächsten "k" Transportstrecken auf demselben Transportweg in der aktuellen Produktionssituation ebenso offen sind. Der Vorausschauhorizont "k" bestimmt darüber, wie viele nächste Transportstrecken (maximal) berücksichtigt werden. Bei hinreichend großen Vorausschauhorizont wird der gesamte Transportweg bis zur nächsten Zielposition untersucht. Nur wenn alle überprüften Transportstrecken offen sind, wird die Startstrecke des untersuchten Transportwegs tatsächlich ausgewählt. Andernfalls wird eine andere offene Transportstrecke betrachtet, die von der aktuellen Transportposition ebenso ausgeht. Dieser vorausschauende Auswahlprozeß wird so lange fortgesetzt, bis eine offene Transportstrecke gefunden ist, für die gilt: Es handelt sich um die Startstrecke eines Transportwegs zwischen der aktuellen Transportposition und der nächsten Zielposition, auf dem alle Transportstrecken innerhalb des Vorausschauhorizonts offen sind. Wenn mehrere solcher Startstrecken existieren, kann diejenige ausgewählt werden, deren Transportweg zur Zielposition die kürzeste Weglänge besitzt. Es kann aber auch der Fall eintreten, daß keine solche Startstrecke zur Verfügung steht, weil alle offenen Transportstrecken, die von der aktuellen Transportposition ausgehen, die Startstrecken von Transportwegen sind, auf denen innerhalb des Vorausschauhorizonts mindestens eine geschlossene Transportstrecke liegt. Dann besteht ein neuartiger Freiheitsgrad: Entweder kann dennoch eine der offenen Transportstrecken ausgewählt werden, um die aktuelle Transportposition zu verlassen. Es wird dann gehofft, die Produktionssituation möge sich zwischenzeitlich so verändern, daß die ehemals geschlossenen Transportstrecken auf dem eingeschlagenen Transportweg bis zu ihrem Erreichen wieder offen sind. Oder das Transportmittel verharrt in seiner Transportposition so lange, bis mindestens ein Transportweg zwischen dieser Transport- und der nächsten Zielposition existiert, auf dem innerhalb des Vorausschauhorizonts alle Transportstrecken offen sind. Beide Entscheidungsoptionen - sowohl das hoffnungsvolle Einschlagen eines Transportwegs als auch das zurückhaltende Abwarten - gehören zum Koordinierungsspielraum in der aktuellen Transportposition. Auf eine Ausarbeitung dieser verfeinerten Transportkoordinierung mit begrenzter Vorausschau auf zukünftige Transportstrecken wird jedoch im Rahmen der hier präsentierten Fallstudie verzichtet.

113) Auf diese Weise läßt sich auch das Konzept der Leitteilsteuerung verwirklichen. Vgl. zu diesem Koordinierungskonzept WILDEMANN (1988c), S. 54; ansatzweise auch O.V. (1984e), S. 46ff. Die Leitteilsteuerung harmoniert mit der Vorstellung, die Werkstücke eines Auftrags in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Produktionssituation durch ein Produktionssystem zu steuern. Dabei wird der Vereinzelung der Werkstückbearbeitung entsprochen, die im Zusammenhang mit der Losgröße "Eins" erwähnt wurde. Zugleich erfolgt ein Beitrag zur situationsabhängigen Prozeßkoordinierung, die anhand des opportunistischen Koordinierungskonzepts thematisiert wurde.

Bei der Leitteilsteuerung erhält ein Werkstück, das durch ein Produktionssystem geschleust werden soll, eine individuelle Kennzeichnung, z.B. ein Barcode-Etikett. Dieses individualisierte Werkstück ("Leitteil") wird mit Hilfe der Betriebsdatenerfassung bei seinem Fluß durch das Produktionssystem fortlaufend verfolgt. Zu diesem Zweck wurden oben entsprechende Meldepunkte im Transportgraphen vorgesehen. Zugleich empfängt das Werkstück vom prozeßkoordinierenden Informationssystem Anweisungsinformationen darüber, welche Position es im Produktionssystem als nächste ansteuern soll. Es handelt sich in der Regel um die jeweils nächste Bearbeitungsstation. Wie sich die hierfür erforderliche Zuordnung zwischen Werkstück und Folgestation konkret realisieren läßt, wird im letzten Kapitel dieser Fallstudie skizziert. Dabei braucht keineswegs eine zentrale Koordinierungskomponente in Anspruch genommen zu werden. Statt dessen ist es ebenso möglich, daß Agenten, die jeweils eine Bearbeitungsstation oder einen Produktionsauftrag vertreten, über die Zuordnung zwischen auftragszugehörigen Werkstücken und Bearbeitungsstationen in dezentraler Weise miteinander verhandeln. Sobald diese Zuordnung geschehen ist, steht für das betrachtete Werkstück die nächste anzusteuernde Bearbeitungsstation fest. Eine entsprechende Anweisungsinformation wird an das Werkstück im Produktionssystem abgesandt. Im Koordinierungsmodell wird die Information

über die zugeordnete nächste Bearbeitungsstation in der Werkstückmarke als aktuelle Ausprägung des Markenattributs "Entladeposition" berücksichtigt. Das Werkstück wartet nun auf seiner aktuellen Transportposition - der Beladeposition - auf ein Transportmittel. Das Heranlotsen eines freien Transportmittels kann mit Hilfe der Anforderungstransitionen erfolgen, die an anderer Stelle beschrieben werden. Das Transportmittel lädt das Werkstück an der Beladeposition auf und steuert die ausgewählte Bearbeitungsstation als Entladeposition an. Nachdem das Werkstück die nächste Bearbeitungsstation erreicht hat und dort bearbeitet worden ist, wiederholt sich das voranstehend skizzierte Procedere so lange, bis ein vollständig bearbeitetes Werkstück vorliegt. Im Regelfall wird es noch in ein Ausgangslager des Produktionssystems als letzte Entladeposition transportiert.

114) Vgl. dazu den Hinweis in der voranstehenden Anmerkung.

115) Die Idee einer dezentralen Transportsteuerung findet sich bereits bei MERTENS (1989c), S. 850f., und MERTENS (1989d), S. 14f. Es wird dort vorgeschlagen, dezentrale Transportsteuerungen auf der Grundlage von Kontraktnetz-Systemen zu verwirklichen. Die Anforderungstransitionen des hier modellierten Transportsystems erfüllen etwa diejenige Funktion, die bei MERTENS und Mitarbeitern von einem Planungsrechner durch das Verkünden von Transportaufträgen ausgeübt wird. Daher lassen sich die Vergabemodi für das Verteilen von Transportaufträgen, die in den beiden vorgenannten Quellen detaillierter ausgearbeitet sind (vgl. S. 851 bzw. 15), benutzen, um das betrachtete Netzmodul weiter zu verfeinern. In zweierlei Hinsicht reicht es aber auch schon über die Anregungen von MERTENS und Mitarbeitern hinaus. Denn sie sehen immer noch einen zentralen Planungsrechner für die Vergabe von Transportaufträgen vor. Dagegen werden hier Transportmittel von den zahlreichen Anforderungstransitionen auf dezentrale Weise nebenläufig angefordert. Daher wird hier das Prinzip der Steuerungs-Dezentralisierung konsequenter verwirklicht. Darüber hinaus wird die Dezentralisierung noch dadurch vervollkommen, daß durch die Ausgangstransitionen der Transportpositionen jederzeit lokale, situationsabhängige Entscheidungen über die Fortsetzung von Transportrouten getroffen werden (können). Diese zusätzlichen Transportentscheidungen während der Transportausführung werden von MERTENS und Mitarbeitern noch nicht gesehen.

7.2.1.1.2.2 Modellierung von Arbeitskräften

Die Fallstudie unterstellt, daß für die Bedienung des modellierten Flexiblen Fertigungssystems insgesamt sechs ausführende¹⁾ Arbeitskräfte zur Verfügung stehen. Jede Arbeitskraft wird durch die Kopie einer Arbeitskraftmarke repräsentiert. Alle Kopien der Arbeitskraftmarke fließen durch ein Netz, das ausschließlich der Repräsentation von Arbeitskräften gewidmet ist²⁾. Das markierte Arbeitskräftenetz wird im Rahmen der Fallstudie nur so weit ausgearbeitet, wie es für die Prozeßkoordinierung im modellierten Produktionssystem erforderlich ist³⁾. Daher erfolgt eine Beschränkung auf jene Eigenschaften von Arbeitskräften, die aus der Koordinierungsperspektive von Interesse sind⁴⁾.

Bei der Arbeitskraftmarke handelt es sich um eine Attributmarke. Das erste Attribut identifiziert die jeweils betroffene Arbeitskraft durch ihren Namen⁵⁾. Die sechs Arbeitskräfte der Fallstudie erhalten die abstrakten Namen "AK_1", "AK_2", "AK_3", "AK_4", "AK_5" sowie "AK_6"⁶⁾. Das zweite Attribut beschreibt die Qualifikation, über die eine Arbeitskraft hinsichtlich der Bedienung maschineller Vorrichtungen tatsächlich verfügt⁷⁾. Das Qualifikationsattribut wird als eine Liste dargestellt⁸⁾. Sie besteht aus der Iteration des Subattributs "Qualifikationsmerkmal". Diese Listenform ermöglicht einerseits eine ausdrucksstarke Qualifikationsbeschreibung durch frei wählbare Qualifikationsmerkmale⁹⁾. Andererseits läßt sie sich flexibel an unterschiedliche Qualifikationsstrukturen anpassen. Denn die Merkmalslisten, die zwei unterschiedliche Ausprägungen des Qualifikationsattributs konstituieren, brauchen weder hinsichtlich der Anzahl noch bezüglich der Art der involvierten Qualifikationsmerkmale übereinzustimmen¹⁰⁾. Dieser Formulierungsspielraum für qualifikationsbeschreibende Merkmalslisten erlaubt es z.B., die Qualifikationsspannweiten von Arbeitskräften unterschiedlich festzulegen: So kann eine Arbeitskraft über die Qualifikation verfügen, genau eine Bearbeitungsstation ("Maschine") zu bedienen¹¹⁾. Zugleich läßt sich ausdrücken, daß eine andere Arbeitskraft zur Mehrmaschinenbedienung¹²⁾ qualifiziert ist¹³⁾.

In der Fallstudie wird kein Wert auf die subtile Ausformulierung von Qualifikationsmerkmalen gelegt. Statt dessen werden als Qualifikationsmerkmale einfach die Namen der Bearbeitungsstationen angesetzt, die eine Arbeitskraft zu bedienen vermag¹⁴⁾. Daher läßt sich die qualifikationsgerechte Zuordnung von Arbeitskräften auf Bearbeitungsstationen in besonders transparenter Weise modellieren. Im Netzmodul der Arbeitskräfte brauchen lediglich die Namen derjenigen Bearbeitungsstationen vorzuliegen, die für ihren Betrieb in der aktuellen Produktionssituation die Bedienung durch eine¹⁵⁾ Arbeitskraft benötigen¹⁶⁾. Diesen Zweck erfüllt eine Informationsmarke der Sorte "bedienungsbedarf"¹⁷⁾. Ihre Kopien informieren jeweils über eine Bearbeitungsstation, die im zugrundeliegenden Produktionssystem auf die Bedienung durch eine Arbeitskraft wartet. Arbeitskräfte und Bearbeitungsstationen werden einander zugeordnet, indem die Namen von Bearbeitungsstationen, die jeweils auf eine bedienende Arbeitskraft warten, mit den Stationsnamen abgeglichen werden, die als Qualifikationsmerkmale von verfügbaren Arbeitskräften ausgewiesen sind. Ein drittes Attribut der Arbeitskraftmarke informiert durch seine Ausprägungen darüber, welchen Bearbeitungsstationen die Arbeitskräfte aktuell zugeordnet sind¹⁸⁾.

Sobald eine solche Zuordnung geschehen ist, muß sich die betroffene Arbeitskraft zu ihrer vorgesehenen Bearbeitungsstation begeben. Die Fortbewegung der Arbeitskraft im Produktionssystem wird nicht unmittelbar repräsentiert. Statt dessen informieren Systemmeldungen darüber, wann die Arbeitskraft zu ihrer Bearbeitungsstation aufgebrochen und wann sie dort angelangt ist. Im Arbeitskräftenetz schlagen sich diese beiden Nachrichten als die Schaltakte zweier entsprechender Meldetransitionen nieder. Beim Eintreffen der zweiten Nachricht wird die Kopie einer zweiten Informationsmarke¹⁹⁾ an das Netzmodul der betroffenen Bearbeitungsstation abgesandt. Sie zeigt dort an, daß die Arbeitskraft an der Bearbeitungsstation, an der sie erwartet wurde,

tatsächlich eingetroffen ist. Zwischen dem Eintreffen der Arbeitskraft und ihrem Arbeitseinsatz kann noch Zeit - z.B. für arbeitsvorbereitende Tätigkeiten - verstreichen. Eine weitere Melde-transition schaltet, wenn die Arbeitskraft bereitsteht, um die Bearbeitungsstation zu bedienen. Dieser Arbeitskräfteeinsatz kann auch vorübergehend unterbrochen werden. Jede solche Arbeitsstörung wird als eine Verteilzeit²⁰⁾ erfaßt²¹⁾.

Schließlich wird der Arbeitskräfteeinsatz an einer Bearbeitungsstation beendet. Dafür kommen zwei Gründe in Betracht. Erstens ist es möglich, daß an der Bearbeitungsstation kein Bedienungsbedarf mehr besteht. Dies ist entweder der Fall, wenn die Bearbeitungsstation leer steht. Oder alle Arbeitsgänge, die der Bearbeitung von Werkstücken aus dem Eingangspuffer der Bearbeitungsstation dienen, lassen sich bedienungsfrei ausführen. In beiden Fällen informiert eine Kopie der zweiten Informationsmarke darüber, daß an der Bearbeitungsstation keine Arbeitskräfte benötigt werden. Ein zweiter Grund für die Beendigung des Arbeitskräfteeinsatzes liegt im Ablauf der regulären Arbeitszeit, während derer die Arbeitskraft zur Verfügung steht.

Die Verfügbarkeit einer Arbeitskraft wird durch ihren persönlichen²²⁾ Verfügbarkeitskalender bestimmt²³⁾. Er listet für den gesamten Koordinierungszeitraum auf, in welchen Zeitintervallen eine Arbeitskraft voraussichtlich zur Verfügung steht²⁴⁾. Dadurch lassen sich einerseits Arbeitstage von arbeitsfreien Tagen unterscheiden²⁵⁾. Andererseits ist es ebenso möglich, für die Arbeitskräfte unterschiedliche Arbeitsschichten oder sogar individuell vereinbarte tägliche Arbeitszeiten zu berücksichtigen²⁶⁾. Die persönlichen Verfügbarkeitskalender der Arbeitskräfte lassen sich in einem Schichtplan²⁷⁾ zusammenfassen.

Für die sechs Arbeitskräfte, die zur Bedienung der Bearbeitungsstationen eingesetzt werden können, wird eine flexible Arbeitszeitregelung unterstellt²⁸⁾. Das Produktionssystem wird in zwei bemanneten Schichten²⁹⁾ genutzt, die jeweils 7 Stunden dauern. Für alle Arbeitskräfte ist eine durchschnittliche wöchentliche Arbeitszeit von 38,5 Stunden vereinbart. Die tatsächliche Schichtanzahl und -verteilung variiert für jede Arbeitskraft im wöchentlichen Rhythmus. Abb. 161 auf der nächsten Seite zeigt den Schichtplan, in dem die Arbeitszeiten der sechs Arbeitskräfte eingetragen sind³⁰⁾. Er repräsentiert für jede Arbeitskraft die vertraglich vereinbarte persönliche Verfügbarkeit³¹⁾. Der Schichtplan erstreckt sich nur über 2 Wochen. Sie reichen aus, um das Verteilungsmuster der Schichten für alle Arbeitskräfte eindeutig darzustellen³²⁾.

Zwei Transitionen des Arbeitskräftenetzes legen durch ihre Schaltakte den Arbeitsbeginn und das Arbeitsende jeder Arbeitskraft fest. Zur Ermittlung des Arbeitsbeginns wird unmittelbar auf den Schichtplan zurückgegriffen. Seine Informationen über die persönlichen Verfügbarkeitskalender der sechs Arbeitskräfte gehen daher in die Schaltvorschrift der Transition für den Arbeitsbeginn ein³³⁾. Durch Vergleich mit der aktuellen Systemzeit wird für jede Arbeitskraft ermittelt, ob sie ihre Arbeit im Produktionssystem beginnen kann. Sobald dies der Fall ist, schaltet die Transition des Arbeitsbeginns³⁴⁾. Zugleich wird mit Hilfe des Verfügbarkeitskalenders der Arbeitskraft berechnet, wie lange sie zur Verfügung steht. Diese Verfügbarkeitsdauer wird als Ausprägung des vierten Attributs der Arbeitskraftmarke festgehalten. Ein fünftes Attribut vermerkt die aktuelle Systemzeit, zu der diese Verfügbarkeitsdauer ermittelt wurde³⁵⁾. Sobald diese Verfügbarkeitsdauer abgelaufen ist³⁶⁾, schaltet die Transition für das Arbeitsende³⁷⁾. Diese Transition erstreckt sich aber nur auf solche Arbeitskräfte, die im Produktionssystem zur Verfügung stehen, dort aber noch keiner Bearbeitungsstation zugeordnet sind. Daher tritt ihr eine dritte, analog konstruierte Transition zur Seite. Sie berücksichtigt den Verfügbarkeitsablauf für alle Arbeitskräfte, die an den Bearbeitungsstationen des Produktionssystems eingesetzt sind.

Abb. 162 auf der übernächsten Seite präsentiert die Netzgraphik³⁸⁾ für das Arbeitskräftenetz, dessen Charakteristika zuvor beschrieben wurden. Im Anschluß daran findet sich die zugehörige Netzlegende.

Tag \ Schicht	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
1. Woche Frühschicht (5.00-12.00 Uhr)	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6
Spätschicht (12.00-19.00 Uhr)	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	
2. Woche Frühschicht (5.00-12.00 Uhr)	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5	AK_2 AK_4 AK_5
Spätschicht (12.00-19.00 Uhr)	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	AK_1 AK_3 AK_6	

Abb. 161: Schichtplan für sechs Arbeitskräfte

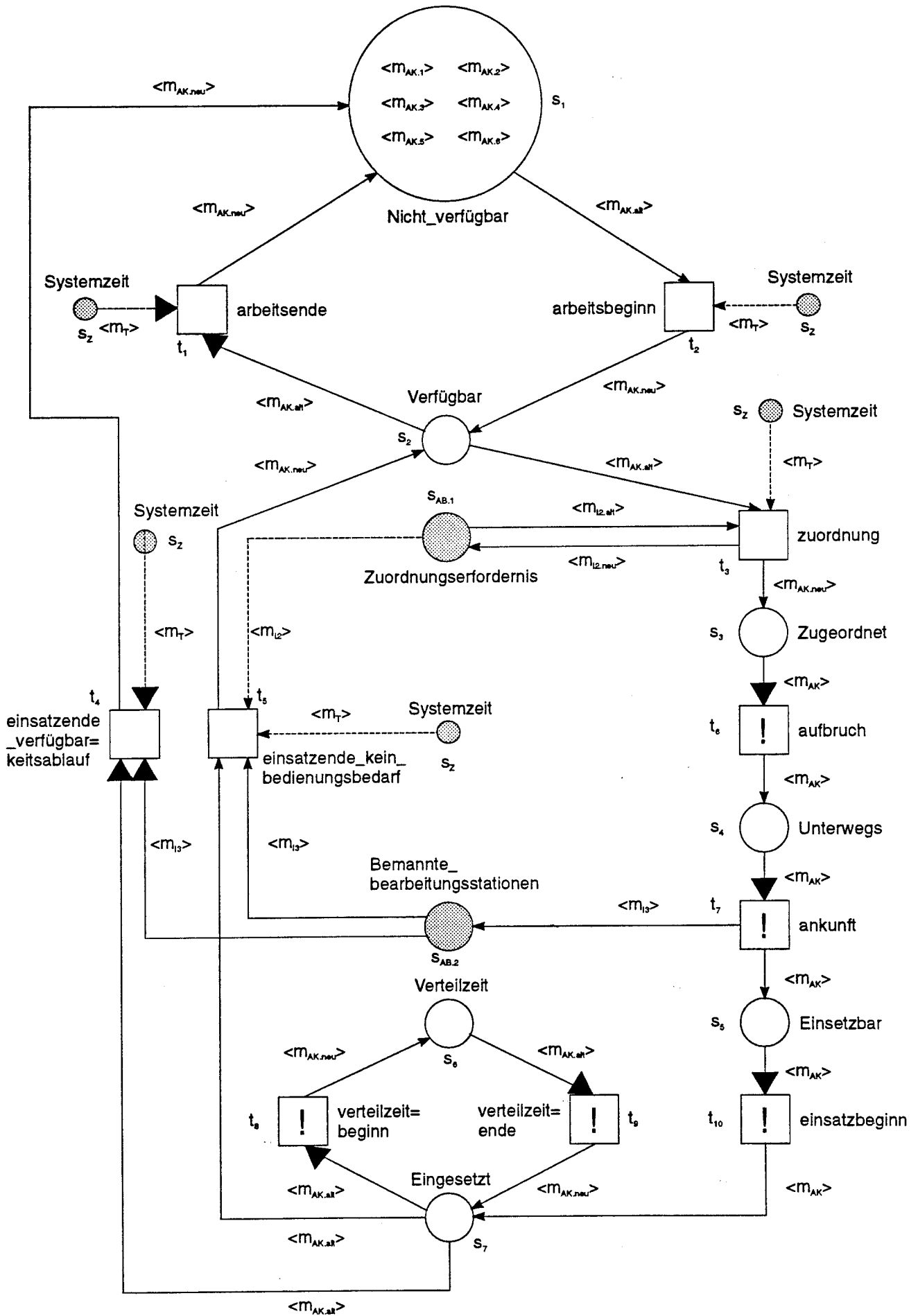


Abb. 162: Netzgraphik für den Einsatz von Arbeitskräften

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zeitpunkt:	INTEGER
zeitdauer:	INTEGER
arbeitskraftname:	STRING
"AK_1","AK_2","AK_3", "AK_4","AK_5","AK_6":	→ OB _{arbeitskraftname}
qualifikationsmerkmal:	STRING
"BS_1","BS_2", "BS_3","BS_4":	→ OB _{qualifikationsmerkmal}
bearbeitungsstationsname:	STRING
"BS_1","BS_2", "BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}
zuordnungsstatus:	SYMBOL
bedienung_überflüssig, bedienung_erforderlich, arbeitskraft_zugeordnet:	→ OB _{bedarfsstatus}
qualifikationsliste =	qualifikationsmerkmal*
bedienungsqualifikation =	Qualifikation(qualifikationsliste)
arbeitskraftzuordnung =	Zuordnung_akbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_akbs_ka()
verfügbarkeitsdauer =	Verfügbarkeit(zeitdauer)
letzter_zeitpunkt =	Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
«m _{AK} » = arbeitskraft =	Arbeitskraftmarke(arbeitskraftname bedienungsqualifikation arbeitskraftzuordnung verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt)
«m _{I2} » = bedienungsbedarf =	Informationsmarke_bb(bearbeitungsstationsname zuordnungsstatus)
«m _{I3} » = arbeitskrafteinsatz =	Informationsmarke_ae(arbeitskraftname bearbeitungsstationsname)
«m _T » = syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)

Stellen/Prädikatssymbole:

- $s_{AB.1}$: Zuordnungserfordernis(bedienungsbedarf)
markenkapazität_{AB.1} = ω 39)
- $s_{AB.2}$: Bemannte_bearbeitungsstationen(arbeitskrafteinsatz)
markenkapazität_{AB.2} = ω
- s_z : Systemzeit(syszeit)
markenkapazität_z = 1
- s_1 : Nicht_verfügbar(arbeitskraft)
markenkapazität₁ = ω
- s_2 : Verfügbar(arbeitskraft)
markenkapazität₂ = ω
- s_3 : Zugeordnet(arbeitskraft)
markenkapazität₃ = ω
- s_4 : Unterwegs(arbeitskraft)
markenkapazität₄ = ω
- s_5 : Einsetzbar(arbeitskraft)
markenkapazität₅ = ω
- s_6 : Verteilzeit(arbeitskraft)
markenkapazität₆ = ω
- s_7 : Eingesetzt(arbeitskraft)
markenkapazität₇ = ω

Transitionen/Transaktionen:

- t_1 : arbeitsende
- $\langle m_{AK.alt} \rangle =$ verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))
- $\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
- $(Time - Emtzeitpunkt_alt) \geq Vfbdauer_alt$
Vfbdauer_neu := 0
Emtzeitpunkt_neu := Time
- $\langle m_{AK.neu} \rangle =$ nicht_verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

t_2 : arbeitsbeginn

$\langle m_{AK,alt} \rangle =$ nicht_verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))

$\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

for_schichtplan \Leftrightarrow ...

40)

(Arbeitskraftname = "AK_1"

→ $(0 \leq \text{Time} < 420 \vee 1440 \leq \text{Time} < 1860 \vee 2880 \leq \text{Time} < 3300$
 $\vee 4320 \leq \text{Time} < 4740 \vee 5760 \leq \text{Time} < 6180 \vee 7200 \leq \text{Time} < 7620$
 $\vee 10500 \leq \text{Time} < 10920 \vee 11940 \leq \text{Time} < 12360 \vee 13380 \leq \text{Time} < 13800$
 $\vee 14820 \leq \text{Time} < 15240 \vee 16260 \leq \text{Time} < 16680)$)

∧ (Arbeitskraftname = "AK_2"

→ $(420 \leq \text{Time} < 840 \vee 1860 \leq \text{Time} < 2280 \vee 3300 \leq \text{Time} < 3720$
 $\vee 4740 \leq \text{Time} < 5160 \vee 6180 \leq \text{Time} < 6600 \vee 10080 \leq \text{Time} < 10500$
 $\vee 11520 \leq \text{Time} < 11940 \vee 12960 \leq \text{Time} < 13380$
 $\vee 14400 \leq \text{Time} < 14820 \vee 15840 \leq \text{Time} < 16260$
 $\vee 17280 \leq \text{Time} < 17700)$)

∧ (Arbeitskraftname = "AK_3"

→ $(0 \leq \text{Time} < 420 \vee 1440 \leq \text{Time} < 1860 \vee 2880 \leq \text{Time} < 3300$
 $\vee 4320 \leq \text{Time} < 4740 \vee 5760 \leq \text{Time} < 6180 \vee 7200 \leq \text{Time} < 7620$
 $\vee 10500 \leq \text{Time} < 10920 \vee 11940 \leq \text{Time} < 12360$
 $\vee 13380 \leq \text{Time} < 13800 \vee 14820 \leq \text{Time} < 15240$
 $\vee 16260 \leq \text{Time} < 16680)$)

∧ (Arbeitskraftname = "AK_4"

→ $(420 \leq \text{Time} < 840 \vee 1860 \leq \text{Time} < 2280 \vee 3300 \leq \text{Time} < 3720$
 $\vee 4740 \leq \text{Time} < 5160 \vee 6180 \leq \text{Time} < 6600 \vee 10080 \leq \text{Time} < 10500$
 $\vee 11520 \leq \text{Time} < 11940 \vee 12960 \leq \text{Time} < 13380$
 $\vee 14400 \leq \text{Time} < 14820 \vee 15840 \leq \text{Time} < 16260$
 $\vee 17280 \leq \text{Time} < 17700)$)

∧ (Arbeitskraftname = "AK_5"

→ $(420 \leq \text{Time} < 840 \vee 1860 \leq \text{Time} < 2280 \vee 3300 \leq \text{Time} < 3720$
 $\vee 4740 \leq \text{Time} < 5160 \vee 6180 \leq \text{Time} < 6600 \vee 10080 \leq \text{Time} < 10500$
 $\vee 11520 \leq \text{Time} < 11940 \vee 12960 \leq \text{Time} < 13380$
 $\vee 14400 \leq \text{Time} < 14820 \vee 15840 \leq \text{Time} < 16260$
 $\vee 17280 \leq \text{Time} < 17700)$)

∧ (Arbeitskraftname = "AK_6"

→ $(0 \leq \text{Time} < 420 \vee 1440 \leq \text{Time} < 1860 \vee 2880 \leq \text{Time} < 3300$
 $\vee 4320 \leq \text{Time} < 4740 \vee 5760 \leq \text{Time} < 6180 \vee 7200 \leq \text{Time} < 7620$
 $\vee 10500 \leq \text{Time} < 10920 \vee 11940 \leq \text{Time} < 12360$
 $\vee 13380 \leq \text{Time} < 13800 \vee 14820 \leq \text{Time} < 15240)$

$$\vee 16260 \leq \text{Time} < 16680))$$

for_verfügbarkeit $:\Leftrightarrow$...

41)

$$((\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge (K-1) \cdot 1440 \leq \text{Time} < (K-1) \cdot 1440 + 420)$$

$$\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := (K-1) \cdot 1440 + 420 - \text{Time})$$

$$\wedge ((\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge (K-1) \cdot 1440 + 420 \leq \text{Time} < (K-1) \cdot 1440 + 840)$$

$$\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := (K-1) \cdot 1440 + 840 - \text{Time})$$

$$\wedge ((\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge (K-1) \cdot 1440 + 840 \leq \text{Time} < (K-1) \cdot 1440 + 1440)$$

$$\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := (K-1) \cdot 1440 + 1440 - \text{Time})$$

Letzter_zeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{AK_neu} \rangle =$ verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

t₃: zuordnung

$\langle m_{AK_alt} \rangle =$ verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
qualifikation(Qualifikationsliste),Arbeitskraftzuordnung_alt,
verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))

$\langle m_{I2_alt} \rangle =$ zuordnungserfordernis(informationsmarke_bb(Bearbeitungsstationsname,
Zuordnungsstatus_alt)

$\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Arbeitskraftzuordnung_alt = zuordnung_akbs_ka()

Zuordnungsstatus_alt = bedienung_erforderlich

element(Bearbeitungsstationsname,Qualifikationsliste)

Zuordnungsstatus_neu := arbeitskraft_zugeordnet

Arbeitskraftzuordnung_neu := zuordnung_akbs(Bearbeitungsstationsname)

Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)

Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{I2_neu} \rangle =$ zuordnungserfordernis(informationsmarke_bb(Bearbeitungsstationsname,
Zuordnungsstatus_neu))

$\langle m_{AK_neu} \rangle =$ zugeordnet(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
qualifikation(Qualifikationsliste),Arbeitskraftzuordnung_neu,
verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

t₄: einsatzende_verfügbarkeitsablauf

$\langle m_{AK_alt} \rangle =$ eingesetzt(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung_alt,
verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))

$\langle m_{I3} \rangle =$ bemannte_bearbeitungsstationen(informationsmarke_ae(Arbeitskraftname,
Bearbeitungsstationsname))

```

<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
(Time - Emtzeitpunkt_alt) ≥ Vfbdauer_alt
Arbeitskraftzuordnung_alt = zuordnung_akbs(Bearbeitungsstationsname),
Arbeitskraftzuordnung_neu := zuordnung_akbs_ka()
Vfbdauer_neu := 0
Emtzeitpunkt_neu := Time

<mAK,neu> = nicht_verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
    Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung_neu,
    verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

```

t₅: einsatzende_kein_bedienungsbedarf

```

<mAK,alt> = eingesetzt(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
    Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung_alt,
    verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))
<mI3> = bemannte_bearbeitungsstationen(informationsmarke_ae(Arbeitskraftname,
    Bearbeitungsstationsname))
<mI2> = zuordnungserfordernis(informationsmarke_bb(Bearbeitungsstationsname,
    Zuordnungsstatus))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
Zuordnungsstatus = bedienung_überflüssig
Arbeitskraftzuordnung_neu := zuordnung_akbs_ka()
Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
Emtzeitpunkt_neu := Time

<mAK,neu> = verfügbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
    Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung_neu,
    verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

```

t₆: aufbruch

```

<mAK> = zugeordnet(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
    Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
    Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

!systemmeldung!: Aufbruch zur Bearbeitungsstation

<mAK> = unterwegs(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
    Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
    Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

```

t₇: ankunft

$\langle m_{AK} \rangle \approx$ unterwegs(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,zuordnung_akbs(Bearbeitungsstationsname),
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

!systemmeldung!: Ankunft an der Bearbeitungsstation

$\langle m_{AK} \rangle \approx$ einsetzbar(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,zuordnung_akbs(Bearbeitungsstationsname),
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

$\langle m_{I3} \rangle \approx$ bemannte_bearbeitungsstationen(informationsmarke_ae(Arbeits-
kraftname,Bearbeitungsstationsname))

t₈: verteilzeitbeginn

$\langle m_{AK,alt} \rangle \approx$ eingesetzt(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

!systemmeldung!: Beginn einer Verteilzeit

$\langle m_{AK,neu} \rangle \approx$ verteilzeit(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

t₉: verteilzeitende

$\langle m_{AK,alt} \rangle \approx$ verteilzeit(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

!systemmeldung!: Ende einer Verteilzeit

$\langle m_{AK,neu} \rangle \approx$ eingesetzt(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

t₁₀: einsatzbeginn

$\langle m_{AK} \rangle \approx$ zugeordnet(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

!systemmeldung!: Beginn des Arbeitskrafteinsatzes

$\langle m_{AK} \rangle \approx$ unterwegs(arbeitskraftmarke(Arbeitskraftname,
Bedienungsqualifikation,Arbeitskraftzuordnung,
Verfügbarkeitsdauer,Letzter_zeitpunkt))

Fakten:

- $\langle m_{AK.1} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfuegbar}(\text{arbeitskraftmarke}("AK_1", \text{qualifikation}(["BS_1", "BS_2", "BS_4"]), \text{zuordnung_akbs_ka}(), \text{verfuegbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$
- $\langle m_{AK.2} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfuegbar}(\text{arbeitskraftmarke}("AK_2", \text{qualifikation}(["BS_1", "BS_3", "BS_4"]), \text{zuordnung_akbs_ka}(), \text{verfuegbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$
- $\langle m_{AK.3} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfuegbar}(\text{arbeitskraftmarke}("AK_3", \text{qualifikation}(["BS_3", "BS_4"]), \text{zuordnung_akbs_ka}(), \text{verfuegbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$
- $\langle m_{AK.4} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfuegbar}(\text{arbeitskraftmarke}("AK_4", \text{qualifikation}(["BS_1", "BS_2", "BS_3", "BS_4"]), \text{zuordnung_akbs_ka}(), \text{verfuegbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$
- $\langle m_{AK.5} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfuegbar}(\text{arbeitskraftmarke}("AK_5", \text{qualifikation}(["BS_2", "BS_3"]), \text{zuordnung_akbs_ka}(), \text{verfuegbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$
- $\langle m_{AK.6} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfuegbar}(\text{arbeitskraftmarke}("AK_6", \text{qualifikation}(["BS_1", "BS_2", "BS_3", "BS_4"]), \text{zuordnung_akbs_ka}(), \text{verfuegbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$

Das bisher konstruierte Netzmodul für die Repräsentation von Arbeitskräften deckt strenggenommen die Prozeßkoordinierung im Produktionssystem noch nicht vollständig ab. Denn es werden zwei Sonderfälle nicht hinreichend berücksichtigt. Erstens handelt es sich um Arbeitskräfte, die zwar einer Bearbeitungsstation schon zugeordnet sind, deren Einsatz an der Station aber noch nicht begonnen hat. Sie werden durch Markenkopien dargestellt, die sich auf den Stellen s_3 , s_4 oder s_5 befinden. Zweitens sind Arbeitskräfte betroffen, die an einer Bearbeitungsstation eingesetzt sind, dort aber in der aktuellen Produktionssituation eine Verteilzeit verbringen. Ihnen entsprechen Kopien der Arbeitskraftmarke, die auf der Stelle s_6 ruhen. In beiden Fällen ist es nicht möglich zu erfassen, daß der Einsatz dieser Arbeitskräfte endet, weil kein Bedarf an der betroffenen Bearbeitungsstation mehr besteht oder weil die Verfügbarkeit der Arbeitskräfte abgelaufen ist. Diese Modellierungslücke läßt sich jedoch durch eine einfache Netzerweiterung schließen. Zu diesem Zweck reicht es aus, die beiden Transitionen t_4 und t_5 für das ablauf- bzw. bedarfsbedingte Ende des Arbeitseinsatzes jeweils zu vervielfachen. Jedes der vier zusätzlichen Exemplare der Transition t_4 wird mit je einer von den vier vorgenannten Stellen verknüpft. Gleiches gilt für die vier zusätzlichen Exemplare der Transition t_5 . Abb. 163 auf der nächsten Seite zeigt die Netzgraphik des resultierenden, nunmehr vollständigen Arbeitskräftenetzes. Ihre Beschriftung wurde auf die Angabe der Stellen- und Transitionsnamen reduziert, um eine transparente Darstellung zu ermöglichen⁴²⁾. Auf die zugehörige Netzlegende wurde verzichtet, da sie gegenüber der oben spezifizierten keine neuartigen Einsichten vermittelt⁴³⁾.

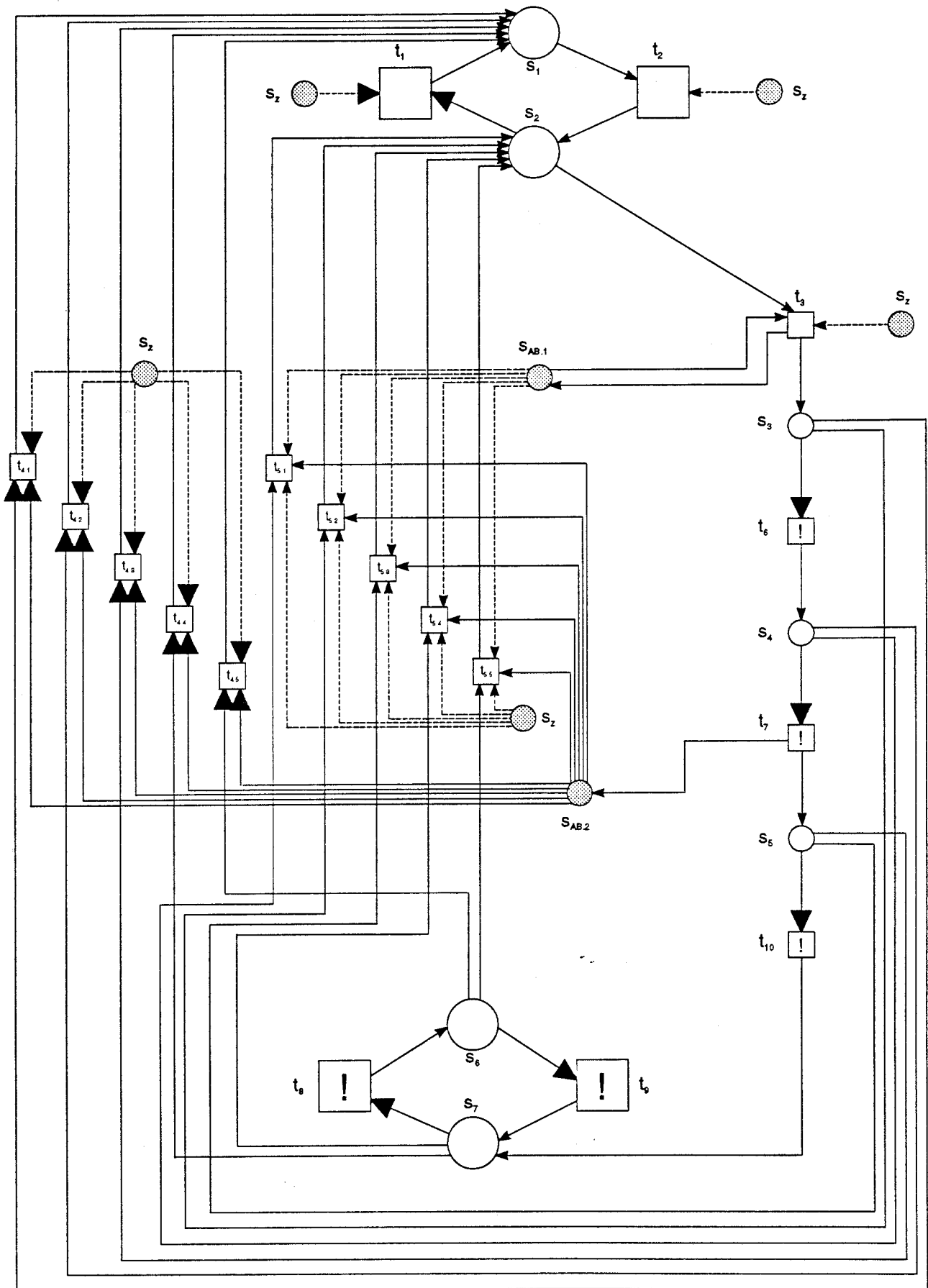


Abb. 163: Vervollständigte Netzgraphik für den Einsatz von Arbeitskräften

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Das Attribut "ausführend" kann fortan vernachlässigt werden, da ausschließlich ausführende Arbeitskräfte Berücksichtigung finden. Hinsichtlich der inhaltlichen Reichweite und Problematik der Modellierung von ausführenden Arbeitskräften wird auf die Erläuterungen verwiesen, die schon bei der einleitenden Rahmenlegung erfolgten.
- 2) Daher wird das Netz(modul) als Arbeitskräftenetz angesprochen.
- 3) Arbeitskosten werden in der Fallstudie grundsätzlich nicht berücksichtigt. Sie werden als Gemeinkosten betrachtet, die für Entscheidungen über die kurzfristige Koordinierung von Produktionsprozessen keine Relevanz besitzen.
- 4) Infolgedessen wird keineswegs der Anspruch erhoben, eine "vollständige" oder "ausgewogene" Modellierung von Arbeitskräften vorzulegen. Aber es bestehen keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, das Netzmodul für die Arbeitskräfte so zu verfeinern, daß es auch anderen als Koordinierungszwecken dienen kann. Beispielsweise läßt sich vorstellen, die Arbeitskraftmarke durch Attribute für die tatsächlich geleisteten Arbeitszeiten und die dabei erfüllten Arbeitsaufgaben zu erweitern. Dann wäre es möglich, im Netzmodul Informationen über die Beiträge einzelner Arbeitskräfte bei der Ausführung von Produktionsprozessen zu sammeln. Diese Informationen könnten an ein Personalinformations- oder ein Kostenrechnungssystem weitergereicht werden. Solche Erweiterungsmöglichkeiten werden aber in der Fallstudie nicht weiter vertieft.
- 5) Falls mehrere Arbeitskräfte zufällig denselben Namen tragen, ist durch differenzierende Namenszusätze sicherzustellen, daß tatsächlich ein identifizierender Arbeitskraftname vorliegt. Diese Maßnahme ist erforderlich, damit jede Markenkopie stets derselben Arbeitskraft zugeordnet wird. Zwar würde sich eine Verletzung dieser Anforderung angesichts der Einfachheit der hier vorgelegten Fallstudie auf die Koordinierung von Produktionsprozessen nicht auswirken. Doch führte sie zu erheblichen Konsequenzen, falls das Arbeitskräftenetz als Schnittstelle zu einem Personalinformationssystem genutzt würde.
- 6) Die abstrakten Namen sind so gestaltet, daß sie von vornherein identifizierenden Charakter besitzen. Sie können durch beliebige konkrete Namen ersetzt werden, sofern die Hinweise der voranstehenden Anmerkung beachtet werden.
- 7) Es handelt sich um die Istqualifikation der Arbeitskraft. Sie steht der Sollqualifikation gegenüber, die zur Bedienung einer Bearbeitungsstation erforderlich ist.
- 8) Es werden dabei Listen im Sinne der Programmiersprache PROLOG vorausgesetzt.
- 9) In dieser Arbeit interessiert nicht, welche Qualifikationsmerkmale ein Koordinierungsträger im einzelnen für wichtig hält. Daher werden sie nicht näher konkretisiert, sondern nur als abstrakte Attribute der Art "Merkmal" behandelt.
- 10) Der Abgleich der Qualifikationsattribute von Arbeitskräften und Bearbeitungsstationen, auf den in Kürze näher eingegangen wird, bereitet dennoch keine grundsätzlichen Schwierigkeiten. Denn die Programmiersprache PROLOG, die für die Ausformulierung der Listen vorausgesetzt wurde, ermöglicht festzustellen, ob die Merkmalsausprägungen einer qualifikationsbeschreibenden Liste in den Merkmalsausprägungen einer anderen qualifikationsbeschreibenden Liste enthalten sind.
- 11) Die Merkmalsliste des Qualifikationsattributs umfaßt dann genau eine Komponente. Es handelt sich um das eine Qualifikationsmerkmal, dessen Ausprägung die betroffene Bearbeitungsstation eindeutig identifiziert. Dabei kann es sich z.B. um den Namen der Bearbeitungsstation handeln.
- 12) Unter Mehrmaschinenbedienung wird hier die Fähigkeit von Arbeitskräften verstanden, unterschiedliche Maschinenarten zu bedienen. Vgl. zu Konzept und Anwendung der Mehrmaschinenbedienung ENDELL (1987), S. 212; ARNING (1987), S. 15. Die Mehrmaschinenbedienung kann gerade in Flexiblen Fertigungssystemen besondere Bedeutung erlangen. Beispielsweise wird sie im Kontext flexibler Automatisierung hervorgehoben von BÜHNER (1986c), S. 18; ENDELL (1987), S. 212; ARNING (1987), S. 81 (ohne explizite Nennung der Mehrmaschinenbedienung) u. 100 (als "Mehrstellenarbeit"); BÖTZOW (1988a), S. 118 sowie - indirekt - S. 142f.
- 13) Die Merkmalsliste des Qualifikationsattributs umfaßt dann im allgemeinen mehrere Komponenten. Sie spezifizieren in ihrer Gesamtheit diejenige Menge von Bearbeitungsstationen, welche die Arbeitskraft zu bedienen vermag. Beispielsweise können die Namen der betroffenen Bearbeitungsstationen "aufgelistet" werden. Ebenso ist es möglich, eine Menge von Qualifikationsmerkmalen anzugeben, die in ihrer Kombination die vorgenannten Bearbeitungsstationen eindeutig identifizieren. (Ein Sonderfall liegt vor, wenn dazu genau ein Qualifikationsmerkmal ausreicht.)
Neben der Fähigkeit zur Mehrmaschinenbedienung, die hier exemplarisch herausgestellt wurde, eignet sich die Merkmalsliste des Qualifikationsattributs generell dazu, um Mehrfachqualifikationen von Arbeitskräften zu repräsentieren. Auf diese Weise ist es möglich, ein breites Qualifikationsspektrum für heterogen qualifizierte Arbeitskräfte abzudecken. Ein solches Qualifikationsspektrum wird für Arbeitskräfte in Flexiblen Fertigungssystemen des

öfteren vorausgesetzt oder angeboten. Vgl. zur erheblichen Bedeutung, die der Mehrfachqualifikation von Arbeitskräften bei Flexiblen Fertigungssystemen zugemessen wird, FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMTECHNIK (1982), S. 436 ("Universalqualifikationen"); HARTLEY (1984), S. 265. Vgl. ebenso die Organisationsform Flexibler Fertigungssysteme vom "Typ B", die von FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMTECHNIK (1982), S. 29ff. u. 316ff.; BÜHNER (1986c), S. 15ff., beschrieben wird. Sie betont die Qualifikationsvielfalt von Arbeitskräften. Weitere Auflistungen des breiten Qualifikationsspektrums, das Arbeitskräfte in Flexiblen Fertigungssystemen erfüllen sollen, finden sich auch bei FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMTECHNIK (1982), S. 324ff.; BÜHNER (1986c), S. 25f., 44, 48 u. 58f.; ARNING (1987), S. 48f., 78ff. u. 98ff. Vgl. auch BÜHNER (1986c), S. 47, und ARNING (1987), S. 81 (i.V.m. S. 79) u. 100. Sie fordern, daß Arbeitskräfte innerhalb einer Fertigungsinsel in der Lage sein sollen, alle dort anfallenden Arbeitsaufgaben zu erfüllen. Dies setzt implizit eine entsprechende Mehrfachqualifikation voraus. Ähnlich äußern sich BÜHNER (1987), S. 263; WILDEMANN (1987a), S. 38; ENDELL (1987), S. 211. Allgemeine, nicht speziell auf Flexible Fertigungssysteme bezogene Ausführungen zur Erfassung von Mehrfachqualifikationen bietet BORMANN (1978), S. 193f. u. 196ff.

14) Die Bedienung von Lagerstationen durch Arbeitskräfte findet in der Fallstudie keine Berücksichtigung. Statt dessen wird ein vollautomatischer Lagerbetrieb unterstellt. Es würde aber keine Schwierigkeiten bereiten, die Bedienung von Lagerstationen analog zu den von Bearbeitungsstationen zu modellieren. Dadurch sind aber keine neuartigen Erkenntnisse zu erwarten. Daher wird auf diesen Aspekt nicht weiter eingegangen.

15) In der Fallstudie wird stets davon ausgegangen, daß an jeder Bearbeitungsstation eine Arbeitskraft ausreicht. Es wird daher von allen Komplizierungen abgesehen, die daraus resultieren, daß für die Bedienung einer Bearbeitungsstation zugleich mehrere Arbeitskräfte erforderlich sind.

16) Die Namen der Bearbeitungsstationen besitzen den Charakter von "Sollqualifikationen". Dies folgt unmittelbar aus der oben vorgenommenen Spezifizierung der Istqualifikation einer Arbeitskraft durch die Namen aller Bearbeitungsstationen, die sie tatsächlich zu bedienen vermag.

17) Ihre Kopien werden durch den Ausdruck " m_{12} " notiert. Die Kopien der Informationsmarke "bedienungsbedarf" werden über zwei Schnittstellen $s_{AB,1}$ und $s_{AB,2}$ mit den Netzmodulen der Bearbeitungsstationen ausgetauscht. Da in der Fallstudie insgesamt vier Bearbeitungsstationen berücksichtigt werden, können höchstens vier Kopien zugleich auf den Schnittstellen ankommen, um über einen Bedienungsbedarf zu informieren. Daher wird den beiden Schnittstellen die Markenkapazität von jeweils vier Markenkopien zugewiesen.

18) Falls eine Arbeitskraft keiner Bearbeitungsstation zugeordnet ist, nimmt das Attribut die neutrale Ausprägung "nil" an.

19) Diese Informationsmarke wird durch die Sorte "arbeitskräfteeinsatz" definiert. Ihre Kopien lassen sich durch den Ausdruck " m_{13} " wiedergeben. Sie werden abermals über zwei Schnittstellen ($s_{AB,3}$ und $s_{AB,4}$) mit den Netzmodulen der Bearbeitungsstationen ausgetauscht. Den Schnittstellen wird wiederum die Markenkapazität von vier Markenkopien zugeordnet.

20) Es wird hier ein weit gefaßter Verteilzeitbegriff zugrundegelegt. Er umfaßt neben der Verteilzeit im engeren Sinn, die z.B. bei der Planung von Vorgabezeiten eine Rolle spielt, ebenso die Erholungszeit der Arbeitskraft. Vgl. zu Verteil- und Erholungszeiten KERN, W. (1990a), S. 293f.

21) Es wird unterstellt, daß die Einsatzstörung einer Arbeitskraft nicht so schwer wiegt, daß sie eine Störung derjenigen Bearbeitungsstation nach sich zieht, an der die Arbeitskraft tätig ist. Andernfalls müßte eine zusätzliche Schnittstelle eingerichtet werden, die das hier betrachtete Netzmodul für Arbeitskräfte mit dem später präsentierten Netzmodul für eine Bearbeitungsstation verknüpft. Dann wäre es möglich, daß die Störung des Arbeitskräfteeinsatzes während einer Verteilzeit vom Arbeitskräftenetz auf das Netz der jeweils zugeordneten Bearbeitungsstation durchschlägt. Von dieser Komplizierung wird hier aber abgesehen.

22) Bei kollektiven Arbeitszeitregelungen nimmt dieser "persönliche" Verfügbarkeitskalender für alle Arbeitskräfte die gleiche Gestalt an. Bei Arbeitszeitindividualisierung kann der Verfügbarkeitskalender von Arbeitskraft zu Arbeitskraft variieren.

23) Vgl. dazu die Erläuterungen von Verfügbarkeitskalendern.

24) Dies schließt nicht aus, daß bei unvorhergesehenen Ausfällen einer Arbeitskraft - z.B. infolge plötzlicher Erkrankungen - deren Verfügbarkeitskalender nachträglich korrigiert wird.

25) Vgl. zur Zeiterfassung in PPS-Systemen, bei der zwischen Arbeitstagen und arbeitsfreien Tagen differenziert wird, JAHN (1988), S. 454. Als arbeitsfreie Tage kommen vor allem Sonn-, Feier- und Ferientage in Betracht.

26) Starre Arbeitszeitregelungen bedeuten dagegen, daß die Zeiträume der voraussichtlichen Verfügbarkeit einer Arbeitskraft für alle Arbeitstage gleich ausfallen.

27) Vgl. zu solchen Schichtplänen KERN, W. (1990a), S. 191; HOFF, A. (1991), S. 413 u. 423.

- 28) Die Arbeitszeitregelung ist dem Beispiel von KERN, W. (1990a), S. 191, entnommen.
- 29) Auf eine dritte, aber unbemannte Schicht wird später eingegangen. Da sie keine ausführenden Arbeitskräfte für die Bedienung von Bearbeitungsstationen vorsieht, spielt sie bei der Modellierung des Netzmoduls für ausführende Arbeitskräfte keine Rolle.
- 30) Die Darstellungsweise des Schichtplans lehnt sich eng an KERN, W. (1990a), S. 191, Abb. 66, an.
- 31) Die sechs Arbeitskräfte werden im Schichtplan durch ihre Namen "AK_1", "AK_2", "AK_3", "AK_4", "AK_5" und "AK_6" identifiziert.
- 32) Je nach der Länge und Lage des Koordinierungsintervalls, in dem ein Auftragspaket abgewickelt werden soll, kann dieser Schichtplan durch Iteration seines Verteilungsmusters beliebig verlängert werden. Ebenso ist es möglich, den ursprünglichen oder den verlängerten Schichtplan auf genau jenen Ausschnitt einzuengen, der dem vorgegebenen Koordinierungsintervall entspricht. In der Fallstudie wird jedoch kein bestimmtes Koordinierungsintervall fixiert. Daher brauchen die vorgenannten Modifizierungen nicht vorgenommen zu werden.
- 33) Eine Komplizierung ergibt sich aus der Diskrepanz der Zeitskalen, die einerseits dem Schichtplan und andererseits der Systemuhr des Produktionssystems zugrundeliegen. Denn der Schichtplan wurde in den drei zeitlichen Dimensionen von Arbeitsstunden, -tagen und -wochen entworfen. Für die Systemuhr wurde dagegen eine eindimensionale und ganzzahlige Zeitskala vorausgesetzt. Dabei wurden für die Systemuhr weder die Art ihrer Zeiteinheit noch ihr Nullpunkt festgelegt. Daher läßt sich der Zeitpunkt, in dem ein Zustand des Produktionssystems im Rahmen seiner Systemzeit betrachtet wird, zunächst nicht auf der Zeitskala des Schichtplans lokalisieren. Um diesen Lokalisierungsproblem zu heilen, werden zwei "pragmatische" Vereinbarungen getroffen: Der Nullpunkt der Systemzeit, in dem die Systemzeitvariable "Time" mit dem Wert "0" initialisiert wird, fällt mit dem Beginn der Frühschicht der ersten Woche um 5.00 Uhr zusammen. Als Zeiteinheit der Systemuhr wird die Minute gewählt. Die entsprechenden Umrechnungen zwischen Systemzeit und Zeitintervallen des Schichtplans finden sich in der Schaltvorschrift der Transition des Arbeitsbeginns.
- Die voranstehend skizzierte Komplizierung läßt sich von vornherein vermeiden, wenn die Systemuhr nicht so simpel gestaltet wird, wie es für die hier präsentierte Fallstudie geschah. Statt dessen wäre auf die alternative Systemuhr zurückzugreifen, die an früherer Stelle für Zeitnetze konstruiert wurde. Sie basiert auf der Signatur TERMIN und der zugehörigen TERMIN-Algebra, die bereits in einer früheren Anmerkung vorgestellt wurde. Diese komplexe Systemuhr ist in der Lage, die Systemzeit in den gleichen Dimensionen wie der Schichtplan auszudrücken. Darüber hinaus besitzen die Zeitangaben dieser Systemuhr aufgrund ihrer Datumskomponente einen wohldefinierten Nullpunkt. Daher läßt sich jeder Zeitpunkt, der von auf der komplexen Systemuhr generiert wurde, sofort im Schichtplan lokalisieren. Auf diese Vereinfachung wurde jedoch in der Fallstudie verzichtet. Denn die Modellierung der komplexen Systemuhr hätte erheblich größeren Aufwand bereitet, als er hier anfällt, um die oben erwähnten Umrechnungen in der Schaltvorschrift für die Transition des Arbeitsbeginns durchzuführen. Darüber hinaus hätte die komplexe Systemuhr in allen anderen Netzmodulen wesentlich aufwendigere Konstruktionen für die Berücksichtigung temporaler Aspekte erfordert.
- 34) Es wird an dieser Stelle die Permissivität der Schaltregel gewöhnlicher Petrinetze bewußt ausgenutzt. Dies bedeutet, daß der Arbeitsbeginn eintreten *kann*, wenn die o.a. Bedingung erfüllt ist. Die Transition des Arbeitsbeginns muß dann aber nicht unbedingt schalten. Statt dessen kann ihr Schalten auch verzögert oder sogar endgültig unterbunden werden. Auf diese Weise läßt sich berücksichtigen, daß eine Arbeitskraft, die aufgrund ihrer vereinbarten Arbeitszeiten zur Verfügung stehen sollte, tatsächlich verhindert ist. Z.B. kann sie erkrankt sein. In solchen Fällen wird die bereits aktivierte Transition des Arbeitsbeginns für die betroffene Arbeitskraft so lange nicht geschaltet, bis sie wieder tatsächlich zur Verfügung steht. Auf diese Weise wird die vereinbarungswidrige Nichtverfügbarkeit einer Arbeitskraft zwar im Arbeitskräftenetz nicht explizit repräsentiert. Aber sie ist immerhin in der dynamischen Struktur des Netzmoduls kraft seiner Schaltregel implizit enthalten.
- Anstatt die Permissivität der Schaltregel auszunutzen, könnte die vereinbarungswidrige Nichtverfügbarkeit einer Arbeitskraft im Arbeitskräftenetz auch explizit modelliert werden. Dazu wären weitere Transitionen und Stellen erforderlich. Diese Netzerweiterung wäre im Interesse einer möglichst vollständigen Explizierung aller modellierten Sachverhalte durchaus zu begrüßen. Es wird aber im Rahmen der hier präsentierten Fallstudie darauf verzichtet, um das Volumen des Arbeitskräftenetzes zu begrenzen.
- 35) Dieses Markenattribut besitzt nur eine technische Bedeutung. Es ist erforderlich, um bei jeder Neuberechnung der Verfügbarkeitsdauer festzustellen, wieviel Zeit seit ihrer letzten Ermittlung verstrichen ist.
- 36) Der Verfügbarkeitsablauf tritt ein, sobald die Differenz zwischen der aktuellen Systemzeit und der Zeitpunkt, in dem die Verfügbarkeitsdauer zuletzt ermittelt wurde, so groß wie eben jene letzte Verfügbarkeitsdauer ist.
- 37) Im Gegensatz zur Transition des Arbeitsbeginns handelt es sich hier um eine Transition, die schalten *muß*, sobald die Verfügbarkeitsdauer abgelaufen ist. Daher wird sie mit der Hilfe von Obligatkanten definiert.

Es kann der spezielle Fall eintreten, daß das Ende des Einsatzes einer Arbeitskraft an einer Bearbeitungsstation wegen Verfügbarkeitsablaufs mit dem Ende des Einsatzes derselben Arbeitskraft an derselben Bearbeitungsstation wegen mangelnden Bedienungsbedarfs exakt zusammenfallen. Dann sind die beiden Transitionen t_4 bzw. t_5 im Arbeitskräftenetz unter derselben Markierung konfliktionär aktiviert. Aber nur die Transition t_4 für den Verfügbarkeitsablauf besitzt obligatorischen Charakter. Daher wird der Schaltkonflikt stets zugunsten der letztgenannten Transition aufgelöst. Denn obligatorische Transitionen *müssen* geschaltet werden, sobald sie aktiviert sind, während alle anderen aktivierten Transitionen lediglich geschaltet werden *können*. Daher läßt sich nur die eine vorgenannte Konfliktauflösung mit der modal erweiterten Schaltregel von Synthetischen Netzen konsistent vereinbaren.

38) Um die Netzgraphik auf einer Seite wiedergeben zu können, wurde darauf verzichtet, die Transitionen mit den Restriktionsformeln aus den zugehörigen Transaktionen zu beschriften. Die gleiche Vereinbarung wird auch für spätere Netzgraphiken vorausgesetzt, ohne darauf wiederholt hinzuweisen.

39) Für die Stellen des Arbeitskräftenetzes wird - abgesehen von seiner Schnittstelle zur Systemuhr - jeweils eine unbeschränkte Markenkapazität angenommen. Da in der Fallstudie insgesamt nur sechs Arbeitskräfte berücksichtigt werden, würde zwar eine Markenkapazität von jeweils 6 Einheiten vollkommen ausreichen. Doch wird das Netzmodul für die Repräsentation von Arbeitskräften von vornherein so ausgelegt, daß es sich ebenso für jede andere - und beliebig große - Arbeitskräfteanzahl verwenden läßt.

Allerdings ließe sich einwenden, daß die Verwendung unbeschränkter Markenkapazitäten gegen die früher erhobene Finitheitsprämisse für Netze verstößt. Dies scheint jedoch nur auf den ersten Blick zuzutreffen. Denn bei einer näheren Untersuchung des Arbeitskräftenetzes zeigt sich, daß die Kopien der Arbeitskraftmarke weder erzeugt noch vernichtet werden. Daher gilt für jede Stelle des Arbeitskräftenetzes, die keine der oben erwähnten Schnittstellen darstellt: Auf der Stelle können sich unter jeder zulässigen Netzmarkierung nur höchstens so viele Kopien der Arbeitskraftmarke befinden, wie unter der Ausgangsmarkierung des Netzes eingeführt wurden. Die Ausgangsmarkierung enthält für jede Arbeitskraft genau eine Kopie der Arbeitskraftmarke. Die Arbeitskräfteanzahl ist für jedes reale Produktionssystem eine endliche Konstante. Daher muß auch die Anzahl der Kopien der Arbeitskraftmarke im Arbeitskräftenetz stets diesen einen konstanten Wert annehmen. Folglich erfüllt dieses Netz die Finitheitsprämisse trotz seiner unbeschränkten Markenkapazitäten für alle Stellen, auf denen sich Kopien der Arbeitskraftmarke befinden können.

40) Der Ermittlung der prädikatenlogischen Formel, die den Schichtplan mit den persönlichen Verfügbarkeitskalendern aller sechs Arbeitskräfte wiedergibt, liegen die Vereinbarungen zugrunde, die in einer der voranstehenden Anmerkungen erwähnt wurden. Mit dem Beginn der Frühschicht der ersten Woche als Nullpunkt und der Minute als Zeiteinheit ergibt sich folgendes Zeitraster:

Kalendertag:	1.Woche: Mo	1.Woche: Di	1.Woche: Mi	1.Woche: Do	1.Woche: Fr
Frühschicht:	0-420	1440-1860	2880-3300	4320-4740	5760-6180
Spätschicht:	420-840	1860-2280	3300-3720	4740-5160	6180-6600
Nachtschicht:	840-1440	2280-2880	3720-4320	5160-5760	6600-7200
Kalendertag:	1.Woche: Sa	1.Woche: So	2.Woche: Mo	2.Woche: Di	2.Woche: Mi
Frühschicht:	7200-7620	8640-9060	10080-10500	11520-11940	12960-13380
Spätschicht:	7620-8040	9060-9480	10500-10920	11940-12360	13380-13800
Nachtschicht:	8040-8640	9480-10080	10920-11520	12360-12960	13800-14400
Kalendertag:	2.Woche: Do	2.Woche: Fr	2.Woche: Sa	2.Woche: So	
Frühschicht:	14400-14820	15840-16260	17280-17700	18720-19140	
Spätschicht:	14820-15240	16260-16680	17700-18120	19140-19560	
Nachtschicht:	15240-15840	16680-17280	18120-18720	19560-20160	

Die Nachtschicht und der Sonntag sind nicht notwendig, um den Schichtplan prädikatenlogisch zu repräsentieren. Dennoch werden sie hier aus zwei Gründen berücksichtigt. Erstens erlauben sie eine vollständige Zeitrepräsentation über zwei Wochen hinweg, die auch die Ruhezeit des Produktionssystems umfaßt. Zweitens läßt sich später in dieses Zeitraster der unbemannte Systembetrieb während einer Nachtschicht integrieren.

41) Die drei Teilformeln der Verfügbarkeitsformel stellen sicher, daß die Verfügbarkeitsdauer einer Arbeitskraft auch dann noch korrekt bestimmt wird, wenn die Arbeitskraft erst verzögert zur Verfügung steht. Die Variable "K" gibt durch ihre Belegungen mit den Konstanten "1", "2" ... an, ob es sich um den ersten (K=1) bzw. zweiten (K=2) ... Kalendertag handelt, der seit dem Nullpunkt - dem Beginn der Frühschicht am Montagmorgen der 1. Woche - an-

gebrochen ist. Das Prädikat "integer(K)" sorgt zusammen mit der Restriktionsformel " $K \geq 1$ " dafür, daß die Variable "K" nur mit positiven Ganzzahlen belegt werden kann. Das Prädikat "integer(X)" wird von mehreren Varianten der Programmiersprache PROLOG als Standardprädikat vorgehalten. Es ist genau dann gültig, wenn die Variable "X" eine Ganzzahl darstellt. Vgl. CLOCKSIN (1990), S. 136. Die Konstruktion der o.a. Teilformeln ist erforderlich, wenn das Schalten der Transition t_2 für jeden Kalendertag definiert sein soll, ohne einen separaten Zähler für die bereits verstrichenen Kalendertage vorzusehen. Die Formelkonstruktion geht über die bisher benutzten Deklarationen der Schaltvorschriften von Transitionen insofern hinaus, als die Variable "K" nicht unmittelbar aus den Attributausprägungen von Markenkopien zusammengesetzt wird, die sich auf den Einflußstellen der Transition t_2 befinden. Die Formelkonstruktion stellt jedoch sicher, daß die Variable "K" entweder durch überhaupt keine Konstante oder aber durch genau eine Konstante belegt werden kann. Im ersten Fall ist die Transition t_2 nicht aktiviert. Im zweiten Fall wird die Transition t_2 so aktiviert, daß die Belegung der Variablen "K" in Abhängigkeit von der Ausprägung der aktuellen Systemzeit - also von der Belegung der Variablen "Time" - den angebrochenen Kalendertag wiedergibt. Daher wird die Variable "K" auf indirekte Weise auf die Ausprägung des Attributs "syszeit" zurückgeführt. Diese Attributausprägung gehört zu der Kopie der Zeitmarke, die sich unter der aktuellen Netzmarkierung auf der Einflußstelle "Systemzeit" befindet.

42) Die übrigen Kantenanschriften können ohne Schwierigkeiten der Netzgraphik aus Abb. 162 entnommen werden.

43) Die Verfünffachung der Transitionen t_4 und t_5 bedeutet keinen nennenswerten Informationszuwachs. Sie beschränkt sich darauf, die neuen Transitionsexemplare mit unterschiedlichen Ein- und Ausgangsstellen zu verknüpfen. Dies ist aus der Netzgraphik des vervollständigten Arbeitskräftenetzes unmittelbar ersichtlich.

7.2.1.2 Modellierung immobiler Objektarten

7.2.1.2.1 Modellierung von Bearbeitungsstationen

Jede Bearbeitungsstation wird durch ein eigenes Netzmodul¹⁾ repräsentiert. Die Fallstudie umfaßt drei Bearbeitungsstationen im engeren Sinn²⁾. Hinzu kommt eine Spannstation³⁾, die als Bearbeitungsstation im weiteren Sinn behandelt wird⁴⁾. Zunächst wird nur auf die drei Bearbeitungsstationen i.e.S. eingegangen⁵⁾. Ihre Netzmodule unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander⁶⁾. Daher wird nur eines von ihnen in exemplarischer Weise vorgestellt. Es handelt sich um das Netzmodul für die Bearbeitungsstation "BS_2"⁷⁾.

Das Netzmodul wird durch horizontale Netzerweiterungen schrittweise konstruiert⁸⁾. Zunächst besteht es aus einem äußerst einfachen Kernnetz. Seine Netzgraphik wird in Abb. 164 auf der nächsten Seite präsentiert. Die zugehörige Netzlegende schließt sich unmittelbar an. Bei dieser rudimentären Betrachtungsweise wird die Modellierung der Bearbeitungsstation auf ihren funktionalen Kern - die Ausführung einer Bearbeitungsoperation - reduziert. Die Ausführung der Bearbeitungsoperation wird durch das Schalten einer Starttransition t_1 mit der Anschrift "bearbeitungsbeginn" eingeleitet und durch das komplementäre Schalten einer Schlußtransition t_2 mit der Anschrift "bearbeitungsende" abgeschlossen⁹⁾. Die Schaltvorschriften für diese beiden Transitionen können im Kernnetz noch nicht festgelegt werden, weil sie von späteren Netzerweiterungen abhängen. Solange ein Werkstück auf der Station bearbeitet wird, ruht die werkstückdarstellende Markenkopie auf der Stelle "Bearbeitungsausführung" zwischen der Start- und der Schlußtransition. Das Kernnetz wird begrenzt durch seine Schnittstellen $s_{TE.B2}$ und $s_{TA.B2}$. Sie repräsentieren den Ein- bzw. den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation "BS_2"¹⁰⁾. Hierdurch wird das stationsspezifische Netzmodul in das bereits modellierte Transportnetz eingebettet¹¹⁾.

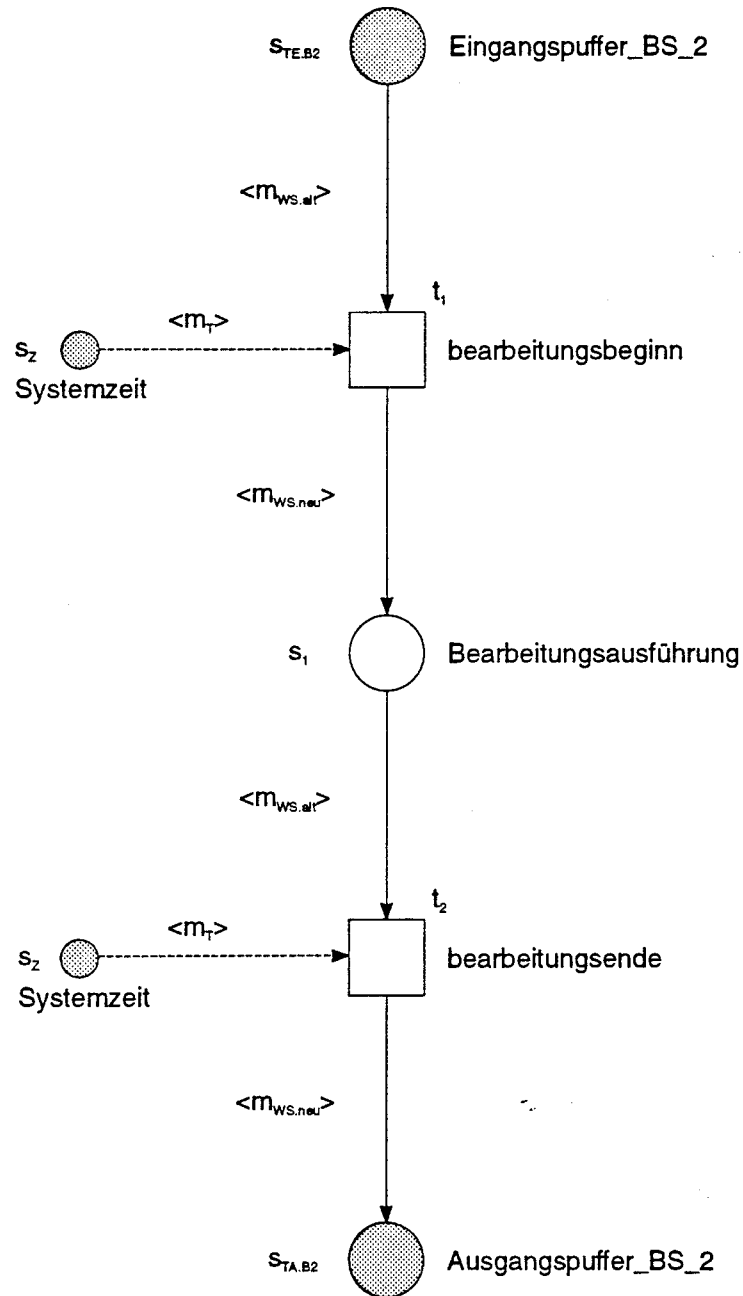


Abb. 164: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: Kernnetz

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zeitpunkt:	INTEGER		
zeitdauer:	INTEGER		
kosten:	REAL		
kapitalbindungsbetrag:	REAL		
werkstückname:	STRING		
	"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5", "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10", "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15", "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20", "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25", "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30", "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35", "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40", "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45", "nil"	→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	12)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	13)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	14)

```

werkstücklagername:          STRING
    "LS_1":                   → OBwerkstücklagername

werkstückzugehörigkeit =     Zuordnung_wspa(auftragsname);
                              Zuordnung_wspa_ka()

werkstückzuordnung =        Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
                              Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                              Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn =   Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                              Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende =    Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                              Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                              Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                              Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer =   Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer =       Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer =       Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit =    Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten =           Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                                      werkstück_bearbeitungsbeginn
                                      werkstück_bearbeitungsdauer
                                      werkstück_transportdauer
                                      werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                                      werkstück_durchlaufzeit
                                      werkstück_bearbeitungsende
                                      werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt =         Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

werkstückkapitalbindung =    Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)

werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)

werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)

werkstück_transportkosten =  Transport_ws(kosten)

werkstück_lagerkosten =      Lagerung_ws(kosten)

werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)

```

werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)
 werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
 werkstück_bearbeitungskosten
 werkstück_transportkosten
 werkstück_lagerkosten
 werkstück_kapitalbindungskosten
 werkstück_herstellkosten)
 <m_T> = syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
 <m_{WS}> = werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
 bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
 werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
 werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

s_{TE.B2}: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
 markenkapazität_{TE.B2} = 10 15)
 s₁: Bearbeitungsausführung(werkstück)
 markenkapazität₁ = 1
 s_{TA.B2}: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
 markenkapazität_{TE.B2} = 5 16)
 s_Z: Systemzeit(syszeit)
 markenkapazität_Z = 1

Transitionen/Transaktionen:

t₁: bearbeitungsbeginn
 <m_{WS.alt}> = eingangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
 Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten_alt,
 Werkstückkapitalbindung_alt,Werkstückkosten_alt))
 <m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
 <m_{WS.neu}> = bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
 Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten_neu,
 Werkstückkapitalbindung_neu,Werkstückkosten_neu))

t_2 : bearbeitungsende

$\langle m_{WS,alt} \rangle \approx \text{bearbeitungsausführung}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_alt}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{Werkstückzeiten_alt}, \text{Werkstückkapitalbindung_alt}, \text{Werkstückkosten_alt}))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$\langle m_{WS,neu} \rangle \approx \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{Werkstückzeiten_neu}, \text{Werkstückkapitalbindung_neu}, \text{Werkstückkosten_neu}))$

Fakten: ---

Die erste Erweiterung des Kernnetzes widmet sich der differenzierten Modellierung derjenigen Zustände, die eine Bearbeitungsstation im Zeitablauf einzunehmen vermag. Der aktuelle Zustand der Bearbeitungsstation läßt sich - analog zur früheren Zustandsbeschreibung von Transportmitteln - durch folgende zustandsbeschreibende Attributausprägungen charakterisieren¹⁷⁾:

- nicht-verfügbar: Die Station steht aufgrund ihres Verfügbarkeitskalenders für produktive Nutzungen nicht zur Verfügung (z.B. Maschineninstandsetzung, -test, -stilllegung).
- verfügbar: Die Station steht aufgrund ihres Verfügbarkeitskalenders für produktive Nutzungen planmäßig zur Verfügung.
- betriebsbereit: Die verfügbare Station kann grundsätzlich durch Ausführen von Bearbeitungsoperationen produktiv genutzt werden.
- gestört: Die verfügbare Station hat aufgrund einer Betriebsstörung ihre Betriebsbereitschaft eingebüßt.
- wartend: Im zentralen Arbeitsbereich¹⁸⁾ der betriebsbereiten Station befindet sich kein Werkstück. Es ist auch kein auszuführender Arbeitsgang eingelastet. Die Bearbeitungskapazität der Station wird nicht ausgenutzt.
- belastet: An der betriebsbereiten Station ist genau ein Arbeitsgang zur Ausführung eingelastet. Das Werkstück¹⁹⁾, das durch die Arbeitsgangausführung bearbeitet werden soll, kann sich schon im zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation befinden, muß es aber nicht. Auf jeden Fall ist dieser Arbeitsbereich für andere Arbeitsgänge gesperrt, sobald ein Arbeitsgang eingelastet ist²⁰⁾.
- gerüstet: An der betriebsbereiten Station ist genau ein Arbeitsgang eingelastet worden. Alle Rüstoperationen, mit denen die Bearbeitungsstation auf die Arbeitsgangausführung vorbereitet werden muß, sind erfolgt. Das Werkstück, das durch die Arbeitsgangausführung bearbeitet werden soll, befindet sich im zentralen Arbeitsbereich der Station.
- operativ: An der betriebsbereiten Station erfolgt die Ausführung desjenigen Arbeitsgangs, der an der Station zuletzt eingelastet wurde. Dabei wird das Werkstück bearbeitet, das sich im zentralen Arbeitsbereich befindet.
- blockiert: Die Ausführung desjenigen Arbeitsgangs, der an der betriebsbereiten Station zuletzt eingelastet wurde, ist zwar abgeschlossen. Aber das bearbeitete Werkstück befindet sich noch im zentralen Arbeitsbereich der Station²¹⁾.

- belegt: Die betriebsbereite Station besitzt in ihrem Eingangspuffer für Werkstücke keinen freien Lagerplatz. Jeder Lagerplatz wird entweder durch ein dort vorhandenes Werkstück real in Anspruch genommen. Oder der Lagerplatz ist für ein Werkstück reserviert worden, das der Station bereits zugeordnet ist, sich aber noch auf dem Transport befindet.
- frei: Die betriebsbereite Station besitzt in ihrem Eingangspuffer für Werkstücke mindestens einen freien Lagerplatz, der weder von einem Werkstück eingenommen noch für ein Werkstück reserviert ist²²).
- (zuordnungs-)geeignet: Die Station ist betriebsbereit und frei. Ihr kann ein neuer Arbeitsgang zugeordnet werden.
- (zuordnungs-)ungeeignet: Die Station steht entweder nicht zur Verfügung. Oder sie ist verfügbar, aber gestört. Oder sie ist zwar betriebsbereit, aber belegt. In allen drei Fällen eignet sich die Bearbeitungsstation nicht für die Zuordnung eines neuen Arbeitsgangs.

Abb. 165 auf der nächsten Seite veranschaulicht den sachlichen Zusammenhang zwischen den zustandsbeschreibenden Attributausprägungen durch einen erweiterten Zustandsgraphen²³). Es handelt sich - wie schon bei den Transportmitteln - um eine multidimensionale Zustandsbeschreibung.

Es werden vier²⁴) Attributmarken eingeführt. Sie beschreiben den aktuellen Zustand einer Bearbeitungsstation mit Hilfe der zuvor eingeführten Attributausprägungen²⁵). Die vier Marken beleuchten die Nutzungsmöglichkeit der Bearbeitungsstation, ihre tatsächliche Nutzung, ihre Pufferbelegung und ihre Zuordnungseignung.

Zunächst wird nur die Potentialmarke berücksichtigt. Sie ermöglicht, die Nutzungsmöglichkeiten der Bearbeitungsstation differenzierter darzustellen. Ihre beiden Attribute zeigen an, wie lang die Verfügbarkeit der Bearbeitungsstation andauern wird und wann diese Dauer das letzte Mal ermittelt wurde²⁶). Dadurch wird ein Verfügbarkeitskalender eingebunden, der analog zu den Verfügbarkeitskalendern der Arbeitskräfte strukturiert ist²⁷). Er legt fest, in welchen Zeitintervallen sich die Bearbeitungsstation tatsächlich nutzen läßt. Es wird unterstellt, daß jede Bearbeitungsstation während der Früh- und Spätschichten der Arbeitskräfte zur Verfügung steht. Hinzu kommt eine Nachtschicht²⁸), in der die drei Bearbeitungsstationen i.e.S. unbemannt betrieben werden können²⁹). Die Nachtschicht wird aber nur für die Wochentage Montag bis Freitag angesetzt. Daher herrscht nach dem Ende der Frühschicht am Samstag Betriebsruhe bis zum Beginn der Frühschicht am Montag. Bei Wiederaufnahme der Betriebstätigkeit am Montagmorgen wird geprüft, ob die nunmehr verfügbare Bearbeitungsstation entweder betriebsbereit oder aber gestört³⁰) ist³¹). Die Ausführung von Bearbeitungsoperationen kann auf der Bearbeitungsstation nur dann begonnen oder abgeschlossen werden, solange die Station (verfügbar und) betriebsbereit ist. Sobald eine Systemmeldung eintrifft, daß im Produktionssystem die Betriebsbereitschaft der Bearbeitungsstation gestört wurde, repräsentiert das Netzmodul der Bearbeitungsstation diese Betriebsstörung. Ebenso wird angezeigt, wenn die Störung beseitigt und damit die Betriebsbereitschaft der Bearbeitungsstation wiederhergestellt ist³²).

Abb. 166 auf der übernächsten Seite zeigt die Netzgraphik für die erste Erweiterung des anfangs präsentierten Kernnetzes³³). Sie resultiert aus der Berücksichtigung der voranehend skizzierten Verfügbarkeits- und Betriebsbereitschaftsaspekte. Die zugehörige Netzlegende schließt sich unmittelbar an.

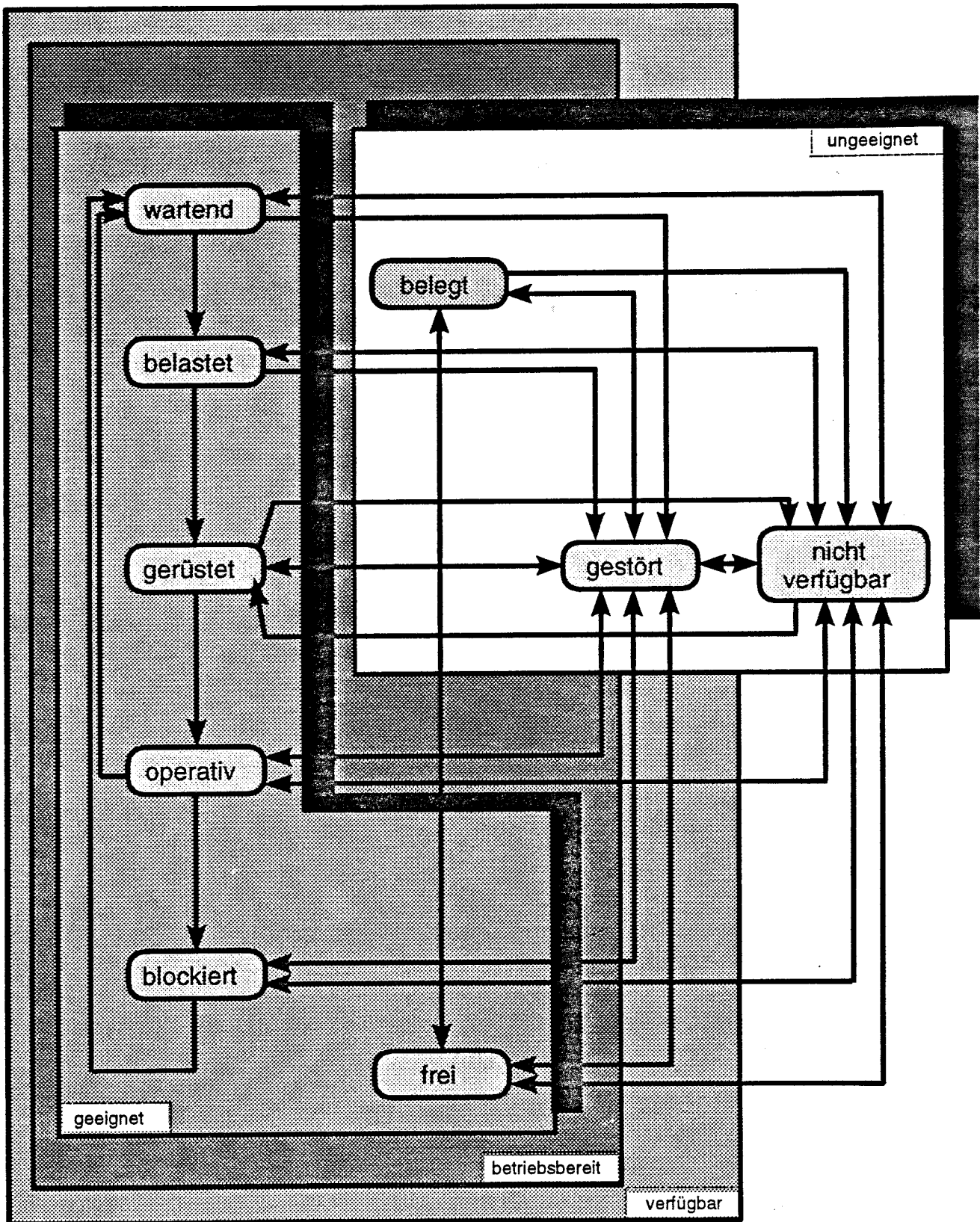


Abb. 165: Erweiterter Zustandsgraph einer Bearbeitungsstation

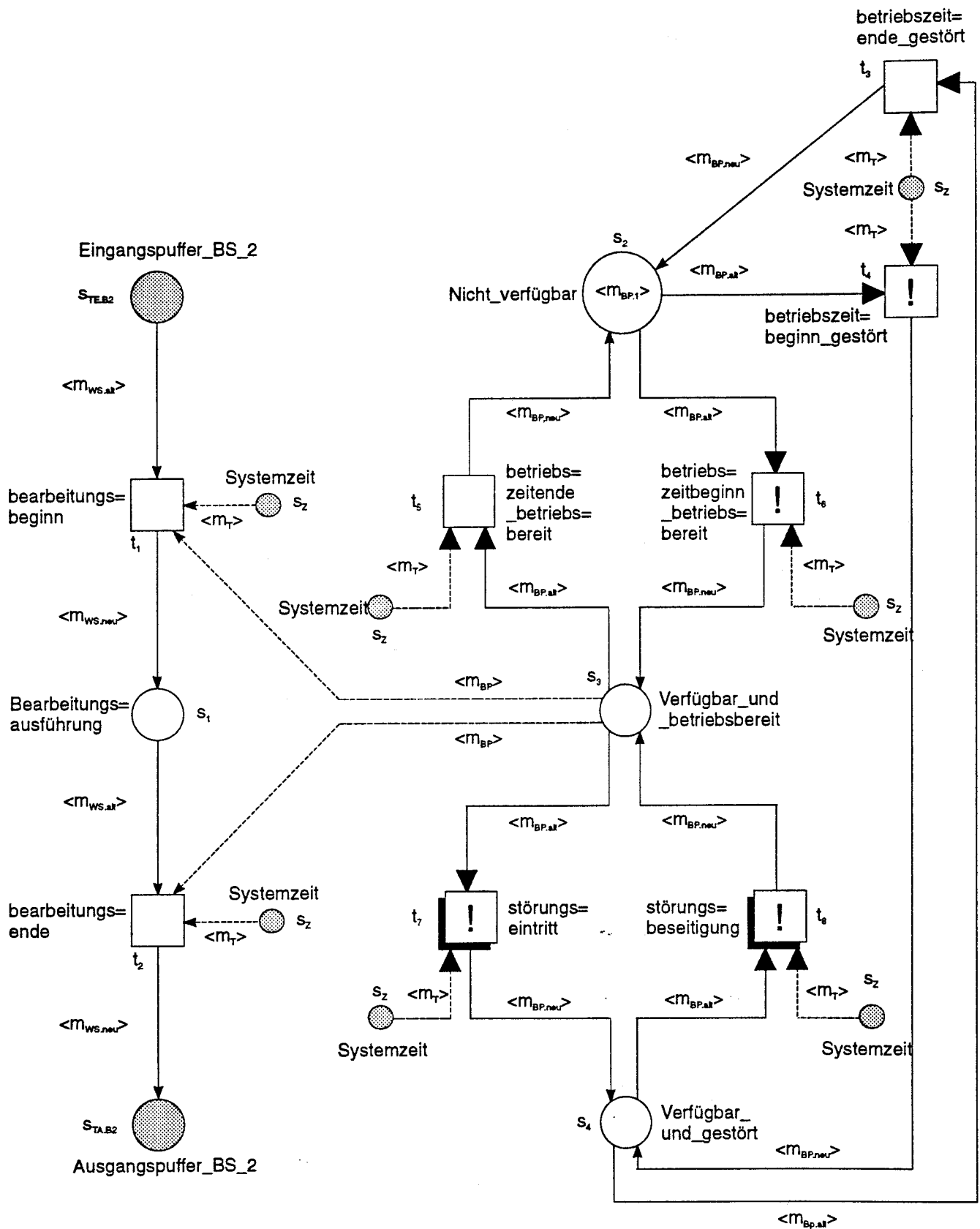


Abb. 166: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: erste Kernnetzwerkerweiterung

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zeitpunkt:	INTEGER		
zeitdauer:	INTEGER		
kosten:	REAL		
kapitalbindungsbetrag:	REAL		
werkstückname:	STRING		
	"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5", "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10", "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15", "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20", "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25", "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30", "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35", "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40", "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45", "nil"	→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	34)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	35)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	36)

```

werkstücklagername:          STRING
    "LS_1":                   → OBwerkstücklagername

werkstückzugehörigkeit =     Zuordnung_wspa(auftragsname);
                               Zuordnung_wspa_ka()

werkstückzuordnung =        Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
                               Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                               Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn =   Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                               Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende =    Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                               Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer =   Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer =       Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer =       Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit =    Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten =           Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                                       werkstück_bearbeitungsbeginn
                                       werkstück_bearbeitungsdauer
                                       werkstück_transportdauer
                                       werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                                       werkstück_durchlaufzeit
                                       werkstück_bearbeitungsende
                                       werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt =          Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

werkstückkapitalbindung =    Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)

werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)

werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)

werkstück_transportkosten =  Transport_ws(kosten)

werkstück_lagerkosten =      Lagerung_ws(kosten)

werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)

```

werkstück_herstellkosten =	Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten =	Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten werkstück_bearbeitungskosten werkstück_transportkosten werkstück_lagerkosten werkstück_kapitalbindungskosten werkstück_herstellkosten)
verfügbarkeitsdauer =	Verfügbarkeit(zeitdauer)
letzter_zeitpunkt =	Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
«m _{BP} » = nutzungsoption =	Potentialmarke(verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt)
«m _T » = syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
«m _{WS} » = werkstück =	Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückstatus bearbeitungsstatus werkstückzuordnung werkstückzeiten werkstückkapitalbindung werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

s _{TA.B2} :	Ausgangspuffer_BS_2(werkstück) markenkapazität _{TE.B2} = 5
s _{TE.B2} :	Eingangspuffer_BS_2(werkstück) markenkapazität _{TE.B2} = 10
s _Z :	Systemzeit(syszeit) markenkapazität _Z = 1
s ₁ :	Bearbeitungsausführung(werkstück) markenkapazität ₁ = 1
s ₂ :	Nicht_verfügbar(nutzungsoption) markenkapazität ₂ = 1
s ₃ :	Verfügbar_und_betriebsbereit(nutzungsoption) markenkapazität ₃ = 1
s ₄ :	Verfügbar_und_gestört(nutzungsoption) markenkapazität ₄ = 1

Transitionen/Transaktionen:

t_1 : bearbeitungsbeginn

$\langle m_{WS,alt} \rangle \approx$ eingangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten_alt,
Werkstückkapitalbindung_alt,Werkstückkosten_alt))
 $\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
 $\langle m_{BP} \rangle \approx$ verfügbar_und_betriebsbereit(nutzungsoption)
 $\langle m_{WS,neu} \rangle \approx$ bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten_neu,
Werkstückkapitalbindung_neu,Werkstückkosten_neu))

t_2 : bearbeitungsende

$\langle m_{WS,alt} \rangle \approx$ bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten_alt,
Werkstückkapitalbindung_alt,Werkstückkosten_alt))
 $\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
 $\langle m_{BP} \rangle \approx$ verfügbar_und_betriebsbereit(nutzungsoption)
 $\langle m_{WS,neu} \rangle \approx$ ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten_neu,
Werkstückkapitalbindung_neu,Werkstückkosten_neu))

t_3 : betriebszeitende_gestört

$\langle m_{BP,alt} \rangle \approx$ verfügbar_und_gestört(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))
 $\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
 $(Time - Emtzeitpunkt_alt) \geq Vfbdauer_alt$
 $Vfbdauer_neu := 0$
 $Emtzeitpunkt_neu := Time$
 $\langle m_{BP,neu} \rangle \approx$ nicht_verfügbar(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

t_4 : betriebszeitbeginn_gestört

$\langle m_{BP,alt} \rangle \approx$ nicht_verfügbar(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: gestört

for_betriebszeit $\Leftrightarrow (0 \leq \text{Time} < 7620 \vee 10080 \leq \text{Time} < 17700)$

for_verfügbarkeit $\Leftrightarrow \dots$

$(\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge \dots$

$(K-1) \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 \leq \text{Time} < K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460$

$\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 - \text{Time}$

Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

t_5 : betriebszeitende_betriebsbereit

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$(\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt}) \geq \text{Vfbdauer_alt}$

Vfbdauer_neu := 0

Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

t_6 : betriebszeitbeginn_betriebsbereit

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: betriebsbereit

for_betriebszeit $\Leftrightarrow (0 \leq \text{Time} < 7620 \vee 10080 \leq \text{Time} < 17700)$

37)

for_verfügbarkeit $\Leftrightarrow \dots$

$(\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge \dots$

$(K-1) \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 \leq \text{Time} < K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460$

$\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 - \text{Time}$

Letzter_zeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

t_7 : störungseintritt

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$$

!systemmeldung!: Störungseintritt

$$\text{Vfbdauer_neu} := \text{Vfbdauer_alt} - (\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt})$$

$$\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$$

$$\langle m_{BP.neu} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$$

t₈: störungsbeseitigung

$$\langle m_{BP.alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$$

$$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung

$$\text{Vfbdauer_neu} := \text{Vfbdauer_alt} - (\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt})$$

$$\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$$

$$\langle m_{BP.neu} \rangle = \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$$

Fakten:

$$\langle m_{BP.1} \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(0), \text{letzte_ermittlung}(0))))$$

Eine weitere Attributmarke - die Nutzungsmarke - wird eingeführt, um das Kernnetz so zu erweitern, daß die tatsächliche Nutzung der Bearbeitungsstation detaillierter modelliert wird. Mit ihrer Hilfe läßt sich unterscheiden, ob die betriebsbereite Bearbeitungsstation die Bearbeitungsphase "wartend", "belastet", "gerüstet", "operativ" oder "blockiert" einnimmt³⁸). Die Attribute der Nutzungsmarke dienen dazu, die Ausführung eines Arbeitsgangs auf der Bearbeitungsstation zu spezifizieren. Ihre Ausprägungen werden bei jeder Arbeitsgangeinlastung initialisiert³⁹). Im einzelnen handelt es sich um:

- den Zeitpunkt, in dem der Arbeitsgang an der Bearbeitungsstation eingelastet und der zentrale Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation für andere Arbeitsgänge gesperrt wurde (arbeitsgangspezifischer Einlastungszeitpunkt);
- den Rüstzustand, den die Bearbeitungsstation einnehmen muß, bevor die Arbeitsgangausführung begonnen werden kann;
- die Ausführungsdauer des Arbeitsgangs⁴⁰);
- den Zeitpunkt, in dem die Arbeitsgangausführung durch den Beginn der arbeitsgangzugehörigen Bearbeitungsoperation gestartet wird (Startzeitpunkt);
- den Zeitpunkt, in dem die Arbeitsgangausführung durch das Ende der arbeitsgangzugehörigen Bearbeitungsoperation abgeschlossen wird (Schlußzeitpunkt);
- die Kosten, die für die Ausführung des Arbeitsgangs und für die Kapazitätsinanspruchnahme durch das Werkstück an der Bearbeitungsstation anfallen (arbeitsgangspezifische Bearbeitungskosten).

Die Auslastung des zuletzt ausgeführten Arbeitsgangs erfolgt, sobald das bearbeitete Werkstück in den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation abgelegt worden ist⁴¹⁾. In diesem Auslastungszeitpunkt wird der zentrale Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation für andere Arbeitsgänge freigegeben. Zugleich werden die Bearbeitungskosten⁴²⁾ und -dauern⁴³⁾ berechnet, die während der Arbeitsgangausführung insgesamt angefallen sind⁴⁴⁾. Sie werden dem bearbeiteten Werkstück bei seiner Ablage in den Ausgangspuffer zugerechnet.

Die Differenzierung zwischen den Bearbeitungsphasen "belastet" und "gerüstet" setzt voraus, daß an der Bearbeitungsstation nicht nur Bearbeitungs-, sondern auch Rüstoperationen ausgeführt werden. Sowohl die Ausführungsdauern als auch die Ausführungskosten von Rüstoperationen können von der Reihenfolge abhängen, in der Arbeitsgänge auf der Bearbeitungsstation ausgeführt werden. Um solche Reihenfolgeeffekte zu erfassen, wird eine Hilfsmarke mit der Sorte "rüststatus" eingeführt. Diese Rüstmarke gibt an, in welchem Rüstzustand sich die Bearbeitungsstation beim Einlasten eines Arbeitsgangs befindet (Istrüstzustand). Die Nutzungsmarke enthält bereits die Information darüber, welcher Rüstzustand der Bearbeitungsstation für die nächste Arbeitsgangausführung erforderlich ist (Sollrüstzustand). Eine Rüstmatrix, die in der Schaltvorschrift für die Starttransition der Rüstoperation spezifiziert wird, legt für jeden Übergang zwischen einem Ist- und einem Sollrüstzustand fest, welche Ausführungsdauern und welche Ausführungskosten für das Auf-, Um- oder Abrüsten⁴⁵⁾ der Bearbeitungsstation anfallen⁴⁶⁾.

Die zweite Erweiterung des Kernnetzes baut auf der ersten Kernnetzerweiterung auf⁴⁷⁾. Hierdurch wird die Modellierung der Nutzungsmöglichkeiten der Bearbeitungsstation um die Phasen ihrer tatsächlichen Nutzung ergänzt. Hinzu kommen die zuvor skizzierten Rüstaspekte. Abb. 167 u. 168 auf den beiden nächsten Seiten zeigen die zweigeteilte Netzgraphik für das erweiterte Netzmodul. Darauf folgt die zugehörige Netzlegende⁴⁸⁾.

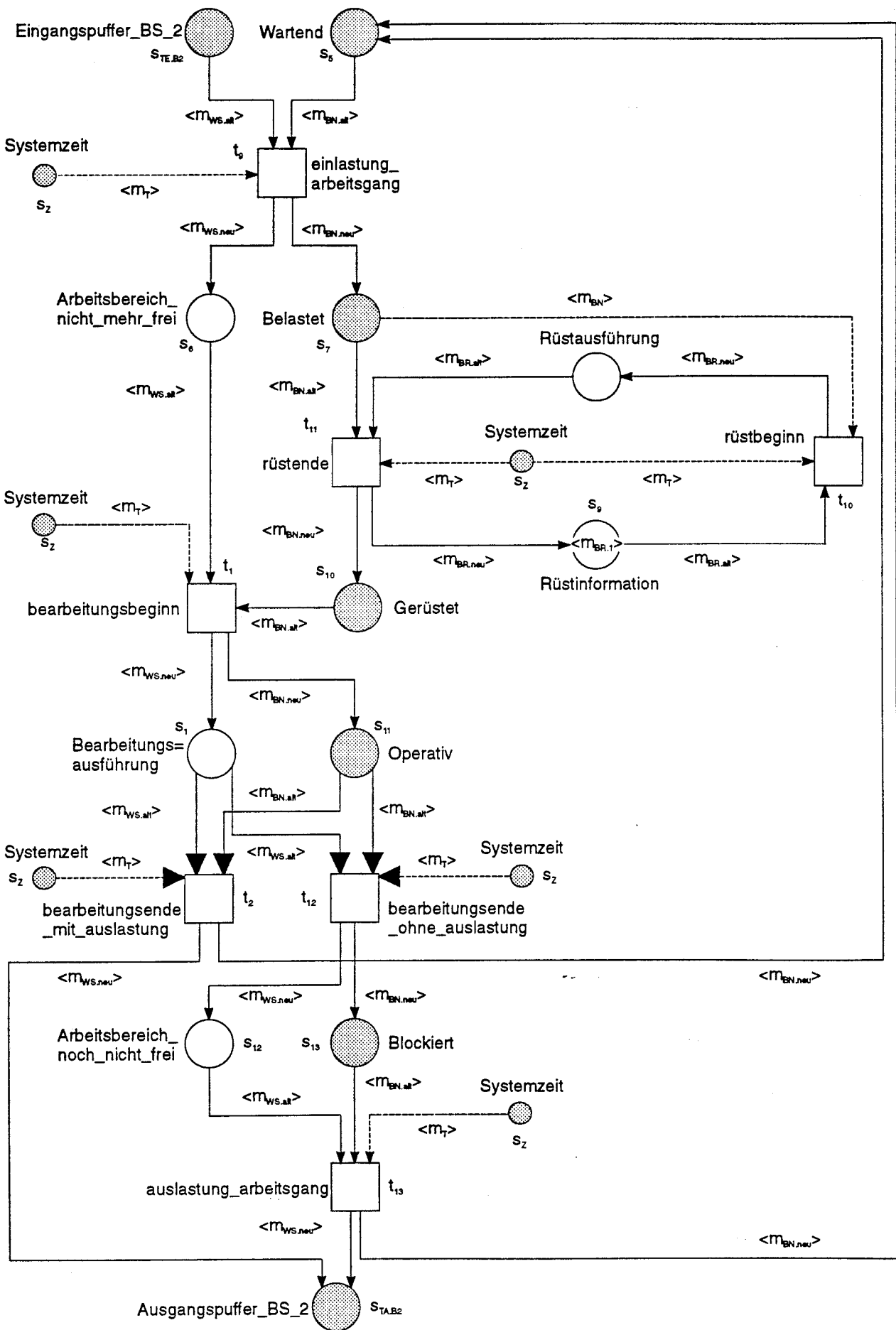


Abb. 167: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: zweite Kernnetzerweiterung (erste Hälfte)

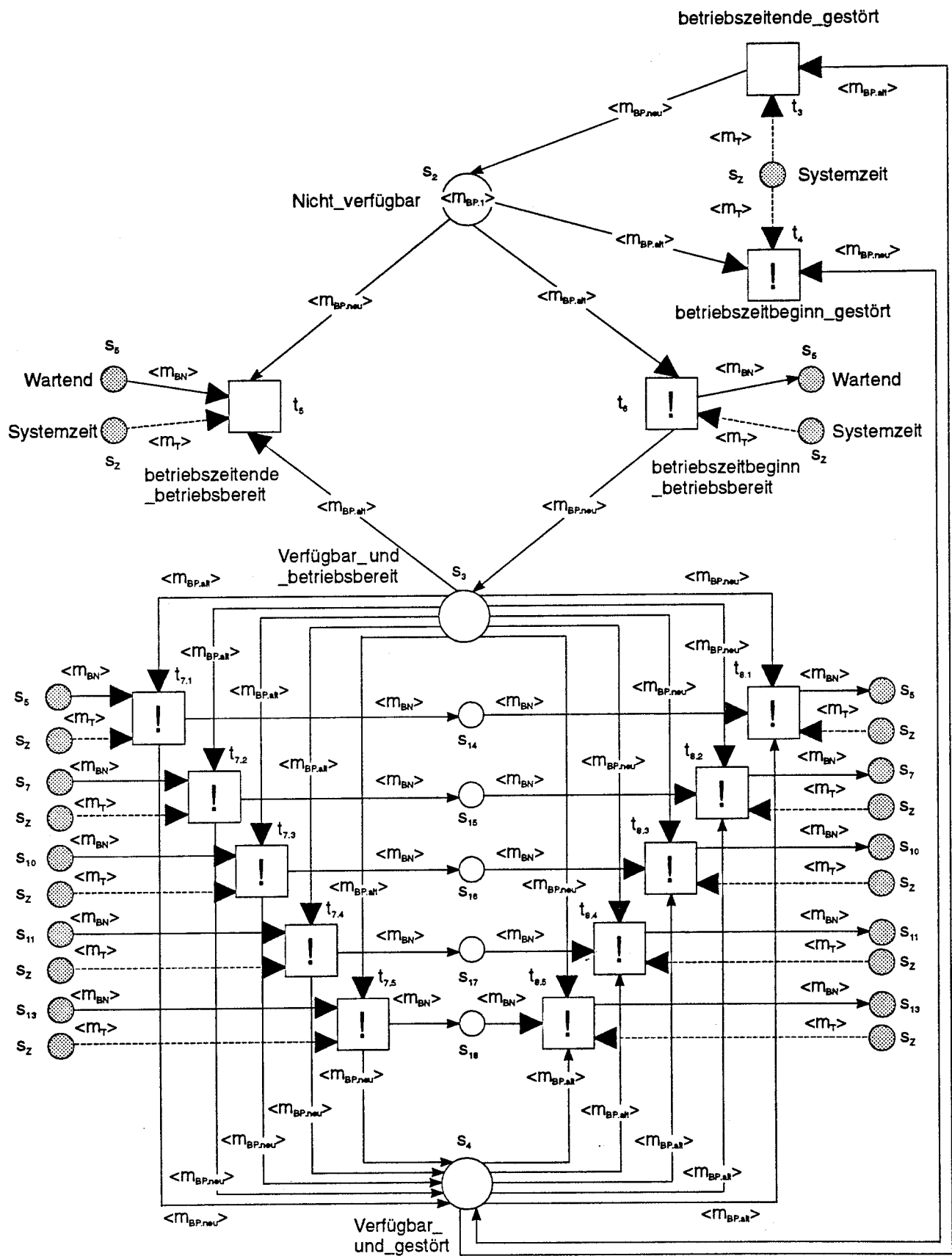


Abb. 168: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: zweite Kernnetzerweiterung (zweite Hälfte)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zinssatz = 0.06

zinszeitverrechnung = 0.0000019

bearbeitungskostensatz = 7.75

49)

rüstkostensatz_iz0_sz0 = 0.00

50)

rüstkostensatz_iz0_sz1 = 1.10

rüstkostensatz_iz0_sz2 = 3.50

rüstkostensatz_iz0_sz3 = 5.35

rüstkostensatz_iz1_sz0 = 2.40

rüstkostensatz_iz1_sz1 = 0.00

rüstkostensatz_iz1_sz2 = 1.70

rüstkostensatz_iz1_sz3 = 4.22

rüstkostensatz_iz2_sz0 = 1.40

rüstkostensatz_iz2_sz1 = 4.80

rüstkostensatz_iz2_sz2 = 0.00

rüstkostensatz_iz2_sz3 = 2.70

rüstkostensatz_iz3_sz0 = 5.44

rüstkostensatz_iz3_sz1 = 2.08

rüstkostensatz_iz3_sz2 = 3.70

rüstkostensatz_iz3_sz3 = 0.00

rüstdauer_iz0_sz0 = 0

51)

rüstdauer_iz0_sz1 = 10

rüstdauer_iz0_sz2 = 22

rüstdauer_iz0_sz3 = 30

rüstdauer_iz1_sz0 = 15

rüstdauer_iz1_sz1 = 0

rüstdauer_iz1_sz2 = 12

rüstdauer_iz1_sz3 = 18

rüstdauer_iz2_sz0 = 9

rüstdauer_iz2_sz1 = 11

rüstdauer_iz2_sz2 = 0

rüstdauer_iz2_sz3 = 14

rüstdauer_iz3_sz0 = 7

rüstdauer_iz3_sz1 = 23

rüstdauer_iz3_sz2 = 18

rüstdauer_iz3_sz3 = 0

zeitpunkt:

INTEGER

zeitdauer:	INTEGER		
kosten:	REAL		
kapitalbindungsbetrag:	REAL		
werkstückname:	STRING		
	"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5", "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10", "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15", "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20", "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25", "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30", "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35", "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40", "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45", "nil"	→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	52)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	53)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	54)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":	→ OB _{werkstücklagername}	
rüztzustand:	SYMBOL		
	gerüstet_0,gerüstet_1, gerüstet_2,gerüstet_3:	→ OB _{rüztzustand}	

werkstückzugehörigkeit = Zuordnung_ws(auftragsname);
Zuordnung_ws_ka()

werkstückzuordnung = Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);
Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn = Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende = Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
Bearingsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer = Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer = Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
werkstück_bearbeitungsbeginn
werkstück_bearbeitungsdauer
werkstück_transportdauer
werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
werkstück_durchlaufzeit
werkstück_bearbeitungsende
werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)

werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)

werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)

werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)

werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)

werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)

werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)

werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
werkstück_bearbeitungskosten
werkstück_transportkosten
werkstück_lagerkosten
werkstück_kapitalbindungskosten
werkstück_herstellkosten)

verfügbarkeitsdauer = Verfügbarkeit(zeitdauer)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

startzeitpunkt = Start(zeitpunkt);
Start_ka()

schlußzeitpunkt = Schluß(zeitpunkt);
Schluß_ka()

arbeitsgang_einlastungszeitpunkt = Einlastung_ag(zeitpunkt);
Einlastung_ag_ka()

arbeitsgang_rüsterfordernis = Sollrüstung(rüsterzustand);
Sollrüstung_ka()

arbeitsgang_ausführungsdauer = Ausführung_ag(zeitdauer);
Ausführung_ag_ka()

arbeitsgang_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ag(kosten)

istrüsterzustand = Letzte_istrüster(rüsterzustand);
Nächste_istrüster(rüsterzustand)

rüsterkosten = Rüsterausführung(kosten);
Rüsterausführung_ka()

«m_{BN}» ≈ realnutzung = Nutzungsmarke(arbeitsgang_einlastungszeitpunkt
arbeitsgang_rüsterfordernis
arbeitsgang_ausführungsdauer
startzeitpunkt schlußzeitpunkt
arbeitsgang_bearbeitungskosten)

«m_{BP}» ≈ nutzungsoption = Potentialmarke(verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt)

«m_{BR}» ≈ rüsterstatus = Rüstermarke(istrüsterzustand startzeitpunkt
schlußzeitpunkt rüsterkosten)

«m_T» ≈ syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)

«m_{WS}» = werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

- s_{TA.B2}: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität_{TE.B2} = 5
- s_{TE.B2}: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität_{TE.B2} = 10
- s_Z: Systemzeit(syszeit)
markenkapazität_Z = 1
- s₁: Bearbeitungsausführung(werkstück)
markenkapazität₁ = 1
- s₂: Nicht_verfügbar(nutzungsoption)
markenkapazität₂ = 1
- s₃: Verfügbar_und_betriebsbereit(nutzungsoption)
markenkapazität₃ = 1
- s₄: Verfügbar_und_gestört(nutzungsoption)
markenkapazität₄ = 1
- s₅: Wartend(realnutzung)
markenkapazität₅ = 1
- s₆: Arbeitsbereich_nicht_mehr_frei(werkstück)
markenkapazität₆ = 1
- s₇: Belastet(realnutzung)
markenkapazität₇ = 1
- s₈: Rüstaufführung(rüststatus)
markenkapazität₈ = 1
- s₉: Rüstinformation(rüststatus)
markenkapazität₉ = 1
- s₁₀: Gerüstet(realnutzung)
markenkapazität₁₀ = 1
- s₁₁: Operativ(realnutzung)
markenkapazität₁₁ = 1

- s₁₂: Arbeitsbereich_noch_nicht_frei(werkstück)
markenkapazität₁₂ = 1
- s₁₃: Blockiert(realnutzung)
markenkapazität₁₃ = 1
- s₁₄: Gestört_wartend(realnutzung)
markenkapazität₁₄ = 1
- s₁₅: Gestört_belastet(realnutzung)
markenkapazität₁₅ = 1
- s₁₆: Gestört_gerüstet(realnutzung)
markenkapazität₁₆ = 1
- s₁₇: Gestört_operativ(realnutzung)
markenkapazität₁₇ = 1
- s₁₈: Gestört_blockiert(realnutzung)
markenkapazität₁₈ = 1

Transitionen/Transaktionen:

- t₁: bearbeitungsbeginn
- <m_{WS.alt}> = arbeitsbereich_nicht_mehr_frei(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus_alt,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten))
- <m_{BN.alt}> = gerüstet(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Agadauer),start_ka(),schluß_ka(),
bearbeitung_ag(Agakosten)))
- <m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
- Werkstückstatus_neu := in_bearbeitung
Bearbeitungsstatus_neu := angearbeitet
Startzeitpunkt := Time
Schlußzeitpunkt := Time + Agadauer
- <m_{WS.neu}> = bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
Bearbeitungsstatus_neu,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten))
- <m_{BN.neu}> = operativ(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Agadauer),
start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),
bearbeitung_ag(Agakosten)))

t_2 : bearbeitungsende

$\langle m_{WS.alt} \rangle =$ bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_alt,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_alt),Werkstück_transportdauer,
Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
bearbeitung_ws(Btgkosten_alt),Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

$\langle m_{BN.alt} \rangle =$ operativ(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Agadauer),start(Startzeitpunkt),
schluß(Schlußzeitpunkt),bearbeitung_ag(Agakosten_alt)))

$\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Time \geq Schlußzeitpunkt

schaltpriorität(sp_2)

for_2 : \Leftrightarrow ...

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

^ Werkstückzuordnung_neu := zuordnung_ws_ka()

^ Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt

^ Auslastungszeitpunkt := Time

^ Dauer := Auslastungszeitpunkt - Einlastungszeitpunkt

^ Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer

^ Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer

^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

^ Emtzeitpunkt_neu := Time

^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

^ Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten

^ Btgkosten_neu := Btgkosten_alt + Agakosten_neu

^ Kapitalkostenzunahme := ...

Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung

^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu

^ Agakosten_neu := 0

$\langle m_{WS.neu} \rangle \approx \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 $\text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu},$
 $\text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung_neu},$
 $\text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsbeginn},$
 $\text{bearbeitungsdauer_ws}(\text{Bgtdauer_neu}), \text{Werkstück_transportdauer},$
 $\text{Werkstück_wartedauer}, \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_neu}),$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsende}, \text{Werkstück_nachlagerende}),$
 $\text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu}),$
 $\text{Kapitalbindungsbetrag_neu}), \text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten},$
 $\text{bearbeitung_ws}(\text{Btgkosten_neu}), \text{Werkstück_transportkosten},$
 $\text{Werkstück_lagerkosten}, \text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_neu}),$
 $\text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_neu})))$

$\langle m_{BN.neu} \rangle \approx \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag_ka}(), \text{sollrüstung_ka}(),$
 $\text{ausführung_ag_ka}(), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(),$
 $\text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten_neu})))$

t_3 : betriebszeitende_gestört

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt},$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$(\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt}) \geq \text{Vfbdauer_alt}$
 $\text{Vfbdauer_neu} := 0$
 $\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu},$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

t_4 : betriebszeitbeginn_gestört

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt},$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$!\text{systemmeldung!}: \text{gestört}$
 $\text{for_betriebszeit} := \Leftrightarrow (0 \leq \text{Time} < 7620 \vee 10080 \leq \text{Time} < 17700)$
 $\text{for_verfügbarkeit} := \Leftrightarrow \dots$
 $(\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge \dots$
 $(K-1) \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 \leq \text{Time} < K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460$
 $\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 - \text{Time}$
 $\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

t_5 : betriebszeitende_betriebsbereit

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag_ka}(), \text{sollrüstung_ka}(), \text{ausführung_ag_ka}(), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$(\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt}) \geq \text{Vfbdauer_alt}$

$\text{Vfbdauer_neu} := 0$

$\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

t_6 : betriebszeitbeginn_betriebsbereit

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{nicht_verfügbar}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: betriebsbereit

for_betriebszeit $\Leftrightarrow (0 \leq \text{Time} < 7620 \vee 10080 \leq \text{Time} < 17700)$

55)

for_verfügbarkeit $\Leftrightarrow \dots$

$(\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge \dots$

$(K-1) \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 \leq \text{Time} < K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460$

$\rightarrow \text{Vfbdauer_neu} := K \cdot 7620 + (K-1) \cdot 2460 - \text{Time}$

$\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$

$\text{Agakosten} := 0$

$\langle m_{BP.neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag_ka}(), \text{sollrüstung_ka}(), \text{ausführung_ag_ka}(), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten})))$

$t_{7,1}$: störungseintritt_wartend

$\langle m_{BP.alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten})))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

```

!systemmeldung!: Störungseintritt
schaltpriorität(sp_7.1)
Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
Emtzeitpunkt_neu := Time

<mBP.neu> = verfügbar_und_gestört(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),
    letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))
<mBN> = gestört_wartend(nutzungsmarke(Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt,
    Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,
    Startzeitpunkt,Schlußzeitpunkt,Arbeitsgang_bearbeitungskosten))

```

```

t7.2: störungseintritt_belastet

<mBP.alt> = verfügbar_und_betriebsbereit(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),
    letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))
<mBN> = belastet(nutzungsmarke(Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt,
    Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,
    Startzeitpunkt,Schlußzeitpunkt,Arbeitsgang_bearbeitungskosten))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

!systemmeldung!: Störungseintritt
schaltpriorität(sp_7.2)
Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
Emtzeitpunkt_neu := Time

<mBP.neu> = verfügbar_und_gestört(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_neu),
    letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))
<mBN> = gestört_belastet(nutzungsmarke(Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt,
    Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,
    Startzeitpunkt,Schlußzeitpunkt,Arbeitsgang_bearbeitungskosten))

```

```

t7.3: störungseintritt_gerüstet

<mBP.alt> = verfügbar_und_betriebsbereit(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),
    letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))
<mBN> = gerüstet(nutzungsmarke(Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt,
    Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,
    Startzeitpunkt,Schlußzeitpunkt,Arbeitsgang_bearbeitungskosten))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

!systemmeldung!: Störungseintritt
schaltpriorität(sp_7.3)
Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
Emtzeitpunkt_neu := Time

```

$\langle m_{BP,neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{gestört_gerüstet}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{7.4}: störungseintritt_operativ

$\langle m_{BP,alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{operativ}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungseintritt

schaltpriorität(sp_7.4)

Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)

Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP,neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{gestört_operativ}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{7.5}: störungseintritt_blockiert

$\langle m_{BP,alt} \rangle \approx \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{blockiert}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungseintritt

schaltpriorität(sp_7.5)

Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)

Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP,neu} \rangle \approx \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{gestört_blockiert}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{8,1}: störungsbeseitigung_wartend

$\langle m_{BP,alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$
 $\langle m_{BN} \rangle = \text{gestört_wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$
 $\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung
Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP,neu} \rangle = \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$
 $\langle m_{BN} \rangle = \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{8,2}: störungsbeseitigung_belastet

$\langle m_{BP,alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$
 $\langle m_{BN} \rangle = \text{gestört_belastet}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$
 $\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung
Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP,neu} \rangle = \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$
 $\langle m_{BN} \rangle = \text{belastet}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{8,3}: störungsbeseitigung_gerüstet

$\langle m_{BP,alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{gestört_gerüstet}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung

$\text{Vfbdauer_neu} := \text{Vfbdauer_alt} - (\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt})$

$\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$

$\langle m_{BP.neu} \rangle = \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbar-}$
 $\text{keit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{gerüstet}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{8.4}: störungsbeseitigung_operativ

$\langle m_{BP.alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{gestört_operativ}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung

$\text{Vfbdauer_neu} := \text{Vfbdauer_alt} - (\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt})$

$\text{Emtzeitpunkt_neu} := \text{Time}$

$\langle m_{BP.neu} \rangle = \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbar-}$
 $\text{keit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{operativ}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{8.5}: störungsbeseitigung_blockiert

$\langle m_{BP.alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{gestört_blockiert}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung

$\text{Vfbdauer_neu} := \text{Vfbdauer_alt} - (\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt_alt})$

Emtzeitpunkt_neu := Time

<m_{BP.neu}> = verfügbar_und_betriebsbereit(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_neu), letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu)))

<m_{BN}> = blockiert(nutzungsmarke(Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt, Arbeitsgang_rüsterfordernis, Arbeitsgang_ausführungsdauer, Startzeitpunkt, Schlußzeitpunkt, Arbeitsgang_bearbeitungskosten))

t₉: einlastung_arbeitsgang

<m_{WS.alt}> = eingangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname, Werkstückklasse, Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_alt, Bearbeitungsstatus, Werkstückzuordnung, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn, Werkstück_bearbeitungsbeginn, Werkstück_bearbeitungsdauer, Werkstück_transportdauer, wartedauer_ws(Wrtdauer_alt), durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt), Werkstück_bearbeitungsende, Werkstück_nachlagerende), kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt), Kapitalbindungsbetrag_alt), kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, Werkstück_bearbeitungskosten, Werkstück_transportkosten, Werkstück_lagerkosten, kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt), herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

<m_{BN.alt}> = wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(), sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(), start_ka(), schluß_ka(), bearbeitung_ag(Agakosten)))

<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Werkstückstatus_alt = auf_einlastung_wartend

schaltpriorität(sp_9)

for_9 := ...

Elzeitpunkt := Time

^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt

^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer

^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

^ Emtzeitpunkt_neu := Time

^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

^ Kapitalkostenzunahme := ...

Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung

^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

^ Werkstückstatus_neu := eingelastet

$\langle m_{WS,neu} \rangle = \text{bearbeitungsausführung}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung}, \text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsdauer}, \text{Werkstück_transportdauer}, \text{wartedauer_ws}(\text{Wrtdauer_neu}), \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_neu}), \text{Werkstück_bearbeitungsende}, \text{Werkstück_nachlagerende}), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu}), \text{Kapitalbindungsbetrag_neu}), \text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten}, \text{Werkstück_bearbeitungskosten}, \text{Werkstück_transportkosten}, \text{Werkstück_lagerkosten}, \text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_neu}), \text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_neu})))$

$\langle m_{BN,neu} \rangle = \text{belastet}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag}(\text{Elazeitpunkt}), \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand})^{56}), \text{ausführung_ag}(\text{Agadauer})^{57}), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten})))$

t_{10} : rüstbeginn

$\langle m_{BR,alt} \rangle = \text{rüstinformation}(\text{rüstmarke}(\text{letzte_istrüstung}(\text{Istrüstzustand_alt}), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{rüstausführung_ka}()))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{belastet}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag}(\text{Elazeitpunkt}), \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand}), \text{ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten})))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

schaltpriorität(sp_10)

for_rüstmatrix : \Leftrightarrow ...

$((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_0} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_0})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz0_sz0} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz0_sz0}))$
 $\wedge ((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_0} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_1})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz0_sz1} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz0_sz1}))$
 $\wedge ((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_0} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_2})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz0_sz2} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz0_sz2}))$
 $\wedge ((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_0} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_3})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz0_sz1} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz0_sz3}))$
 $\wedge ((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_1} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_0})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz1_sz0} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz1_sz0}))$
 $\wedge ((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_1} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_1})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz1_sz1} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz1_sz1}))$
 $\wedge ((\text{Istrüstzustand_alt} = \text{gerüstet_1} \wedge \text{Sollrüstzustand} = \text{gerüstet_2})$
 $\rightarrow (\text{Rüstdauer} := \text{rüstdauer_iz1_sz2} \wedge \text{Rüstkosten} := \text{rüstkostensatz_iz1_sz2}))$

- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_1 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_3)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz1_sz1 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz1_sz3))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_2 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_0)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz2_sz0 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz2_sz0))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_2 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_1)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz2_sz1 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz2_sz1))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_2 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_2)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz2_sz2 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz2_sz2))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_2 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_3)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz2_sz1 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz2_sz3))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_3 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_0)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz3_sz0 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz3_sz0))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_3 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_1)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz3_sz1 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz3_sz1))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_3 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_2)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz3_sz2 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz3_sz2))
- \wedge ((Istrüstzustand_alt = gerüstet_3 \wedge Sollrüstzustand = gerüstet_3)

 \rightarrow (Rüstdauer := rüstdauer_iz3_sz1 \wedge Rüstkosten := rüstkostensatz_iz3_sz3))

Istrüstzustand_neu := Sollrüstzustand

Startzeitpunkt := Time

Schlußzeitpunkt := Time + Rüstdauer

$\langle m_{BR,neu} \rangle \approx$ rüstauführung(rüstmarke(nächste_istrüstung(Istrüstzustand_neu),
 start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),rüstauführung(Rüstkosten)))

t_{11} : rüstende

$\langle m_{BN,alt} \rangle \approx$ belastet(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
 sollrüstung(Sollrüstzustand),ausführung_ag(Agadauer),
 start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten_alt)))

$\langle m_{BR,alt} \rangle \approx$ rüstauführung(rüstmarke(nächste_istrüstung(Sollrüstzustand),
 start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),rüstauführung(Rüstkosten)))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Time \geq Schlußzeitpunkt

schaltpriorität(sp_11)

Agakosten_neu := Agakosten_alt + Rüstkosten

Istrüstzustand := Sollrüstzustand

$\langle m_{BN,neu} \rangle \approx$ belastet(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
 sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Agadauer),
 start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten_neu)))

$\langle m_{BR.neu} \rangle \approx$ rüstauführung(rüstmärke(letzte_istrüstung(Istrüstzustand),
start_ka(),schluß_ka(),rüstauführung_ka()))

t₁₂: bearbeitungsende_ohne_auslastung

$\langle m_{WS.alt} \rangle \approx$ bearbeitungsausführung(werkstückmärke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten))

$\langle m_{BN.alt} \rangle \approx$ operativ(nutzungsmärke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Adauer),
start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt_alt),bearbeitung_ag(Adkosten)))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmärke_sys(Time))

Time \geq Schlußzeitpunkt_alt

schaltpriorität(sp_12)

Schlußzeitpunkt_neu := Time

58)

$\langle m_{WS.neu} \rangle \approx$ arbeitsbereich_noch_nicht_frei(werkstückmärke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten))

$\langle m_{BN.neu} \rangle \approx$ blockiert(nutzungsmärke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Adauer),start(Startzeitpunkt),
schluß(Schlußzeitpunkt_neu),bearbeitung_ag(Adkosten)))

t₁₃: auslastung_arbeitsgang

$\langle m_{WS.alt} \rangle \approx$ arbeitsbereich_noch_nicht_frei(werkstückmärke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_alt,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_alt),Werkstück_transportdauer,
Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
bearbeitung_ws(Btgkosten_alt),Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

$\langle m_{BN.alt} \rangle \approx$ blockiert(nutzungsmärke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),sollrüstung_ka(),
ausführung_ag(Adauer),start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),
bearbeitung_ag(Adkosten_alt)))

```

<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
schaltpriorität(sp_13)
for_13 :⇔ ...
    Werkstückstatus_neu := ausgelastet
    ^ Werkstückzuordnung_neu := zuordnung_ws_ka()
    ^ Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt
    ^ Auslastungszeitpunkt := Time
    ^ Dauer := Auslastungszeitpunkt - Einlastungszeitpunkt
    ^ Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer
    ^ Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
    ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten
    ^ Btggkosten_neu := Btggkosten_alt + Agakosten_neu
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu
    ^ Agakosten_neu := 0

<m_WS.neu> = ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
    Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
    zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
    bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_neu),Werkstück_transportdauer,
    Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
    Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
    kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
    Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
    bearbeitung_ws(Btggkosten_neu),Werkstück_transportkosten,
    Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
    herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

<m_BN.neu> = wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(),
    ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten_neu)))

```

Schaltprioritäten: sp_7.1 > sp_9
 sp_7.2 > sp_10
 sp_7.2 > sp_11

```

sp_7.3 > sp_1
sp_7.4 > sp_2
sp_7.4 > sp_12
sp_7.5 > sp_13

```

Fakten:

```
<mBP.1> = fakt0(1,nicht_verfügbar(potentialmarke(verfügbarkeit(0),letzte_ermittlung(0))))
```

```
<mBR.1> = fakt0(1,rüstinformation(rüstmarke(gerüstet_0,start_ka(),schluß_ka(),
rüstausführung_ka()))))
```

Die dritte Netzerweiterung konzentriert sich auf die Einlastung von Arbeitsgängen, die der betrachteten Bearbeitungsstation zur Ausführung zugeordnet worden sind⁵⁹). Ihr Fokus liegt daher auf der Umgebung der Transition "einlastung_arbeitsgang". Dabei wird die Modellierung dieser Transitions Umgebung vorausgesetzt, die bereits im Rahmen der voranstehenden zweiten Kernnetzerweiterung erfolgte⁶⁰).

Zentrales Instrument für die Gestaltung der Arbeitsgangeinlastung ist eine dritte Attributmarke. Sie erfüllt als Puffermarke⁶¹) zwei komplementäre Funktionen. Einerseits dient sie zur Verwaltung des Speicherplatzes, der für Werkstücke im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation zur Verfügung steht. Daher belegen die Kopien der Puffermarke eine Stelle, der das Prädikatsymbol "Pufferverwaltung" zugeordnet ist. Andererseits nimmt sie Informationen über alle Arbeitsgänge auf, deren Ausführung auf der Bearbeitungsstation erfolgen soll. Zu diesen Arbeitsgängen gehören jeweils Werkstücke als Bearbeitungsobjekte. Für diese arbeitsgangzugehörigen Werkstücke muß im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation entsprechender Speicherplatz reserviert werden, sobald die Arbeitsgangzuordnung der Bearbeitungsstation mitgeteilt wird⁶²). Auch diese Speicherplatzreservierung leistet die Puffermarke⁶³).

Das erste Attribut der Puffermarke zeigt den Belegungsstatus der Bearbeitungsstation an. Es kann die Ausprägungen "belegt" oder "frei" annehmen, sofern die Bearbeitungsstation betriebsbereit ist⁶⁴). Solange die Bearbeitungsstation frei ist, kann ihr ein weiterer Arbeitsgang zugeordnet werden. Dieser Umstand wird später genutzt, um eine Informationsmarke mit einer entsprechenden Bearbeitungsofferte an die prozeßkoordinierende Instanz abzusenden. Das zweite Attribut der Sorte "pufferplatz" gibt durch seine Ausprägung an, wie viele Speicherplätze im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation für die Aufnahme je eines Werkstücks aktuell frei sind⁶⁵). Diese Information ist für die Arbeitsgangzuordnung erforderlich, weil bei synthetischen Produktionen Arbeitsgänge existieren können, die mehrere Werkstücke als Bearbeitungsobjekte voraussetzen⁶⁶). Ein drittes Attribut weist aus, wie lange die Bearbeitungsstation aufgrund ihres Verfügbarkeitskalenders noch planmäßig⁶⁷) genutzt werden kann⁶⁸). Durch die Kenntnisnahme der aktuellen Attributausprägung läßt sich die Einlastung von Arbeitsgängen an der Bearbeitungsstation so steuern, daß nur solche Arbeitsgänge eingelastet werden, deren Ausführungsdauern innerhalb der geplanten Stationsverfügbarkeit liegen. Darüber hinaus wird ein Sicherheitszuschlag vorgesehen, der den zusätzlichen Zeitbedarf für Rüstoperationen und unvorhergesehene Verzögerungen bei der Arbeitsgangausführung abdecken soll⁶⁹).

Das vierte Attribut der Puffermarke stellt ein komplex zusammengesetztes Attribut dar. Auf der horizontalen Zusammensetzungsebene handelt es sich um eine Liste. Jedes Listenelement enthält Informationen über einen Arbeitsgang, der auf der Bearbeitungsstation ausgeführt werden soll. In der vertikalen Zusammensetzungsebene werden die arbeitsgangspezifischen Informationen eines Listenelements hierarchisch zu Informationsgruppen strukturiert. Die Strukturierungsweise kann der Netzlegende für die dritte Kernnetzerweiterung entnommen werden, die später

präsentiert wird. Hier werden zunächst nur die einzelnen Informationen vorgestellt, die in der Puffermarke über zugeordnete Arbeitsgänge vorgehalten werden⁷⁰):

- der Name des Arbeitsgangs, der der Bearbeitungsstation zugeordnet wurde;
- der Name des Produktionsauftrags, zu dem der Arbeitsgang gehört;
- der Sollrüstzustand, in dem sich die Bearbeitungsstation zur Ausführung des Arbeitsgangs befinden muß;
- die Ausführungsdauer des Arbeitsgangs, die sich allerdings nur auf dessen zugehörige Bearbeitungsoperation erstreckt;
- eine Werkzeugliste, die für jedes Werkzeug, das auf der Bearbeitungsstation zur Ausführung des Arbeitsgangs erforderlich ist, die zugehörige Werkzeugklasse angibt⁷¹);
- eine Werkstückeingangsliste, die für jedes Werkstück, das als Bearbeitungsobjekt in den auszuführenden Arbeitsgang eingehen soll, die zugehörige Werkstückklasse spezifiziert⁷²);
- der Werkstückausgang, der den Namen und die Werkstückklasse desjenigen Werkstücks festlegt, das am Ende der Arbeitsgangausführung vorliegen soll;
- eine Angabe darüber, ob die Ausführung des Arbeitsgangs auf der Bearbeitungsstation entweder eine Arbeitskraft erfordert oder aber vollautomatisch erfolgen kann⁷³);
- die Summe der Durchlaufzeiten aller Werkstücke, die als Bearbeitungsobjekte für die Ausführung des Arbeitsgangs bei seiner Zuordnung zur Bearbeitungsstation bereitstanden⁷⁴);
- die Summe der Herstellkosten aller Werkstücke, die als Bearbeitungsobjekte für die Ausführung des Arbeitsgangs bei seiner Zuordnung zur Bearbeitungsstation bereitstanden⁷⁵);
- die Schlupfzeit des Arbeitsgangs⁷⁶);
- die Abwicklungspriorität des Auftrags, zu dem der Arbeitsgang gehört⁷⁷);
- der Wert, der für Abwicklung des arbeitsgangzugehörigen Produktionsauftrags veranschlagt wurde.

Die voranstehend aufgelisteten Informationen über Arbeitsgänge, deren Ausführung auf der Bearbeitungsstation beabsichtigt ist, werden durch eine Informationsmarke der Sorte "bearbeitungsauftrag" übermittelt. Die Bearbeitungsstation erhält von demjenigen Netzmodul, das die Zuordnung von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen leistet⁷⁸), für jeden zugeordneten Arbeitsgang eine entsprechende Kopie der vorgenannten Informationsmarke zugesandt. Diese Informationsmarke umfaßt darüber hinaus noch drei zusätzliche Attribute, die sich nicht auf den zugeordneten Arbeitsgang, sondern die entsprechende Zuordnungsentscheidung erstrecken:

- den Namen der Bearbeitungsstation, der ein Bearbeitungsauftrag zugeordnet worden ist⁷⁹);
- den Zeitpunkt, in dem der Bearbeitungsauftrag erteilt wurde⁸⁰);
- den Bearbeitungsauftragsstatus⁸¹).

Sobald die Kopie der Informationsmarke die Bearbeitungsstation erreicht, liegt ein entsprechender Bearbeitungsauftrag vor. Er erstreckt sich auf die Ausführung von genau einem auftragspezifischen Arbeitsgang, dessen Bearbeitungscharakteristika durch die Attributausprägungen der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" übermittelt worden sind. Dieser Arbeitsgang wartet dann an der Bearbeitungsstation auf Einlastung⁸²). Der Bearbeitungsauftragsstatus nimmt die Ausprägungen "begonnen" und "erledigt" an, sobald die Arbeitsgangausführung an der Bearbeitungsstation begonnen bzw. abgeschlossen worden ist⁸³). Eine Kopie der Informationsmarke mit dieser Attributausprägung liegt auf einer Schnittstelle des Netzmoduls der Bearbeitungsstation bereit. Sie kann dort vom Netzmodul desjenigen Produktionsauftrags abgerufen werden, zu dessen Abwicklung der Arbeitsgang ausgeführt wurde.

Eine Informationsmarke der Sorte "bearbeitungsofferte" dient schließlich dazu, das später vorgestellte Netzmodul für die Zuordnung zwischen Bearbeitungsstationen und auszuführenden Arbeitsgängen über die zuordnungsrelevanten Stationseigenschaften in Kenntnis zu setzen. Ihre Attribute informieren über:

- den Namen der Bearbeitungsstation, die das Ausführen eines Arbeitsgangs anbietet;
- die Anzahl der freien Pufferplätze, die an der Bearbeitungsstation für die Aufnahme von zu bearbeitenden Werkstücken aktuell zur Verfügung stehen⁸⁴);
- die Bearbeitungskosten, die bei der Arbeitsgangausführung je Zeiteinheit anfallen (Bearbeitungskostensatz);
- die Zeitdauer, in der die geplante Verfügbarkeit der Bearbeitungsstation noch andauert⁸⁵).

Das Netzmodul der Bearbeitungsstation wird so erweitert, daß die Bearbeitungsstation nur dann eine Bearbeitungsofferte abgeben kann, wenn sich die Bearbeitungsstation für die Zuordnung eines weiteren Arbeitsgangs eignet. Dies ist der Fall, wenn die Bearbeitungsstation betriebsbereit ist und ihr Eingangspuffer freien Speicherplatz für mindestens ein Werkstück aufweist⁸⁶). Ob diese Voraussetzung erfüllt ist, wird durch eine Kopie der Zuordnungsmarke angezeigt⁸⁷). Es handelt sich um die letzte der vier Attributmarken, die oben für die Zustandsbeschreibung von Bearbeitungsstationen erwähnt wurden. Sie besitzt nur das eine Attribut der Sorte "zuordnungseignung", das die Ausprägungen "geeignet" oder "ungeeignet" anzunehmen vermag⁸⁸). Wenn die Bearbeitungsstation eine Bearbeitungsofferte ausspricht, wird eine Kopie der zugehörigen Informationsmarke auf der Schnittstelle "Bearbeitung_angeboten" abgelegt. Dort kann sie von dem oben erwähnten Netzmodul für die Zuordnung zwischen Bearbeitungsstationen und Arbeitsgängen abgerufen werden⁸⁹).

In der dritten Kernnetzerweiterung werden die voranstehend erläuterten Aspekte der Pufferverwaltung und Arbeitsgangeinlastung zusammengefaßt. Dadurch baut sie einen Ausschnitt aus der früher erfolgten zweiten Kernnetzerweiterung weiter aus. Darüber hinaus wird die Transition "einlastung_arbeitsgang" aus der zweiten Kernnetzerweiterung so modifiziert, daß sie auch synthetische Produktionen⁹⁰) abzudecken vermag⁹¹). Die derart verallgemeinerte Einlastungstransition wird als Transition "einlastung_arbeitsgang_mod" bezeichnet. Abb. 169 auf der nächsten Seite zeigt die Netzgraphik für das resultierende Teilnetzmodul. Auf der nachfolgenden Seite schließt sich die zugehörige Netzlegende an.

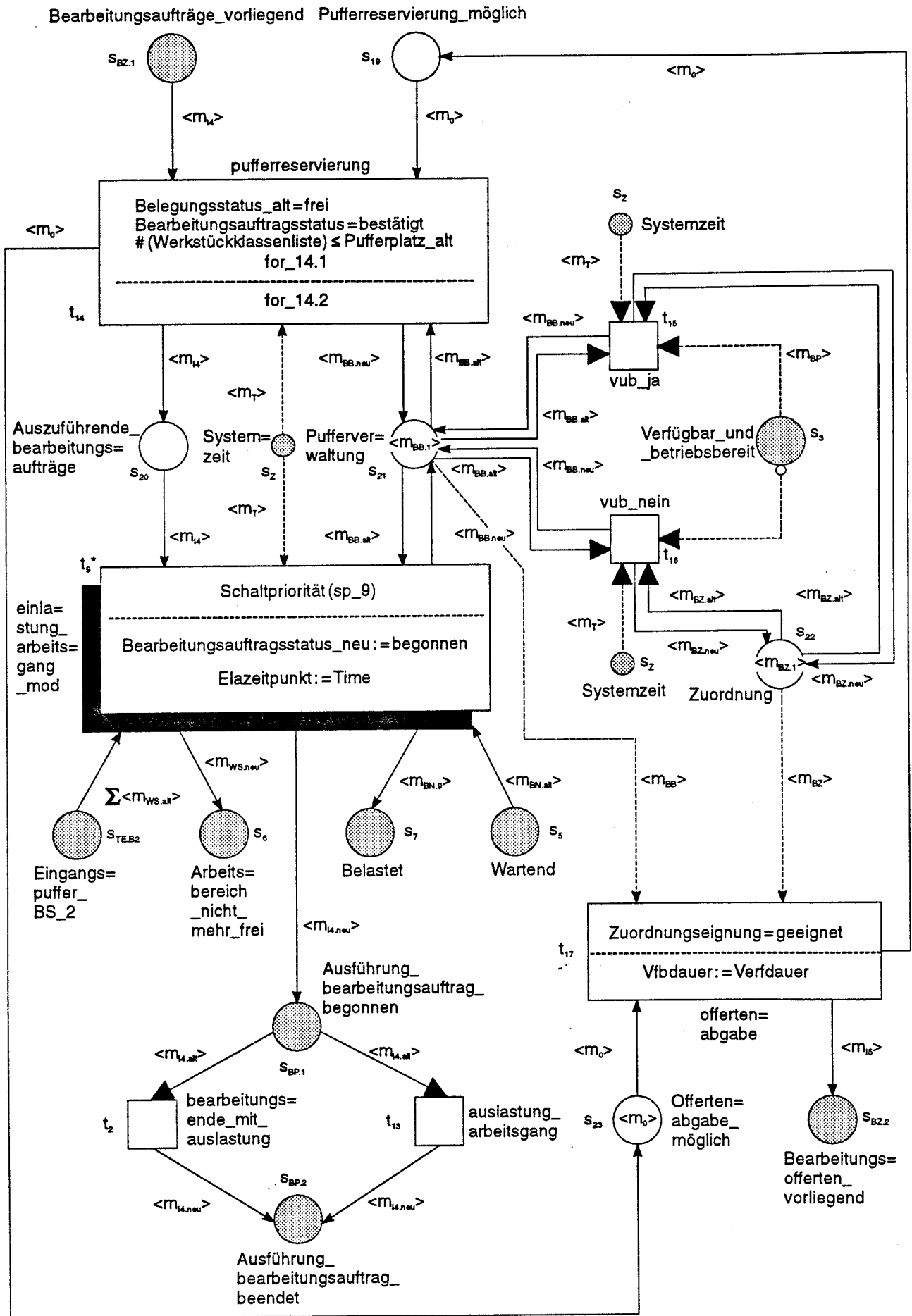


Abb. 169: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: dritte Kernnetzerweiterung

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

eingangspufferkapazität = 10 92)

ausgangspufferkapazität = 5

bearbeitungskostensatz = 7.75

sicherheitszuschlag= 0.20 93)

bearbeitungsstation_name = "BS_2" 94)

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
 "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
 "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
 "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
 "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
 "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
 "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
 "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
 "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
 "nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse: STRING

"WSK_1","WSK_2","WSK_3",
 "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:

→ OB_{werkstückklasse}

werkstückklassenliste = werkstückklasse*

auftragsname: STRING

"PA_1":

→ OB_{auftragsname}

95)

werkstückstatus: SYMBOL

nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,
 eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,
 auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,
 auf_transportmittelzuordnung_wartend,
 auf_transportmittelbeladung_wartend,
 transportiert,nachgelagert:

→ OB_{werkstückstatus}

96)

bearbeitungsstatus:	SYMBOL	
unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:		→ OB _{bearbeitungsstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING	
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname} ⁹⁷⁾
werkstücklagername:	STRING	
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}
auftragsname:	STRING	
rüztzustand:	SYMBOL	
gerüstet_0,gerüstet_1, gerüstet_2,gerüstet_3:		→ OB _{rüztzustand}
priorität:	INTEGER	
auftragswert:	REAL	
automatisierungsgrad:	SYMBOL	
vollautomatisch,bemannt:		→ OB _{automatisierungsgrad}
werkzeugklasse:	STRING	
"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4", "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":		→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugklassenliste =	werkzeugklasse*	
arbeitsgangname:	STRING	
belegungsstatus:	SYMBOL	
belegt,frei,nil:		→ OB _{belegungsstatus}
pufferplatz:	INTEGER	
zuordnungseignung:	SYMBOL	
geeignet,ungeeignet:		→ OB _{zuordnungseignung}
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_wspa(auftragsname); Zuordnung_wspa_ka()	
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()	
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()	
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt); Nachlagerende_ws_ka()	

```
werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsbeginn_ws_ka()
werkstück_bearbeitungsende =  Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsende_ws_ka()
werkstück_bearbeitungsdauer =  Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)
werkstück_transportdauer =    Transportdauer_ws(zeitdauer)
werkstück_lagerdauer =       Lagerdauer_ws(zeitdauer)
werkstück_wartedauer =       Wartedauer_ws(zeitdauer)
werkstück_durchlaufzeit =    Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)
werkstückzeiten =            Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                                       werkstück_bearbeitungsbeginn
                                       werkstück_bearbeitungsdauer
                                       werkstück_transportdauer
                                       werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                                       werkstück_durchlaufzeit
                                       werkstück_bearbeitungsende
                                       werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt =          Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
werkstückkapitalbindung =    Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten =  Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten =     Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten =   Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten =           Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
                                       werkstück_bearbeitungskosten
                                       werkstück_transportkosten
                                       werkstück_lagerkosten
                                       werkstück_kapitalbindungskosten
                                       werkstück_herstellkosten)

aktuelle_verfügbarkeitsdauer = Verfügbarkeit_akt(zeitdauer)
letzter_zeitpunkt =          Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
arbeitsgang_zugehörigkeit =  Zuordnung_agpa(auftragsname)
```

```

arbeitsgang_rüsterfordernis = Sollrüstung(rüstzustand)
arbeitsgang_ausführungsdauer = Ausführung_ag(zeitdauer)
arbeitsgang_werkzeuge = Werkzeuge_ag(werkzeugklassenliste)
arbeitsgang_werkstückeingang = Input(werkstückklassenliste)
arbeitsgang_werkstückausgang = Output(werkstückname werkstückklasse)
arbeitseingang_durchlaufzeiten = Durchlaufzeit_age(zeitdauer)
arbeitseingang_herstellkosten = Herstellung_age(kosten)
arbeitsgang_schlupfzeit = Schlupfzeit_ag(zeitdauer);
                             Schlupfzeit_ag_ka()

arbeitsganginfo = Arbeitsgang(arbeitsgangname arbeitsgang_zugehörigkeit
                             arbeitsgang_rüsterfordernis
                             arbeitsgang_ausführungsdauer
                             arbeitsgang_werkzeuge
                             arbeitsgang_werkstückeingang
                             arbeitsgang_werkstückausgang
                             automatisierungsgrad
                             arbeitseingang_durchlaufzeiten
                             arbeitseingang_herstellkosten
                             arbeitsgang_schlupfzeit
                             priorität auftragswert)

arbeitsganginfoliste = arbeitsganginfo*
arbeitsganginformationen = Informationen(arbeitsganginfoliste);
                             Informationen_ka()

verfügbarkeitsdauer = Verfügbarkeit(zeitdauer)
startzeitpunkt = Start(zeitpunkt);
                             Start_ka()

schlußzeitpunkt = Schluß(zeitpunkt);
                             Schluß_ka()

arbeitsgang_einlastungszeitpunkt = Einlastung_ag(zeitpunkt);
                             Einlastung_ag_ka()

arbeitsgang_rüsterfordernis = Sollrüstung(rüstzustand);
                             Sollrüstung_ka()

arbeitsgang_ausführungsdauer = Ausführung_ag(zeitdauer);
                             Ausführung_ag_ka()

arbeitsgang_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ag(kosten)

```

bearbeitungsauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)
bearbeitungsauftragsstatus:	SYMBOL
erteilt, bestätigt, begonnen, erledigt, abgebrochen:	→ OB _{bearbeitungsauftragsstatus}
«m ₀ » ≈ bas_marke =	Marke ₀ (), marke ₀ () = m ₀
«m _{BB} » ≈ pufferbelegung =	Puffermarke(belegungsstatus pufferplatz aktuelle_verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt arbeitsganginformationen)
«m _{BN} » ≈ realnutzung =	Nutzungsmarke(arbeitsgang_einlastungszeitpunkt arbeitsgang_rüsterfordernis arbeitsgang_ausführungsdauer startzeitpunkt schlußzeitpunkt arbeitsgang_bearbeitungskosten)
«m _{BP} » ≈ nutzungsoption =	Potentialmarke(verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt)
«m _{BZ} » ≈ eignung =	Zuordnungsmarke(zuordnungseignung)
«m _{I4} » ≈ bearbeitungsauftrag =	Informationsmarke_ba(bearbeitungsstationsname arbeitsganginfo bearbeitungsauftragserteilung bearbeitungsauftragsstatus)
«m _{I5} » ≈ bearbeitungsofferte =	Informationsmarke_bo(bearbeitungsstationsname pufferplatz bearbeitungskostensatz verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt)
«m _T » ≈ syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
«m _{WS} » ≈ werkstück =	Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückstatus bearbeitungsstatus werkstückzuordnung werkstückzeiten.werkstückkapitalbindung werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

S _{BP.1} :	Ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BP.1} = 1
S _{BP.2} :	Ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BP.2} = 1
S _{BZ.1} :	Bearbeitungsaufträge_vorliegend(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BZ.1} = ∞

- $s_{BZ.2}$: Bearbeitungsofferten_vorliegend(bearbeitungsofferte)
markenkapazität $_{BZ.2} = \omega$ 99)
- $s_{TE.B2}$: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität $_{TE.B2} = \text{eingangspufferkapazität}$
- s_2 : Systemzeit(syszeit)
markenkapazität $_2 = 1$
- s_3 : Verfügbar_und_betriebsbereit(nutzungsoption)
markenkapazität $_3 = 1$
- s_5 : Wartend(realnutzung)
markenkapazität $_5 = 1$
- s_6 : Arbeitsbereich_nicht_mehr_frei(werkstück)
markenkapazität $_6 = 1$
- s_7 : Belastet(realnutzung)
markenkapazität $_7 = 1$
- s_{19} : Pufferreservierung_möglich(bas_marke)
markenkapazität $_{19} = 1$
- s_{20} : Auszuführende_bearbeitungsaufträge(bearbeitungsauftrag)
markenkapazität $_{20} = \omega$
- s_{21} : Pufferverwaltung(pufferbelegung)
markenkapazität $_{21} = 1$
- s_{22} : Zuordnung(eignung)
markenkapazität $_{22} = 1$
- s_{23} : Offertenabgabe_möglich(bas_marke)
markenkapazität $_{23} = 1$

Transitionen/Transaktionen:

- t_2 : bearbeitungsende_mit_auslastung 100)
- $\langle m_{14.alt} \rangle = \text{ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname, zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname_ag, sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand), ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{werkzeuge_ag}(\text{Werkzeugklassenliste}), \text{input}(\text{Werkstückklassenliste}), \text{output}(\text{Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age}(\text{Durchlauf_ag}), \text{herstellung_age}(\text{Hstkosten_ag}), \text{Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Bearbeitungsauftragsstatus_alt}))$

Bearbeitungsauftragsstatus_neu := erledigt

$\langle m_{I4.neu} \rangle =$ ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

t_9^* : einlastung_arbeitsgang_mod

$\langle m_{I4.alt} \rangle =$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert), Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

$\langle m_{BB.alt} \rangle =$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_alt,Pufferplatz_alt, Aktuelle_Verfügbarkeitsdauer_alt,Letzte_ermittlung_alt, Arbeitsganginformationen_alt))

$\sum \langle m_{WS.alt} \rangle =$ eingangspuffer_BS_2(werkzeugmarke(Attributausprägungen_1_alt))
+ ... +
+ eingangspuffer_BS_2(werkzeugmarke(Attributausprägungen_K_alt))

$\langle m_{BN.alt} \rangle =$ wartend(nutzungsmarke(einlastung_ka(),sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(), bearbeitung_ag(Agakosten)))

$\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

schaltpriorität(sp_9)

Bearbeitungsauftragsstatus_neu := begonnen

Elazeitpunkt := Time

$\langle m_{I4.neu} \rangle =$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,

Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
 durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
 Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
 Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

<m_{BB.neu}> = pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_neu,
 Pufferplatz_neu,Aktuelle_Verfügbarkeitsdauer_neu,
 Letzte_ermittlung_neu,Arbeitsganginformationen_neu))

<m_{WS.neu}> = arbeitsbereich_nicht_mehr_frei(werkzeug-
 marke(Attributausprägungen_neu))

<m_{BN.neu}> = wartend(nutzungsmarke(einlastung_(Elazeitpunkt),
 sollrüstung_ka(Sollrüstzustand),ausführung_ag_ka(Agadauer),
 start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))

t₁₃: auslastung_arbeitsgang

101)

<m_{I4.alt}> = ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informationsmarke_ba(Bear-
 beitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
 zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand),
 ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
 input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
 Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
 durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
 Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
 auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

Bearbeitungsauftragsstatus_neu := erledigt

<m_{I4.neu}> = ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informationsmarke_ba(Bear-
 beitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
 zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand),
 ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
 input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
 Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
 durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
 Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
 auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

t_{14} : pufferreservierung

$\langle m_{14} \rangle =$ bearbeitungsaufträge_vorliegend(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag), sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{BB,alt} \rangle =$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_alt, Pufferplatz_alt, verfügbarkeit_akt(Verfdauer), letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt), informationen(Arbeitsganginfoliste_alt)))

$\langle m_0 \rangle =$ pufferreservierung_möglich(m_0)

$\langle m_T \rangle =$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Belegungsstatus_alt = frei

Bearbeitungsauftragsstatus = bestätigt

$\#(\text{Werkstückklassenliste}) \leq \text{Pufferplatz_alt}$

102)

for_14.1 : \Leftrightarrow Bearbeitungsstationsname = bearbeitungsstation_name

for_14.2 : \Leftrightarrow

Pufferplatz_neu := Pufferplatz_alt - $\#(\text{Werkstückklassenliste})$

\wedge Arbeitsganginfo := arbeitsgang(Arbeitsgangname, Arbeitsgangzugehörigkeit, sollrüstung(Rüstzustand), ausführung_ag(Agadauer), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert))

\wedge Arbeitsganginfoliste_neu := Arbeitsganginfoliste_alt \oplus [Arbeitsganginfo] 103)

\wedge (Pufferplatz_neu > 0) \rightarrow (Belegungsstatus_neu := frei)

\wedge (Pufferplatz_neu = 0) \rightarrow (Belegungsstatus_neu := belegt)

$\langle m_0 \rangle =$ offertenabgabe_möglich(m_0)

$\langle m_{14} \rangle =$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname, Arbeitsgangzugehörigkeit, sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{BB.neu} \rangle \approx$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_neu,Pufferplatz_neu,
verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_puf),
informationen(Arbeitsganginfoliste_neu)))

t₁₅: vub_ja

$\langle m_{BB.alt} \rangle \approx$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_alt,Pufferplatz,
verfügbarkeit_akt(Verfdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
informationen(Arbeitsganginfoliste)))

$\langle m_{BP} \rangle \approx$ verfügbar_und_betriebsbereit(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_pot)))

$\langle m_{BZ.alt} \rangle \approx$ zuordnung(zuordnungsmarke(Zuordnungseignung_alt))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Time > Emtzeitpunkt_alt

for_16 : \Leftrightarrow ...

Emtzeitpunkt_neu := Time

\wedge (Belegungsstatus_alt=belegt
 \rightarrow (Belegungsstatus_neu := belegt \wedge Zuordnungseignung_neu := ungeeignet))

\wedge (Belegungsstatus_alt=frei
 \rightarrow (Belegungsstatus_neu := frei \wedge Zuordnungseignung_neu := geeignet))

\wedge (((Belegungsstatus_alt = nil) \wedge (Pufferplatz > 0))
 \rightarrow (Belegungsstatus_neu := frei \wedge Zuordnungseignung_neu := geeignet))

\wedge (((Belegungsstatus_alt = nil) \wedge (Pufferplatz = 0))
 \rightarrow (Belegungsstatus_neu := belegt \wedge Zuordnungseignung_neu := ungeeignet))

\wedge Verfdauer_neu := Vfbdauer - (Time - Emtzeitpunkt_pot)

$\langle m_{BB.neu} \rangle \approx$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus,
Pufferplatz,verfügbarkeit_akt(Verfdauer_neu),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),informationen(Arbeitsganginfoliste)))

$\langle m_{BZ.neu} \rangle \approx$ zuordnung(zuordnungsmarke(Zuordnungseignung_neu))

t₁₆: vub_nein

$\langle m_{BB.alt} \rangle \approx$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_alt,Pufferplatz,
verfügbarkeit_akt(Verfdauer_alt),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
informationen(Arbeitsganginfoliste)))

$\langle m_{BZ.alt} \rangle \approx$ zuordnung(zuordnungsmarke(Zuordnungseignung_alt))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

FAK_{verfügbar_und_betriebsbereit} = {}

Time > Emtzeitpunkt_alt

```

for_16 := ...
    Belegungsstatus_neu := nil
    ^ Verfdauer_neu := 0
    ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
    ^ Zuordnungseignung_neu := ungeeignet

<mBB,neu> = pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_neu,Pufferplatz,
    verfügbarkeit_akt(Verfdauer_neu),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
    informationen(Arbeitsganginfoliste)))
<mBZ,neu> = zuordnung(zuordnungsmarke(Zuordnungseignung_neu))

```

t₁₇: offertenabgabe

```

<mBB> = pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus,Pufferplatz,
    verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt),
    informationen(Arbeitsganginfoliste)))
<mBZ> = zuordnung(zuordnungsmarke(Zuordnungseignung))
<m0> = offertenabgabe_möglich(m0)

Zuordnungseignung = geeignet
Vfbdauer := Verfdauer

<m0> = pufferreservierung_möglich(m0)
<m15> = bearbeitungsofferte_vorliegend(informationsmarke_bo(bearbeitungs-
    station_name,Pufferplatz,bearbeitungskostensatz,
    verfügbarkeit(Vfbdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt)))

```

Fakten:

```

<mBB.1> = fakt0(1,pufferverwaltung(puffermarke(nil,ingangspufferkapazität,
    verfügbarkeit_akt(0),letzte_ermittlung(0),informationen_ka()))))
<mBZ.1> = fakt0(1,zuordnung(zuordnungsmarke(ungeeignet)))
<m0> = fakt0(1,offertenabgabe_möglich(m0))

```

Allerdings läßt sich die Schaltvorschrift der verallgemeinerten Einlastungstransition zunächst nur unvollständig spezifizieren. Deshalb wird sie als eine Makrotransition behandelt. Sie wird in der Abb. 169 schattiert dargestellt. Die vorläufige Unvollständigkeit der Schaltvorschrift liegt darin begründet, daß die Zulässigkeit synthetischer Produktionen erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Denn bei der Einlastung eines Arbeitsgangs kann der Fall eintreten, daß *mehrere* Werkstücke als Bearbeitungsobjekte aus dem Eingangspuffer der Bearbeitungsstation abgezogen werden müssen. Diese Werkstückanzahl ist jedoch bei der Netzkonstruktion *unbekannt*. Sie steht erst dann fest, wenn ein Arbeitsgang eingelastet wird. Denn erst im Einlastungszeitpunkt gewährt die Informationsmarke der Sorte "bearbeitungsauftrag" Aufschluß darüber, welche - und damit auch: wie viele - Bearbeitungsobjekte für die Arbeitsgangausführung erforderlich sind. Daher muß sich die Schaltvorschrift der Transition "einlastung_arbeitsgang"

auf eine zunächst unbekannte, infolgedessen variable Anzahl von Werkstücken erstrecken. Zu diesem Zweck ist es notwendig, eine variable Anzahl von Kopien der Werkstückmarke von der Stelle "Eingangspuffer_BS_2" über die entsprechende Eingangskante der Transition "einlastung_arbeitsgang" abzuziehen¹⁰⁴). Die Kopienanzahl wird erst im Schaltzeitpunkt durch eine Attributausprägung der zuvor erwähnten Informationsmarke fixiert. Diese spezielle Art einer variablen, von Attributausprägungen abhängigen Kantengewichtung ist jedoch weder bei Synthetischen Netzen noch bei anderen Höheren Netzen vorgesehen¹⁰⁵). Daher wird die Makrotransition "einlastung_arbeitsgang_mod" noch im Rahmen der dritten Kernnetzerweiterung so verfeinert, daß die voranstehend skizzierten Schaltprobleme aufgelöst werden¹⁰⁶). Das Verfeinerungsergebnis stellt ein Subnetz dar, dessen Netzgraphik in Abb. 170 auf der nächsten Seite präsentiert wird. Seine Netzlegende folgt unmittelbar.

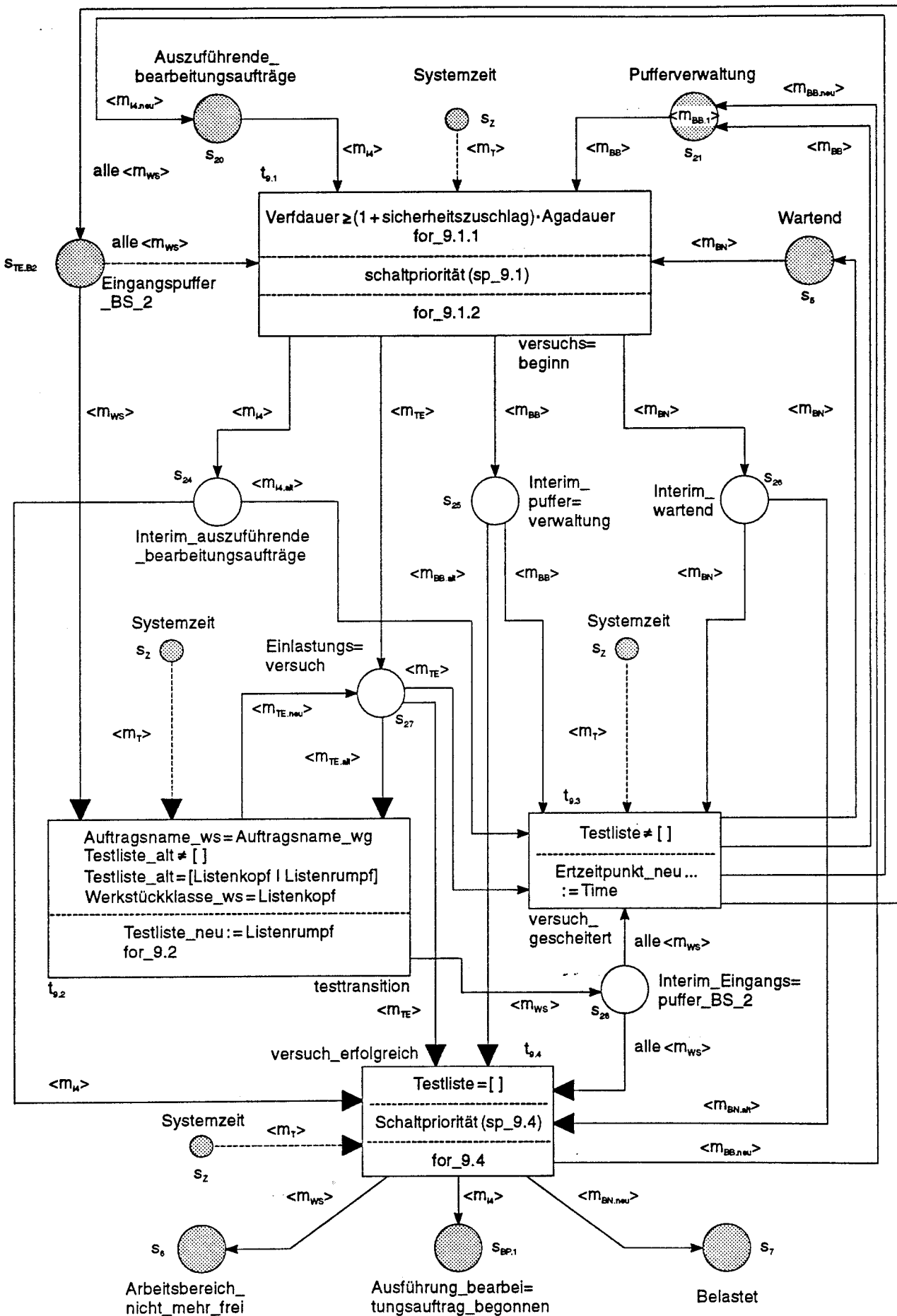


Abb. 170: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation:
Subnetz zur Verfeinerung der dritten Kernnetzerweiterung

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zinssatz = 0.06

zinszeitverrechnung = 0.0000019

eingangspufferkapazität = 10

bearbeitungsstation_name = "BS_2"

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
 "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
 "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
 "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
 "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
 "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
 "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
 "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
 "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
 "nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse: STRING

"WSK_1","WSK_2","WSK_3",
 "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:"

→ OB_{werkstückklasse}

auftragsname: STRING

"PA_1":

→ OB_{auftragsname}

107)

werkstückstatus: SYMBOL

nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,
 eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,
 auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,
 auf_transportmittelzuordnung_wartend,
 auf_transportmittelbeladung_wartend,
 transportiert,nachgelagert:

→ OB_{werkstückstatus}

108)

bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:		→	OB _{bearbeitungsstatus}
bearbeitungsstationsname:	STRING		
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→	OB _{bearbeitungsstationsname} 109)
werkstücklagername:	STRING		
"LS_1":		→	OB _{werkstücklagername}
auftragsname:	STRING		
rüztzustand:	SYMBOL		
gerüstet_0,gerüstet_1, gerüstet_2,gerüstet_3:		→	OB _{rüztzustand}
belegungsstatus:	SYMBOL		
belegt,frei,nil:		→	OB _{belegungsstatus}
pufferplatz:	INTEGER		
priorität:	INTEGER		
auftragswert:	REAL		
automatisierungsgrad:	SYMBOL		
vollautomatisch,bemannt:		→	OB _{automatisierungsgrad}
werkzeugklasse:	STRING		
"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4","WZK_5", "WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":		→	OB _{werkzeugklasse}
werkzeugklassenliste =	werkzeugklasse*		
arbeitsgangname:	STRING		
zuordnungseignung:	SYMBOL		
geeignet,ungeeignet:		→	OB _{zuordnungseignung}
bearbeitungsauftragsstatus:	SYMBOL		
erteilt,bestätigt,begonnen, erledigt,abgebrochen:		→	OB _{bearbeitungsauftragsstatus}
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_wspa(auftragsname); Zuordnung_wspa_ka()		
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()		
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()		

	arbeitseingang_herstellkosten arbeitsgang_schlupfzeit priorität auftragswert)
arbeitsganginfoliste =	arbeitsganginfo*
arbeitsganginformationen =	Informationen(arbeitsganginfoliste); Informationen_ka()
bearbeitungsauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)
«m _{BB} » ≈ pufferbelegung =	Puffermarke(belegungsstatus pufferplatz aktuelle_verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt arbeitsganginformationen)
«m _{BN} » ≈ realnutzung =	Nutzungsmarke(arbeitsgang_einlastungszeitpunkt arbeitsgang_rüsterfordernis arbeitsgang_ausführungsdauer startzeitpunkt schlußzeitpunkt arbeitsgang_bearbeitungskosten)
«m _{BZ} » ≈ eignung =	Zuordnungsmarke(zuordnungseignung)
«m _{I4} » ≈ bearbeitungsauftrag =	Informationsmarke_ba(bearbeitungsstationsname arbeitsganginfo bearbeitungsauftragserteilung bearbeitungsauftragsstatus)
«m _T » ≈ syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
«m _{TE} » ≈ test =	Testmarke(arbeitsgang_zugehörigkeit testliste werkstückeigenschaften)
«m _{WS} » ≈ werkstück =	Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückstatus bearbeitungsstatus werkstückzuordnung werkstückzeiten werkstückkapitalbindung werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

s _{BP.1} :	Ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BP.1} = 1
s _{TE.B2} :	Eingangspuffer_BS_2(werkstück) markenkapazität _{TE.B2} = eingangspufferkapazität
s _Z :	Systemzeit(syszeit) markenkapazität _Z = 1

- s_5 : Wartend(realnutzung)
markenkapazität₅ = 1
- s_6 : Arbeitsbereich_nicht_mehr_frei(werkstück)
markenkapazität₆ = 1
- s_7 : Belastet(realnutzung)
markenkapazität₇ = 1
- s_{20} : Auszuführende_bearbeitungsaufträge(bearbeitungsauftrag)
markenkapazität₂₀ = ω
- s_{21} : Pufferverwaltung(pufferbelegung)
markenkapazität₂₁ = 1
- s_{24} : Interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge(bearbeitungsauftrag)
markenkapazität₂₄ = 1
- s_{25} : Interim_pufferverwaltung(pufferbelegung)
markenkapazität₂₅ = 1
- s_{26} : Interim_wartend(realnutzung)
markenkapazität₂₆ = 1
- s_{27} : Einlastungsversuch(test)
markenkapazität₂₇ = 1
- s_{28} : Interim_eingangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität₂₈ = eingangspufferkapazität

Transitionen/Transaktionen:

- $t_{9,1}$: versuchsbeginn
- $\langle m_{I4} \rangle =$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste_ag),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus)))
- $\langle m_{BB} \rangle =$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus,Pufferplatz,
verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_puf),
informationen(Arbeitsganginfoliste))
- $\langle m_{BN} \rangle =$ wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(),
ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$
alle $\langle m_{WS} \rangle = \sum \text{eingangspuffer_BS_2}(\text{Werkstück}): \dots$ 110)
fakt(1, eingangspuffer_BS_2(Werkstück))

Verfdauer $\geq (1 + \text{sicherheitszuschlag}) \cdot \text{Agadauer}$
for_9.1.1 : \Leftrightarrow ...
((integer(K) \wedge K \geq 1 \wedge ...
(K-1) \cdot 1440 + 840 \leq Time < (K-1) \cdot 1440 + 1440)
 \rightarrow Automatisierungsgrad = vollautomatisch)
 \wedge Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: fakt(1,
auszuführende_bearbeitungsaufträge(informations-
marke_ba(bearbeitungsstation_name, arbeitsgang(_____, _____,
Automatisierungsgrad, _____), auftragserteilung(Ertzeitpunkte),
bestätigt)))} \wedge #(Werkstückklassenliste) \leq #(\sum Werkstück: ...
fakt(1, eingangspuffer_BS_2(Werkstück)))
 \wedge Werkstück = werkstückmarke(_____, zugehörig-
keit_ws(Auftragsname_ws), _____, _____)
 \wedge Auftragsname_ws = Auftragsname_ag)

schaltpriorität(sp_9.1)
for_9.1.2 : \Leftrightarrow ...
Volbeginn := Time
 \wedge Beabeginn := Time
 \wedge Beadauer := 0
 \wedge Tptdauer := 0
 \wedge Wrtdauer := 0
 \wedge Durchlauf_ws := 0
 \wedge Emtzeitpunkt_ws := Time
 \wedge Kapitalbindungsbetrag := 0
 \wedge Bstkosten := 0
 \wedge Beakosten := 0
 \wedge Tptkosten := 0
 \wedge Lagkosten := 0
 \wedge Kapkosten := 0
 \wedge Hstkosten_ws := 0

$\langle m_{I4} \rangle = \text{interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bear-}$
beitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname_ag), sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname,
Werkstückklasse), Automatisierungsgrad,

durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
 Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
 auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus)))

<m_{TE}> = einlastungsversuch(testmarke(zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),
 testen(Testliste),eigenschaften(zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(Volbeginn),
 bearbeitungsbeginn_ws(Beabeginn),bearbeitungsdauer_ws(Beadauer),
 transportdauer_ws(Tptdauer),wartedauer_ws(Wrtdauer),
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_ws),bearbeitungsende_ka(),nachlagerende_ka()),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_ws),
 Kapitalbindungsbetrag),kosten_ws(bereitstellung_ws(Bstkosten),
 bearbeitung_ws(Beakosten),transport_ws(Tptkosten),lagerung_ws(Lagkosten),
 kapitalbindung_ws(Kapkosten),herstellung_ws(Hstkosten_ws))))))

<m_{BB}> = interim_pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus,Pufferplatz,
 verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_puf),
 informationen(Arbeitsganginfoliste)))

<m_{BN}> = interim_wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(),
 ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))

t_{9,2}: testtransition

<m_{WS}> = eingangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse_ws,zugehörigkeit_ws(Auftragsname_ws),
 Werkstückstatus,Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(Volbeginn_ws),
 bearbeitungsbeginn_ws(Beabeginn_ws),bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_ws),
 transportdauer_ws(Tptdauer_ws),wartedauer_ws(Wrtdauer_ws),
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_ws),bearbeitungsende_ka(),
 nachlagerende_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_ws),
 Kapitalbindungsbetrag_ws),kosten_ws(bereitstellung_ws(Bstkosten_ws),
 bearbeitung_ws(Beakosten_ws),transport_ws(Tptkosten_ws),
 lagerung_ws(Lagkosten_ws),kapitalbindung_ws(Kapkosten_ws),
 herstellung_ws(Hstkosten_ws))))))

<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

<m_{TE.alt}> = einlastungsversuch(testmarke(zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),
 testen(Testliste_alt)eigenschaften(zeiten_ws(vorlager-
 beginn_ws(Volbeginn_alt),bearbeitungsbeginn_ws(Beabeginn_alt),
 bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_alt),transportdauer_ws(Tptdauer_alt),
 wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
 bearbeitungsende_ka(),nachlagerende_ka()),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
 Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(bereitstellung_ws(Bstkosten),

```

bearbeitung_ws(Beakosten_alt),transport_ws(Tptkosten_alt),
lagerung_ws(Lagkosten_alt),kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))))))

```

```
Auftragsname_ws = Auftragsname_ag
```

```
Testliste_alt ≠ []
```

```
Testliste_alt = [Listenkopf | Listenrumpf] 111)
```

```
Werkstückklasse_ws = Listenkopf
```

```
Testliste_neu := Listenrumpf
```

```
for_9.2 :⇔ ... 112)
```

```
Volbeginn_neu := min {Volbeginn_ws,Volbeginn_alt}
```

```
^ Beabeginn_neu := min {Beabeginn_ws,Beabeginn_alt}
```

```
^ Beadauer_neu := Beadauer_ws + Beadauer_alt
```

```
^ Tptdauer_neu := Tptdauer_ws + Tptdauer_alt
```

```
^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_ws
```

```
^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_ws + Dauer + Wrtdauer_alt
```

```
^ Durchlauf_neu := Durchlauf_ws + Dauer + Durchlauf_alt
```

```
^ Emtzeitpunkt_neu := Time
```

```
^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_ws • Dauer
```

```
^ Kapitalbindungsbetrag_neu := Kapitalbindungsbetrag_ws + ...
    Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
```

```
^ Beakosten_neu := Beakosten_ws + Beakosten_alt
```

```
^ Tptkosten_neu := Tptkosten_ws + Tptkosten_alt
```

```
^ Lagkosten_neu := Lagkosten_ws + Lagkosten_alt
```

```
^ Kapitalkostenzunahme := ...
```

```
    Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
```

```
^ Kapkosten_neu := Kapkosten_ws + Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
```

```
^ Hstkosten_neu := Hstkosten_ws + Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
```

```

<mTE.neu> ≈ einlastungsversuch(testmarke(zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),
testen(Werkstückklassenliste_neu),zeiten_ws(vorlager-
beginn_ws(Volbeginn_neu),bearbeitungsbeginn_ws(Beabeginn_neu),
bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_neu),transportdauer_ws(Tptdauer_neu),
wartedauer_ws(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
bearbeitungsende_ka(),nachlagerende_ka()),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(bereitstellung_ws(Bstkosten),
bearbeitung_ws(Beakosten_neu),transport_ws(Tptkosten_neu),
lagerung_ws(Lagkosten_neu),kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
herstellung_ws(Hstkosten_neu))))))

```

$\langle m_{WS} \rangle \approx \text{interim_eingangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 $\text{Werkstückklasse_ws}, \text{zugehörigkeit_ws}(\text{Auftragsname_ws},$
 $\text{Werkstückstatus}, \text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung},$
 $\text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(\text{Volbeginn_ws}),$
 $\text{bearbeitungsbeginn_ws}(\text{Beabeginn_ws}), \text{bearbeitungsdauer_ws}(\text{Beadauer_ws}),$
 $\text{transportdauer_ws}(\text{Tptdauer_ws}), \text{wartedauer_ws}(\text{Wrtdauer_ws}),$
 $\text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_ws}), \text{bearbeitungsende_ka}(), \text{nachlagerende_ka}(),$
 $\text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_ws}),$
 $\text{Kapitalbindungsbetrag_ws}), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(\text{Bstkosten_ws}),$
 $\text{bearbeitung_ws}(\text{Beakosten_ws}), \text{transport_ws}(\text{Tptkosten_ws}),$
 $\text{lagerung_ws}(\text{Lagkosten_ws}), \text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_ws}),$
 $\text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_ws}))))$

$t_{9,3}$: versuch_gescheitert

$\langle m_{TE} \rangle \approx \text{einlastungsversuch}(\text{testmarke}(\text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname_ag}),$
 $\text{testen}(\text{Testliste}), \text{Werkstückeigenschaften})$

$\langle m_{I4,alt} \rangle \approx \text{interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bear-}$
 $\text{beitungsstationsname}, \text{arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname},$
 $\text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname_ag}), \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand}),$
 $\text{ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{werkzeuge_ag}(\text{Werkzeugklassenliste}),$
 $\text{input}(\text{Werkstückklassenliste_ag}), \text{output}(\text{Werkstückname_ag},$
 $\text{Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad}, \text{durchlaufzeit_age}(\text{Durchlauf_ag}),$
 $\text{herstellung_age}(\text{Hstkosten_ag}), \text{Arbeitsgang_schlupfzeit}, \text{Priorität},$
 $\text{Auftragswert}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt_alt}), \text{Bearbeitungsauftragsstatus}))$

$\langle m_{BB} \rangle \approx \text{interim_pufferverwaltung}(\text{puffermarke}(\text{Belegungsstatus},$
 $\text{Pufferplatz}, \text{verfügbarkeit_akt}(\text{Verfdauer}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_puf}),$
 $\text{informationen}(\text{Arbeitsganginfoliste}))$

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{interim_wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag_ka}(), \text{sollrüstung_ka}(),$
 $\text{ausführung_ag_ka}(), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten}))$

$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$\text{alle} \langle m_{WS} \rangle \approx \sum \text{interim_eingangspuffer_BS_2}(\text{Werkstück}): \dots$
 $\text{fakt}(1, \text{interim_eingangspuffer_BS_2}(\text{Werkstück}))$

Testliste $\neq []$

Ertzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BN} \rangle \approx \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag_ka}(), \text{sollrüstung_ka}(),$
 $\text{ausführung_ag_ka}(), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten}))$

$\langle m_{BB} \rangle \approx \text{pufferverwaltung}(\text{puffermarke}(\text{Belegungsstatus}, \text{Pufferplatz},$
 $\text{verfügbarkeit_akt}(\text{Verfdauer}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_puf}),$
 $\text{informationen}(\text{Arbeitsganginfoliste}))$

$\langle m_{I4,neu} \rangle \approx$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste_ag),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität, Auftragswert),auftragserteilung(Ertzeitpunkt_neu), Bearbeitungsauftragsstatus)))

alle $\langle m_{WS} \rangle \approx \sum$ ingangspuffer_BS_2(Werkstück): ...
fakt(1,ingangspuffer_BS_2(Werkstück))

$t_{9,4}$: versuch_erfolgreich

$\langle m_{I4} \rangle \approx$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste_ag),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt_neu),Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

$\langle m_{TE} \rangle \approx$ einlastungsversuch(testmarke(zuordnung_agpa(Auftragsname_ag), testen(Testliste),eigenschaften(zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(Volbeginn), bearbeitungsbeginn_ws(Beabeginn),bearbeitungsdauer_ws(Beadauer), transportdauer_ws(Tptdauer),wartedauer_ws(Wrtdauer), durchlaufzeit_ws(Durchlauf_ws),bearbeitungsende_ka(),nachlagerende_ka()), kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_ws),Kapitalbindungsbetrag), kosten_ws(bereitstellung_ws(Bstkosten),bearbeitung_ws(Beakosten), transport_ws(Tptkosten),lagerung_ws(Lagkosten), kapitalbindung_ws(Kapkosten),herstellung_ws(Hstkosten_ws))))))

alle $\langle m_{WS} \rangle \approx \sum$ interim_ingangspuffer_BS_2(Werkstück): ...
fakt(1,interim_ingangspuffer_BS_2(Werkstück))

$\langle m_{BN,alt} \rangle \approx$ interim_wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))

$\langle m_{BB,alt} \rangle \approx$ interim_pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_alt, Pufferplatz_alt,verfügbarkeitsdauer_akt(Verfdauer), letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_puf),informationen(Arbeitsganginfoliste_alt)))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Testliste = []

```

auftragserteilung(Ertzeitpunkt_neu),Bearbeitungsauftragsstatus_neu))
<mBN,neu> = belastet(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elazeitpunkt),
sollrüstung(Sollrüstzustand),ausführung_ag(Agadauer),
start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))
<mBB,neu> = interim_pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_neu,
Pufferplatz_neu,verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermitt-
lung(Ertzeitpunkt_puf),informationen(Arbeitsganginfoliste_neu)))

```

114)

Schaltprioritäten: sp_{7.1} > sp_{9.1}
sp_{7.1} > sp_{9.4}

Fakten:

```

<mBB.1> = fakt0(1,pufferverwaltung(puffermarke(nil,ingangspufferkapazität,
verfügbarkeit_akt(0),letzte_ermittlung(0),informationen_ka()))

```

Bisher wurde bei der Einlastung und Ausführung von Arbeitsgängen an einer Bearbeitungsstation lediglich berücksichtigt, ob die Bearbeitungsstation betriebsbereit ist und ob die erforderlichen Werkstücke (Bearbeitungsobjekte) im Eingangspuffer bereitstehen. Dagegen blieben Werkzeuge und Arbeitskräfte außer acht. Diese Modellierungslücke wird durch die vierte Kernnetzerweiterung geschlossen. Sie ergänzt die Transitionen "pufferreservierung" (t_{14}) und "versuchsbeginn" ($t_{9,1}$) so, daß die beiden vorgenannten Faktorarten berücksichtigt werden. Zugleich wird das Netzmodul der Bearbeitungsstation über Schnittstellen mit dem bereits präsentierten Arbeitskräftenetz und dem später vorgestellten Netzmodul für das zentrale Werkzeugmagazin verknüpft.

Einerseits wird bei der Pufferreservierung für vorliegende Bearbeitungsaufträge überprüft, ob die Werkzeuge, die für die Ausführung des jeweils betrachteten Arbeitsgangs benötigt werden, an der Bearbeitungsstation tatsächlich zur Verfügung stehen¹¹⁵). Sofern das nicht der Fall ist, wird ein entsprechender Werkzeugbedarf angezeigt. Dann lassen sich Lageraufträge für die benötigten Werkzeuge auslösen¹¹⁶). Mit ihrer Hilfe werden die benötigten, aber nicht vorhandenen Werkzeuge vom zentralen Werkzeugmagazin abgerufen¹¹⁷). Sobald die angeforderten Werkzeuge eintreffen, werden sie am Werkstückpuffer der Bearbeitungsstation vom anliefernden Transportmittel übernommen und in den lokalen Werkzeugspeicher¹¹⁸) der Bearbeitungsstation eingestellt¹¹⁹). Anschließend wird die Einlastung solcher Arbeitsgänge versucht, für die alle erforderlichen Werkzeuge im lokalen Werkzeugspeicher der Bearbeitungsstation tatsächlich bereitstehen¹²⁰).

Andererseits findet eine zweigeteilte Untersuchung statt, ob die Arbeitskräfte anwesend sind, die für die Bedienung der Bearbeitungsstation benötigt werden. Zunächst wird geprüft, ob es sich entweder um eine bemannte Früh- oder Spätschicht oder aber um eine unbemannte Nachtschicht handelt. Im letzten Fall erfolgt kein Arbeitskräfteeinsatz an der Bearbeitungsstation. Dann lassen sich aber nur solche Arbeitsgänge an der Bearbeitungsstation einlasten, deren vollautomatische Ausführbarkeit feststeht. Bei Früh- und Spätschichten können dagegen Arbeitsgänge sowohl vollautomatisch als auch bemannt ausgeführt werden. Eine Arbeitskraft wird durch das obligatorische Schalten der Transition "arbeitskraftanforderung" zu der Bearbeitungsstation gerufen, falls sich an der Bearbeitungsstation keine Arbeitskraft aufhält, obwohl mindestens ein Arbeitsgang aus dem Einflußbereich der Bearbeitungsstation nur bemannt ausgeführt werden kann¹²¹). Dagegen schaltet die ebenso obligatorische Transition "arbeitskraftüber-

flüssig", falls sich alle Arbeitsgänge aus dem Einflußbereich der Bearbeitungsstation vollautomatisch ausführen lassen¹²²⁾.

Abb. 171 auf der nächsten Seite zeigt die Netzgraphik, die aus der Beachtung von Werkzeugen und Arbeitskräften bei der Arbeitsgangeinlastung resultiert. Es folgt die zugehörige Netzlegende.

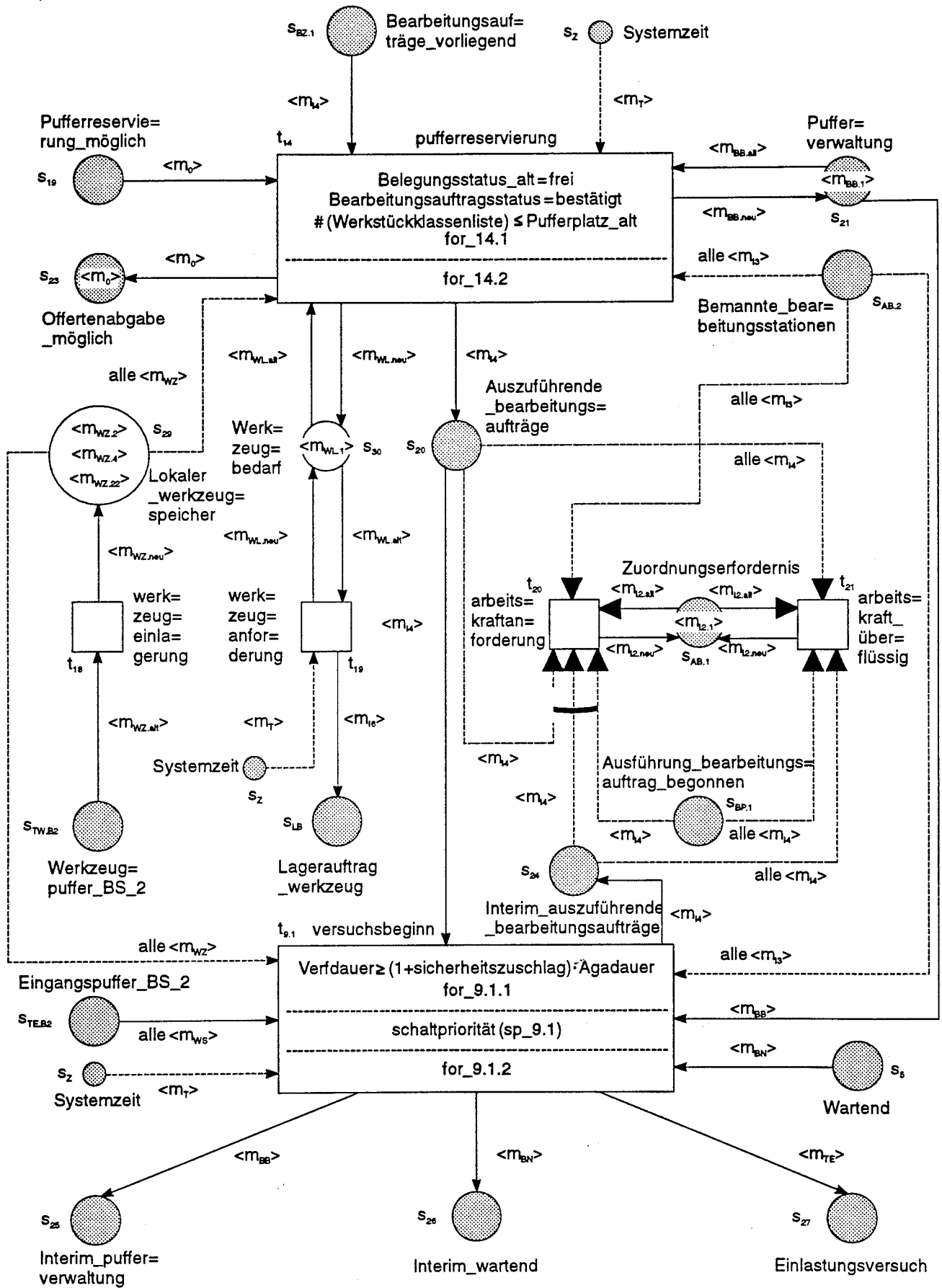


Abb. 171: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: vierte Kernnetzerweiterung

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zinssatz = 0.06

zinszeitverrechnung = 0.0000019

eingangspufferkapazität = 10

bearbeitungsstation_name = "BS_2"

lagerstation_name = "LS_2"

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
 "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
 "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
 "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
 "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
 "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
 "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
 "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
 "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
 "nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse: STRING

"WSK_1","WSK_2","WSK_3",
 "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:

→ OB_{werkstückklasse}

auftragsname: STRING

"PA_1":

→ OB_{auftragsname}

123)

werkstückstatus: SYMBOL

nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,
 eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,
 auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,
 auf_transportmittelzuordnung_wartend,
 auf_transportmittelbeladung_wartend,
 transportiert,nachgelagert:

→ OB_{werkstückstatus}

124)

bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:		→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname}	125)
werkstücklagername:	STRING		
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}	
werkzeugname:	STRING		
"WZ_1","WZ_2","WZ_3","WZ_4","WZ_5", "WZ_6","WZ_7","WZ_8","WZ_9","WZ_10", "WZ_11","WZ_12","WZ_13","WZ_14","WZ_15", "WZ_16","WZ_17","WZ_18","WZ_19","WZ_20", "WZ_21","WZ_22","WZ_23","WZ_24","WZ_25", "WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":		→ OB _{werkzeugname}	
werkzeugklasse:	STRING		
"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4", "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":		→ OB _{werkzeugklasse}	
werkzeugstatus:	SYMBOL		
gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:		→ OB _{werkzeugstatus}	
werkzeuglagername:	STRING		
"LS_2":		→ OB _{werkzeuglagername}	
rüstzustand:	SYMBOL		
gerüstet_0,gerüstet_1, gerüstet_2,gerüstet_3:		→ OB _{rüstzustand}	
belegungsstatus:	SYMBOL		
belegt,frei,nil:		→ OB _{belegungsstatus}	
pufferplatz:	INTEGER		
auftragsname:	STRING		
priorität:	INTEGER		
auftragswert:	REAL		
automatisierungsgrad:	SYMBOL		
vollautomatisch,bemannt:		→ OB _{automatisierungsgrad}	
arbeitsgangname:	STRING		

zuordnungsstatus:	SYMBOL	
bedienung_überflüssig,		
bedienung_erforderlich,		
arbeitskraft_zugeordnet:		→ OB _{bedarfsstatus}
arbeitskraftname:	STRING	
"AK_1","AK_2","AK_3",		
"AK_4","AK_5","AK_6":		→ OB _{arbeitskraftname}
bearbeitungsauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)	
bearbeitungsauftragsstatus:	SYMBOL	
erteilt,bestätigt,begonnen,		
erledigt,abgebrochen:		→ OB _{bearbeitungsauftragsstatus}
lagerauftragsart:	SYMBOL	
zwischenlagerung,		
auslagerung:		→ OB _{lagerauftragsart}
lagerauftragsstatus:	SYMBOL	
erteilt,erledigt:		→ OB _{lagerauftragsstatus}
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_ws(auftragsname); Zuordnung_ws_ka()	
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()	
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()	
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt); Nachlagerende_ws_ka()	
werkstück_bearbeitungsbeginn =	Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsbeginn_ws_ka()	
werkstück_bearbeitungsende =	Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsende_ws_ka()	
werkstück_bearbeitungsdauer =	Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)	
werkstück_transportdauer =	Transportdauer_ws(zeitdauer)	
werkstück_lagerdauer =	Lagerdauer_ws(zeitdauer)	
werkstück_wartedauer =	Wartedauer_ws(zeitdauer)	
werkstück_durchlaufzeit =	Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)	

werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
werkstück_bearbeitungsbeginn
werkstück_bearbeitungsdauer
werkstück_transportdauer
werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
werkstück_durchlaufzeit
werkstück_bearbeitungsende
werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)

werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)

werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)

werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)

werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)

werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)

werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)

werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
werkstück_bearbeitungskosten
werkstück_transportkosten
werkstück_lagerkosten
werkstück_kapitalbindungskosten
werkstück_herstellkosten)

werkzeugzuordnung = Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname);
Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)

startzeitpunkt = Start(zeitpunkt);
Start_ka()

schlußzeitpunkt = Schluß(zeitpunkt);
Schluß_ka()

arbeitsgang_einlastungszeitpunkt = Einlastung_ag(zeitpunkt);
Einlastung_ag_ka()

arbeitsgang_rüsterfordernis = Sollrüstung(rüsterzustand);
Sollrüstung_ka()

arbeitsgang_ausführungsdauer = Ausführung_ag(zeitdauer);
Ausführung_ag_ka()

arbeitsgang_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ag(kosten)

«m _{BB} »	= pufferbelegung =	Puffermarke(belegungsstatus pufferplatz aktuelle_verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt arbeitsganginformationen)	
«m _{BN} »	= realnutzung =	Nutzungsmarke(arbeitsgang_einlastungszeitpunkt arbeitsgang_rüsterfordernis arbeitsgang_ausführungsdauer startzeitpunkt schlußzeitpunkt arbeitsgang_bearbeitungskosten)	
«m _{I2} »	= bedienungsbedarf =	Informationsmarke_bb(bearbeitungsstationsname zuordnungsstatus)	
«m _{I3} »	= arbeitskrafteinsatz =	Informationsmarke_ae(arbeitskraftname bearbeitungsstationsname)	
«m _{I4} »	= bearbeitungsauftrag =	Informationsmarke_ba(bearbeitungsstationsname arbeitsganginfo bearbeitungsauftragserteilung bearbeitungsauftragsstatus)	
«m _{I6} »	= werkzeuglagerauftrag =	Informationsmarke_wzl(werkzeuglagername werkzeuginfo lagerauftragserteilung lagerauftragsart lagerauftragsstatus)	126)
«m _T »	= syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)	
«m _{TE} »	= test =	Testmarke(arbeitsgang_zugehörigkeit testliste werkstückeigenschaften)	
«m _{WL} »	= werkzeugklassenliste =	werkzeugklasse*	
«m _{WS} »	= werkstück =	Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückstatus bearbeitungsstatus werkstückzuordnung werkstückzeiten werkstückkapitalbindung werkstückkosten)	
«m _{WZ} »	= werkzeug =	Werkzeugmarke(werkzeugname werkzeugklasse werkzeugstatus werkzeugzuordnung)	

Stellen/Prädikatssymbole:

s _{AB.1} :	Zuordnungserfordernis(zuordnungsstatus) markenkapazität _{AB.1} = 1
s _{AB.2} :	Bemannte_bearbeitungsstationen(arbeitskrafteinsatz) markenkapazität _{AB.2} = 1
s _{BP.1} :	Ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BP.1} = 1

- $s_{BZ.1}$: Bearbeitungsaufträge_vorliegend(bearbeitungsauftrag)
markenkapazität $_{BZ.1} = \omega$
- s_{LB} : Lagerauftrag_werkzeug(werkzeuglagerauftrag)
markenkapazität $_{LB} = 10$
- $s_{TE.B2}$: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität $_{TE.B2} = \text{eingangspufferkapazität}$
- $s_{TW.B2}$: Werkzeugpuffer_BS_2(werkzeug)
markenkapazität $_{28} = 1$
- s_Z : Systemzeit(syszeit)
markenkapazität $_Z = 1$
- s_5 : Wartend(realnutzung)
markenkapazität $_5 = 1$
- s_{19} : Pufferreservierung_möglich(bas_marke)
markenkapazität $_{19} = 1$
- s_{20} : Auszuführende_bearbeitungsaufträge(bearbeitungsauftrag)
markenkapazität $_{20} = \omega$
- s_{21} : Pufferverwaltung(pufferbelegung)
markenkapazität $_{21} = 1$
- s_{23} : Offertenabgabe_möglich(bas_marke)
markenkapazität $_{23} = 1$
- s_{24} : Interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge(bearbeitungsauftrag)
markenkapazität $_{24} = 1$
- s_{25} : Interim_pufferverwaltung(pufferbelegung)
markenkapazität $_{25} = 1$
- s_{26} : Interim_wartend(realnutzung)
markenkapazität $_{26} = 1$
- s_{27} : Einlastungsversuch(test)
markenkapazität $_{27} = 1$
- s_{29} : Lokaler_werkzeugspeicher(werkzeug)
markenkapazität $_{29} = 5$
- s_{30} : Werkzeugbedarf(werkzeugklassenliste)
markenkapazität $_{31} = 1$

Transitionen/Transaktionen:

$t_{9,1}$: versuchsbeginn

$\langle m_{I4} \rangle \approx$ auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste_ag),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus)))

$\langle m_{BB} \rangle \approx$ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus,Pufferplatz, verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_puf), informationen(Arbeitsganginfoliste)))

$\langle m_{BN} \rangle \approx$ wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

alle $\langle m_{WS} \rangle \approx \sum$ eingangspuffer_BS_2(Werkstück): ...
fakt(1,ingangspuffer_BS_2(Werkstück))

alle $\langle m_{WZ} \rangle \approx \sum$ lokaler_werkzeugspeicher(Werkzeug): ... 127)
fakt(1,lokaler_werkzeugspeicher(Werkzeug))

alle $\langle m_{I3} \rangle \approx \sum$ bemannte_bearbeitungsstationen(Arbeitskrafteinsatz): ...
fakt(1,bemannte_bearbeitungsstationen(informationsmarke_ae(Arbeitskraftname,Bearbeitungsstationsname))) 128)

Verfdauer $\geq (1 + \text{sicherheitszuschlag}) \cdot \text{Agadauer}$

for_9.1.1 : \Leftrightarrow ...

Bearbeitungsstationsname = bearbeitungsstation_name

$\wedge ((\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge \dots$

$(K-1) \cdot 1440 + 840 \leq \text{Time} < (K-1) \cdot 1440 + 1440)$

\rightarrow Automatisierungsgrad = vollautomatisch)

\wedge Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: fakt(1,bearbeitungsaufträge_vorlegend(informationsmarke_ba(bearbeitungsstation_name, arbeitsgang(_____,Automatisierungsgrad,_____), auftragserteilung(Ertzeitpunkte),bestätigt)))}

$\wedge \#(\text{Werkstückklassenliste}) \leq \#(\sum \text{Werkstück: ...$

fakt(1,ingangspuffer_BS_2(Werkstück)))

\wedge Werkstück = werkstückmarke(_____,zugehörigkeit_ws(Auftragsname_ws),_____,_____)

\wedge Auftragsname_ws = Auftragsname_ag)

$$\begin{aligned}
& \wedge (\#(\text{FAK}_{\text{Lokaler_werkzeugspeicher}}) = K \wedge K \geq 1 \quad 129) \\
& \quad \wedge (\text{FAK}_{\text{Lokaler_werkzeugspeicher}} = \text{werkzeugmarke}(_, \text{Werkzeugklasse}_1, _, _), \\
& \quad \quad + \dots + \\
& \quad \quad + \text{werkzeugmarke}(_, \text{Werkzeugklasse}_K, _, _)) \\
& \quad \rightarrow \text{Werkzeugklassen_vorhanden} = \dots \\
& \quad \quad [\text{Werkzeugklasse}_1, \dots, \text{Werkzeugklasse}_K] \\
& \wedge (\#(\text{FAK}_{\text{Lokaler_werkzeugspeicher}}) = 0 \rightarrow \text{Werkzeugklassen_vorhanden} := []) \\
& \wedge (\text{Werkzeugklassen_benötigt} = \dots \\
& \quad \quad \text{ohne}(\text{Werkzeugklassenliste}, \text{Werkzeugklassen_vorhanden})) \quad 130) \\
& \wedge (\text{Werkzeugklassen_benötigt} = []) \\
& \wedge (\text{Automatisierungsgrad} = \text{bemannt} \rightarrow \text{fakt}(1, \text{arbeitskraft_vorhanden}(m_0)))
\end{aligned}$$

schaltpriorität(sp_9.1)

for_9.1.2 : \Leftrightarrow ...

Volbeginn := Time

\wedge Beabeginn := Time

\wedge Beadauer := 0

\wedge Tptdauer := 0

\wedge Wrtdauer := 0

\wedge Durchlauf_ws := 0

\wedge Emtzeitpunkt_ws := Time

\wedge Kapitalbindungsbetrag := 0

\wedge Bstkosten := 0

\wedge Beakosten := 0

\wedge Tptkosten := 0

\wedge Lagkosten := 0

\wedge Kapkosten := 0

\wedge Hstkosten_ws := 0

$\langle m_{I4} \rangle = \text{interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungsstationsname}, \text{arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname}, \text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname_ag}, \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand}), \text{ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{werkzeuge_ag}(\text{Werkzeugklassenliste}), \text{input}(\text{Werkstückklassenliste}), \text{output}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}), \text{Automatisierungsgrad}, \text{durchlaufzeit_age}(\text{Durchlauf_ag}), \text{herstellung_age}(\text{Hstkosten_ag}), \text{Arbeitsgang_schlupfzeit}, \text{Priorität}, \text{Auftragswert}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Bearbeitungsauftragsstatus})))$

$\langle m_{BB} \rangle = \text{interim_pufferverwaltung}(\text{puffermarke}(\text{Belegungsstatus}, \text{Pufferplatz}, \text{verfügbarkeit_akt}(\text{Verfdauer}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_puf}), \text{informationen}(\text{Arbeitsganginfoliste})))$

```

<mBN> ≈ interim_wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(),
ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))
<mTE> ≈ einlastungsversuch(testmarke(zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),
testen(Testliste),eigenschaften(zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(Volbeginn),
bearbeitungsbeginn_ws(Beabeginn),bearbeitungsdauer_ws(Beadauer),
transportdauer_ws(Tptdauer),wartedauer_ws(Wrtdauer),
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_ws),bearbeitungsende_ka(),
nachlagerende_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_ws),
Kapitalbindungsbetrag),kosten_ws(bereitstellung_ws(Bstkosten),
bearbeitung_ws(Beakosten),transport_ws(Tptkosten),
lagerung_ws(Lagkosten),kapitalbindung_ws(Kapkosten),
herstellung_ws(Hstkosten_ws))))))

```

t₁₄: pufferreservierung

```

<mI4> ≈ bearbeitungsaufträge_vorliegend(informationsmarke_ba(Bear-
beitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus))
<mBB.alt> ≈ pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_alt,
Pufferplatz_alt,verfügbarkeit_akt(Verfdauer),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt),informationen(Arbeitsganginfoliste_alt)))
<mT> ≈ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
<m0> ≈ pufferreservierung_möglich(m0)
<mWL.alt> ≈ werkzeugbedarf(Werkzeugklassen_benötigt_alt)
alle<mWZ> ≈ ∑ lokaler_werkzeugspeicher(Werkzeug): ...
fakt(1,lokaler_werkzeugspeicher(Werkzeug))
alle<mI3> ≈ ∑ bemannte_bearbeitungsstationen(Arbeitskrafteinsatz): ...
fakt(1,bemannte_bearbeitungsstationen(informations-
marke_ae(Arbeitskraftname,Bearbeitungsstationsname)))

```

131)

Belegungsstatus_alt = frei

Bearbeitungsauftragsstatus = bestätigt

#(Werkstückklassenliste) ≤ Pufferplatz_alt

for_14.1 : ⇔ Bearbeitungsstationsname = bearbeitungsstation_name

for_14.2 : ⇔ ...

Pufferplatz_neu := Pufferplatz_alt - #(Werkstückklassenliste)

\wedge arbeitsganginfo := arbeitsgang(Arbeitsgangname,Arbeitsgangzugehörigkeit,
sollrüstung(Rüstzustand),ausführung_ag(Agadauer),
werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),input(Werkstückklassenliste),
output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),
Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),
herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,
Priorität,Auftragswert))

\wedge Arbeitsganginfoliste_neu := Arbeitsganginfoliste_alt \oplus [Arbeitsganginfo]

\wedge (Pufferplatz_neu > 0) \rightarrow (Belegungsstatus_neu := frei)

\wedge (Pufferplatz_neu = 0) \rightarrow (Belegungsstatus_neu := belegt)

\wedge (#(FAK_{Lokaler_werkzeugspeicher})=K \wedge K \geq 1

\wedge (FAK_{Lokaler_werkzeugspeicher} = ...
werkzeugmarke(_,Werkzeugklasse_1,_,_),
+ ... +
+ werkzeugmarke(_,Werkzeugklasse_K,_,_))

\rightarrow Werkzeugklassen_vorhanden = ...
[Werkzeugklasse_1,...,Werkzeugklasse_K]

\wedge (#(FAK_{lokaler_werkzeugspeicher}) = 0 \rightarrow Werkzeugklassen_vorhanden := [])

\wedge (Werkzeugklassen_benötigt = ...
ohne(Werkzeugklassenliste,Werkzeugklassen_vorhanden))

\wedge (Werkzeugklassen_benötigt_neu := ...
Werkzeugklassen_benötigt_alt \oplus Werkzeugklassen_benötigt)

$\langle m_0 \rangle$ = offertenabgabe_möglich(m_0)

$\langle m_{WL,neu} \rangle$ = werkzeugbedarf(Werkzeugklassen_benötigt_neu)

$\langle m_{I_4} \rangle$ = auszuführende_bearbeitungsaufträge(informationsmarke_ba(Bear-
beitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
Arbeitsgangzugehörigkeit,sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{BB,neu} \rangle$ = pufferverwaltung(puffermarke(Belegungsstatus_neu,Pufferplatz_neu,
verfügbarkeit_akt(Verfdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_puf),
informationen(Arbeitsganginfoliste_neu)))

t₁₈: werkzeuginlagerung

$\langle m_{WZ,alt} \rangle$ = werkzeugpuffer_BS_2(werkzeugmarke(Werkzeugname,
Werkzeugklasse,Werkzeugstatus_alt,Werkzeugzuordnung))

Zuordnungsstatus_neu := bedienung_erforderlich

$\langle m_{I2.neu} \rangle \approx \text{zuordnungserfordernis}(\text{informationsmarke_bb}(\text{bearbeitungsstation_name}, \text{Zuordnungsstatus_neu}))$

t_{21} : arbeitskraft_überflüssig

alle $\langle m_{I4} \rangle \approx \sum \text{auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{Bearbeitungsauftrag}): \dots$
 $\text{fakt}(_, \text{auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{informationsmarke_ba}(_,$
 $\text{arbeitsgang}(_, _, _, _, _, _, \text{Automatisierungsgrad}, _, _, _, _, _, _)))$

alle $\langle m_{I4} \rangle \approx \sum \text{interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{Bearbeitungsauftrag}): \dots$
 $\text{fakt}(_, \text{interim_auszuführende_bearbeitungsaufträge}(\text{informationsmarke_ba}(_,$
 $\text{arbeitsgang}(_, _, _, _, _, _, \text{Automatisierungsgrad}, _, _, _, _, _, _)))$

alle $\langle m_{I4} \rangle \approx \sum \text{ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen}(\text{Bearbeitungsauftrag}): \dots$
 $\text{fakt}(_, \text{ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen}(\text{informationsmarke_ba}(_,$
 $\text{arbeitsgang}(_, _, _, _, _, _, \text{Automatisierungsgrad}, _, _, _, _, _, _)))$

$\langle m_{I2.alt} \rangle \approx \text{zuordnungserfordernis}(\text{informationsmarke_bb}(\text{bearbeitungsstation_name}, \text{Zuordnungsstatus_alt}))$

Automatisierungsgrad = vollautomatisch

Zuordnungsstatus_alt $\in \{\text{bedienung_erforderlich}, \text{arbeitskraft_zugeordnet}\}$

Zuordnungsstatus_neu := bedienung_überflüssig

$\langle m_{I2.neu} \rangle \approx \text{zuordnungserfordernis}(\text{informationsmarke_bb}(\text{bearbeitungsstation_name}, \text{Zuordnungsstatus_neu}))$

Fakten:

$\langle m_{BB.1} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{pufferverwaltung}(\text{puffermarke}(\text{nil}, \text{eingangspufferkapazität},$
 $\text{verfügbarkeit_akt}(0), \text{letzte_ermittlung}(0), \text{informationen_ka}()))))$

$\langle m_{I2.2} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{zuordnungserfordernis}(\text{informationsmarke_bb}(\text{bearbeitungsstation_name},$
 $\text{bedienung_überflüssig})))$

132)

$\langle m_{WL.1} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{werkzeugbedarf}([\]))$

$\langle m_{WZ.2} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lokaler_werkzeugspeicher}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_2"}, \text{"WZK_7"}, \text{eingesetzt},$
 $\text{zuordnung_wzbs}(\text{bearbeitungsstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.4} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lokaler_werkzeugspeicher}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_4"}, \text{"WZK_4"}, \text{eingesetzt},$
 $\text{zuordnung_wzbs}(\text{bearbeitungsstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.22} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lokaler_werkzeugspeicher}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_22"}, \text{"WZK_1"}, \text{eingesetzt},$
 $\text{zuordnung_wzbs}(\text{bearbeitungsstation_name}))))$

$\langle m_0 \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{offertenabgabe_möglich}(m_0))$

Als fünfte Erweiterung des eingangs erwähnten Kernnetzes erfolgt eine differenziertere Behandlung von Produktionsstörungen¹³³⁾. Dabei werden in exemplarischer Weise solche Störungen herausgegriffen, die geschehen, während sich die Bearbeitungsstation in ihrer operativen Betriebsphase befindet¹³⁴⁾.

Bisher wurde für alle Störungen einer operativen Bearbeitungsstation angenommen, sie ließen sich so beseitigen, daß der aktuell ausgeführte Arbeitsgang fortgesetzt und schließlich erfolgreich beendet werden kann. Diese Präsupposition muß jedoch keineswegs erfüllt sein. Von der Vielfalt denkmöglicher Störungsauswirkungen¹³⁵⁾ werden hier nur drei¹³⁶⁾ typische Fälle betrachtet:

- die Bearbeitungsunterbrechung,
- der Bearbeitungsabbruch mit Nacharbeit und
- der Bearbeitungsabbruch mit Ausschuß.

Die Bearbeitungsunterbrechung betrifft den bereits erwähnten, bislang unterstellten Fall, daß sich eine gestörte Werkstückbearbeitung nach der Störungsbeseitigung wiederaufnehmen und erfolgreich zu Ende führen läßt¹³⁷⁾. Hierdurch wird zwar die tatsächliche Bearbeitungsdauer gegenüber der geplanten Ausführungsdauer des Arbeitsgangs verlängert¹³⁸⁾. Darüber hinaus treten aus der Perspektive der Störungsmodellierung jedoch keine besonderen Probleme auf.

Bei einem Bearbeitungsabbruch mit Nacharbeit¹³⁹⁾ wiegt die Produktionsstörung dagegen so schwer, daß die eingeleitete Arbeitsgangausführung nicht mehr zu Ende gebracht werden kann. Statt dessen wird die Werkstückbearbeitung zunächst abgebrochen. Die Werkstücke befinden sich jedoch in einem Zustand, der zuläßt, das intendierte Bearbeitungsergebnis der abgebrochenen Arbeitsgangausführung schließlich doch noch zu erreichen. Zu diesem Zweck muß allerdings eine störungsspezifische Nacharbeit erfolgen. Ihre Modellierung bereitet erhebliche Schwierigkeiten, weil die Art dieser Nacharbeit im Arbeitsplan für die ungestörte Abwicklung eines Produktionsauftrags nicht enthalten ist¹⁴⁰⁾. Daher ist es erforderlich, die Modellierung von Werkstückbearbeitungen für Zusatzinformationen zu öffnen: Zur Berücksichtigung von Nacharbeit müssen sich einzelfallspezifische Informationen aufnehmen lassen, die aus der realen Modellumgebung stammen. In dieser Hinsicht erweist sich als vorteilhaft, daß das Petrinetz-Konzept modellexogene Informationsakquisitionen durch Systemmeldungen unterstützt. Durch solche Meldungen spezifiziert diejenige Arbeitskraft, die mit der Bedienung der gestörten Bearbeitungsstation befaßt ist, die erforderliche Nacharbeit. Dafür werden hier nur zwei einfache Alternativen unterschieden.

Einerseits kann die Nacharbeit auf derselben Bearbeitungsstation erfolgen. In diesem Fall legt die Arbeitskraft die Eigenschaften eines entsprechenden Nacharbeitsgangs fest. Das betroffene Werkstück wird in den Eingangspuffer der Bearbeitungsstation zurückgelegt¹⁴¹⁾. Nach der Einlastung und Ausführung des Nacharbeitsgangs¹⁴²⁾ gelangt das Werkstück auf den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation. Von dort aus kann die Abwicklung des zugehörigen Produktionsauftrags so fortgesetzt werden, wie es bei einer ungestörten oder bloß unterbrochenen Arbeitsgangausführung geschehen wäre. Das Netzmodul, das die Auftragsabwicklung repräsentiert, wird dann benachrichtigt, daß der zunächst gestörte Bearbeitungsauftrag schließlich doch noch erledigt werden konnte.

Andererseits ist es aber auch möglich, daß sich die Nacharbeit auf der Bearbeitungsstation nicht - zumindest nicht vollständig - ausführen läßt. Auch dies wird von der bedienenden Arbeitskraft angegeben. Das betroffene Werkstück wird dann zunächst zum zentralen Werkstücklager zurücktransportiert. Dort wird es zwischengelagert, bis ein zusätzlicher Produktionsauftrag¹⁴³⁾ für die Nacharbeit formuliert ist¹⁴⁴⁾. Eine neue Informationsmarke der Sorte "werkstücklagerauftrag" wird eingeführt, um das zentrale Werkstücklager über das zwischenzulagernde Werkstück in Kenntnis zu setzen¹⁴⁵⁾.

Die Erstellung des Nacharbeitsauftrags wird in der Fallstudie nicht mehr modelliert. Sie wird als modellexogene Aktivität ausgegrenzt¹⁴⁶). Daher findet die Möglichkeit, den ursprünglichen Produktionsauftrag nach der Einlastung und vollständigen Abwicklung des Nacharbeitsauftrags wiederaufzunehmen, hier keine Beachtung¹⁴⁷). Der betroffene Produktionsauftrag kann daher nicht mehr vollständig abgewickelt und ausgelastet werden, sobald ein störungsbedingter Nacharbeitsauftrag anfällt. Statt dessen wird das Netzmodul des ursprünglichen Produktionsauftrags nur darüber in Kenntnis gesetzt, daß der betroffene Bearbeitungsauftrag an der Bearbeitungsstation abgebrochen werden mußte.

Schließlich kommt noch der Bearbeitungsabbruch mit Ausschuß in Betracht. Auch bei dieser letzten Störungsvariante wird das Netzmodul des betroffenen Produktionsauftrags über den Abbruch seines Bearbeitungsauftrags informiert¹⁴⁸). Allerdings wurde das Werkstück durch die Störung der Bearbeitungsstation so stark in Mitleidenschaft gezogen, daß sich jetzt eine Nacharbeit erübrigt¹⁴⁹). Es erfolgt daher keine Werkstückrückgabe an den Eingangspuffer der Bearbeitungsstation oder an das zentrale Werkstücklager. Statt dessen wird das erheblich beschädigte Werkstück als Ausschuß aussortiert¹⁵⁰).

Die voranstehend skizzierte Differenzierung zwischen unterschiedlichen Störungsmodi einer Bearbeitungsstation, die sich vormals in ihrer operativen Bearbeitungsphase befand, wird durch die letzte Kernnetzerweiterung modelliert¹⁵¹). Abb. 172 auf der nächsten Seite zeigt die zugehörige Netzgraphik; danach folgt die Netzlegende.

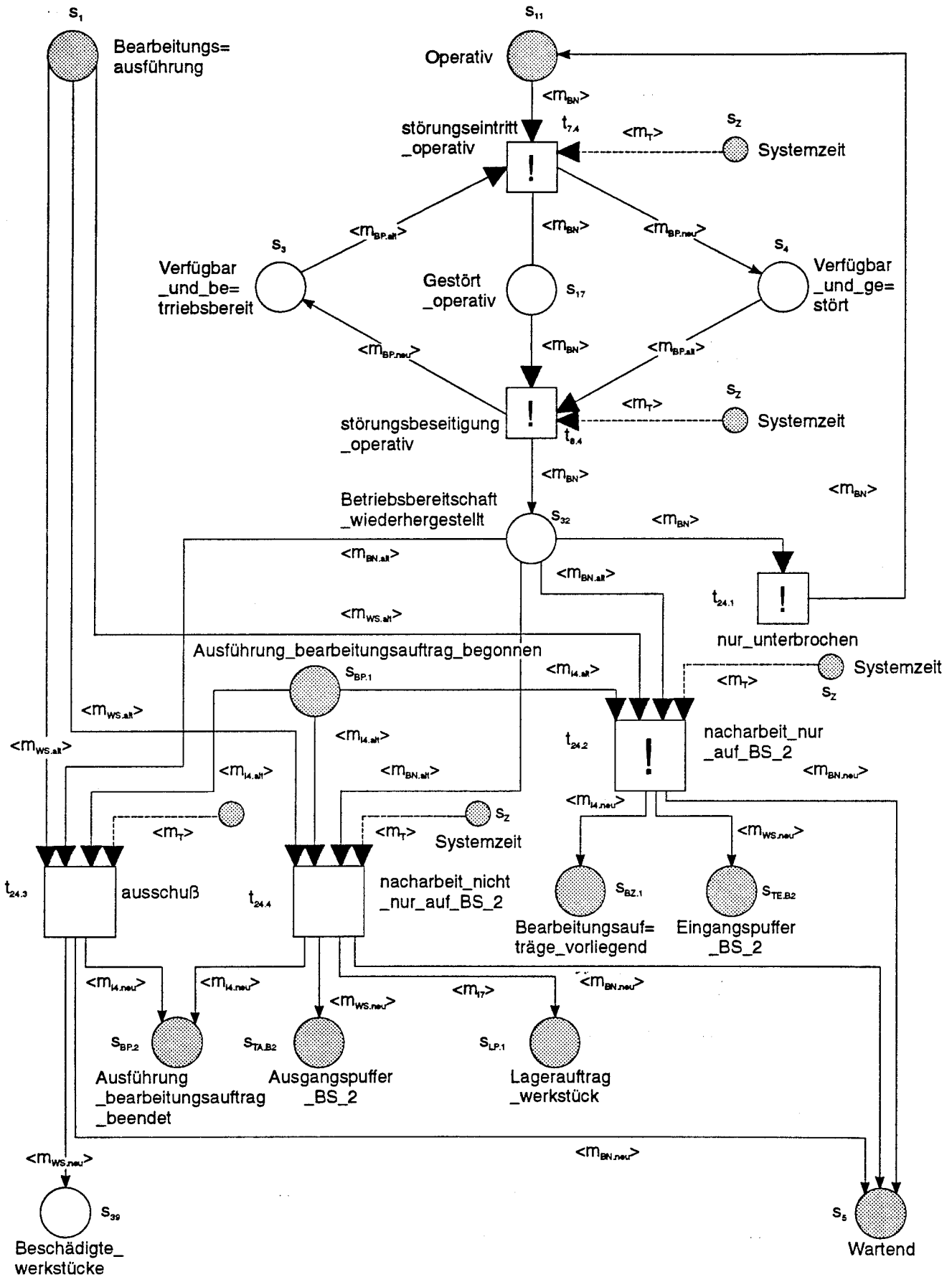


Abb. 172: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: fünfte Kernnetzerweiterung

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

eingangspufferkapazität = 10

ausgangspufferkapazität = 5

bearbeitungsstation_name = "BS_2"

lagerstation_name = "LS_1"

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
 "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
 "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
 "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
 "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
 "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
 "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
 "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
 "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
 "nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse: STRING

"WSK_1","WSK_2","WSK_3",
 "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7"

→ OB_{werkstückklasse}

auftragsname: STRING

"PA_1":

→ OB_{auftragsname}

152)

werkstückstatus: SYMBOL

nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,
 eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,
 auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,
 auf_transportmittelzuordnung_wartend,
 auf_transportmittelbeladung_wartend,
 transportiert,nachgelagert:

→ OB_{werkstückstatus}

153)

bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:		→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname}	154)
werkstücklagername:	STRING		
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}	
rüztzustand:	SYMBOL		
gerüstet_0,gerüstet_1, gerüstet_2,gerüstet_3:		→ OB _{rüztzustand}	
bearbeitungsauftragsstatus:	SYMBOL		
erteilt,bestätigt,begonnen, erledigt,abgebrochen:		→ OB _{bearbeitungsauftragsstatus}	
werkstücklagername:	STRING		
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}	
lagerauftragsart:	SYMBOL		
zwischenlagerung, endlagerung,auslagerung:		→ OB _{lagerauftragsart}	
lagerauftragsstatus:	SYMBOL		
erteilt,erledigt:		→ OB _{lagerauftragsstatus}	
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_ws(auftragsname); Zuordnung_ws_ka()		
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()		
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()		
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt); Nachlagerende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsbeginn =	Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsbeginn_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsende =	Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsdauer =	Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_transportdauer =	Transportdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_lagerdauer =	Lagerdauer_ws(zeitdauer)		

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)
werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)
werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
werkstück_bearbeitungsbeginn
werkstück_bearbeitungsdauer
werkstück_transportdauer
werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
werkstück_durchlaufzeit
werkstück_bearbeitungsende
werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
werkstück_bearbeitungskosten
werkstück_transportkosten
werkstück_lagerkosten
werkstück_kapitalbindungskosten
werkstück_herstellkosten)

verfügbarkeitsdauer = Verfügbarkeit(zeitdauer)
letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
startzeitpunkt = Start(zeitpunkt);
Start_ka()
schlußzeitpunkt = Schluß(zeitpunkt);
Schluß_ka()

arbeitsgang_einlastungszeitpunkt = Einlastung_ag(zeitpunkt);
Einlastung_ag_ka()

arbeitsgang_rüsterfordernis = Sollrüstung(rüsterzustand);
Sollrüstung_ka()

arbeitsgang_ausführungsdauer =	Ausführung_ag(zeitdauer); Ausführung_ag_ka()	
arbeitsgang_bearbeitungskosten =	Bearbeitung_ag(kosten)	
bearbeitungsauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)	
werkstückinfo =	Werkstückinformation(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückzuordnung)	
lagerauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)	
«m _{BN} » ≈ realnutzung =	Nutzungsmarke(arbeitsgang_einlastungszeitpunkt arbeitsgang_rüsterfordernis arbeitsgang_ausführungsdauer startzeitpunkt schlußzeitpunkt arbeitsgang_bearbeitungskosten)	
«m _{BP} » ≈ nutzungsoption =	Potentialmarke(verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt)	
«m _{I4} » ≈ bearbeitungsauftrag =	Informationsmarke_ba(bearbeitungsstationsname arbeitsganginfo bearbeitungsauftragserteilung bearbeitungsauftragsstatus)	
«m _{I7} » ≈ werkstücklagerauftrag =	Informationsmarke_wsl(werkstücklagername werkstückinfo lagerauftragserteilung lagerauftragsart lagerauftragsstatus)	155)
«m _T » ≈ syszeit =	Zeitmarke_sys(zeitpunkt)	
«m _{WS} » ≈ werkstück =	Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückstatus bearbeitungsstatus werkstückzuordnung werkstückzeiten werkstückkapitalbindung werkstückkosten)	

Stellen/Prädikatssymbole:

s _{BP.1} :	Ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BP.1} = 1
s _{BP.2} :	Ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BP.2} = 1
s _{BZ.1} :	Bearbeitungsaufträge_vorliegend(bearbeitungsauftrag) markenkapazität _{BZ.1} = ω
s _{LP.1} :	Lagerauftrag_werkstück(werkstücklagerauftrag) markenkapazität _{LP.1} = 10

- $s_{TA.B2}$: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität $_{TE.B2}$ = ausgangspufferkapazität
- $s_{TE.B2}$: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität $_{TE.B2}$ = eingangspufferkapazität
- s_Z : Systemzeit(syszeit)
markenkapazität $_Z$ = 1
- s_1 : Bearbeitungsausführung(werkstück)
markenkapazität $_1$ = 1
- s_3 : Verfügbar_und_betriebsbereit(nutzungsoption)
markenkapazität $_3$ = 1
- s_4 : Verfügbar_und_gestört(nutzungsoption)
markenkapazität $_4$ = 1
- s_5 : Wartend(realnutzung)
markenkapazität $_5$ = 1
- s_{11} : Operativ(realnutzung)
markenkapazität $_{11}$ = 1
- s_{17} : Gestört_operativ(realnutzung)
markenkapazität $_{17}$ = 1
- s_{32} : Betriebsbereitschaft_wiederhergestellt(realnutzung)
markenkapazität $_{32}$ = 1
- s_{33} : Beschädigte_werkstücke(werkstück)
markenkapazität $_{33}$ = ω

Transitionen/Transaktionen:

- $t_{7.4}$: störungseintritt_operativ
- $\langle m_{BP.alt} \rangle$ = verfügbar_und_betriebsbereit(potentialmarke(verfügbarkeit(Vfbdauer_alt),
letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt)))
- $\langle m_{BN} \rangle$ = operativ(nutzungsmarke(Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt,
Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,
Startzeitpunkt,Schlußzeitpunkt,Arbeitsgang_bearbeitungskosten))
- $\langle m_T \rangle$ = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
- !systemmeldung!: Störungseintritt
- Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)
- Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP,neu} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_neu}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})),$
 $\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{8,4}: störungsbeseitigung_operativ

$\langle m_{BP,alt} \rangle = \text{verfügbar_und_gestört}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer_alt}),$
 $\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{gestört_operativ}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

!systemmeldung!: Störungsbeseitigung

Vfbdauer_neu := Vfbdauer_alt - (Time - Emtzeitpunkt_alt)

Emtzeitpunkt_neu := Time

$\langle m_{BP,neu} \rangle = \text{verfügbar_und_betriebsbereit}(\text{potentialmarke}(\text{verfügbar-}$
 $\text{keit}(\text{Vfbdauer_neu}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu})))$

$\langle m_{BN} \rangle = \text{betriebsbereitschaft_wiederhergestellt}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_ein-}$
 $\text{lastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{24,1}: nur_unterbrochen

$\langle m_{BN} \rangle = \text{betriebsbereitschaft_wiederhergestellt}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_ein-}$
 $\text{lastungszeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

!systemmeldung!: Arbeitsgangausführung kann fortgesetzt werden /
keine Nacharbeit erforderlich

$\langle m_{BN} \rangle = \text{operativ}(\text{nutzungsmarke}(\text{Arbeitsgang_einlastungszeitpunkt},$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis}, \text{Arbeitsgang_ausführungsdauer},$
 $\text{Startzeitpunkt}, \text{Schlußzeitpunkt}, \text{Arbeitsgang_bearbeitungskosten}))$

t_{24,2}: nacharbeit_nur_auf_BS_2

$\langle m_{WS,alt} \rangle = \text{bearbeitungsausführung}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname_alt},$
 $\text{Werkstückklasse_alt}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_alt},$
 $\text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung},$
 $\text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsbeginn},$
 $\text{bearbeitungsdauer_ws}(\text{Bgtdauer_alt}), \text{Werkstück_transportdauer},$
 $\text{Werkstück_wartedauer}, \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_alt}),$


```

    Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
    kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
    Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
    bearbeitung_ws(Btgkosten_alt),Werkstück_transportkosten,
    Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
    herstellung_ws(Hstkosten_alt)))
<mBN.alt> = betriebsbereitschaft_wiederhergestellt(nutzungsmarke(ein-
    lastung_ag(Elzeitpunkt),sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Agadauer),
    start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),bearbeitung_ag(Agakosten_alt)))
<mI4.alt> = ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informationsmarke_ba(Bear-
    beitungstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname_alt,
    zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),Arbeitsgangzugehörigkeit,
    sollrüstung(Sollrüstzustand_alt),ausführung_ag(Agadauer_alt),
    werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste_alt),input(Werkstückklassenliste_alt),
    output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad_alt,
    durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag_alt),herstellung_age(Hstkosten_ag_alt),
    Arbeitsgang_schlupfzeit_alt,Priorität_alt,Auftragswert),
    auftragserteilung(Ertzeitpunkt_alt),Bearbeitungsauftragsstatus_alt))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

!systemmeldung!: Arbeitsgangausführung kann nicht fortgesetzt werden /
    statt dessen erfolgt ein Nacharbeitsgang an der Bearbeitungsstation "BS_2"
!systemmeldung!: Sollrüstzustand_neu
!systemmeldung!: Agadauer_neu
!systemmeldung!: Werkzeugklassenliste_neu
!systemmeldung!: Automatisierungsgrad_neu
!systemmeldung!: Priorität_neu 156)
for_24.2 := ...
    concat(Arbeitsgangname_alt,"/Nacharbeit",Arbeitsgangname_neu) 157)
    ^ concat(Werkstückname_alt,"/Nacharbeit",Werkstückname_neu)
    ^ concat(Werkstückklasse_alt,"/Nacharbeit",Werkstückklasse_neu)
    ^ Werkstückklassenliste_neu := [Werkstückklasse_neu]
    ^ (Arbeitsgang_schlupfzeit_alt = schlupfzeit_ag(Schlupf_alt)
    → Schlupf_neu := Schlupf_alt-(Time-Ertzeitpunkt_alt))
    ^ (Arbeitsgang_schlupfzeit_alt = schlupfzeit_ag_ka()
    → Arbeitsgang_schlupfzeit_neu := schlupfzeit_ag_ka())
    ^ Ertzeitpunkt_neu := Time
    ^ Bearbeitungsauftragsstatus_neu := bestätigt
    ^ Werkstückstatus_neu := wartend
    ^ Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt
    ^ Dauer := Time - Einlastungszeitpunkt

```

\wedge Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer
 \wedge Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer
 \wedge Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
 \wedge Emtzeitpunkt_neu := Time
 \wedge Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
 \wedge Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
 Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
 \wedge Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten
 \wedge Btgkosten_neu := Btgkosten_alt + Agakosten_neu
 \wedge Kapitalkostenzunahme := ...
 Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
 \wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
 \wedge Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu
 \wedge Durchlauf_ag_neu := Durchlauf_neu
 \wedge Hstkosten_ag_neu := Hstkosten_neu
 \wedge Agakosten_neu := 0

$\langle m_{I4,neu} \rangle$ = bearbeitungsaufträge_vorliegend(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname_neu, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag), sollrüstung(Sollrüstzustand_neu), ausführung_ag(Agadauer_neu), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste_neu), input(Werkstückklassenliste_neu), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad_neu, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag_neu), herstellung_age(Hstkosten_ag_neu), Arbeitsgang_schlupfzeit_neu, Priorität_neu, Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt_neu), Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

$\langle m_{WS,neu} \rangle$ = eingangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname_neu, Werkstückklasse_neu, Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_neu, Bearbeitungsstatus, Werkstückzuordnung, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn, Werkstück_bearbeitungsbeginn, bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_neu), Werkstück_transportdauer, Werkstück_wartedauer, durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu), Werkstück_bearbeitungsende, Werkstück_nachlagerende), kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu), Kapitalbindungsbetrag_neu), kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, bearbeitung_ws(Btgkosten_neu), Werkstück_transportkosten, Werkstück_lagerkosten, kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu), herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

$\langle m_{BN,neu} \rangle$ = wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(), sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(), start_ka(), schluß_ka(), bearbeitung_ag(Agakosten_neu)))

t_{24.3}: ausschub

<m_{WS.alt}> ≈ bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname_alt, Werkstückklasse_alt, Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus, Bearbeitungsstatus_alt, Werkstückzuordnung_alt, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn, Werkstück_bearbeitungsbeginn, bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_alt), Werkstück_transportdauer, Werkstück_wartedauer, durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt), Werkstück_bearbeitungsende, Werkstück_nachlagerende), kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt), Kapitalbindungsbetrag_alt), kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, bearbeitung_ws(Btgkosten_alt), Werkstück_transportkosten, Werkstück_lagerkosten, kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt), herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

<m_{BN.alt}> ≈ betriebsbereitschaft_wiederhergestellt(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt), sollrüstung_ka(), ausführung_ag(Agadauer), start(Startzeitpunkt), schluß(Schlußzeitpunkt), bearbeitung_ag(Agakosten_alt)))

<m_{I4.alt}> ≈ ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag), Arbeitsgangzugehörigkeit, sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

<m_T> ≈ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

!systemmeldung!: Arbeitsgangausführung kann nicht fortgesetzt werden / Ausschub
for_24.3 :⇔ ...

```

    Bearbeitungsauftragsstatus_neu := abgebrochen
  ^ Bearbeitungsstatus_neu := beschädigt
  ^ Werkstückzuordnung_neu := zuordnung_ws_ka()
  ^ Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt
  ^ Auslastungszeitpunkt := Time
  ^ Dauer := Auslastungszeitpunkt - Einlastungszeitpunkt
  ^ Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer
  ^ Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer
  ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
  ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
  ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

```

\wedge Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
 Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
 \wedge Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten
 \wedge Btgcosten_neu := Btgcosten_alt + Agakosten_neu
 \wedge Kapitalkostenzunahme := ...
 Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
 \wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
 \wedge Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu
 \wedge Agakosten_neu := 0

$\langle m_{I4.neu} \rangle$ = ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

$\langle m_{WS.neu} \rangle$ = beschädigte_werkstücke(werkstückmarke(Werkstückname_neu, Werkstückklasse_neu,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus, Bearbeitungsstatus_neu,Werkstückzuordnung, zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn, bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_neu),Werkstück_transportdauer, Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu), Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende), kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu), Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, bearbeitung_ws(Btgcosten_neu),Werkstück_transportkosten, Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu), herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

$\langle m_{BN.neu} \rangle$ = wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten_neu)))

t_{24.4}: nacharbeit_nicht_nur_auf_BS_2

$\langle m_{WS.alt} \rangle$ = bearbeitungsausführung(werkstückmarke(Werkstückname_alt, Werkstückklasse_alt,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt, Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_alt, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn, bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_alt),Werkstück_transportdauer, Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),

Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
 Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
 bearbeitung_ws(Btgkosten_alt),Werkstück_transportkosten,
 Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
 herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

<m_{BN.alt}> = betriebsbereitschaft_wiederhergestellt(nutzungsmarke(ein-
 lastung_ag(Elzeitpunkt),sollrüstung_ka(),ausführung_ag(Agadauer),
 start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),bearbeitung_ag(Agakosten_alt)))

<m_{I4.alt}> = ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informationsmarke_ba(Bear-
 beitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
 zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),Arbeitsgangzugehörigkeit,
 sollrüstung(Sollrüstzustand),ausführung_ag(Agadauer),
 werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),input(Werkstückklassenliste),
 output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
 durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
 Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
 auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

!systemmeldung!: Arbeitsgangausführung kann nicht fortgesetzt werden /
 statt dessen ist ein Nacharbeitsauftrag zu veranlassen

for_24.4 : \Leftrightarrow ...

Bearbeitungsauftragsstatus_neu := abgebrochen

^ Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelzuordnung_wartend

^ Werkstücklagername := lagerstation_name

^ Ertzeitpunkt := Time

^ Lagerauftragsart := zwischenlagerung

^ Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt

^ Auslastungszeitpunkt := Time

^ Dauer := Auslastungszeitpunkt - Einlastungszeitpunkt

^ Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer

^ Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer

^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

^ Emtzeitpunkt_neu := Time

^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

^ Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten

^ Btgkosten_neu := Btgkosten_alt + Agakosten_neu

- \wedge Kapitalkostenzunahme := ...
 Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
 - \wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
 - \wedge Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu
 - \wedge Agakosten_neu := 0
- $\langle m_{I4.neu} \rangle \approx$ ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname_ag),sollrüstung(Sollrüstzustand), ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste), input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität, Auftragswert),auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Bearbeitungsauftragsstatus_neu))
- $\langle m_{WS.neu} \rangle \approx$ ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname_neu, Werkstückklasse_neu,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu, Bearbeitungsstatus,zuordnung_ws(Werkstücklagername), zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn, bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_neu),Werkstück_transportdauer, Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu), Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende), kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu), Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, bearbeitung_ws(Btgkosten_neu),Werkstück_transportkosten, Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu), herstellung_ws(Hstkosten_neu))))
- $\langle m_{I7} \rangle \approx$ lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername, werkstückinformation(Werkstückname,Werkstückklasse, Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_ws(Werkstücklagername)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
- $\langle m_{BN.neu} \rangle \approx$ wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(), ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten_neu)))

Fakten: ---

Abschließend wird der Spezialfall von Anschlußarbeitsgängen betrachtet. Ein Anschlußarbeitsgang liegt vor, wenn nach der Ausführung eines früheren Arbeitsgangs der nächste Arbeitsgang desselben Produktionsauftrags auf derselben Bearbeitungsstation geschehen soll¹⁵⁸). In diesem Fall braucht das ausgelastete Werkstück, das sich nach der Ausführung des vorangehenden Arbeitsgangs im Ausgangspuffer der betroffenen Bearbeitungsstation befindet, lediglich in den Eingangspuffer derselben Bearbeitungsstation zurückgereicht zu werden. Dagegen wäre es verfehlt, ein Transportmittel für den Werkstücktransport anzufordern¹⁵⁹). Daher wird einem Werkstück, an dem ein Anschlußarbeitsgang ausgeführt werden soll, nicht der Status "auf_transportmittelzuordnung_wartend" zugewiesen. Statt dessen wird es durch das Schalten der Transition "anschlußarbeitsgang" in den Eingangspuffer der Bearbeitungsstation zurückgelegt, sobald ihm diese Bearbeitungsstation als nächste Bearbeitungsstation zugeordnet worden ist¹⁶⁰). Um diesen Spezialfall zu modellieren, wird auf die zweite Kernnetzerweiterung zurückgegriffen. Allerdings wird es so weit vergrößert, daß danach nur noch diejenigen Aspekte erfaßt werden, die für die Behandlung von Arbeitsgängen von Interesse sind¹⁶¹). Abb. 173 auf der nächsten Seite zeigt die Netzgraphik des resultierenden Grobnetzes. Daran schließt sich die zugehörige Netzlegende an.

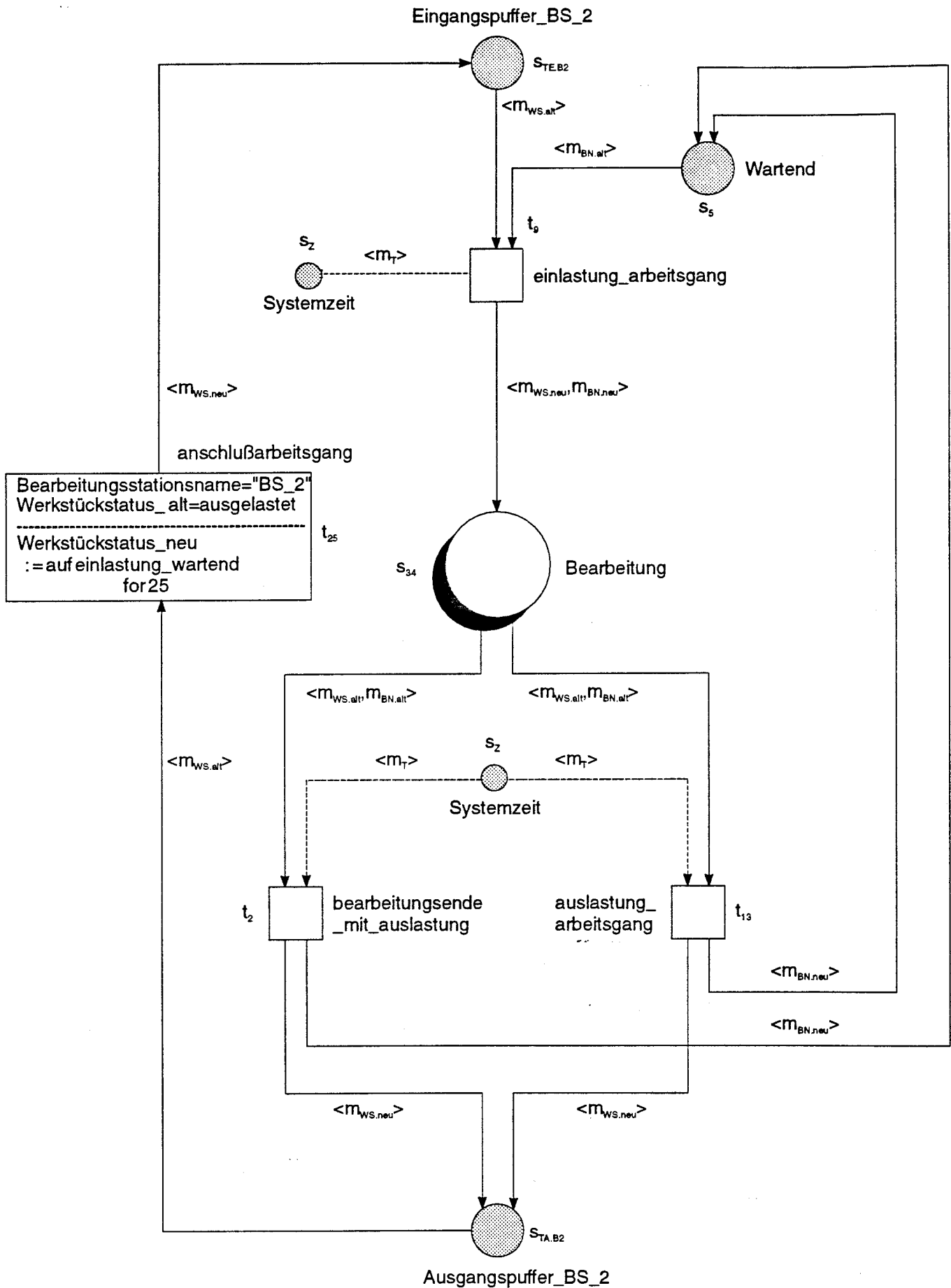


Abb. 173: Netzgraphik für eine Bearbeitungsstation: Grobnetz für Anschlußarbeitsgänge

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

ausgangspufferkapazität = 5

eingangspufferkapazität = 10

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
 "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
 "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
 "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
 "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
 "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
 "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
 "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
 "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
 "nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse: STRING

"WSK_1","WSK_2","WSK_3",
 "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:

→ OB_{werkstückklasse}

auftragsname: STRING

"PA_1":

→ OB_{auftragsname}

162)

werkstückstatus: SYMBOL

nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,
 eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,
 auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,
 auf_transportmittelzuordnung_wartend,
 auf_transportmittelbeladung_wartend,
 transportiert,nachgelagert:

→ OB_{werkstückstatus}

163)

bearbeitungsstatus: SYMBOL

unbearbeitet,angearbeitet,
 fertigbearbeitet,beschädigt:

→ OB_{bearbeitungsstatus}

bearbeitungsstationsname:	STRING		
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname}	164)
werkstücklagername:	STRING		
"LS_1":		→ OB _{werkstücklagername}	
rüszustand:	SYMBOL		
gerüstet_0,gerüstet_1, gerüstet_2,gerüstet_3:		→ OB _{rüszustand}	
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_ws(auftragsname); Zuordnung_ws_ka()		
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()		
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()		
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt); Nachlagerende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsbeginn =	Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsbeginn_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsende =	Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsdauer =	Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_transportdauer =	Transportdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_lagerdauer =	Lagerdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_wartedauer =	Wartedauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_durchlaufzeit =	Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)		
werkstückzeiten =	Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn werkstück_bearbeitungsbeginn werkstück_bearbeitungsdauer werkstück_transportdauer werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer werkstück_durchlaufzeit werkstück_bearbeitungsende werkstück_nachlagerende)		
letzter_zeitpunkt =	Letzte_ermittlung(zeitpunkt)		
werkstückkapitalbindung =	Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)		

Stellen/Prädikatssymbole:

$s_{TA.B2}$: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität_{TE.B2} = ausgangspufferkapazität

$s_{TE.B2}$: Eingangspuffer_BS_2(werkstück)
markenkapazität_{TE.B2} = eingangspufferkapazität

s_z : Systemzeit(syszeit)
markenkapazität_z = 1

s_5 : Wartend(realnutzung)
markenkapazität₅ = 1

s_{34} : Bearbeitung(werkstück realnutzung)
markenkapazität₃₄ = 1

Transitionen/Transaktionen:

t_2 : bearbeitungsende

$\langle m_{WS.alt}, m_{BN.alt} \rangle \approx$ (bearbeitung(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_alt,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_alt),Werkstück_transportdauer,
Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
bearbeitung_ws(Btgkosten_alt),Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))),
bearbeitung(nutzungsmarke,einlastung_ag(Elzeitpunkt),sollrüstung_ka(),
ausführung_ag(Agadauer),start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),
bearbeitung_ag(Agakosten_alt))))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Time \geq Schlußzeitpunkt

for_2 : \Leftrightarrow ...

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

\wedge Werkstückzuordnung_neu := zuordnung_ws_ka()

\wedge Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt

\wedge Auslastungszeitpunkt := Time

\wedge Dauer := Auslastungszeitpunkt - Einlastungszeitpunkt

\wedge Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer

- ^ $Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer$
- ^ $Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer$
- ^ $Emtzeitpunkt_neu := Time$
- ^ $Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt \cdot Dauer$
- ^ $Kapitalbindungsbetrag_neu := \dots$
 $\quad Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme$
- ^ $Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten$
- ^ $Btgkosten_neu := Btgkosten_alt + Agakosten_neu$
- ^ $Kapitalkostenzunahme := \dots$
 $\quad Kapitalbindungszunahme \cdot zinssatz \cdot zinszeitverrechnung$
- ^ $Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme$
- ^ $Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu$
- ^ $Agakosten_neu := 0$

$\langle m_{WS,neu} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 $\text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu},$
 $\text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung},$
 $\text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsbeginn},$
 $\text{bearbeitungsdauer_ws}(\text{Bgtdauer_neu}), \text{Werkstück_transportdauer},$
 $\text{Werkstück_wartedauer}, \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_neu}),$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsende}, \text{Werkstück_nachlagerende}),$
 $\text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_neu}),$
 $\text{Kapitalbindungsbetrag_neu}), \text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten},$
 $\text{bearbeitung_ws}(\text{Btgkosten_neu}), \text{Werkstück_transportkosten},$
 $\text{Werkstück_lagerkosten}, \text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_neu}),$
 $\text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_neu})))$

$\langle m_{BN,neu} \rangle = \text{wartend}(\text{nutzungsmarke}(\text{einlastung_ag_ka}(), \text{sollrüstung_ka}(),$
 $\text{ausführung_ag_ka}(), \text{start_ka}(), \text{schluß_ka}(), \text{bearbeitung_ag}(\text{Agakosten_neu})))$

$t_9:$ $\text{einlastung_arbeitsgang}$

$\langle m_{WS,alt} \rangle = \text{eingangspuffer_BS_2}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 $\text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_alt},$
 $\text{Bearbeitungsstatus}, \text{Werkstückzuordnung},$
 $\text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsbeginn},$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsdauer}, \text{Werkstück_transportdauer},$
 $\text{wartedauer_ws}(\text{Wrtedauer_alt}), \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_alt}),$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsende}, \text{Werkstück_nachlagerende}),$
 $\text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt_alt}),$
 $\text{Kapitalbindungsbetrag_alt}), \text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten},$
 $\text{Werkstück_bearbeitungskosten}, \text{Werkstück_transportkosten},$
 $\text{Werkstück_lagerkosten}, \text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_alt}),$

```

    herstellung_ws(Hstkosten_alt)))
<mBN.alt> = wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(),
    ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten)))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
Werkstückstatus_alt = auf_einlastung_wartend
Agakosten = 0
for_9 := ⇔ ...
    Elzeitpunkt := Time
    ^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt
    ^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
    ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Werkstückstatus_neu := eingelastet
<mWS.neu,mBN.neu> = (bearbeitung(werkstückmarke(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
    Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
    zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
    Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
    wartedauer_ws(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
    Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
    kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
    Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
    Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
    Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
    herstellung_ws(Hstkosten_neu))),
    bearbeitung(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),
    sollrüstung(Sollrüstzustand)165,ausführung_ag(Agadauer)166,
    start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten))))

```

t₁₃: auslastung_arbeitsgang

```

<mWS.alt,mBN.alt> = (bearbeitung(werkstückmarke(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
    Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_alt,

```

```

zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_alt),Werkstück_transportdauer,
Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
bearbeitung_ws(Btgkosten_alt),Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))),
bearbeitung(nutzungsmarke(einlastung_ag(Elzeitpunkt),sollrüstung_ka(),
ausführung_ag(Agadauer),start(Startzeitpunkt),schluß(Schlußzeitpunkt),
bearbeitung_ag(Agakosten_alt))))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
for_13 :⇔ ...
    Werkstückstatus_neu := ausgelastet
    ^ Werkstückzuordnung_neu := zuordnung_ws_ka()
    ^ Einlastungszeitpunkt := Elzeitpunkt
    ^ Auslastungszeitpunkt := Time
    ^ Dauer := Auslastungszeitpunkt - Einlastungszeitpunkt
    ^ Kosten := bearbeitungskostensatz • Dauer
    ^ Bgtdauer_neu := Bgtdauer_alt + Dauer
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
    ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Agakosten_neu := Agakosten_alt + Kosten
    ^ Btgkosten_neu := Btgkosten_alt + Agakosten_neu
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Agakosten_neu
    ^ Agakosten_neu := 0
<mWS.neu> = ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_neu,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
bearbeitungsdauer_ws(Bgtdauer_neu),Werkstück_transportdauer,
Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),

```

```

kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
bearbeitung_ws(Btgcosten_neu),Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

```

```

<mBN,neu> = wartend(nutzungsmarke(einlastung_ag_ka(),sollrüstung_ka(),
ausführung_ag_ka(),start_ka(),schluß_ka(),bearbeitung_ag(Agakosten_neu)))

```

t₂₅: anschlußarbeitsgang

```

<mWS,alt> = ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

```

Bearbeitungsstationsname = "BS_2"

Werkstückstatus_alt = ausgelastet

Werkstückstatus_neu := auf_einlastung_wartend

for_25 :⇔ ...

Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt

∧ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer

∧ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

∧ Emtzeitpunkt_neu := Time

∧ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

∧ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

∧ Kapitalkostenzunahme := ...

Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung

∧ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

∧ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

```

<mWS,neu> = ausgangspuffer_BS_2(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
Bearbeitungsstatus,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,

```


Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
wartedauer_ws(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

Fakten: ---

Das zuvor konstruierte Netzmodul dient nur der Modellierung von Bearbeitungsstationen im engeren Sinn. Dazu gehören in dieser Fallstudie die Stationen mit den Namen "BS_1", "BS_2" und "BS_3". Es erstreckt sich dagegen nicht auf die Bearbeitungsstation "BS_4". Sie stellt als Spannstation eine Bearbeitungsstation im weiteren Sinne dar. Sie wird nachfolgend durch ein Netzmodul sui generis modelliert. Dabei wird zwar die Struktur des Netzmoduls für Bearbeitungsstationen i.e.S. in ihren Grundzügen übernommen, aber erheblich vergrößert¹⁶⁷⁾. Es werden lediglich zwei Arbeitsgänge berücksichtigt¹⁶⁸⁾. Der erste dient zum Aufspannen unbearbeiteter Vorprodukte. Der zweite leistet das Abspannen von angearbeiteten Zwischen-¹⁶⁹⁾ oder fertiggearbeiteten Endprodukten. Zusätzlich wird unterstellt, daß jedes Werkstück auf genau eine Palette als Trägervorrichtung aufgespannt wird¹⁷⁰⁾. Insgesamt stehen im modellierten Produktionssystem 40 Paletten zur Verfügung. Sie begrenzen dadurch die Anzahl von Werkstücken, die sich im Produktionssystem gleichzeitig aufhalten können¹⁷¹⁾. Abb. 174 auf der nächsten Seite zeigt die Netzgraphik für das derart grob entworfene Netzmodul einer Spannstation. Es folgt die zugehörige Netzlegende.

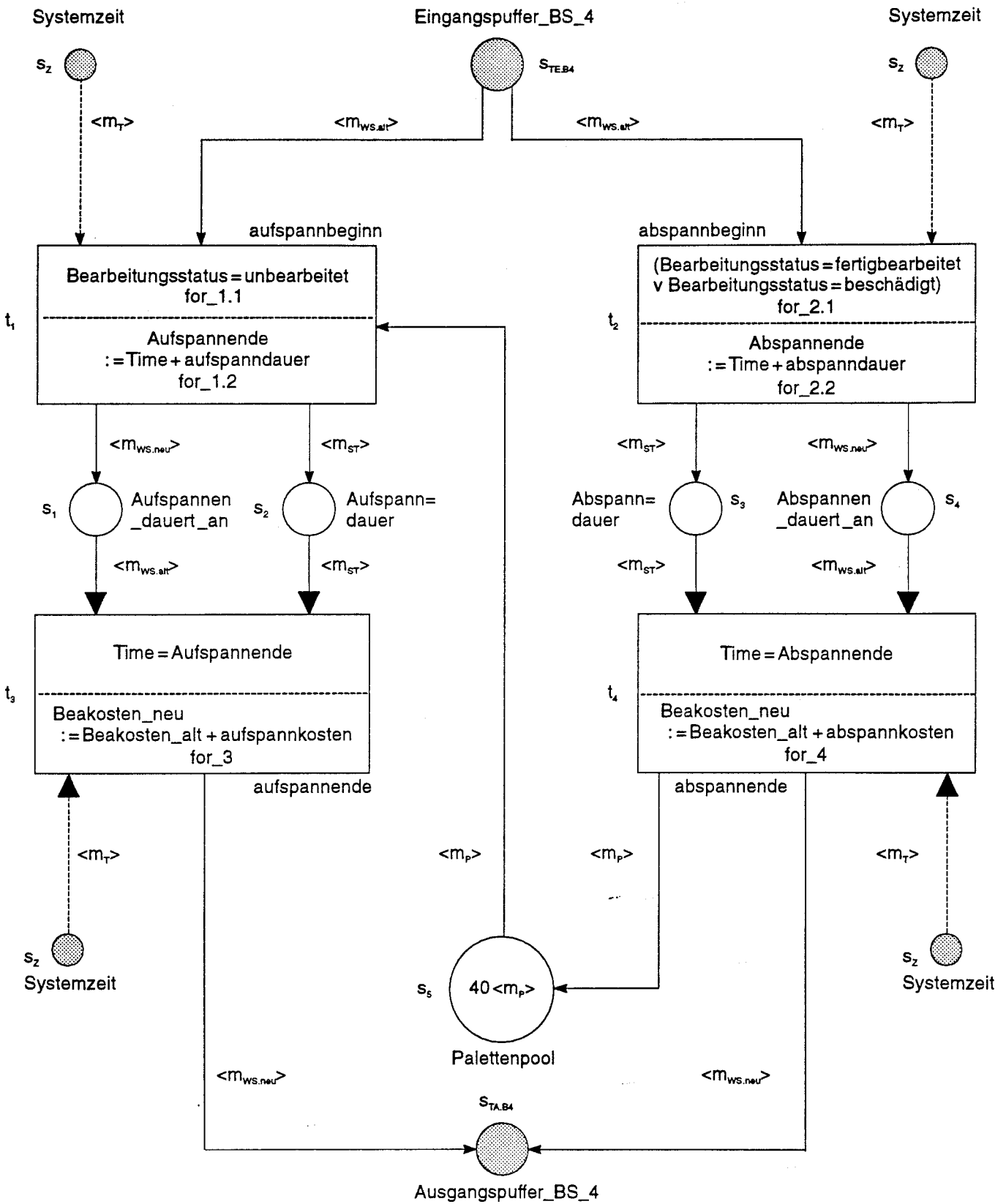


Abb. 174: Netzgraphik für eine Spannstation

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

bearbeitungsstation_name = "BS_4"

paletten_name = "Einheitspalette"

ausgangspufferkapazität = 2

eingangspufferkapazität = 2

aufspanndauer = 11

abspanndauer = 7

aufspannkosten = 5.50

abspannkosten = 4.30

zinssatz = 0.06

zinszeitverrechnung = 0.0000019

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

palettenname: STRING

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
 "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
 "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
 "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
 "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
 "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
 "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
 "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
 "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
 "nil"

→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse: STRING

"WSK_1","WSK_2","WSK_3",
 "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:"

→ OB_{werkstückklasse}

auftragsname: STRING

"PA_1":

→ OB_{auftragsname}

werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend,		173)
	eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet,		
	auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert,		
	auf_transportmittelzuordnung_wartend,		
	auf_transportmittelbeladung_wartend,		
	transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet,		
	fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	174)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":	→ OB _{werkstücklagername}	
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_wspa(auftragsname);		
	Zuordnung_wspa_ka()		
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname);		
	Zuordnung_wsls(werkstücklagername);		
	Zuordnung_ws_ka()		
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);		
	Vorlagerbeginn_ws_ka()		
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt);		
	Nachlagerende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsbeginn =	Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);		
	Bearbeitungsbeginn_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsende =	Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);		
	Bearbeitungsende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsdauer =	Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_transportdauer =	Transportdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_lagerdauer =	Lagerdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_wartedauer =	Wartedauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_durchlaufzeit =	Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)		
werkstückzeiten =	Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn		
	werkstück_bearbeitungsbeginn		
	werkstück_bearbeitungsdauer		

werkstück_transportdauer
 werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
 werkstück_durchlaufzeit
 werkstück_bearbeitungsende
 werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)

werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)

werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)

werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)

werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)

werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)

werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)

werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
 werkstück_bearbeitungskosten
 werkstück_transportkosten
 werkstück_lagerkosten
 werkstück_kapitalbindungskosten
 werkstück_herstellkosten)

«m_p» = palette = Palettenmarke(palettenname)

«m_{ST}» = spazzeit = Zeitmarke_spa(zeitpunkt)

«m_T» = syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)

«m_{WS}» = werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
 bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
 werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
 werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

s_{TA.B4}: Ausgangspuffer_BS_4(werkstück)
 markenkapazität_{TE.B4} = ausgangspufferkapazität

s_{TE.B4}: Eingangspuffer_BS_4(werkstück)
 markenkapazität_{TE.B4} = eingangspufferkapazität

s_Z: Systemzeit(syszeit)
 markenkapazität_Z = 1

- s₁: Aufspannen_dauert_an(werkstück)
 markenkapazität₁ = 1
- s₂: Aufspanndauer(spazzeit)
 markenkapazität₂ = 1
- s₃: Abspanndauer(spazzeit)
 markenkapazität₃ = 1
- s₄: Abspannen_dauert_an(werkstück)
 markenkapazität₄ = 1
- s₅: Palettenpool(palette)
 markenkapazität₅ = 40

Transitionen/Transaktionen:

- t₁: aufspannbeginn
- <m_{WS.alt}> = eingangspuffer_BS_4(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
 Bearbeitungsstatus,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
 zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
 wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
 Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
 Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
 Werkstück_bearbeitung,Werkstück_transportkosten,Werkstück_lagerkosten,
 kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),herstellung_ws(Hstkosten_alt)))
- <m_P> = palettenpool(palettenmarke(Palettenname))
- <m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Bearbeitungsstatus = unbearbeitet

175)

for_1.1 :⇔ ...

 Bearbeitungsstationsname = bearbeitungsstation_name

 ^ Werkstückstatus_alt = auf_einlastung_wartend

Aufspannende := Time + aufspanndauer

for_1.2 :⇔ ...

 Werkstückstatus_neu := eingelastet

 ^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt

 ^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer

 ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

 ^ Emtzeitpunkt_neu := Time

 ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

\wedge Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
 Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
 \wedge Kapitalkostenzunahme := ...
 Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
 \wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
 \wedge Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
 $\langle m_{ST} \rangle \approx$ aufspanndauer(zeitmarke_spa(Aufspannende))
 $\langle m_{WS,neu} \rangle \approx$ aufspannen_dauert_an(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
 Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
 zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
 wartedauer_ws(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
 Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
 Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
 Werkstück_bearbeitung,Werkstück_transportkosten,
 Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
 herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

t_2 : abspannbeginn

$\langle m_{WS,alt} \rangle \approx$ eingangspuffer_BS_4(werkstückmarke(Werkstückname,
 Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
 Bearbeitungsstatus,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
 zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
 wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
 Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
 Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
 Werkstück_bearbeitung,Werkstück_transportkosten,
 Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
 herstellung_ws(Hstkosten_alt))))
 $\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Bearbeitungsstatus = fertigbearbeitet \vee Bearbeitungsstatus = beschädigt

for_2.1 \Leftrightarrow ...

 Bearbeitungsstationsname = bearbeitungsstation_name

\wedge Werkstückstatus_alt = auf_einlastung_wartend

Abspannende := Time + abspanndauer

for_2.2 : \Leftrightarrow ...

Werkstückstatus_neu := eingelastet

\wedge Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt

\wedge Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer

\wedge Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

\wedge Emtzeitpunkt_neu := Time

\wedge Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt \cdot Dauer

\wedge Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

\wedge Kapitalkostenzunahme := ...

Kapitalbindungszunahme \cdot zinssatz \cdot zinszeitverrechnung

\wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

\wedge Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

$\langle m_{ST} \rangle \approx$ abspanndauer(zeitmarke_spa(Abspannende))

$\langle m_{WS,neu} \rangle \approx$ abspannen_dauert_an(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
wartedauer_ws(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitung,Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

t₃: aufspannende

$\langle m_{WS,alt} \rangle \approx$ aufspannen_dauert_an(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_alt),Werkstück_transportdauer,
Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
bearbeitung_ws(Beakosten_alt),Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))))

$\langle m_{ST} \rangle = \text{aufspanndauer}(\text{zeitmarke_spa}(\text{Aufspannende}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Time = Aufspannende

Beakosten_neu := Beakosten_alt + aufspannkosten

176)

for_3 : \Leftrightarrow ...

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

\wedge Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt

\wedge Beadauer_neu := Beadauer_alt + Dauer

\wedge Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer

\wedge Emtzeitpunkt_neu := Time

\wedge Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer

\wedge Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

\wedge Kapitalkostenzunahme := ...

Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung

\wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme

\wedge Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + aufspannkosten + Kapitalkostenzunahme

$\langle m_{WS_neu} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_4}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 Werkstückklasse, Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_neu,
 Bearbeitungsstatus, Werkstückzuordnung,
 zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn, Werkstück_bearbeitungsbeginn,
 bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_neu), Werkstück_transportdauer,
 Werkstück_wartedauer, durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
 Werkstück_bearbeitungsende, Werkstück_nachlagerende),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
 Kapitalbindungsbetrag_neu), kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
 bearbeitung_ws(Beakosten_neu), Werkstück_transportkosten,
 Werkstück_lagerkosten, kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
 herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

t₄: abspannende

$\langle m_{WS_alt} \rangle = \text{abspannen_dauert_an}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname},$
 Werkstückklasse, Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_alt,
 Bearbeitungsstatus, Werkstückzuordnung,
 zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn, Werkstück_bearbeitungsbeginn,
 bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_alt), Werkstück_transportdauer,
 Werkstück_wartedauer, durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),
 Werkstück_bearbeitungsende, Werkstück_nachlagerende),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_alt),
 Kapitalbindungsbetrag_alt), kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,

```

        bearbeitung_ws(Beakosten_alt),Werkstück_transportkosten,
        Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
        herstellung_ws(Hstkosten_alt))))
<mST> = abspanndauer(zeitmarke_spa(Abspannende))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
Time = Abspannende
Beakosten_neu := Beakosten_alt + abspannkosten
for_4 :⇔ ...
    Werkstückstatus_neu := ausgelastet
    ^ Dauer := Time - Emtzeitpunkt_alt
    ^ Beadauer_neu := Beadauer_alt + Dauer
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
    ^ Emtzeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + abspannkosten + Kapitalkostenzunahme
    ^ Palettenname := paletten_name
<mWS.neu> = ausgangspuffer_BS_4(werkstückmarke(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,
    Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
    zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
    bearbeitungsdauer_ws(Beadauer_neu),Werkstück_transportdauer,
    Werkstück_wartedauer,durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),
    Werkstück_bearbeitungsende,Werkstück_nachlagerende),
    kapitalbindung(letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt_neu),
    Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
    bearbeitung_ws(Beakosten_neu),Werkstück_transportkosten,
    Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
    herstellung_ws(Hstkosten_neu))))
<mp> = palettenpool(palettenmarke(Palettenname))

```

Fakten:

40 • <m_p> = fakt₀(40,palettenpool(palettenmarke("Einheitspalette")))

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Das Netzmodul einer Bearbeitungsstation wird auch als Bearbeitungsstationsnetz bezeichnet. Sofern aus dem Argumentationskontext ersichtlich ist, daß keine Lager-, sondern nur Bearbeitungsstationen thematisiert werden, kann ebenso von einem stationsspezifischen Netzmodul oder Bearbeitungsnetz gesprochen werden.
- 2) Diese Bearbeitungsstationen werden als "BS_1", "BS_2" und "BS_3" benannt.
- 3) Sie trägt den Namen "BS_4".
- 4) Vgl. dazu die Konzeptualisierung von Bearbeitungsstationen.
- 5) Das Netzmodul für die Spannstation wird an anderer Stelle gesondert behandelt.
- 6) Der einzige erwähnenswerte Unterschied betrifft die Ausstattung der Bearbeitungsstationen mit Werkzeugen, die sich bei Koordinierungsbeginn in ihren lokalen Werkzeugspeichern befinden. Dies schlägt sich in verschiedenen Ausgangsmarkierungen der stationsspezifischen Bearbeitungsnetze nieder. Darüber hinaus weichen die Netzmodule der Bearbeitungsstationen (i.e.S.) nur durch diejenigen Beschriftungsindizes voneinander ab, die sich jeweils auf den Stationsnamen beziehen.
- 7) Diese Bearbeitungsstation wurde bereits bei der Modellierung des Transportsystems ausgewählt, um ein verfeinertes Teilnetz für den Übergabepunkt an einer Bearbeitungsstation zu entwickeln.
- 8) In die horizontalen Netzerweiterungen fließen auch vertikale Netzverfeinerungen ein. Z.B. werden die Makrotransitionen t_7 und t_8 aus der ersten Kernnetzerweiterung in der zweiten Kernnetzerweiterung verfeinert. Diese kombinierte Modellierungsstrategie entspricht der Vorgehensweise bei der Gestaltung des Netzmoduls für das Transportsystem. Allerdings dominierte bei der letztgenannten Netzgestaltung der Aspekt der hierarchischen Modulverfeinerung. Bei der hier erfolgenden Gestaltung des Netzmoduls einer Bearbeitungsstation herrscht dagegen der Aspekt der sukzessiven Modulerweiterung vor.
Die Netzerweiterungen führen auch zu zwei geringfügigen Modifizierungen des zunächst vorgestellten Kernnetzes. Erstens wird sein Teilnetz, das aus der Stelle "Eingangspuffer_BS_2", der Transition "bearbeitungsbeginn" und der dazwischen liegenden Kante besteht, durch ein Teilnetz verfeinert. Es umfaßt weiterhin die vorgenannte Stelle und Transition als Teilnetzränder. Aber die Kante wird durch eine zusätzliche Transition "einlastung_arbeitsgang", eine zusätzliche Stelle "Arbeitsbereich_nicht_mehr_frei" und neue Verknüpfungskanten ersetzt. Andererseits erhält die Transition "bearbeitungsende" des Kernnetzes den präzisierenden Transaktionsnamen "bearbeitungsende_mit_auslastung". Beide vorgenannten Modifizierungen erfolgen durch die zweite Kernnetzerweiterung. Solche Teilnetzverfeinerungen und Knotenumbenennungen werden durch die bisher erläuterten Verfeinerungen und Erweiterungen von Netzen nicht abgedeckt. Insbesondere gehört die oben skizzierte Teilnetzverfeinerung nicht zur hierarchischen Verfeinerungstechnik, da sie sich nicht auf die Verfeinerung einer Makrostelle oder -transition zurückführen läßt. Vielmehr besitzt sie die Qualität einer Kantenverfeinerung. Es wird darauf verzichtet, die vorgenannten zusätzlichen Verfeinerungs- und Umbenennungsoperationen weiter zu vertiefen.
- 9) Dies entspricht der Modellierung atomarer Transportoperationen.
- 10) Jeder Puffer besitzt die Kapazität, höchstens 2 Werkstücke aufzunehmen. Damit sind zwei Werkstücke i.w.S. gemeint. Sie bestehen jeweils aus einem Werkstückträger und allen darauf aufgespannten Werkstücken i.e.S.
- 11) Denn das Netzmodul des Transportsystems enthält auf der Darstellungsebene, auf der eine Verfeinerung des Übergabepunkts an der Bearbeitungsstation "BS_2" erfolgte, dieselben Schnittstellen s_{TEB2} und s_{TAB2} .
- 12) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.
- 13) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.
- 14) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.
- 15) Die Kapazität des Eingangspuffers wurde so groß festgelegt, daß sie ausreicht, um den Produktionsauftrag abzuwickeln, der später modelliert wird. Dieser Produktionsauftrag umfaßt einen Arbeitsgang, der auf der Bearbeitungsstation "BS_2" abgewickelt werden soll und in den insgesamt 7 Werkstücke eingehen.
- 16) Die Kapazität des Ausgangspuffers wird kleiner als die des Eingangspuffers angesetzt, weil in der Fallstudie eine synthetische Produktion betrachtet wird. Bei ihr können auf einer Bearbeitungsstation bei der Ausführung eines Arbeitsgangs zwar mehrere Werkstücke zugleich bearbeitet werden. Das Ergebnis einer Arbeitsgangausführung stellt aber immer ein - gegebenenfalls neu benanntes - Werkstück dar. Daher ist es möglich, daß sich die Anzahl

bearbeiteter Werkstücke im Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation gegenüber der Werkstückanzahl, die im Eingangspuffer einer Bearbeitungsstation für die Ausführung eines Arbeitsgangs vorgehalten wurde, *verringert* hat. Eine umgekehrte Vergrößerung der Werkstückanzahl ist bei synthetischer Produktion jedoch ausgeschlossen.

17) Vgl. zu ähnlichen Differenzierungen, die zumeist als Betriebs-, Funktions- oder Belegungszustände von Bearbeitungsstationen oder Maschinen behandelt werden, STUTE (1978a), S. 19f.; DÖTTLING (1981), S. 59; ALDINGER (1985a), S. 86f. u. 70 (Tabelle 2); KNOOP (1986), S. 142f.

18) Als zentraler Arbeitsbereich einer Bearbeitungsstation wird in dieser Fallstudie jede Aufenthaltsmöglichkeit von Werkstücken angesehen, die sich zwar in der Bearbeitungsstation, aber weder in ihrem Ein- noch in ihrem Ausgangspuffer befindet.

19) Zwecks Vereinfachung der Diktion wird stets davon gesprochen, daß durch die Ausführung eines Arbeitsgangs ein Werkstück bearbeitet wird. Dies trifft strenggenommen aber nur auf *das eine bearbeitete Werkstück* zu, das nach der Arbeitsgangausführung im Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation vorliegt. Denn die früher vorausgesetzten linearen oder synthetischen Produktionen stellen nur sicher, daß an jeder Bearbeitungsstation bei jeder Arbeitsgangausführung genau eine Produkteinheit als bearbeitetes Werkstück hergestellt wird. Im Falle einer synthetischen Produktion gehen jedoch bei der Arbeitsgangausführung an der Bearbeitungsstation in die Herstellung dieser einen Produkteinheit notwendig *mehrere zu bearbeitende Werkstücke* ein. Vgl. dazu auch die Konzeptualisierung der Aufbau- und Ablaufstruktur eines Produktionsauftrags durch GOZINTO- und Präzedenzgraphen. Auch dort wird eine synthetische Produktion zugrundegelegt. Infolgedessen kann sich das "eine" Werkstück, das während einer Arbeitsgangausführung bearbeitet wird, auf mehrere zu bearbeitende, in die Arbeitsgangausführung einfließende Werkstücke erstrecken. Daher muß im Eingangspuffer einer Bearbeitungsstation für jedes zu bearbeitende Werkstück, das in das "eine" Werkstück eingehen soll, das bei einer Arbeitsgangausführung bearbeitet wird, ein eigener Speicherplatz vorgesehen werden. Dies wird in der Gestaltung des Netzmoduls für Bearbeitungsstationen berücksichtigt. Denn die zu bearbeitenden Werkstücke werden erst bei der Einlastung eines Arbeitsgangs zu dem "einen" Werkstück des auszuführenden Arbeitsgangs zusammengefaßt.

20) Diese Konsequenz resultiert aus zwei früher getroffenen Konzeptualisierungsprämissen. Erstens wurde unterstellt, daß auf einer Bearbeitungsstation zur selben Zeit höchstens ein Arbeitsgang ausgeführt werden kann. Zweitens wurden Arbeitsgänge so weit definiert, daß derselbe Arbeitsgang sowohl Bearbeitungs- als auch Rüstoperationen umfassen kann. Folglich wird die Bearbeitungskapazität einer Bearbeitungsstation schon dann vollständig ausgenutzt, wenn auf ihr das Rüsten für die Bearbeitung eines Werkstücks eingeleitet ist. Das gilt auch dann, wenn sich das zu bearbeitende Werkstück überhaupt noch nicht im zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation befindet. Denn die Ausführung des Arbeitsgangs, der auf die Bearbeitung dieses Werkstücks abzielt, ist durch die gestartete Rüstoperation bereits begonnen worden. Da an der Bearbeitungsstation nur höchstens ein Arbeitsgang ausgeführt werden kann, darf ihr kein weiterer Arbeitsgang zur Ausführung eingelastet werden. Deswegen wird der zentrale Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation für andere Arbeitsgänge gesperrt, sobald ein Arbeitsgang eingelastet worden ist. Er wird erst dann für andere Arbeitsgänge freigegeben, wenn das Werkstück den zentralen Arbeitsbereich verläßt, indem es auf den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation abgelegt wird.

Die voranstehende Konzeptualisierung stellt eine wesentliche Einschränkung dar. Denn sie läßt kein bearbeitungsparalleles Umrüsten von Bearbeitungsstationen zu. Dies kann aber bei flexiblen Fertigungssystemen durchaus der Fall sein. Vgl. zu solchen bearbeitungsparallelen Umrüstungen - mit speziellem Bezug auf flexible Fertigungssysteme - EVERSHEIM (1981), S. 155; FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMTECHNIK (1982), S. 5; SELIGER (1983), S. 68; DEY (1984), S. 464; KNOOP (1986), S. 49; HELBERG (1987), S. 47f.; BÖTZOW (1988a), S. 141 (ansatzweise); O.V. (1988i), S. 23; vgl. des weiteren allgemeine Ausführungen zu dieser Umrüstungsweise JUNGHANNS (1976), S. 48; JUNGHANNS (1971), S. 49; WILDEMANN (1984a), S. 30; MÜLLER, U. (1988b), S. 148ff.

Um bearbeitungsparalleles Umrüsten erfassen zu können, sind zwei Wege möglich. Entweder werden Rüstoperationen als Arbeitsgänge *sui generis* Konzeptualisiert. Dieser Ansatz findet sich z.B. bei MÜLLER, U. (1988b), S. 148f. Oder Bearbeitungs- und Rüstoperationen bleiben weiterhin in einem gemeinsamen Arbeitsgang zusammengefaßt. Aber es wird zugelassen, daß zwei aufeinander folgende Arbeitsgänge auf derselben Bearbeitungsstation derart überlappend ausgeführt werden dürfen, daß die Ausführung der Rüstoperation eines nachfolgenden Arbeitsgangs noch während der Ausführung der Bearbeitungsoperation des vorangehenden Arbeitsgangs begonnen werden darf. In beiden Fällen muß die o.a. Prämisse, auf einer Bearbeitungsstation lasse sich im selben Zeitpunkt nur höchstens ein Arbeitsgang ausführen, abgeschwächt werden. Statt dessen ist es erforderlich zu erlauben, daß zwei Arbeitsgänge in dem Ausmaß gleichzeitig ausgeführt werden können, in dem Bearbeitungs- und Rüstoperationen betroffen sind, die zu zwei aufeinander folgenden Werkstückbearbeitungen gehören. In dieser Hinsicht trifft die implizite Unterstellung von MÜLLER, U. (1988b), S. 149, alle Arbeitsgänge an derselben Bearbeitungsstation müßten sequentiell nacheinander ausgeführt werden, nicht zu. Auf solche Komplizierungen, die für bearbeitungsparalleles Rüsten erforderlich wären, wird in dieser Arbeit aber wegen der beiden o.a. Konzeptualisierungsprämissen verzichtet. Allerdings könnten sie in das hier präsentierte Netzmodul einer Bearbeitungsstation ohne größere Schwierigkeiten aufgenommen werden. Dazu reicht es aus, die Abhängigkeiten zwischen den Transitionen geringfügig so zu modifizieren, daß sich die Starttransition der Rüstoperation schon dann aktivieren läßt, wenn die jeweils vorangehende

- Ausführung der Rüstoperation abgeschlossen ist. Dann wird zur Aktivierung der Rüstoperation nicht mehr so lange gewartet, bis das zuletzt bearbeitete Werkstück in den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation abgelegt worden ist.
- 21) Beispielsweise kann der Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation von Werkstücken, die dort auf Abtransport warten, vollständig eingenommen sein. Dann kann das Werkstück, das sich noch im zentralen Arbeitsbereich, nicht auf den Ausgangspuffer abgelegt werden. Eine solche Blockierung beschreibt z.B. KOCHAN, D. (1986), S. 140. Ähnliche Blockierungsfälle, die ebenso auf Verstopfungen der Pufferlager von Bearbeitungsstationen beruhen, finden sich bei ABEL, D. (1986a), S. 62; KNOOP (1986), S. 143 u. 166.
- 22) Eine freie Bearbeitungsstation wird als leer bezeichnet, wenn zwei zusätzliche Bedingungen erfüllt sind. Erstens müssen alle Lagerplätze des Eingangspuffers der betriebsbereiten Station leer sein. Zweitens darf sich im zentralen Arbeitsbereich der Station kein Werkstück befinden. Dabei ist zu beachten, daß der Eingangspuffer der Bearbeitungsstation die Kapazität von 2 Werkstücken besitzt. Daher kann eine belegte Bearbeitungsstation niemals unmittelbar leer werden (vice versa).
- 23) Eine ähnliche, aber einfachere graphische Zustandsbeschreibung findet sich bei KNOOP (1986), S. 142. Um die Transparenz des Zustandsgraphen zu fördern, werden in der Abb. 165 bidirektionale Kanten benutzt. Sie vertreten jeweils zwei entgegengesetzt gerichtete, aber dasselbe Knotenpaar verknüpfende (unidirektionale) Kanten.
- 24) Eine fünfte Attributmarke wird später als Rüstmarke vorgestellt. Sie dient aber nicht dazu, die oben angeführten Zustände der Bearbeitungsstation auszudrücken. Vielmehr handelt es sich um eine Hilfsmarke für die Erfassung reihenfolgeabhängiger Rüstauern und -kosten. Auch die Informationsmarken, die später eingeführt werden, stellen Attributmarken dar, die nicht auf die Zustandsbeschreibung einer Bearbeitungsstation abzielen. Vielmehr erfüllen sie eine informationsvermittelnde Funktion.
- 25) Darüber hinaus gestatten sie, durch zusätzliche Attribute weitere koordinierungsrelevante Informationen zu repräsentieren. Dazu gehört z.B. die Verfügbarkeitsdauer. Sie präzisiert die nominal gemessene Beschreibungsdimension der Stationsverfügbarkeit auf metrischer Skala.
- 26) Wenn die Bearbeitungsstation nicht verfügbar ist, wird ihre Verfügbarkeitsdauer auf den Wert Null gesetzt. Der letzte Ermittlungszeitpunkt wird entweder mit dem Wert Null initialisiert oder auf denjenigen Zeitpunkt gesetzt, in dem das letzte Mal das Ablaufen der Stationsverfügbarkeit festgestellt wurde.
- 27) Allerdings wird für die drei Bearbeitungsstationen i.e.S. unterstellt, daß sie in denselben Zeitintervallen verfügbar (nicht verfügbar) sind. Ihre gemeinsamen Verfügbarkeitsintervalle werden fortan auch als Betriebszeit des modellierten Produktionssystems bezeichnet.
- 28) Die Nachtschicht reicht vom Ende der Spätschicht (19.00 Uhr) bis zum Beginn der Frühschicht (5.00 Uhr). An allen Tagen, an denen eine Nachtschicht vorgesehen ist, können daher die Bearbeitungsstationen (i.e.S.) ununterbrochen genutzt werden.
- 29) Für die Spannstation wird dagegen vorausgesetzt, daß sie stets die Bedienung durch eine Arbeitskraft erfordert. Sie läßt sich daher nur während der Früh- und Spätschichten nutzen.
- 30) Eine verfügbare, aber gestörte Bearbeitungsstation kann in zwei Fällen vorliegen. Einerseits ist es möglich, daß die Bearbeitungsstation während der Phase ihrer Nichtverfügbarkeit beschädigt wurde. Andererseits kann die Station ihre Betriebsbereitschaft schon während einer ihrer vorangehenden Verfügbarkeitsintervalle eingebüßt haben. Aber es ist zwischenzeitlich noch nicht gelungen, ihre Betriebsbereitschaft wiederherzustellen.
- 31) Das Prüfungsergebnis wird als Systemmeldung an das Netzmodell der Bearbeitungsstation übermittelt. Dort sind die beiden Transitionen t_4 und t_5 bei Wiederaufnahme der Betriebstätigkeit konfliktionär aktiviert. Je nachdem, ob die Systemmeldung entweder "betriebsbereit" oder aber "gestört" lautet, schaltet die Transition t_5 bzw. t_4 . Ansonsten lehnt sich die Modellierung der Verfügbarkeit einer Bearbeitungsstation - einschließlich ihres Verfügbarkeitskalenders - eng an die entsprechenden Konstruktionen an, die bereits für Arbeitskräfte entfaltet wurden. Vgl. insbesondere auch die Ausführungen zur zeitlichen Verknüpfung des Schichtplans mit den Zeitgrößen der Fallstudie. Dort wurde bereits die Möglichkeit, Bearbeitungsstationen während einer unbemannten Nachtschicht einzusetzen, berücksichtigt.
- 32) Die beiden Transitionen t_7 und t_8 , die das Eintreffen von Systemmeldungen über das Eintreten und Beseitigen von Störungen der Bearbeitungsstation wiedergeben, stellen Makrotransitionen dar. Sie werden später verfeinert.
- 33) Dabei wird auf die Vereinbarung zurückgegriffen, bei Platzknappheit darauf zu verzichten, die Transitionen mit den Restriktionsformeln aus der zugehörigen Transaktionen zu beschriften.
- 34) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

35) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

36) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

37) Die Ermittlung der prädikatenlogischen Formel für die Betriebszeit des Produktionssystems beruht einerseits auf dem Zeitraster, das in einer früheren Anmerkung vorgestellt wurde. Andererseits gehen in diese Formel die früheren Vereinbarungen für die Früh-, Spät- und Nachtschichten von Bearbeitungsstationen ein. Diese Festlegungen gelten für die drei Bearbeitungsstationen BS_1, BS_2 und BS_3 in derselben Weise. Daher ist es - anders als bei den Arbeitskräften - hier nicht erforderlich, in der betriebszeitbeschreibenden Formel zwischen den drei Bearbeitungsstationen zu differenzieren. Die Zeitlücke in der Formel repräsentiert die Betriebsruhe, die zwischen dem Ende der Frühschicht am Samstag und dem Beginn der Frühschicht am Montag klafft.

38) Durch die Kombination mit einem Ausschnitt aus der ersten Kernnetzerweiterung wird ebenfalls offengelegt, ob die Bearbeitungsstation gestört ist oder nicht zur Verfügung steht.

39) Wie dies im einzelnen geschieht, bleibt im Rahmen der zweiten Kernnetzerweiterung noch offen. Denn die Initialisierung der Attributausprägungen setzt voraus, daß die Eigenschaften des nächsten Arbeitsgangs bekannt sind. Die Informationen darüber werden aber erst später durch eine entsprechende Informationsmarke geliefert. Daher bleibt die Transaktionsvorschrift der Transition "einlastung_arbeitsgang" zunächst unterbestimmt.

40) Es handelt sich um die Sollausführungsdauer, die als Vorgabezeit im Arbeitsplan desjenigen Produktionsauftrags festgelegt wird, zu dessen Abwicklung die Arbeitsgangausführung beiträgt. Die Istausführungsdauer des Arbeitsgangs braucht jedoch wegen der Möglichkeit von Störungen mit der Vorgabezeit nicht übereinzustimmen. Daher wird die Bearbeitungsdauer des Werkstücks auf der Bearbeitungsstation nicht auf der Basis der Sollausführungsdauer des jeweils betroffenen Arbeitsgangs berechnet. Vielmehr umfaßt sie die tatsächliche Verweilzeit des bearbeiteten Werkstücks auf der Bearbeitungsstation.

41) Die Werkstückauslastung kann trotz abgeschlossener Arbeitsgangausführung verhindert werden. Dies kann insbesondere daran liegen, daß der Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation durch dort befindliche Werkstücke vollständig in Anspruch genommen wird. Andere Gründe - wie etwa autonome Dispositionen ausführende Arbeitskräfte - können die Werkstückauslastung ebenso aufschieben. Beispielsweise läßt sich eine nachträgliche, im Arbeitsplan nicht vorgesehene Werkstückinspektion vorstellen. In allen Fällen, in denen die Werkstückauslastung trotz abgeschlossener Arbeitsgangausführung unterbleibt, geht die Bearbeitungsstation in die Bearbeitungsphase "blockiert" über. Sie wird erst dann verlassen, wenn das blockierende Werkstück in den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation abgelegt wird.

Sobald die Arbeitsgangausführung auf der Bearbeitungsstation abgeschlossen ist, sind per constructionem die beiden Transitionen t_2 und t_{12} konfliktionär aktiviert. Ihre Schaltakte bedeuten, daß die Bearbeitungsstation entweder durch Arbeitsgangauslastung in die Bearbeitungsphase "wartend" übergeht (t_2) oder aber durch Auslastungsverhinderung die Bearbeitungsphase "blockiert" einnimmt. Genau eine von diesen beiden Phasen *muß* eintreten, sobald die Ausführung des Arbeitsgangs beendet ist. Dieser Umstand wird dadurch berücksichtigt, daß die Eingangskanten der Transitionen t_2 und t_{12} Obligatkanten darstellen. Da die beiden Transitionen konfliktionär aktiviert sind, sofern sie überhaupt aktiviert sind, wirkt sich die frühere Vereinbarung aus, daß von konfliktionär aktivierten obligatorischen Transitionen stets genau eine geschaltet werden muß.

42) Die arbeitsgangspezifischen Bearbeitungskosten umfassen zunächst die Kosten, die für das Auf- oder Umrüsten der Bearbeitungsstation angefallen sind. Hinzu kommen die Kosten für die Ausführung der arbeitsgangspezifischen Bearbeitungsoperation. Sie werden als das Produkt aus der arbeitsgangspezifischen Bearbeitungsdauer und aus dem stationspezifischen Bearbeitungskostensatz ermittelt. Daher fallen auch dann Bearbeitungskosten an, wenn sich das Werkstück im zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation befindet, aber der eingelastete Arbeitsgang noch nicht oder nicht mehr ausgeführt wird. Denn auch in diesen Zeiträumen wird die Bearbeitungskapazität der Bearbeitungsstation vom Werkstück beansprucht. Da der Bearbeitungskostensatz auf die Zeit der Inanspruchnahme der Bearbeitungsstation durch ein Werkstück bezogen wurde, müssen auch diese Zeiträume kostenwirksam berücksichtigt werden.

Der Bearbeitungskostensatz wird hier als ein fester, zeitbezogener Verrechnungssatz für Bearbeitungskosten unterstellt. Er läßt sich aus den Maschinen- oder Platzkostenstundensätzen ableiten, die schon früher angesprochen wurden. Dazu brauchen jene Stundensätze lediglich auf diejenige Zeiteinheit umgerechnet zu werden, die in den hier verwendeten Netzmodulen benutzt wird. Wenn als Zeiteinheit die Stunde gewählt wurde, kann der Bearbeitungskostensatz unmittelbar mit dem Maschinen- oder Platzkostenstundensatz identifiziert werden. Auf jeden Fall mißt der Bearbeitungskostensatz diejenigen Bearbeitungskosten, die je Zeiteinheit an der Bearbeitungsstation anfallen, sofern ihre Bearbeitungskapazität durch ein Werkstück in Anspruch genommen wird, das sich im zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation befindet. Dieser Bearbeitungskostensatz kann auch den Wert "Null" annehmen.

Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn am Prinzip einer streng verursachungsgerechten Kostenrechnung festgehalten wird. Denn aus dieser Perspektive verhalten sich Maschinen- und Platzkostenstundensätze im allgemeinen nicht verursachungsgerecht. Dann entstehen überhaupt keine arbeitsgangspezifischen Bearbeitungskosten.

Darüber hinaus kann auch wieder die Perspektive der Prozeßkostenrechnung eingenommen werden. Dann ist der zeitbezogene Bearbeitungskostensatz durch einen aktivitätsbezogenen Bearbeitungskostenbetrag zu ersetzen. Dieser Bearbeitungskostenbetrag gibt dann jene Kosten an, die bei jeder Ausführung der Aktivität "Arbeitsgang" anfallen. Dieser aktivitätsbezogene Bearbeitungskostenbetrag läßt sich den beiden Transitionen t_2 und t_{12} , die jeweils das Ende einer Arbeitsgangausführung repräsentieren, als Schaltkosten zuordnen. Bei jedem Schalten dieser Transitionen werden die Kosten des betroffenen Werkstücks um den Bearbeitungskostenbetrag erhöht. Daneben muß die Transaktionsvorschrift der Transition t_2 angepaßt werden. Zu diesem Zweck reicht es aus, in der Berechnungsanweisung für die Variable "Kosten" das Produkt aus Bearbeitungskostensatz und Dauer der Bearbeitung durch den Bearbeitungskostenbetrag zu substituieren. Schließlich muß auch die Kostenberechnung aus der Transaktionsvorschrift der Transition t_{13} gestrichen, in die Transaktionsvorschrift der Transition t_{12} übernommen und dort auf analoge Weise auf den aktivitätsbezogenen Bearbeitungskostenbetrag umgestellt werden.

43) Die arbeitsgangspezifische Bearbeitungsdauer ist das Zeitintervall, das sich zwischen dem Ein- und dem Auslastungszeitpunkt des ausgeführten Arbeitsgangs erstreckt. Es umfaßt die Zeitspannen, die für das Rüsten der Bearbeitungsstation und für die Ausführung der arbeitsgangzugehörigen Bearbeitungsoperation tatsächlich angefallen sind. Beide Zeitspannen brauchen mit den Vorgabezeiten für das Rüsten bzw. die Arbeitsgangausführung nicht übereinzustimmen. Statt dessen werden sie durch die Schaltzeitpunkte der Transitionen t_{10} und t_{11} (für das Rüsten) bzw. t_1 und t_2 (für die Arbeitsgangausführung) determiniert. Daher können die beiden Zeitspannen auch Rüst- und Bearbeitungsverzögerungen umfassen. Hinzu kommt unter Umständen diejenige Zeitspanne, während der das bearbeitete Werkstück den zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation blockiert, weil es nach seinem Bearbeitungsende nicht unmittelbar in den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation gelangt.

In der Fallstudie werden allerdings Beschleunigungen von Rüst- oder Bearbeitungsoperationen nicht berücksichtigt. Dies wird durch die Restriktionsformeln aus den Schaltvorschriften für die Transitionen t_{11} und t_2 verhindert. Denn sie lassen das Rüst- bzw. Bearbeitungsende frühestens dann zu, wenn die Vorgabezeiten für das Rüsten bzw. die Arbeitsgangausführung verstrichen sind. Falls solche Beschleunigungen erfaßt werden sollen, müssen die beiden vorgenannten Transitionen verdoppelt werden. Das erste Exemplar ist jeweils wie die ursprüngliche definiert. Im zweiten Exemplar wird jeweils die o.a. Restriktionsformel durch eine Systemmeldung über das verfrühte Rüst- oder Bearbeitungsende ersetzt. Falls diese Systemmeldungen eintreffen, liegt eine entsprechende Rüst- oder Bearbeitungsbeschleunigung vor.

44) Es handelt sich um die weit gefaßten Bearbeitungsdauern und -kosten, die für Werkstücke definiert wurden. Sie enthalten nicht nur die Zeit- und Kostengrößen für die Ausführung von Bearbeitungsoperationen im engeren Sinne, sondern ebenso die zugehörigen Rüst-dauern und -kosten. Darüber hinaus werden auch Zeit- und Kostenkomponenten berücksichtigt, die bei Rüstverzögerungen oder beim Blockieren der Bearbeitungsstation anfallen. Vgl. dazu die Festlegungen für Bearbeitungskosten und -dauern in den beiden voranstehenden Anmerkungen.

45) Zu Beginn der Betriebszeit nimmt die Bearbeitungsstation den Istrüztzustand "ungerüstet" ein. Für die Ausführung des ersten Arbeitsgangs muß die Bearbeitungsstation auf dessen Sollrüztzustand aufgerüstet werden. Beim Übergang zwischen zwei Arbeitsgangausführungen ist ein Umrüsten nur dann erforderlich, wenn Soll- und Istrüztzustand auseinanderfallen. Dies wird in der oben erwähnten Transaktionsvorschrift berücksichtigt. Beim Ablaufen der Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation wird sie auf den Zustand "ungerüstet" abgerüstet.

46) Es hängt vom Detaillierungsgrad der Modellierung ab, wie viele Rüstzustände einer Bearbeitungsstation unterschieden werden. In der Fallstudie soll nur die prinzipielle Möglichkeit aufgezeigt werden, die reihenfolgeabhängigen Rüst-dauern und -kosten zu berücksichtigen. Daher beschränkt sich der Verf. darauf, nur die geringe Zahl von vier Rüstzuständen zu erfassen. Sie können jedoch bei Bedarf beliebig vermehrt werden. Ebenso bereitet es keine Schwierigkeiten, auf reihenfolgeabhängige Rüst-dauern und -kosten zu verzichten. In diesem Fall brauchen in der Rüstmatrix lediglich für alle Übergänge zwischen Soll- und Istrüztzuständen dieselben konstanten Zeit- bzw. Kostenbeträge angesetzt zu werden.

47) Das Verhältnis zwischen der ersten und zweiten Kernnetzerweiterung ist durch drei Besonderheiten geprägt. Erstens stellt die zweite Kernnetzerweiterung eine kombinierte Erweiterung und Verfeinerung der ersten Kernnetzerweiterung dar. Der Erweiterungsaspekt erstreckt sich auf die Nutzungsmarke, auf die Stellen und Transitionen, die das Befinden bzw. Fortschalten von Kopien der Nutzungsmarke betreffen, und auf die Rüstaspekte. Die Verfeinerung der ersten Kernnetzerweiterung erfolgt dagegen für deren Transitionen t_7 und t_8 . Sie werden in jeweils 5 Subtransitionen aufgespalten. Die Subtransitionen entsprechen jeweils einer Bearbeitungsphase, in der sich die Bearbeitungsstation vor dem Störungseintritt befunden hat und zu der sie nach der Störungsbeseitigung zurückkehrt. Aus der Perspektive der zweiten Kernnetzerweiterung stellen die beiden Transitionen t_7 und t_8 der ersten Kernnetzerweiterung also Makrotransitionen dar.

Zweitens werden Schalthprioritäten eingeführt. Sie stellen sicher, daß die Nutzung der Bearbeitungsstation nicht fortgesetzt werden kann, sobald eine Störung ihrer Betriebsbereitschaft eingetreten ist. Beispielsweise wird durch die

beiden Schulprioritäten $sp_{7,1}$ und sp_9 mit $sp_{7,1} > sp_9$ erreicht, daß die Transition "einlastung_arbeitsgang" nicht schalten kann, falls sie zufällig im gleichen Zustand des Netzmoduls aktiviert ist, in dem eine Systemmeldung über eine Störung der wartenden Bearbeitungsstation eintrifft. In diesem Fall wird die Bearbeitungsstation zunächst vom wartenden in den prioritätsbevorzugten gestörten Zustand versetzt. Erst wenn eine Systemmeldung über die Beseitigung der Störung vorliegt, befindet sich die Bearbeitungsstation wieder im Wartezustand. Danach kann die Transition "einlastung_arbeitsgang" schalten. Später wird die Einlastungstransition verfeinert und in 4 Subtransitionen aufgespalten. Dann gilt die o.a. Prioritätsbeziehung sowohl für die erste als auch für die vierte Subtransition: $sp_{7,1} > sp_{9,1}$ und $sp_{7,1} > sp_{9,4}$.

Drittens endet die Betriebszeit erst dann, wenn die Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation abgelaufen ist und sich die Bearbeitungsstation in der Phase "wartend" befindet. Dies kann bedeuten, daß die Werkstückbearbeitung an der Bearbeitungsstation so lange fortgesetzt wird, bis das zuletzt bearbeitete Werkstück im Ausgangspuffer abgelegt ist. Dies gilt auch dann, wenn die Bearbeitungsstation nach Maßgabe ihres Verfügbarkeitskalenders schon nicht mehr zur Verfügung stände. In diesem Fall wird die Nutzung der Bearbeitungsstation so weit verlängert, bis die Werkstückbearbeitung durch Auslastung des letzten Arbeitsgangs abgeschlossen ist. Bei der nächsten Kernnetzerweiterung wird berücksichtigt, daß auf der Bearbeitungsstation nur solche Arbeitsgänge eingelastet werden, die sich innerhalb der Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation ausführen lassen. Darüber hinaus kann noch ein Zuschlag für das Rüsten der Bearbeitungsstation und eventuell auftretende Verzögerungen berücksichtigt werden. Aufgrund dieser potentiellen Nutzungsverlängerung werden die beiden Informationskanten, die sich in der ersten Kernnetzerweiterung von der Stelle "Verfügbar_und_betriebsbereit" zu den beiden Transitionen "bearbeitungsbeginn" und "bearbeitungsende" erstrecken, in der zweiten Kernnetzerweiterung eliminiert. Denn sie würden verhindern, daß die letzte Bearbeitungsoperation der Bearbeitungsstation bei Ablauf ihrer Verfügbarkeitsdauer noch ausgeführt werden kann, um in die Betriebsphase "wartend" zurückzukehren. Allerdings kann der Sonderfall eintreten, daß während der Nutzungsverlängerung eine Bereitschaftsstörung der Bearbeitungsstation eintritt. Dann wird nicht abgewartet, bis der zuletzt ausgeführte Arbeitsgang ausgelastet ist. Statt dessen endet die Betriebszeit störungsbedingt. Das nächste Verfügbarkeitsintervall der Bearbeitungsstation beginnt durch das Schalten der Transition "betriebszeitbeginn_betriebsbereit" ("betriebszeitbeginn_gestört"), falls die Störungsbeseitigung während der Nichtverfügbarkeit (nicht) gelungen ist. Die Störung ist erst dann beseitigt, wenn sich das zuletzt bearbeitete Werkstück nicht mehr im zentralen Arbeitsbereich der Bearbeitungsstation befindet.

48) Wegen der starken Volumenzunahme der zweiten Kernnetzerweiterung werden in der Netzgraphik diejenigen Komponenten, die aus der ersten Kernnetzerweiterung bereits bekannt sind, nur kurz - aber eindeutig - gekennzeichnet. Auf die ausführlichen Stellen- und Transitionenbeschriftungen wird dabei verzichtet. Darüber hinaus ist noch ein besonderer Aspekt zu beachten: Die beiden Informationskanten, die sich in der ersten Kernnetzerweiterung von der Stelle "Verfügbar_und_betriebsbereit" zu den beiden Transitionen "bearbeitungsbeginn" und "bearbeitungsende" erstrecken, werden angesichts der zweiten Kernnetzerweiterung überflüssig, aber nicht fehlerhaft. Es steht daher im Belieben des Modellierungsträgers, ob er die redundanten Informationskanten beibehält oder aufgibt. Der Verf. hat sich zugunsten der zweiten Alternative entschieden, um das Netzvolumen zu reduzieren.

49) Der Wert des Konstantensymbols "bearbeitungskostensatz" ist der Verrechnungssatz für die Bearbeitungskosten, die an der Bearbeitungsstation anfallen. Seine Dimension ist:

DM [Bearbeitungskosten] : min [Bearbeitungszeit] = DM/min

Dieser Bearbeitungskostensatz kann von Bearbeitungsstation zu Bearbeitungsstation variieren. Da jede Bearbeitungsstation durch ein eigenes Netzmodul repräsentiert wird, braucht der Bearbeitungskostensatz aber nicht stationspezifisch ausgezeichnet (indiziert) zu werden.

50) Die reihenfolgeabhängigen Rüstkostensätze werden als Konstantensymbole "rüstkostensatz_izX_szY" eingeführt. Sie legen die Rüstkosten fest, die beim Übergang vom Istrüszustand iz_X zum Sollrüszustand sz_Y anfallen. Sie werden in der Dimension "DM" gemessen. Es werden insgesamt nur 4 Rüstzustände der Bearbeitungsstation unterschieden. Sie werden durch die Zustandsindizes "0", "1", "2" und "3" gekennzeichnet. Daher gilt $X, Y \in \{0, 1, 2, 3\}$. Der ungerüstete Zustand der Bearbeitungsstation erhält den Index "0". Wenn Soll- und Istrüszustand zusammenfallen ($X=Y$), erfolgt kein Zustandsübergang. Entsprechend werden auch keine Rüstkosten verursacht. Dies wird durch die Festlegung "rüstkostensatz_izX_szY = 0" für $X=Y$ explizit ausgewiesen.

51) Die reihenfolgeabhängigen Rüstauern werden analog zu den voranstehenden Rüstkostensätzen als Konstantensymbole "rüstdauer_izX_szY" festgelegt. Die Erläuterungen aus der voranstehenden Anmerkung werden entsprechend übernommen. Lediglich die Dimension der Rüstdauer wird durch "min [Rüstzeit]" neu vereinbart.

52) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

- 53) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.
- 54) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.
- 55) Die Ermittlung der prädikatenlogischen Formel für die Betriebszeit des Produktionssystems beruht einerseits auf dem Zeitraster, das in einer der voranstehenden Anmerkungen vorgestellt wurde. Andererseits gehen in diese Formel die früheren Vereinbarungen für die Früh-, Spät- und Nachtschichten von Bearbeitungsstationen ein. Diese Festlegungen gelten für die drei Bearbeitungsstationen BS_1, BS_2 und BS_3 in derselben Weise. Daher ist es - anders als bei den Arbeitskräften - hier nicht erforderlich, in der betriebszeitbeschreibenden Formel zwischen den drei Bearbeitungsstationen zu differenzieren. Die Zeitlücke in der Formel repräsentiert die Betriebsruhe, die zwischen dem Ende der Frühschicht am Samstag und dem Beginn der Frühschicht am Montag klafft.
- 56) Die Variable "Sollrüstzustand" ist hier noch nicht durch einen wohldefinierten Term gebunden. Dies erfolgt erst später, wenn eine zusätzliche Informationsmarke mitteilt, welcher Rüstzustand der Bearbeitungsstation für die Ausführung des eingelasteten Arbeitsgangs erforderlich ist.
- 57) Auch die Variable "Agadauer" ist noch nicht durch einen wohldefinierten Term gebunden. Dies geschieht, wenn die zusätzliche Informationsmarke eingeführt wird, die bereits in der voranstehenden Anmerkung erwähnt wurde. Diese Informationsmarke wird auch angeben, wie groß die Ausführungsdauer derjenigen Bearbeitungsoperation ist, die zu dem betrachteten Arbeitsgang gehört.
- 58) Mit der Hilfe dieser Wertzuweisung läßt sich bei Bedarf feststellen, wie lange die Blockierung der Bearbeitungsstation in der aktuellen Produktionssituation jeweils andauert.
- 59) Wie diese Zuordnung selbst geschieht, wird an späterer Stelle näher ausgeführt.
- 60) Die dritte Netzerweiterung stellt daher nur noch eine mittelbare Kernnetzerweiterung dar. Denn sie bezieht sich nicht mehr unmittelbar auf das Kernnetz, sondern nur noch auf dessen zweite Erweiterung. Im folgenden wird zwischen unmittelbaren und mittelbaren Kernnetzerweiterungen nicht weiter unterschieden. Deshalb wird auch die dritte Netzerweiterung als eine Kernnetzerweiterung thematisiert. (Gleiches gilt für die spätere vierte Netzerweiterung.)
- 61) Die Puffermarke bezieht sich nur auf den Eingangspuffer der Bearbeitungsstation. Eine entsprechende Marke für den Ausgangspuffer wird nicht modelliert. Daher wird auf die präzisere, aber umständliche Diktion verzichtet, von einer "Eingangspuffermarke" zu sprechen.
- 62) Diese Mitteilung geschieht durch eine besondere Informationsmarke. Darauf wird in Kürze näher eingegangen.
- 63) Darüber hinaus erfüllt die Puffermarke eine dritte Funktion. Sie wird hier nicht besonders herausgestellt, weil sie nur "technischen" Charakter trägt. Aber sie ist unbedingt erforderlich, sobald synthetische Produktionen zugelassen werden. Dann muß die Besonderheit beachtet werden, daß sich die Ausführung eines Arbeitsgangs auf *mehrere* zu bearbeitende Werkstücke erstrecken kann, aus denen ein - in der Regel neu benanntes - bearbeitetes Werkstück hervorgeht. In diesem Fall ist es notwendig, die mehreren eingehenden Werkstücke mit dem einen hervorgebrachten Werkstück eindeutig zu verknüpfen. Eine solche "technische" Überleitung zwischen unterschiedlichen Werkstücken, die an derselben Arbeitsgangausführung teilhaben, wird in Modellierungen von Produktionssystemen kaum explizit behandelt. Hier geschieht sie mit Hilfe der Informationen, die in der Puffermarke über auszuführende Arbeitsgänge bereitgehalten werden.
- 64) Falls die Bearbeitungsstation nicht betriebsbereit oder nicht verfügbar ist, wird dem Attribut die neutrale Ausprägung "nil" zugewiesen.
- 65) Ein Speicherplatz ist frei, wenn er weder für ein Werkstück reserviert noch von einem Werkstück physisch eingenommen wird. Die Anzahl der freien Speicherplätze wird auch dann angegeben, wenn die Bearbeitungsstation gestört oder nicht verfügbar ist. Dies erspart es, bei jeder Wiederinbetriebnahme der Bearbeitungsstation die Anzahl freier Pufferplätze erneut ermitteln zu müssen. Allerdings wird nicht ausgeschlossen, daß Ereignisse eintreten können, die eine Korrektur der ausgewiesenen Anzahl freier Speicherplätze erfordern. Z.B. läßt sich vorstellen, daß eine Störung der Bearbeitungsstation dazu geführt hat, ein beschädigtes Werkstück aus ihrem Eingangspuffer zu entfernen. Solche Korrekturen werden im Rahmen der Fallstudie nicht berücksichtigt.
- 66) Vgl. das Netzmodul für die Modellierung eines Produktionsauftrags. Dort gehen z.B. in denjenigen Arbeitsgang, durch dessen Ausführung eine Einheit der Endproduktart hergestellt wird, insgesamt 7 Werkstücke ein: 4 Einheiten einer Vorproduktart, 1 Einheit einer ersten und 2 Einheiten einer zweiten Zwischenproduktart (vgl. z.B. den GOZINTO-Graphen in Abb. 177).

67) Es wird hier nur auf die *geplante* Verfügbarkeit der Bearbeitungsstation Bezug genommen, weil nach Ablauf der Verfügbarkeitsdauer eine ungeplante Nacharbeit für das Abschließen des jeweils zuletzt eingelasteten Arbeitsgangs erforderlich werden kann.

68) Die jeweils gültige Verfügbarkeitsdauer wird bei jedem Fortschalten der Systemuhr neu berechnet. Zu diesem Zweck wird die zuletzt ermittelte Verfügbarkeitsdauer von derjenigen Kopie der Potentialmarke abgefragt, die sich auf der Stelle "Verfügbar_und_betriebsbereit" befindet. Dies gilt allerdings nur so lange, wie die Bearbeitungsstation tatsächlich betriebsbereit zur Verfügung steht. Sobald diese Voraussetzung nicht mehr erfüllt ist, verliert die vorgenannte Stelle ihre Markenkopie. Dies wird im Netzmodul der Bearbeitungsstation erkannt. Entsprechend werden die aktuelle Verfügbarkeitsdauer in der Puffermarke auf den Wert "0" und der Belegungsstatus auf die neutrale Attributausprägung "nil" zurückgesetzt. Vgl. dazu die Konstruktion der Transitionen t_{15} und t_{16} in der Netzgraphik und -legende der dritten Netzerweiterung.

69) Vgl. dazu die Erläuterungen zum Informationsgehalt der Ausführungsdauern von Arbeitsgängen. Da das Ausmaß von *unvorhergesehenen* Ausführungsverzögerungen grundsätzlich nicht exakt begrenzt werden kann, vermag ein Sicherheitszuschlag nicht zu garantieren, daß die Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation *immer* ausreicht, um die eingelasteten Arbeitsgänge tatsächlich auszuführen. Daher muß die Möglichkeit von Nacharbeit, die nach Ablauf der geplanten Verfügbarkeitsdauer erfolgt, auch weiterhin in Rechnung gestellt werden. Wie groß der Sicherheitszuschlag ausfällt, wird in dieser Arbeit nicht weiter diskutiert. Statt dessen wird ein relativer Zuschlag von 20% der geplanten Ausführungsdauer des jeweils betrachteten Arbeitsgangs vorausgesetzt.

70) Die Informationen, die in den Kopien der Puffermarke über auszuführende Arbeitsgänge enthalten sind, werden hier nur kurz vorgestellt. Sie werden erst an späterer Stelle ausführlicher erläutert. Denn ihr Verständnis wird erleichtert, wenn der Kontext derjenigen Produktionsaufträge bekannt ist, zu deren Abwicklung die zugeordneten Arbeitsgänge beitragen sollen.

Die arbeitsgangspezifizierenden Informationen erstrecken sich einerseits auf Angaben, die im Rahmen der Fallstudie unbedingt erforderlich sind, um den Arbeitsgang auf der Bearbeitungsstation ausführen zu können. Dazu gehören vor allem die Ausführungsdauer des Arbeitsgangs und der Rüstzustand, den die Bearbeitungsstation vor Beginn der Arbeitsgangausführung einnehmen soll. Diese beiden Informationen wurden bei der zweiten Kernnetz-erweiterung vorausgesetzt, ohne daß sie dort konkret zur Verfügung standen. Sie werden nunmehr durch Attributausprägungen der Puffermarke nachgereicht.

Andererseits werden aber auch solche Informationen berücksichtigt, die für die Arbeitsgangausführung angesichts der hier vorgelegten Modellierung von Bearbeitungsstationen nicht benötigt werden. Es handelt sich daher strenggenommen um abundante Informationsvorhaltung. Sie geschieht dennoch, um spätere Erweiterungen des Netzmoduls für Bearbeitungsstationen zu erleichtern. Dabei wird an Erweiterungen gedacht, die sich auf Produktionssituationen beziehen, in denen an einer Bearbeitungsstation *mehrere* einzulastende Arbeitsgänge zur Auswahl stehen. Eine solche Situation liegt vor, wenn einer Bearbeitungsstation bereits mehrere Arbeitsgänge zugeordnet worden sind und wenn sich in ihrem Eingangspuffer so viele Werkstücke befinden, daß sich mindestens zwei der zugeordneten Arbeitsgänge tatsächlich ausführen lassen. In diesem Fall besteht ein Schaltkonflikt für die Transition "einlastung_arbeitsgang", da zwischen mehreren Arbeitsgangeinlastungen gewählt werden kann. Welche dieser Alternativen realisiert wird, legt die Modellierung der Fallstudie nicht fest. Statt dessen überläßt sie es der Entscheidungsfreiheit des Koordinierungsträgers, auf welche Weise er seinen lokalen Koordinierungsspielraum bei der Einlastung des jeweils nächsten Arbeitsgangs ausschöpft.

Grundsätzlich könnte diese Einlastungsentscheidung aber auch durch Prioritätsregeln gelöst werden. Dabei kann auf die gleiche Konstruktion eines Netzmoduls für Koordinierungsinstanzen zurückgegriffen werden, wie sie später für die Synchronisation von Bearbeitungsstationen und Produktionsaufträgen vorgelegt wird. Der Verf. verzichtet darauf, ein analoges Submodul für die prioritätsregelgeleitete Auswahl von einzulastenden Arbeitsgängen an einer Bearbeitungsstation zu entwerfen. Es würde die Konstruktionsidee des vorgenannten Netzmoduls lediglich ein zweites Mal anwenden, ohne grundsätzlich neuartige Einsichten zu vermitteln. Aber das Netzmodul für die Modellierung einer Bearbeitungsstation wird in der hier thematisierten dritten Erweiterungsstufe von vornherein so angelegt, daß sich ein entsprechendes Submodul für die Arbeitsgangeinlastung mit Prioritätsregeln ohne größere Schwierigkeiten integrieren läßt. Zu diesem Zweck werden die oben erwähnten "abundanten" Informationen vorgehalten. Zu ihnen gehören z.B. die Angaben über Auftragsprioritäten und Schlupfzeiten von Arbeitsgängen. Es handelt sich um Informationen, auf die Prioritätsregeln für die Arbeitsgangeinlastung oftmals zurückgreifen.

71) Dieses Attribut stellt wegen seiner listenförmigen Gestalt ein komplexes Attribut dar. Es wird in eine Iteration gleichartiger einfacher Subattribute zerlegt. Ihre Ausprägungen repräsentieren jeweils eine Werkzeugklasse. Für die Ausführung eines Arbeitsgangs ist es nicht erforderlich, die Namen individueller Werkzeuge anzugeben. Dies würde sogar die Flexibilität des Koordinierungsträgers bei der Zuordnung von Werkzeugen zu Arbeitsgangausführungen unnötig einschränken. Daher wird die Werkzeugliste nur aus Werkzeugklassen, nicht aber aus individuell benannten Werkzeugen gebildet.

72) Hinsichtlich der Bezugnahme auf Werkstückklassen gelten die Erläuterungen der voranstehenden, auf Werkzeugklassen abzielenden Anmerkung analog.

73) Diese Information dient zunächst dazu, die Einlastung von Arbeitsgängen während einer Nachtschicht zu ermöglichen, in der keine Arbeitskräfte für die Bedienung der Bearbeitungsstation zur Verfügung stehen ("unbemannte" Arbeitsgangausführung). Darüber hinaus läßt sie es zu, auch während einer Früh- oder Spätschicht eine Bearbeitungsstation ohne bedienende Arbeitskraft zu nutzen. Diese Option gestattet z.B., an einer Bearbeitungsstation einen vollautomatisch ausführbaren Arbeitsgang vorzuziehen, wenn der zunächst eingeplante Arbeitsgang zu seiner Ausführung eine Arbeitskraft benötigt hätte, an der Bearbeitungsstation jedoch keine Arbeitskraft vorhanden ist. Auf diese Weise kann auf Störungen der Arbeitskraftanwesenheit flexibel reagiert werden, falls vollautomatisch ausführbare Arbeitsgänge zur Einlastung anstehen. Ob sich ein Arbeitsgang vollautomatisch ausführen läßt, wird im Rahmen der Arbeitsplanung festgelegt. Diese Informationen schlägt sich in der Spezifikation von Auftragsnetzen nieder, die später vorgestellt werden.

74) Aufgrund dieser Durchlaufzeitenangabe lassen sich Arbeitsgänge bei der Einlastung bevorzugen, deren Bearbeitungsobjekte sich seit ihrem Bearbeitungsbeginn - im Vergleich mit allen anderen wartenden Arbeitsgängen - am längsten im Produktionssystem aufhalten. Dadurch wird tendenziell verhindert, daß einzelne Produktionsaufträge bei der Arbeitsgangeinlastung immer wieder benachteiligt werden. Auf diese Weise läßt sich dem Entstehen sehr großer Durchlaufzeiten für einzelne Produktionsaufträge entgegenwirken.

Von einer Komplizierung wird hier abgesehen. Sie resultiert daraus, daß die Werkstücke, die bei der Arbeitsganguzuordnung zu der Bearbeitungsstation bereitstanden, nicht notwendig mit denjenigen identisch zu sein brauchen, die bei der Arbeitsgangeinlastung aus dem Eingangspuffer der Bearbeitungsstation abgezogen werden. Statt dessen kann sich im Eingangspuffer z.B. ein Werkstück befinden, das aus der Abwicklung eines früheren - störungsbedingt abgebrochenen - Produktionsauftrags zurückgeblieben ist, das sich aber dennoch als Bearbeitungsobjekt für den betrachteten Arbeitsgang eignet. Daher dürfte die Durchlaufzeitensumme streng genommen nicht auf alle Werkstücke bezogen werden, die bei der Arbeitsganguzuordnung bereitstanden. Vielmehr müßte sie für alle Werkstücke neu berechnet werden, für die eine Einlastung des Arbeitsgangs an der Bearbeitungsstation betrachtet wird. Auf diese Neuberechnung der Durchlaufzeitensumme wird hier aber verzichtet. Gleiches gilt für die nachfolgende Herstellkostensumme.

75) Mit Hilfe dieser Angabe lassen sich bei der Arbeitsgangeinlastung solche Arbeitsgänge bevorzugen, in deren Bearbeitungsobjekten die relativ größte Kapitalbindung durch ursprüngliche Bereitstellungs- und zwischenzeitlich entstandene Herstellkosten akkumuliert wurde.

76) Die Schlupfzeit gestattet, Arbeitsgänge vorzuziehen, die angesichts von vorgegebenen spätest zulässigen Fertigstellungsterminen für die zugehörigen Produktionsaufträge besonders dringlich sind.

77) Es wird vorausgesetzt, daß die Prioritäten durch die natürlichen Zahlen "1", "2" usw. ausgedrückt werden. Dabei besitzt ein Produktionsauftrag um so höhere Priorität, je niedriger seine Prioritätszahl ist. Aufträge mit der Prioritätszahl "1" genießen daher die maximal mögliche Abwicklungspriorität.

78) Dieses Modul wird im letzten Kapitel der Fallstudie vorgestellt.

79) Der Stationsname erlaubt jeder Bearbeitungsstation, die auf die Schnittstelle "Bearbeitungsaufträge_vorliegend" zugreift, diejenigen Bearbeitungsaufträge zu erkennen, die für die Bearbeitungsstation bestimmt sind.

80) Der Zeitpunkt der Auftragserteilung erfüllt zwei Funktionen. Erstens gestattet er, die Bearbeitungsaufträge in der zeitlichen Reihenfolge ihrer Erteilung abzuarbeiten. Dies entspricht einer Auftragsabarbeitung nach dem FIFO-Prinzip. Zweitens erlauben die Zeitpunkte der Auftragserteilung später, einen "intelligenten" Umgang mit gescheiterten Einlastungsversuchen.

Die zeitliche Ordnung der Auftragsabwicklung wird aber nur als Option angeboten. Der Koordinierungsträger kann auch darauf verzichten, wenn er eine andere Abarbeitungsstrategie bevorzugt. Dann braucht lediglich in der Schaltvorschrift der Transition $t_{9,1}$ die Formel "Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte:...}" ersatzlos gestrichen zu werden. Allerdings entfällt dann auch die oben erwähnte Behandlungsmöglichkeit von gescheiterten Einlastungsversuchen.

81) Beim Eintreffen eines Bearbeitungsauftrags an der Bearbeitungsstation besitzt ihr Statusattribut die Ausprägung "bestätigt". Es drückt aus, daß die Zuordnung des Arbeitsgangs zur Bearbeitungsstation bereits erfolgt ist.

82) Es handelt sich daher um äquivalente Formulierungen, wenn entweder von vorliegenden Bearbeitungsaufträgen oder aber von wartenden Arbeitsgängen gesprochen wird.

83) Hinzu kommt die Attributausprägung "abgebrochen". Sie erlangt erst im Rahmen der vierten Erweiterung des Netzmoduls für Bearbeitungsstationen Relevanz. Dort kennzeichnet sie den störungsbedingten Abbruch einer Arbeitsgangausführung. Zusätzlich wird die Attributausprägung "erteilt" erfaßt. Sie spielt für die Modellierung von Bearbeitungsstationen noch keine Rolle. Denn sie wird nur in den beiden Modulen für die Repräsentation von Produktionsaufträgen und für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen benötigt. Die beiden

Attributausprägungen "abgebrochen" und "erteilt" werden schon hier berücksichtigt, um das Attribut des Bearbeitungsauftragsstatus von vornherein vollständig zu definieren.

84) Dieser Wert wird unmittelbar von der Puffermarkenkopie übernommen, die sich auf der Stelle "Pufferverwaltung" befindet.

85) Auch dieser Wert wird aus der Kopie der Puffermarke ausgelesen, die sich auf der Stelle "Pufferverwaltung" befindet.

86) Zusätzlich wird dafür gesorgt, daß neue Bearbeitungsofferten nur dann abgegeben werden können, wenn alle zuvor ausgesprochenen Bearbeitungsofferten zuvor angenommen und bei der Reservierung von Speicherplätzen im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation berücksichtigt worden sind. Dies stellt der Fluß einer Kopie der Basismarke über die beiden Stellen "Pufferreservierung_möglich" und "Offertenabgabe_möglich" sicher.

87) Die Kopie der Zuordnungsmarke befindet sich stets auf einer Stelle mit dem Prädikatssymbol "Zuordnung". Die Zuordnungsmarke und die Stelle "Zuordnung" sind redundant. Denn die dritte Netzerweiterung ist so konstruiert, daß sich das Verhalten des resultierenden Teilnetzes nicht verändern würde, wenn die Marke und die Stelle ersatzlos eliminiert würden. Denn beide können sich ausschließlich auf das Schaltverhalten der Transition "offertenabgabe" auswirken. Deren Schaltverhalten wird aber bereits durch die Attributausprägungen der Puffermarkenkopie, die sich auf der Stelle "Pufferverwaltung" befindet, vollständig determiniert. Dies läßt sich aus der Netzgraphik und Netzlegende unmittelbar erschließen, die in Kürze präsentiert werden. Daher wird auf einen strengen Beweis der Redundanzfeststellung verzichtet. (Er könnte z.B. durch eine Erreichbarkeitsanalyse des Netzmoduls erfolgen.) Dennoch werden die Zuordnungsmarke und die Stelle "Zuordnung" beibehalten, weil sie den aktuellen Zustand der repräsentierten Bearbeitungsstation verdeutlichen.

88) Das Umschalten zwischen diesen beiden Attributausprägungen bewirken die Schaltakte der beiden Transitionen t_{15} und t_{16} .

89) Die Markenkapazität der Schnittstelle wird auf eine Kopie der Informationsmarke beschränkt. Dadurch wird erreicht, daß die Bearbeitungsstation nur dann eine neue Bearbeitungsofferte abgibt, wenn ihre zuvor ausgesprochenen Offerten vom Zuordnungsmodul zur Kenntnis genommen worden sind.

90) Synthetische Produktionsweisen wurden für Flexible Fertigungssysteme grundsätzlich erlaubt.

91) Dies äußert sich zunächst nur in dem geringfügigen formalen Unterschied, daß die Eingangskante, die von der Stelle "Eingangspuffer_BS_2" her kommt, anstatt des früheren Gewichts " $\langle m_{ws,alt} \rangle$ " nunmehr das Kantengewicht " $\langle \Sigma m_{ws,alt} \rangle$ " trägt. Dieser scheinbar unbedeutende formale Notationsänderung liegen jedoch erhebliche Konsequenzen hinsichtlich der formalen Netzkonstruktion zugrunde. Sie werden anschließend dargelegt. Die beiden Transitionen t_9 und t_9^* werden auch kurz als (arbeitsgangbezogene) Einlastungstransitionen bezeichnet.

92) Die Kapazitäten des Ein- und des Ausgangspuffers der Bearbeitungsstation wurden bisher unmittelbar durch die numerischen Markenkapazitäten "10" bzw. "5" für die pufferrepräsentierenden Stellen $s_{TE,B2}$ bzw. $s_{TA,B2}$ ausgedrückt. Diese numerischen Kapazitätsangaben werden jetzt durch je ein Konstantensymbol "eingangspufferkapazität" bzw. "ausgangspufferkapazität" ersetzt. Dies hat den Vorzug, die Pufferkapazitäten nur einmal zu Beginn der Netzlegende konkret festlegen zu müssen. Danach kann auf die Pufferkapazitäten stets in der Gestalt ihrer Konstantensymbole zugegriffen werden, ohne sich die konkreten Kapazitätswerte merken zu müssen. Dies geschieht nachfolgend in der Transaktionsvorschrift für die Transition t_{14} und bei der Definition der Ausgangsmarkierung für das Modul der dritten Kernnetzerweiterung. Darüber hinaus hat die Verwendung von Konstantensymbolen für die Pufferkapazitäten den Vorzug, daß sich das Netzmodul, das hier exemplarisch für die Bearbeitungsstation "BS_2" entwickelt wird, in besonders übersichtlicher Weise auf die Modellierung anderer Bearbeitungsstationen übertragen läßt: Wenn sich die Bearbeitungsstationen hinsichtlich ihrer Pufferkapazitäten unterscheiden, reicht es aus, die Wertzuweisungen für diejenigen Konstantensymbole genau einmal zu modifizieren, die zu Beginn der Netzlegenden die Pufferkapazitäten repräsentieren. Auf diese Weise wird das Risiko, das Netzmodul an verschiedene Bearbeitungsstationen fehlerhaft anzupassen, verringert. Deshalb wird fortan stets auf die Festlegung der Pufferkapazitäten durch Konstantensymbole zurückgegriffen.

93) Der Sicherheitszuschlag, der auf die geplanten Ausführungsdauern von Arbeitsgängen aufgeschlagen wird, ist ein dimensionsloses Konstantensymbol. Die Wertzuweisung von 0.20 (20%) wurde bereits in einer früheren Anmerkung eingeführt.

94) Der Ausdruck "bearbeitungsstation_name" stellt ein Konstantensymbol dar. Ihm wird jeweils derjenige Stationsname als Wert zugewiesen, die durch das Netzmodul für Bearbeitungsstationen konkret modelliert wird. Da hier die Bearbeitungsstation "BS_2" exemplarisch herausgegriffen wurde, erhält das Konstantensymbol den Wert "BS_2".

95) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

96) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

97) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

98) Es wird vorausgesetzt, daß für ein modelliertes Produktionssystem nur die Koordinierung solcher Auftragspakete betrachtet wird, die aus endlich vielen Produktionsaufträgen bestehen. Darüber hinaus wird angenommen, daß jeder Produktionsauftrag nur eine endliche und wohlbestimmte Anzahl von Arbeitsgangausführungen umfaßt. Aus diesen beiden Prämissen folgt, daß das Netzmodul der Bearbeitungsstation finit bleibt, auch wenn hier eine unbeschränkte Markenkapazität zugelassen wird. Denn es können nur endlich viele Bearbeitungsaufträge für die Ausführungen von Arbeitsgängen erteilt werden. Jeder dieser Bearbeitungsaufträge wird durch genau eine Kopie der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" repräsentiert. Folglich können sich im gesamten Netzmodell nur endlich viele Kopien dieser Marke befinden.

99) Die unbeschränkte Markenkapazität dieser Stelle ermöglicht es, das Netzmodell auf Produktionssysteme mit beliebig vielen Bearbeitungsstationen ohne artifizielle Restriktionen anzuwenden. Andernfalls würde jede Beschränkung der Markenkapazität auf einen Wert $KAP_{BZ.2}$ mit $KAP_{BZ.2} \in \mathcal{N}$, bedeuten, daß nur maximal $KAP_{BZ.2}$ Bearbeitungsstationen zugleich Offerten für die Übernahme von Bearbeitungsaufträgen aussprechen können. Daher würde die Markenkapazität $KAP_{BZ.2}$ die Koordinierung der Auftragsabwicklungen unnötig einschränken, wenn in einer Produktionssituation mehr als $KAP_{BZ.2}$ zuordnungsgerechte Bearbeitungsstationen zur Verfügung stehen.

100) Es wird hier nur die Erweiterung der Transition "bearbeitungsende_mit_auslastung" berücksichtigt, die für die Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" erforderlich ist. Alle anderen Transitionsaspekte, die bereits anlässlich der zweiten Kernnetzerweiterung eingeführt wurden, gelten unverändert fort. Sie werden hier nicht nochmals dargelegt.

101) Es wird wiederum nur die Erweiterung der Transition "auslastung_arbeitsgang" um diejenigen Komponenten angegeben, die sich auf die Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" erstrecken.

102) Durch diese Restriktionsformel wird überprüft, ob im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation genügend Speicherplatz für diejenigen Werkstücke zur Verfügung steht, die als Bearbeitungsobjekte für den Arbeitsgang eines vorliegenden Bearbeitungsauftrags erforderlich sind. Strenggenommen ist diese Überprüfung redundant, weil sie bereits bei der vorangehenden Zuordnung des Arbeitsgangs zu der Bearbeitungsstation erfolgt ist. Diese Zuordnung geschieht jedoch durch das Zuordnungsmodul, das erst später vorgestellt wird. Daher wird der Deutlichkeit halber hier die Erfüllung der o.a. Restriktionsformel noch einmal überprüft. Dabei wird mit Hilfe der Zählfunktion "#" festgestellt, wie viele Listenelemente die Werkstückklassenliste des zugeordneten Arbeitsgangs umfaßt. Diese Funktion gehört zwar nicht zu den Standardfunktionen der Programmiersprache PROLOG. Sie läßt sich aber ohne Schwierigkeiten definieren. Z.B. kann gezählt werden, wie viele Elemente sich aus Liste entfernen lassen, bis die leere Liste vorliegt. Das Entfernen von jeweils einem Listenelement leisten die Prädikate "loesche" bei CORDES (1988), S. 109, und "efface" bei CLOCKSIN (1990), S. 173f.

103) Das Hinzufügen (\oplus) der Einliste zur Arbeitsganginfoliste_alt läßt sich in der Programmiersprache PROLOG durch das Prädikat "append" verwirklichen. Die o.a. Wertzuweisung kann mit seiner Hilfe definiert werden durch:

$$\text{Arbeitsganginfoliste_neu} := \text{Arbeitsganginfoliste_alt} \oplus [\text{Arbeitsganginfo}]$$

$$\Leftrightarrow \text{append}(\text{Arbeitsganginfoliste_alt}, [\text{Arbeitsganginfo}], \text{Arbeitsganginfoliste_neu})$$

104) Dies wurde in der nicht-verfeinerten Netzgraphik der Abb. 169 durch die Kantenanschrift " $\sum \langle m_{ws,al} \rangle$ " angedeutet.

105) Dagegen könnte der Einwand erhoben werden, daß das Petrinetz-Konzept durchaus variable Kantengewichte kennt. Dies betrifft die Klasse der Selbstmodifizierenden Netze, die schon in einer früheren Anmerkung eingeführt wurden. Die Selbstmodifizierenden Netze gestatten Kantengewichte, deren Beträge mit den aktuellen Anzahlen von Markenkopien auf Stellen desselben Netzes identifiziert werden. Solche Netze lösen aber das oben skizzierte Schaltproblem aus zwei Gründen nicht. Erstens stellen die Markenanzahlen keine Attributausprägungen von strukturierten Marken dar. Zweitens ermöglichen sie nur, eine variable Anzahl von Markenkopien in das Schalten einer Transition einzubeziehen. Es ist aber nicht möglich, die geschalteten Marken voneinander zu unterscheiden. Dies mag einerseits daran liegen, daß Selbstmodifizierende Netze zumeist nur anhand von unstrukturierten Kopien der einen Basismarke diskutiert werden. Diese können ohnehin nicht verschieden ausfallen. Andererseits wird aber auch

keine Konstruktion angeboten, die es ermöglichen würde, an die geschalteten Markenkopien bestimmte inhaltliche Anforderungen zu stellen. Dies ist hier aber unbedingt notwendig. Denn bei der Einlastung eines Arbeitsgangs muß nicht nur die erforderliche Anzahl von Werkstücken bereitgestellt werden. Vielmehr ist es ebenso erforderlich, die *richtigen* Werkstücke aus dem Eingangspuffer abzuziehen. Die Kopie der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" legt fest, welche Werkstücke konkret benötigt werden.

Die wesentliche Schwierigkeit der Transition "einlastung_arbeitsgang" liegt also darin, nicht nur die Anzahl, sondern auch die Art der benötigten Werkstücke erst im Schaltzeitpunkt zu kennen. Aus diesem Grund scheidet auch die naheliegende Verwendung des formalen Produkts "Anzahl-<math>m_{ws,ar}>" als Gewicht für diejenige Kante aus, die von der Stelle "Eingangspuffer_BS_2" zur Transition "einlastung_arbeitsgang" weist. Denn das formale Produkt führt dazu, daß in allen Kopien m_{ws} der Werkstückmarke, die an dem Produkt teilhaben, dieselben Variablen für die Ausprägungen der Markenattribute verwendet werden. Dieselbe Variable kann aber nur durch genau eine Konstante gebunden werden. Daher sind alle Kopien der Werkstückmarke identisch, wenn sie das Kantengewicht des o.a. formalen Produkts erfüllen. Dies entspricht genau dem Mangel der Selbstmodifizierenden Netze, die geschalteten Markenkopien nicht inhaltlich unterscheiden zu können. Ein solches Abziehen von mehreren identischen Kopien der Werkstückmarke wäre aber bei der hier vorgelegten Modellierung von Werkstücken immer fehlerhaft. Denn alle Werkstückmarkenkopien unterscheiden sich zumindest hinsichtlich ihrer identifizierenden Werkstücknamen.

106) Die Lösungsidee beruht auf der Einführung einer zusätzlichen Testmarke, deren Kopien als " m_{TE} " notiert werden. Die Testmarkenkopie umfaßt einerseits die Information über den Produktionsauftrag, zu dem der jeweils betrachtete Arbeitsgang und seine Bearbeitungsobjekte gehören. Andererseits enthält sie eine Testliste. Diese Testliste besteht zunächst aus allen Werkstückklassen, zu denen die Bearbeitungsobjekte des Arbeitsgangs gehören müssen. Durch Iteration der Schaltakte der Testtransition $t_{2,2}$ werden sukzessiv geeignete Kopien der Werkstückmarke von der Stelle "Eingangspuffer_BS_2" abgezogen. Kopien der Werkstückmarke werden genau dann als geeignet erkannt, wenn sie sowohl zum oben erwähnten Produktionsauftrag als auch zur richtigen Werkstückklasse gehören. Bei jedem Schaltakt der Testtransition $t_{2,2}$ wird jeweils diejenige Werkstückklasse herangezogen, die in der Testliste an der ersten Position steht. Wenn ein geeignetes Werkstück im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation gefunden ist, wird die zugehörige Werkstückklasse aus dem Kopf der Testliste eliminiert. Sofern alle Werkstücke, die für die Ausführung des Arbeitsgangs erforderlich sind, im Eingangspuffer zur Verfügung stehen, wird die Testliste durch wiederholtes Schalten der Testtransition sukzessiv um eine Werkstückklasse verkürzt. Am Ende liegt die leere Testliste vor. In diesem Fall ist die Transition "versuch_erfolgreich" ($t_{2,d}$) aktiviert. Als obligatorische Transition schaltet sie sofort. Dabei korrigiert sie die Belegung des Eingangspuffers um die dort entnommenen Werkstücke und überführt die Bearbeitungsstation in die Bearbeitungsphase "belastet".

Es kann jedoch auch der Fall eintreten, daß sich die Testliste der Testmarkenkopie nicht auf die leere Liste reduzieren läßt. Dann stehen im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation nicht diejenigen Werkstücke bereit, die für die Ausführung des betrachteten Arbeitsgangs als Bearbeitungsobjekte benötigt werden. In diesem Fall wird eine Markierung des Subnetzes erreicht, unter der weder die Testtransition noch die Transition "versuch_erfolgreich" aktiviert ist. Statt dessen ist dann per constructionem die Transition "versuch_gescheitert" aktiviert. Ihr Schalten legt die Kopien der Werkstückmarke, die zuvor versuchsweise von der Stelle "Eingangspuffer_BS_2" abgezogen worden waren, dorthin zurück. Zugleich stellt die Transition die alte Pufferreservierung wieder her und setzt die Bearbeitungsstation in ihre alte Betriebsphase "wartend" zurück. Nach ihrem Schalten befindet sich die Bearbeitungsstation im gleichen Zustand wie dem, den sie vor dem gescheiterten Einlastungsversuch eingenommen hat.

Es wird noch auf zwei Besonderheiten hingewiesen. Sie tragen dazu bei, die Einlastungsversuche von Arbeitsgängen "intelligenter" zu gestalten, als es aufgrund der oben entfalteten Lösungsidee zu erwarten ist. Erstens prüft die Transition "versuchsbeginn" ($t_{2,1}$), ob sich auf der Stelle "Eingangspuffer_BS_2" überhaupt genügend Werkstücke befinden, die zum Produktionsauftrag des betrachteten Arbeitsgangs gehören. Falls dies nicht der Fall ist, würde der Einlastungsversuch ohnehin scheitern. Auf diese Weise wird eine größere Menge von formal zulässigen, aber materiell "unsinnigen" Versuchen von vornherein unterbunden. Bei diesem Test wird auf die Möglichkeit zurückgegriffen, durch die Haupttestbedingung einer Transition die gesamte Markierung einer ihrer inzidenten Stellen untersuchen zu lassen. Zweitens wird dafür Sorge getragen, daß ein Arbeitsgang, dessen Einlastungsversuch soeben gescheitert ist, nicht sofort wieder einen Einlastungsversuch auslöst (sofern andere Arbeitsgänge auf Einlastung warten). Zu diesem Zweck wird die frühere Vereinbarung genutzt, Bearbeitungsaufträge in der Reihenfolge ihres zeitlichen Eintreffens abzuarbeiten: Wenn ein Einlastungsversuch erfolglos abgebrochen wird, setzt das Schalten der Transition "versuch_gescheitert" den Zeitpunkt der Bearbeitungsauftragserteilung auf den Wert der aktuellen Systemzeit. Dadurch wird der Bearbeitungsauftrag, zu dem der nicht einlastbare Arbeitsgang gehört, zwar weiterhin als wartender Bearbeitungsbetrag behandelt. Aber er wird erst dann wieder in Betracht gezogen, nachdem die Einlastung aller anderen, an der Bearbeitungsstation ebenso wartenden Arbeitsgänge versucht worden ist.

107) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

108) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus

dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertige bearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

109) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

110) Es liegt eine Informationskante mit variablem Kantengewicht vor. Sie greift auf *alle* Kopien "m_{ws,d}" der Werkstückmarke zu, die sich unter der aktuellen Netzmarkierung auf der Stelle s_{TE.B2} mit dem Prädikatssymbol "Eingangspuffer_BS_2(werkstück)" befinden. Durch jede solche Markenkopie kann die Variable "Werkstück" in der Formel "eingangspuffer_BS_2(Werkstück)" gebunden werden. Dabei kann es sich einerseits um verschiedene Kopien handeln, die durch den differenzierenden Index "d" voneinander unterschieden werden. Andererseits kommen grundsätzlich - ebenso "Mu_TE.B2_d" identische Exemplare derselben Markenkopie "m_{ws,d}" in Betracht, die sich auf der Stelle s_{TE.B2} befinden. Die Gesamtheit aller Kopien der Werkstückmarke, die auf der Stelle s_{TE.B2} liegen, ist die aktuelle Extension des Prädikatssymbols "Eingangspuffer_BS_2(werkstück)". Die metasprachliche Notation "fakt(Mu_TE.B2_d,ingangspuffer_BS_2(Werkstück))" drückt aus, daß die teilevaluierte prädikatenlogische Formel "eingangspuffer_BS_2(Werkstück)" für insgesamt "Mu_TE.B2_d" identische Kopien "m_{ws,d}" der Werkstückmarke gültig ist, wobei die Variablenbindung "Werkstück := m_{ws,d}" erfolgt. Da die Extension eines Prädikatssymbols alle Argumente umfaßt, für die das Prädikatssymbol gültig ist, fällt die aktuelle Extension des Prädikatssymbols "Eingangspuffer_BS_2(werkstück)" mit den Mu_TE.Bs_d Markenkopien "m_{ws,d}" zusammen, für die "fakt(Mu_d,ingangspuffer_BS_2(Werkstück))" zutrifft. Vgl. dazu die Erläuterungen zu prädikatenlogischen Modellformulierungen. Für die Fallstudie brauchen allerdings - abweichend von der oben erfolgten generellen Festlegung - keine multiplen Prädikatsgültigkeiten mit Mu_TE.B2_d ≥ 2 berücksichtigt zu werden. Denn die Werkstücke wurden mit identifizierenden Werkstücknamen versehen. Daher kann von jeder werkstückrepräsentierenden Markenkopie "m_{ws,d}" höchstens ein Exemplar zur aktuellen Extension des Prädikatssymbols "Eingangspuffer_BS_2(werkstück)" gehören. Aus diesem Grund wurde im Kantengewicht der o.a. Informationskante von vornherein die variable Multiplizität "Mu_TE.B2_d" durch die Konstante "1" ersetzt. Die konstante Multiplizität "Mu_TE.B2_d=0" spielt dagegen keine Rolle, weil eine Markenkopie mit der Multiplizität "0" per definitionem nicht zur aktuellen Extension des vorgenannten Prädikatssymbols gehört.

111) Die Notation "[Listenkopf | Listenrumpf]" ist in der Programmiersprache PROLOG üblich, um das Listenelement, das an der ersten Position einer Liste steht (Listenkopf), von allen nachfolgenden Listenelementen (Listenrumpf) zu trennen. Vgl. KINNEBROCK (1988), S. 52f.; CLOCKSIN (1990), S. 59f.

112) Vgl. dazu auch die Festlegungen für die Verschmelzung von Werkstücken, die in einer früheren Anmerkung erfolgten.

113) Die "Subtraktion" (\) zweier Listen läßt sich in der Programmiersprache PROLOG ohne größere Schwierigkeiten implementieren. Grundsätzlich kann sie wiederum auf das Prädikat "append" zurückgeführt werden, das schon in einer früheren Anmerkung angesprochen wurde:

```
Arbeitsganginfoliste_neu := Arbeitsganginfoliste_alt \ [Arbeitsganginfo]
```

```
:⇔ append([Arbeitsganginfo],Arbeitsganginfoliste_neu,Arbeitsganginfoliste_alt)
```

Die Reihenfolge der ersten beiden Argumentkomponenten des Prädikats "append" ist wesentlich, weil die Arbeitsganginformation des linksstehenden Listenkopfs "subtrahiert" wird.

114) Die Verfügbarkeitsdauer braucht nicht neu berechnet zu werden. Denn die Konstruktion des Teilnetzes stellt sicher, daß zwischen dem Schalten der Transition "versuchsbeginn" und dem Schalten der Transition "versuch_erfolgreich" die Systemzeit nicht vorangeschritten ist. Dies wird letztlich durch den obligatorischen Charakter der Transitionen "testtransition" und "versuch_erfolgreich" sichergestellt: Solange mindestens eine dieser beiden Transitionen aktiviert ist, darf keine nicht-obligatorische Transition geschaltet werden. Die Transitionen aus dem Netzmodul der Systemuhr besitzen keinen obligatorischen Charakter. Folglich können sie nicht geschaltet worden sein, bis der Versuch, den betrachteten Arbeitsgang einzulasten, entweder erfolgreich beendet worden oder aber gescheitert ist.

115) Wenn an der Bearbeitungsstation überhaupt kein Arbeitsgang auf Bearbeitung wartet, erfolgt auch keine Überprüfung der Werkzeugverfügbarkeit. Die nachfolgenden Erläuterungen entfallen dann.

Eine technische Komplizierung entsteht dadurch, daß für die Ausführung eines Arbeitsgangs auch mehrere Werkzeuge erforderlich sein können. Ebenso läßt sich der Grenzfall vorstellen, daß eine Arbeitsgangausführung überhaupt kein Werkzeug erfordert. Um alle diese Fälle abzudecken, ohne zu einer aufwendigen Fallunterscheidung greifen zu müssen, werden die bereits eingeführten Werkzeugklassenlisten benutzt. Anstatt den Bedarf und das Vorhandensein einzelner Werkzeuge aus einer erforderlichen Werkzeugklasse miteinander zu vergleichen, geschieht diese Überprüfung für Werkzeugklassenlisten. Sie schließen auch die leere Werkzeugklassenliste ein. Allerdings muß für diesen Zweck eine eigenständige Werkzeugklassenlistenmarke eingeführt werden. Ihre Kopien werden

durch den Ausdruck "m_{wl}" notiert. Nur so ist es möglich, alle benötigten, aber an der Bearbeitungsstation nicht vorhandenen Werkzeuge durch genau einen Schaltakt der Transition "pufferreservierung" anzugeben.

116) Es steht in der Entscheidungsfreiheit des Koordinierungsträgers, die Werkzeuglageraufträge durch das Schalten der Transition "werkzeuganforderung" einzuleiten. Es kann auch darauf verzichten und in Kauf nehmen, die betriebsbereite Bearbeitungsstation vorübergehend nicht zu nutzen. Die Transition "werkzeuganforderung" wird so ausgestaltet, daß ein benötigtes Werkzeug nur dann angefordert wird, wenn es nicht schon früher bestellt worden ist. Auf diese Weise werden Mehrfachanforderungen desselben Werkzeugs vermieden. Die Werkzeuganforderung geschieht mit Hilfe einer neuen Informationsmarke mit der Sorte "werkzeuglagerauftrag". Ihre Kopien werden durch Ausdrücke der Art "m₁₆" notiert. Ihre Attributstruktur enthält alle Informationen, die für das Abrufen eines Werkzeugs vom zentralen Werkzeugmagazin erforderlich sind. Das Attribut "lagerauftragsstatus" ist im Rahmen der hier vorgelegten Fallstudie nicht erforderlich, weil nur die Auslagerung benötigter Werkzeuge modelliert wird. Es wird jedoch vorgehalten, um die Erweiterung auf komplementäre Werkzeugeinlagerungen vorzubereiten. Dabei wird nur die Zwischenlagerung von Werkzeugen, die vorübergehend an den Bearbeitungsstationen des Produktionssystems nicht benötigt werden, in Betracht gezogen. Eine Werkzeugendlagerung wird dagegen nicht berücksichtigt, weil sie der Zweckbestimmung von Werkzeugen zuwiderliefe, an Bearbeitungsstationen produktiv eingesetzt zu werden.

117) Falls dort die angeforderten Werkzeuge nicht zur Verfügung stehen, wartet die Bearbeitungsstation vergeblich darauf, daß ihr vom Werkzeugmagazin die Information "erledigt" zugesandt wird.

118) Auf der Stelle, die den lokalen Werkzeugspeicher repräsentiert, befinden sich unter der Ausgangsmarkierung des Netzmoduls einer Bearbeitungsstation für jedes Werkzeug, das an der Bearbeitungsstation von vornherein bereitgestellt wurde, eine entsprechende Kopie der Werkzeugmarke. Nur durch diese Ausgangsmarkierung unterscheiden sich die Netzmodule unterschiedlicher Bearbeitungsstationen wesentlich voneinander.

119) Darauf wurde schon anläßlich der Modellierung des Transportsystems kurz eingegangen. Grundsätzlich kommt auch die umgekehrte Transportrichtung in Betracht, einzelne Werkzeuge von Bearbeitungsstationen abzuziehen und in das zentrale Werkzeugmagazin zu bringen. Ebenso ist es möglich, Werkzeuge unmittelbar zwischen den Bearbeitungsstationen des Produktionssystems auszutauschen. Die beiden vorgenannten Optionen werden in der Fallstudie jedoch nicht berücksichtigt. Daher entspricht der Transition "werkzeugeinlagerung" keine komplementäre Transition für die Werkzeugauslagerung. Eine vollständige Modellierung würde aber eine Erweiterung um Werkzeugauslagerungen erfordern. Denn das zentrale Werkzeugmagazin wird durch die Werkzeuganforderungen der Bearbeitungsstationen allmählich geleert. Danach befinden sich alle Werkzeuge an den Bearbeitungsstationen. Spätere Werkzeuganforderungen können dann nicht mehr erfüllt werden. Dieser Mangel wird erst dann beseitigt, wenn auch Auslagerungen von Werkzeugen erfaßt werden, die zu anderen Bearbeitungsstationen oder zum zentralen Werkzeugmagazin zurück transportiert werden. Auf diese Modellvervollständigung wird hier aber verzichtet. Vgl. dazu die Ausgrenzung einer vertiefenden Behandlung von Werkzeugaspekten an früherer Stelle.

120) Es spielt dabei keine Rolle, ob die Werkzeuge dort von Anfang an bereitstanden oder ob sie zwischenzeitlich durch ein Transportmittel vom zentralen Werkzeugmagazin herbeigeschafft wurden. Im letztgenannten Fall verstreicht zwischen der Pufferreservierung für einen vorliegenden Bearbeitungsauftrag und dem Versuch, den auftragspezifischen Arbeitsgang einzulasten, diejenige Zeitspanne, die für den Transport der Werkzeuge angefallen ist. Daher kann sich zwischen den Schaltakten der Transitionen "pufferreservierung" und "versuchsbeginn", die sich auf denselben Komplex aus einem Bearbeitungsauftrag und seinem zugehörigen Arbeitsgang erstrecken, eine größere Zeitspanne erstrecken. Währenddessen läßt sich die Einlastung anderer Arbeitsgänge versuchen, sofern mehrere auf ihre Ausführung an der Bearbeitungsstation warten. Auf diese Weise ist es möglich, die Zeitdauer für den Transport benötigter, aber nicht vorhandener Werkzeuge produktiv auszufüllen.

121) Der Einflüßbereich der Bearbeitungsstation erstreckt sich hinsichtlich auszuführender Arbeitsgänge auf die Stellen s₂₀, s₂₄ und s_{BP.1}. Die adjunktive Verknüpfung der Eingangskanten der Transition "arbeitskraftanforderung", die von jenen Stellen aus eintreffen, gestattet die Aktivierung dieser Transition schon dann, wenn gilt: Auf mindestens einer jener Stellen befindet sich eine Informationsmarkenkopie, die einen bemannt auszuführenden Arbeitsgang repräsentiert.

122) Das Schalten der Transition "arbeitskraft_überflüssig" wird auf die Fälle eingeschränkt, in denen zuvor durch eine Informationsmarkenkopie auf der Stelle "Zuordnungserfordernis" ein Bedienungsbedarf oder eine Arbeitskraftzuordnung für die Bearbeitungsstation "BS_2" angezeigt wurde. Andernfalls zeigt die Informationsmarkenkopie von vornherein an, daß an der Bearbeitungsstation kein Bedienungsbedarf besteht. In diesem letztgenannten Fall ist ein Schalten der Transition "arbeitskraft_überflüssig" nicht erforderlich.

123) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

124) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus

dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertige Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

125) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

126) Die Informationsmarke muß den Werkzeuglagernamen nicht unbedingt enthalten, da in dieser Fallstudie nur eine Lagerstation für Werkstücke berücksichtigt wird. Dennoch wird der Werkzeuglagername als Markenattribut berücksichtigt. Denn auf diese Weise kann die Anzahl der Lagerstationen beliebig vermehrt werden, ohne die Struktur der Informationsmarke ändern zu müssen.

127) Auch für Kopien der Werkzeugmarke kommen nur konstante Multiplizitäten "Mu_29_d=1" in Betracht. Denn die repräsentierten Werkzeuge besitzen ebenso identifizierende Namen. Daher können niemals mehrere identische Kopien der Werkzeugmarke zur aktuellen Extension des Prädikatssymbols "Lokaler_werkzeugspeicher(werkzeug)" gehören, mit dem die Stelle s_{29} beschriftet ist.

128) Die Faktenmenge der Stelle $s_{AB.2}$ mit dem Prädikatssymbol "Bemannte_bearbeitungsstationen(arbeitskräftein-satz)" kann auch leer sein. Über die o.a. Informationskante wird nur festgestellt, ob die Bearbeitungsstation von entweder (mindestens) einer oder aber von keiner Arbeitskraft bedient wird. Dabei sorgt die Restriktion "Bearbeitungs-stationsname = bearbeitungsstation_name" in der Schaltvorschrift der Transition "versuchsbeginn" dafür, daß nur diejenigen Arbeitskräfte berücksichtigt werden, die sich an der jeweils modellierten Bearbeitungsstation - hier der Station mit dem Namen "BS_2" - befinden.

129) Die Implementierung des Subjugs in der Programmiersprache PROLOG stellt wegen seiner Bezugnahme auf eine unbekannt Anzahl "K" von Werkzeugen keineswegs eine triviale Aufgabe dar. Es wird hier aber nicht näher auf die Möglichkeiten eingegangen, wie es sich mit Hilfe eines rekursiven PROLOG-Prädikats realisieren läßt. Grundsätzlich kann dabei auf das dreistellige metasprachliche PROLOG-Prädikat "findall" zurückgegriffen werden, das bereits an früherer Stelle eingeführt wurde.

130) Das Hilfsprädikat "ohne" läßt sich in der Programmiersprache PROLOG implementieren, indem eine Testliste erstellt und rekursiv abgearbeitet wird: Zunächst fällt die Testliste mit der Liste "Werkzeugklassenliste" zusammen. Die Liste "Werkzeugklassen_benötigt" wird mit der leeren Liste initialisiert. Es wird jeweils festgestellt, ob der Kopf der Testliste in der Liste "Werkzeugklassen_vorhanden" enthalten ist. Wenn dies der Fall ist, wird die betroffene Werkzeugklasse sowohl aus der Testliste als auch aus der Liste "Werkzeugklassen_vorhanden" eliminiert. Andernfalls wird die Werkzeugklasse nur aus der Testliste gestrichen und zugleich zur alten Liste "Werkzeugklassen_benötigt" hinzugefügt. In beiden Fällen wird die Testliste um ihren Kopf verkürzt. Danach liegt eine neue Testliste vor, mit der in derselben Weise verfahren wird. Das Verfahren endet, wenn die Testliste die leere Liste ist. Die dann vorliegende Liste "Werkzeugklassen_benötigt" gibt die Werkzeugklassen aller Werkzeuge an, die für die Arbeitsgangausführung benötigt werden, an der Bearbeitungsstation aber nicht vorhanden sind. Auf zwei Besonderheiten ist zu achten: Erstens wird nur ein Bedarf an Werkzeugklassen formuliert, nicht aber an individuell bestimmten Werkzeugen. Dies läßt den Freiheitsgrad offen, den Werkzeugbedarf durch ein beliebiges Werkzeug aus der erforderlichen Werkzeugklasse zu erfüllen. Falls ein bestimmtes individuelles Werkzeug spezifiziert werden soll, braucht dafür lediglich eine Werkzeugklasse definiert zu werden, die *genau* dieses eine Werkzeug umfaßt. Zweitens wird berücksichtigt, daß für dieselbe Arbeitsgangausführung *mehrere* Werkzeuge aus derselben Werkzeugklasse erforderlich sein können. In diesem Fall stellt die o.a. rekursive Erzeugung der Liste benötigter Werkzeuge sicher, daß die Werkzeugklasse in der Liste entsprechend oft enthalten ist.

131) Die Überprüfung, ob eine Arbeitskraft zur Bedienung der Bearbeitungsstation anwesend ist, braucht in der hier erfolgten Modellierung nicht zu erfolgen. Denn es wird zugelassen, innerhalb von Früh- und Spätschicht auch dann Speicherplatz im Eingangspuffer für einen Bearbeitungsauftrag zu reservieren, wenn sein Arbeitsgang nicht vollautomatisch ausgeführt werden kann und sich in der aktuellen Produktionssituation *keine* Arbeitskraft an der Bearbeitungsstation befindet. Dieser Freiheitsgrad erlaubt es z.B., zunächst den Pufferplatz zu reservieren und danach - während die zu bearbeitenden Werkstücke zur Bearbeitungsstation transportiert werden - eine Arbeitskraft für die Stationsbedienung anzufordern. Daher könnte auf die Eingangskante der Transition "pufferreservierung", die von der Stelle "Bemannte_bearbeitungsstationen" kommt, verzichtet werden. Trotzdem wird sie hier vorgesehen. Auf diese Weise werden dem Schalten der Transition "pufferreservierung" die (zunächst abundante) Information darüber zur Verfügung gestellt, ob sich Arbeitskräfte an der betroffenen Bearbeitungsstation befinden. Mit Hilfe dieser Information lassen sich vor allem solche Schaltkonflikte auflösen, die aus der Aktivierung der Transition "pufferreservierung" durch mehrere Kopien der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" resultieren. Für diese abundanzbedingten Schaltkonflikte kann beispielsweise die Schaltstrategie verfolgt werden, zuerst alle vorliegenden Bearbeitungsaufträge mit vollautomatisch ausführbaren Arbeitsgängen zu bevorzugen, falls eine bedienende Arbeitskraft fehlt. Es wäre auch möglich, diese Schaltstrategie durch ein verfeinerndes Subnetz für die Transition "pufferreservierung" zu modellieren. Darauf wird hier verzichtet. Aber die Verfeinerungsoption wird bereits dadurch unterstützt, daß die oben erwähnte Eingangskante zwischen der Transition und der Stelle "Arbeitskraft_vorhanden" von vornherein vorgesehen ist.

132) Die zweite Komponente "2" im Subskript " $I_{2,2}$ " der Markenkopie " $\langle m_{12,2} \rangle$ " verweist auf den Namen "BS_2" der modellierten Bearbeitungsstation.

133) Bei konventionellen Modellierungen von Produktionssystemen werden dagegen Produktionsstörungen zumeist überhaupt nicht berücksichtigt. Statt dessen wird im allgemeinen vorausgesetzt, daß jede einmal begonnene (Bearbeitungs-)Operation ohne Unterbrechung erfolgreich beendet werde; vgl. z.B. KNOOP (1986), S. 25 (in bezug auf Flexible Fertigungssysteme).

Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts sind dagegen schon umfangreichere Ansätze vorgelegt worden, die sich mit der Modellierung von Systemstörungen befassen. Vgl. z.B. TRIVEDI (1984), S. 87ff., insbesondere das Störungsmodell in Abb. 2 auf S. 93 ("fault-handling model"). Bei FREEDMAN (1988b), S. 342, wird das Vorhaben angekündigt, das dort präsentierte netzbasierte Produktionsmodell zukünftig um die Repräsentation Störungen zu erweitern.

134) Störungen der Betriebsbereitschaft einer Bearbeitungsstation wurden für alle fünf erfaßten Betriebsphasen in der jeweils gleichen Weise modelliert. Vgl. dazu die symmetrischen Konstrukte in der Netzgraphik und der zugehörigen Netzlegende. Daher können Störungen, die während der Betriebsphasen "wartend", "belastet", "gerüstet" oder "blockiert" auftreten, analog zu den nachfolgenden Erläuterungen für die Betriebsphase "operativ" berücksichtigt werden. Es wird darauf verzichtet, die Konstruktionen für jene vier weiteren Betriebsphasen zu wiederholen.

135) Beispielsweise wird in der Fallstudie nicht berücksichtigt, wie sich die Störung einer Bearbeitungsstation auf diejenigen Werkstücke auswirkt, die im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation auf Bearbeitung warten. Diese Werkstücke können einerseits im Eingangspuffer verharren, bis die Störung beseitigt ist (Warteoption). Statt dessen können sie aber auch an den Ausgangspuffer der Bearbeitungsstation übergeben werden (unverzögliche Weiterleitungsoption). Von dort aus können sie anderen Bearbeitungsstation zugeordnet oder aus dem Produktionssystem zwecks späterer Neueinlastung herausgeschleust werden. Darüber hinaus lassen sich Zwischenformen vorstellen, bei denen die Werkstücke im Eingangspuffer eine Zeitlang abwarten, ob sich die Störung der Bearbeitungsstation beseitigen läßt. Wenn dies innerhalb der Wartezeitspanne nicht möglich ist, werden die Werkstücke nach Fristablauf wiederum in den Ausgangspuffer eingestellt (verzögerte Weiterleitungsoption). Die Wartezeitspanne kann auf verschiedene Weise ermittelt werden. Beispielsweise läßt sie sich fest vorgeben oder aber in Abhängigkeit von der Schlupfzeit des betroffenen Arbeitsgangs variieren. Um die vorgenannten Weiterleitungsoptionen zu berücksichtigen, müßte allerdings das Netzmodul, in dem die Abwicklung des jeweils betroffenen Produktionsauftrags repräsentiert wird, erweitert werden. Denn es wäre erforderlich, die Nichtausführung eines Arbeitsgangs an einer Bearbeitungsstation und den anschließenden Weitertransport an eine Alternativstation in den Präzedenzgraphen der Auftragsabwicklung einzubeziehen. Auf diese Komplikation wird hier aber verzichtet. Daher liegt der Fallstudie ausschließlich die Warteoption zugrunde.

136) Es kann auch von vier Störungsvarianten gesprochen werden, weil der zweite Fall - der Bearbeitungsabbruch mit Nacharbeit - in zwei Unterfälle aufgespalten wird. Im Teilnetz der fünften Kernnetzerweiterung wird durch die Transitionen $t_{24,1}$, $t_{24,2}$, $t_{24,3}$ und $t_{24,4}$ unmittelbar auf die vier Störungsvarianten Bezug genommen.

137) Eine solche Bearbeitungsunterbrechung kann z.B. eintreten, weil die Energieversorgung der Bearbeitungsstation vorübergehend ausgefallen ist. Oder es handelt sich um eine dispositionsbedingte Störung durch einen Eilauftrag. In diesem Fall wird die Ausführung des zuletzt eingelasteten Arbeitsgangs unterbrochen, um zunächst einen Eilauftrag bevorzugt zu bedienen. Vgl. dazu ALDINGER (1985a), S. 93. Nachdem der Arbeitsgang des Eilauftrags abgeschlossen ist, wird mit der Ausführung des zuvor unterbrochenen Arbeitsgangs fortgefahren. Ein solches Zwischenschieben von Eilaufträgen wird in der Fallstudie jedoch noch nicht berücksichtigt. Statt dessen besteht hier nur die Möglichkeit, Eilaufträge bei der Arbeitsgangeinlastung durch entsprechend hohe Auftragsprioritäten zu bevorzugen. Die Modellierung von Arbeitsgangunterbrechungen durch zwischengeschobene Arbeitsgänge von Eilaufträgen würde dagegen erfordern, den Arbeitsgang eines Eilauftrags einlasten zu dürfen, noch bevor der vorangehende Arbeitsgang ausgelastet wurde. Dies führte zu erheblichen Veränderungen des bisher entwickelten Netzmoduls für die Repräsentation einer Bearbeitungsstation. Darüber hinaus müßte beachtet werden, daß für die Arbeitsgangausführung des Eilauftrags zusätzliche Umrüstungen vor und nach der Auftragsunterbrechung anfallen können; vgl. ALDINGER (1985a), S. 93. Auch dies verursachte beträchtliche Modulmodifizierungen. Von solchen Komplikationen wird jedoch durch die vereinfachende Konzeptualisierungsprämisse abgesehen, daß Arbeitsgangunterbrechungen zugunsten von Eilaufträgen grundsätzlich nicht zugelassen werden.

138) Dies wurde bereits in der oben vorgelegten Modellierung berücksichtigt.

139) ADAM, D. (1990a), S. 809, hebt als ein Desiderat für zukünftig zu entwickelnde PPS-Systeme hervor, sie sollten so erweitert werden, daß sie auch "Produktionsprozesse mit Materialrückläufen - z.B. Nacharbeiten -" bewältigen könnten. Dieser Anforderung wird hier durch die Verfeinerung des Netzmoduls einer Bearbeitungsstation entsprochen.

140) Es besteht auch keine realistische Aussicht, den Arbeitsplan eines Produktionsauftrags so zu erweitern, daß er die Arbeitsgänge für alle störungsbedingten Nacharbeitserfordernisse enthält. Denn die Vielfalt denkmöglicher Pro-

duktionsstörungen in Flexiblen Fertigungssystemen ist so groß, daß ihre vollständige Antizipation bei der Arbeitsplanung praktisch ausgeschlossen erscheint.

141) Falls der Eingangspuffer keinen freien Speicherplatz bietet, wartet das Werkstück an der Bearbeitungsstation so lange, bis wieder Speicherplatz zur Verfügung steht. Sobald sich das Werkstück im Eingangspuffer befindet, besteht ein Freiheitsgrad für den Koordinierungsträger. Er kann das Werkstück nach Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft der vormals gestörten Bearbeitungsstation entweder sofort wieder bearbeiten, indem er den Nacharbeitsgang als ersten von allen wartenden Arbeitsgängen einlastet. Oder er trifft eine Auswahlentscheidung zwischen allen Arbeitsgängen, deren Werkstücke im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation auf Bearbeitung warten.

142) Der Nacharbeitsgang wird genau so wie ein gewöhnlicher Arbeitsgang behandelt. Daher lassen sich ebenso Störungen bei der Ausführung des Nacharbeitsgangs erfassen.

143) Dieser Produktionsauftrag wird auch als Nacharbeitsauftrag bezeichnet.

144) Der Nacharbeitsauftrag wird genau so behandelt, wie es bei der Abwicklung eines gewöhnlichen Produktionsauftrags der Fall wäre.

145) Die Informationsmarke "werkstücklagerauftrag" ist analog zur Informationsmarke "werkzeuaglagerauftrag" konstruiert. Allerdings besitzt die Informationsmarke "werkstücklagerauftrag" eine reichhaltigere Attributstruktur. Sie wird bei der Modellierung von Lagerstationen ausführlicher erläutert. Die Schnittstelle zum Modul des zentralen Werkstücklagers bildet die Stelle "Lagerauftrag_werkstück" ($s_{LP,1}$). Die Kopien der Informationsmarke "werkstücklagerauftrag" werden als "m_T" notiert.

146) Sie ließe sich aber bei späteren Modellerweiterungen einbeziehen.

147) Dies bleibt späteren Modellerweiterungen vorbehalten.

148) Wiederum ist es im Rahmen der Fallstudie ausgeschlossen, den Produktionsauftrag zu Ende zu führen.

149) Es spielt dabei keine Rolle, ob die Nacharbeit technisch unmöglich oder aber nur wirtschaftlich nachteilhaft ist.

150) Für die Aufnahme des Ausschusses wird an der Bearbeitungsstation ein Zwischenlagerplatz mit unbeschränkter Kapazität unterstellt. Die Ausschubeseitigung wird in der Fallstudie nicht mehr modelliert. Ebenso wäre es aber auch möglich, für die beschädigten Werkstücke wie für andere Werkstücke einen Transportauftrag zu spezifizieren. Der Ausschub könnte dann aus dem Produktionssystem so entfernt werden, wie es später bei den Werkstücken ausgelasteter Produktionsaufträge geschehen wird.

151) Die beiden Transitionen $t_{7,4}$ und $t_{8,4}$ werden aus der zweiten Kernnetzerweiterung übernommen. Allerdings werden ihre Schaltvorschriften hier nur in dem Ausmaß angeführt, wie es für ihre inzidenten Stellen in der fünften Kernnetzerweiterung erforderlich ist. Diejenigen Bestandteile ihrer Schaltvorschriften, die sich nur auf die Stellen s_3 und s_4 aus der zweiten Kernnetzerweiterung beziehen, bleiben dagegen unberücksichtigt. Denn sie spielen für die hier vorgenommene Ausdifferenzierung von Störungsvarianten keine Rolle.

152) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

153) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

154) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

155) Die Informationsmarke muß zwar den Werkstücklagernamen nicht unbedingt umfassen, da nur eine Lagerstation für Werkstücke modelliert wird. Dennoch wird der Werkstücklagername als Markenattribut berücksichtigt. Denn auf diese Weise kann die Anzahl der Lagerstationen beliebig vermehrt werden, ohne die Struktur der Informationsmarke ändern zu müssen. Gleiches gilt für das anschließende Netzmodul, das die Lagerstation des zentralen Werkzeuglagers modelliert.

156) Es wird hier die Möglichkeit eingeräumt, daß einem Nacharbeitsgang eine andere - in der Regel höhere - Priorität zugeordnet wird als dem zugehörigen Produktionsauftrag. Falls dies nicht erwünscht ist, kann die neue Priorität mit der alten Auftragspriorität gleichgesetzt werden. Dann gilt $Priorität_{neu} := Priorität_{alt}$.

157) Die Verknüpfung von zwei Ausdrücken "String_1" und "String_2" aus der Objektmenge "STRING" durch das PROLOG-Prädikat "concat(String_1,String_2,Ergebnisstring)" wurde bereits eingeführt.

158) Dies wird vom Netzmodul für die Zuordnung von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen festgelegt.

159) Vgl. dazu die verfeinerte Netzkonstruktion für die Übergabepunkte an Bearbeitungsstationen.

160) Falls der Eingangspuffer der Bearbeitungsstation keinen freien Speicherplatz für die Werkstückaufnahme besitzt, bleibt die Transition "anschlußarbeitsgang" so lange aktiviert, bis es möglich ist, das Werkstück in den Eingangspuffer zurückzulegen.

161) Die Netzvergrößerung geschieht mit Hilfe der Makrostelle "Bearbeitung". Sie abstrahiert von allen Aspekten der zweiten Kernnetzerweiterung, die sich zwischen dem Ausgang der Transition "schaltbeginn" und den Eingängen der beiden Transitionen "bearbeitungsende_mit_auslastung" und "auslastung_arbeitsgang" erstrecken.

162) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

163) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

164) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

165) Die Variable "Sollrüstzustand" ist hier noch nicht durch einen wohldefinierten Term gebunden. Dies erfolgt erst später, wenn eine zusätzliche Informationsmarke mitteilt, welcher Rüstzustand der Bearbeitungsstation für die Ausführung des eingelasteten Arbeitsgangs erforderlich ist.

166) Auch die Variable "Agadauer" ist noch nicht durch einen wohldefinierten Term gebunden. Dies geschieht, wenn die zusätzliche Informationsmarke eingeführt wird, die bereits in der voranstehenden Anmerkung erwähnt wurde. Diese Informationsmarke wird auch angeben, wie groß die Ausführungsdauer derjenigen Bearbeitungsoperation ist, die zu dem betrachteten Arbeitsgang gehört.

167) Das Netzmodul einer Spannstation ließe sich bei Bedarf ähnlich detailliert konstruieren wie das voranstehende Netzmodul für Bearbeitungsstationen (i.e.S.). Dies würde aber nur den bereits erfolgten Konstruktionsaufwand verdoppeln, ohne zu neuartigen Erkenntnissen zu führen. Daher verzichtet der Verf. auf diese Detaillierungsoption. Er wird in den anschließenden Anmerkungen lediglich auf einige Verfeinerungsmöglichkeiten hinweisen, die sich ohne größere Schwierigkeiten durch das bereits entfaltete Modellierungsmuster für Bearbeitungsstationen abdecken ließen. Eine kompakte, aber inhaltlich bereits recht detaillierte Darstellung gewährt z.B. das Funktionsmodell für automatische Werkstückbearbeitungen bei REFA (1987), S. 314.

168) Die Arbeitsgänge werden auch als Spannarbeitsgänge bezeichnet. Für beide Arbeitsgänge werden verschiedene, aber konstante Ausführungsdauern und -kosten angesetzt. Daher bleibt unberücksichtigt, daß die Ausführungsdauern und -kosten auch von der Eigenart der auf- oder abzuspannenden Werkstücke abhängen kann. Gleiches gilt für die Art der verwandten Werkstückträgervorrichtungen, die sich ebenso auf die Ausführungsdauern und -kosten von Spannarbeitsgängen auszuwirken vermag. Falls eine solche Variabilität der Ausführungen von Spannarbeitsgängen modelliert werden soll, so kann dies in der Weise geschehen, wie es oben für die reihenfolgeabhängigen Rüstauern und -kosten geschehen ist. Zu diesem Zweck müßte - ähnlich einer Rüstmatrix - für alle Werkstückklassen und alle Trägervorrichtungsarten die zweidimensionale Information vorgehalten werden, welche Spanndauern und -kosten für jede Kombination aus einer Werkstückklasse und einer Trägervorrichtungsart anfallen.

Als eine weitere Vergrößerung ist zu beachten, daß nur das Auf- und das Abspannen von Arbeitsgängen modelliert wird. Das Umspannen von Werkstücken bleibt dagegen ausgeklammert. Eine Vielzahl anderer Determinanten des Spanns von Werkstücken findet ebensowenig Beachtung.

169) Dies betrifft insbesondere Zwischenprodukte, die nach dem Eintritt einer Produktionsstörung zwecks späterer Nacharbeit in das zentrale Werkstücklager zurückgesandt werden.

170) Mehrfachaufspannungen und Umpalettierungen von Werkstücken werden daher nicht erfaßt. Darüber hinaus wird präsupponiert, daß jede Palette für jedes Werkstück als Trägervorrichtung geeignet ist. Eignungsrestriktionen, die z.B. hinsichtlich zulässiger Werkstückgewichte oder -abmessungen bestehen können, bleiben daher unberücksichtigt. Unter diesen erheblichen Vereinfachungen reicht es aus, die Paletten im Netzmodul der Spannstation als unstrukturierte Kopien der Basismarke darzustellen. Diese naheliegende Gestaltungsmöglichkeit wird jedoch nicht ergriffen. Statt dessen werden die Paletten von vornherein als Kopien einer eigenständigen Attributmarke der Sorte "palette" modelliert. Dadurch wird das Netzmodul der Spannstation für spätere Verfeinerungen offengehalten. So ist es beispielsweise möglich, daß sich die Attribute der Palettenmarke auf den Belegungszustand der Palette (oder auf die Anzahl der aufgespannten Werkstücke), auf die Tragfähigkeit der Palette und auf die höchstzulässigen Abmessungen aufzuspannender Werkstücke erstrecken. Komplementär dazu müßte die Attributstruktur der Werkstückmarke um zwei Attribute erweitert werden, die das Werkstückgewicht und die Werkstückabmessungen angeben. Darüber hinaus wäre es möglich, die Paletten ähnlich wie die Werkzeuge zu klassifizieren. Dann ließe sich jedem Werkstück eine nicht-leere Liste geeigneter Palettenklassen zuordnen. Die Zuordnung zwischen aufzuspannenden Werkstücken und freien Paletten könnte dann analog zur Arbeitsgangeinlastung an Bearbeitungsstationen ausge-

staltet werden. Die voranstehend skizzierten Verfeinerungsoptionen werden aber im Rahmen der hier präsentierten Fallstudie nicht mehr ausgearbeitet. Daher wird als einziges Attribut der Palettenmarke der Palettenname berücksichtigt. Da die Paletten durch keine weiteren Eigenschaften voneinander unterschieden werden, wird jeder Palette der nicht-identifizierende Name "Einheitspalette" zugewiesen. Die Verwendung identifizierender Palettennamen kommt erst dann in Betracht, wenn ein zusätzliches Attribut der Werkstückmarke angibt, auf welcher Palette ein aufgespanntes Werkstück ruht. Denn nur in diesem Fall kann beim Schalten der Transition "abspannende" festgestellt werden, wie der Name derjenigen Palette lautet, von dem das Werkstück abgespannt worden ist. In der Fallstudie unterbleiben jedoch solche spannbetragenen Erweiterungen der Attributstruktur der Werkstückmarke. Daher kann für die Palette, die nach dem Abspannen des Werkstücks frei geworden ist, nur der nicht-identifizierende Name "Einheitspalette" verwandt werden.

171) Dies stellt eine - besonders einfache - Möglichkeit dar, das "Verstopfen" des Produktionssystems zu verhindern. Auf diese Problematik wurde bereits an früherer Stelle hingewiesen. Dort wurden auch subtilere Entscheidungsregeln erwähnt, die für das Einlasten von Produktionsaufträgen in ein Produktionssystem sorgen. Mit der Steuerung der Auftrageinlastung ist stets das Einschleusen derjenigen Werkstücke (Vorprodukte) verknüpft, die zur Abwicklung der eingelasteten Aufträge als erste bearbeitet werden sollen.

172) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

173) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertigbearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

174) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

175) Diese Restriktionsformel überprüft auf indirekte Weise, ob ein Werkstück, das sich im Eingangspuffer der Spannstation befindet, entweder auf- oder aber abgespannt werden soll. Bei diesem Test wird unterstellt, daß alle unbearbeiteten Werkstücke aus dem zentralen Werkstücklager zur Spannstation transportiert worden sind, um dort aufgespannt zu werden. Der komplementären Schaltvoraussetzung der nachfolgenden Transition "abspannen_beginn" liegt dagegen die Annahme zugrunde, daß alle fertigbearbeiteten Werkstücke vor ihrem Transport in das zentrale Werkstücklager abgespannt werden soll. Die gleiche Unterstellung gilt auch für alle angearbeiteten, aber beschädigten Werkstücke. Ein direkter Test des Auf- oder Abspannbedarfs wäre erst dann möglich, wenn die Werkstückmarke um ein Attribut für den Spannstatus erweitert würde. Dieses Attribut müßte zumindest die Ausprägungen "ungespannt" (ohne Aufspannerfordernis), "aufspannen_erforderlich", "aufgespannt" (ohne Abspannerfordernis) und "abspannen_erforderlich" umfassen. In diesem Fall erübrigten sich die oben angeführten Präsuppositionen. Eine solche spannbetragene Erweiterung der Werkstückmarke unterbleibt in der Fallstudie jedoch, weil das Spannen von Werkstücken ohnehin nur in grober Weise modelliert wird.

176) Die Spannkosten werden in der Fallstudie zu den Bearbeitungskosten gerechnet. Über diese Einordnung ließe sich zwar streiten. Doch sie folgt hier aus der Klassifizierung von Spann- als Bearbeitungsstationen. Andernfalls müßten Spannstationen als Stationen sui generis eingeführt werden. Dann böte es sich auch an, die Kosten für das Auf- und Abspannen von Werkstücken als eine eigenständige Kostenart neben den Bereitstellungs-, Bearbeitungs-, Transport-, Lagerungs-, Kapitalbindungs- und Herstellkosten zu erfassen.

7.2.1.2.2 Modellierung von Lagerstationen

Die Fallstudie umfaßt nur zwei Lagerstationen. Dabei handelt es sich um ein zentrales Werkstück- und ein zentrales Werkzeuglager¹⁾. Sie werden auch kurz als Zentrallager bzw. Werkzeugmagazin bezeichnet. Das zentrale Werkstücklager bildet die physische Schnittstelle zwischen dem modellierten Produktions- und seinem Umsystem. An ihr werden unbearbeitete Werkstücke in das Produktionssystem übernommen und fertiggearbeitete Werkstücke aus dem Produktionssystem entfernt. Daher stellt das zentrale Werkstücklager ein kombiniertes Ein- und des Ausgangslager für das Produktionssystem dar. Das zentrale Werkzeuglager unterscheidet sich von seinem werkstückbezogenen Pendant nicht wesentlich. Lediglich entfällt der Austausch von Werkzeugen zwischen dem Produktions- und seinem Umsystem²⁾.

Die beiden Lagerstationen besitzen jeweils einen Ein- und einen Ausgangspuffer. An ihnen erfolgt die Übergabe von Werkstücken oder Werkzeugen³⁾. Transportmittel entladen dort ihre Transportobjekte oder werden mit ihnen beladen. Dies wurde schon bei der Modellierung des Transportsystems ausführlicher dargestellt. Durch Ein- und Auslagerungsoperationen werden die Lagerobjekte aus dem Ein- bzw. Ausgangspuffer in das Innere einer Lagerstation übernommen. Die internen Strukturen der beiden Lagerstationen interessieren in der Fallstudie nicht näher. Sie werden jeweils durch eine Stelle repräsentiert. Ihre Markenkapazität entspricht der Lagerkapazität⁴⁾. Sie wird hier sowohl für das Werkstück- und für das Werkzeuglager zu 40 bzw. 20 Lagerobjekten festgelegt. Auf die gelagerten Objekte kann wahlfrei zugegriffen werden. Spezielle Ein- oder Auslagerungsstrategien⁵⁾ spielen daher keine Rolle⁶⁾.

Wenn ein Werkstück⁷⁾ auf dem Ausgangspuffer des Zentrallagers bereitgestellt wird, lastet ihm die Auslagerungsoperation diejenigen Kosten an, die durch die Werkstücklagerung angefallen sind⁸⁾. Da das Lagerinnere nicht strukturiert wurde, werden die Lagerkosten durch einen undifferenzierten Lagerkostensatz erfaßt. Er wird jedes Mal erhoben, wenn ein Werkstück ausgelagert wird⁹⁾. Dabei wird dem Werkstück durch den Lagerkostensatz ein Kostenbetrag zugerechnet, der für das Einlagern, die lagerinterne Behandlung und das Auslagern eines Werkstücks durchschnittlich anfällt. Auf eine feinere Modellierung der Lagerkosten, die dem Ideal einer verursachungsgerechten Kostenerfassung etwas näher käme, wird hier verzichtet, weil das Zentrallager ohnehin nur in grober Weise repräsentiert wird. Insbesondere wird davon abgesehen, die Lagerkosten eines Werkstücks auf dessen Einlagerungszeit¹⁰⁾ oder auf werkstückspezifische Eigenschaften¹¹⁾ zu beziehen. Allerdings kommen die Kapitalbindungskosten hinzu, die für das Werkstück während seiner Lagerzeit angefallen sind.

Lager- und Kapitalbindungskosten sowie die Lagerdauer werden ein letztes Mal berechnet, wenn der Produktionsauftrag, zu dem ein fertiggearbeitetes Werkstück als auftragspezifisches Endprodukt gehört, abgewickelt ist und ausgelastet wird. Die fertiggearbeiteten Werkstücke des Produktionsauftrags können dann entweder im Zentrallager zurückgehalten oder aber an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben werden. Für jeden diesen beiden Fälle sorgt eine eigene Auslastungstransition¹²⁾. Ihr Schalten leistet die kurz zuvor angesprochene letzte Ermittlung von Kosten- und Zeitgrößen.

Zu Beginn der Prozeßkoordinierung befinden sich im Zentrallager 35 Werkstücke. Sie stellen ein Teil von den 45 Werkstücken dar, die für das Produktionssystem der Fallstudie an früherer Stelle eingeführt wurden¹³⁾. Sie sind noch keinem Produktionsauftrag zugeordnet. Im Werkzeugmagazin werden von den - ebenso schon vorgestellten - 30 Werkzeugen nur 8 Exemplare gelagert. Die übrigen 22 Werkzeuge werden in den lokalen Werkzeugspeichern der drei Bearbeitungsstationen (i.e.S.) vorgehalten. Die Ausgangsmarkierungen der beiden Netze, die das Zentrallager und das Werkzeugmagazin modellieren, enthalten entsprechend 35 Kopien der Werkstück- und 8 Kopien der Werkzeugmarke.

Die Schnittstelle $s_{LP,1}$ verknüpft die Lagerstation des zentralen Werkstücklagers mit den Netzen, die jeweils einen Produktionsauftrag repräsentieren. Über sie können Kopien der Informationsmarke mit der Sorte "werkstücklagerauftrag" fließen. Sie dienen dazu, die Lagerstation zu benachrichtigen, welche Werkstücke sie für welche Produktionsaufträge in welcher Weise¹⁴⁾ behandeln soll¹⁵⁾. Ebenso informieren sie die Netzmodule der jeweils betroffenen Produktionsaufträge, sobald die erteilten Lageraufträge abgewickelt sind. Die Schnittstellen $s_{LP,2}$ und $s_{LP,3}$ dienen ebenfalls dem Informationsaustausch zwischen dem Zentrallager und den Auftragsnetzen¹⁶⁾. Über die Schnittstelle $s_{LP,2}$ werden beim Beginn der Auftragsabwicklung alle Werkstücke reserviert, die als Vorprodukte erforderlich sind, um alle erwünschten Endprodukteinheiten des Produktionsauftrags herstellen zu können¹⁷⁾. Welche Werkstücke als Vorprodukte benötigt werden, wird durch Kopien der Informationsmarke "werkstückeinlastung" angezeigt¹⁸⁾. Die Schnittstelle $s_{LP,3}$ wird dagegen in Anspruch genommen, wenn die Abwicklung eines Produktionsauftrags abgeschlossen ist. Kopien der Informationsmarke mit der Sorte "werkstückauslastung"¹⁹⁾ teilen der Lagerstation zunächst mit, ob die fertigen Werkstücke, die auftragsspezifische Endprodukte darstellen, entweder im Zentrallager zurückgehalten oder aber an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben werden sollen²⁰⁾. Durch das Schalten der beiden Auslastungstransitionen, die bereits erwähnt wurden, werden alle werkstückspezifischen Zeit- und Kostengrößen an das Netzmodul des zugehörigen Produktionsauftrags übermittelt. Zu diesem Zweck dienen wiederum die Kopien der Informationsmarke "werkstückauslastung".

Eine weitere Schnittstelle, die analog zur Stelle $s_{LP,1}$ konzipiert ist, ermöglicht den Informationsaustausch zwischen der Lagerstation des zentralen Werkzeuglagers einerseits und den Bearbeitungsstationen andererseits. Sie wurde bereits als Stelle s_{LB} des Netzmoduls für Bearbeitungsstationen eingeführt. Gleiches gilt für die Informationsmarke der Sorte "werkzeuglagerauftrag", deren Kopien über die Schnittstelle s_{LB} fließen, um das Werkzeugmagazin mit den Bearbeitungsstationen zu verknüpfen.

Die voranstehenden Erläuterungen werden durch zwei Netzmodule zusammengefaßt und präzisiert. Das erste modelliert die Lagerstation des zentralen Werkzeuglagers. Es wird als Werkstücklagernetz bezeichnet. Seine Netzgraphik findet sich in Abb. 175 auf der nächsten Seite. Seine Netzlegende schließt sich unmittelbar an. Das zweite Netzmodul repräsentiert die Lagerstation des zentralen Werkzeuglagers. Es wird als Werkzeuglagernetz angesprochen. Seine Netzgraphik ist in der nachfolgenden Abb. 176 wiedergegeben. Die zugehörige Netzlegende ist danach aufgeführt.

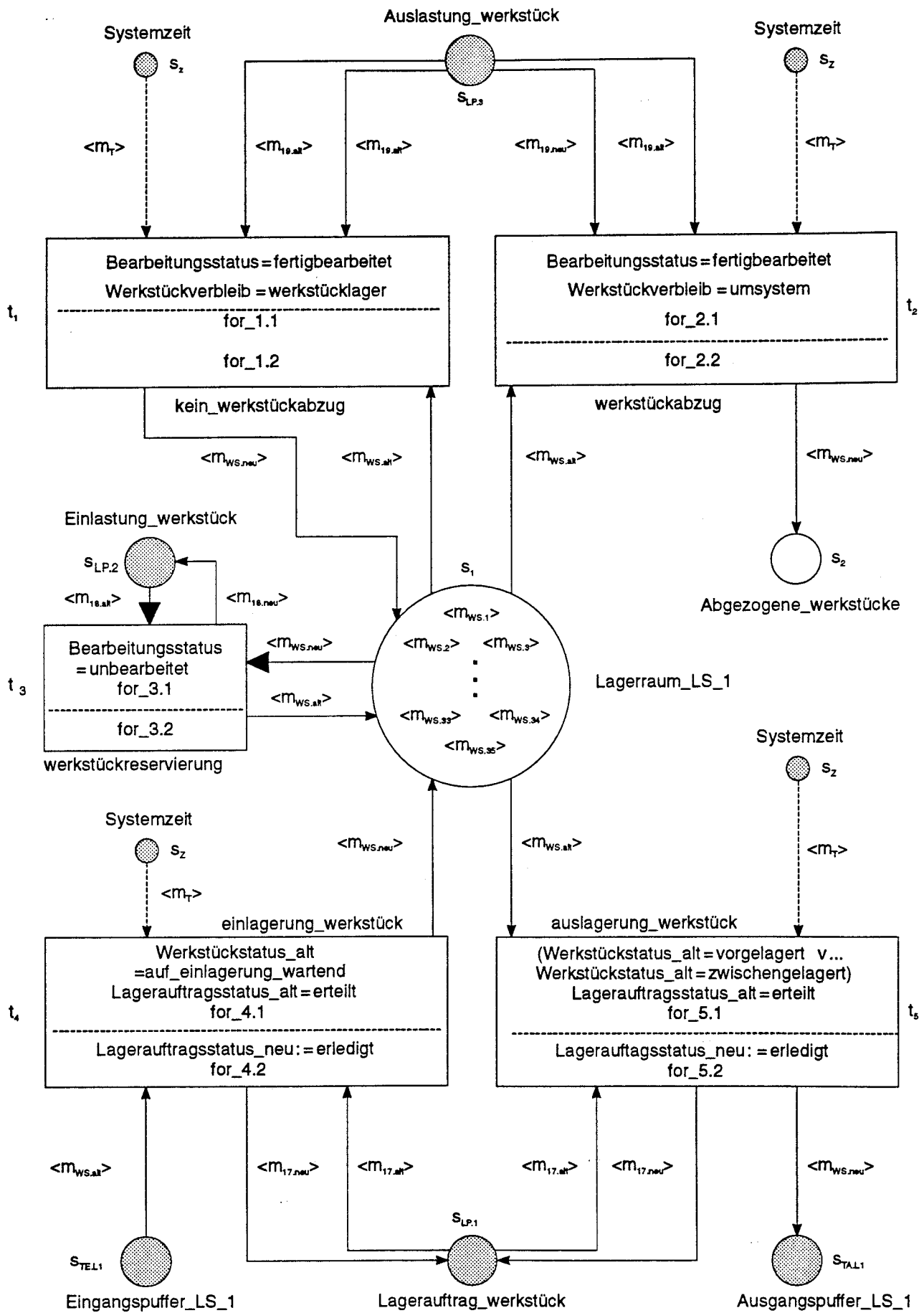


Abb. 175: Netzgraphik für das zentrale Werkstücklager (Zentrallager)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zinssatz = 0.06

zinszeitverrechnung = 0.0000019

lagerkostensatz = 3.00

21)

lagerstation_name = "LS_1"

zeitpunkt: INTEGER

zeitdauer: INTEGER

kosten: REAL

kapitalbindungsbetrag: REAL

werkstücklagername: STRING

"LS_1": → OB_{werkstücklagername}

werkstückverbleib: SYMBOL

werkstücklager,umsystem → OB_{werkstückverbleib}

lagerauftragsart: SYMBOL

zwischenlagerung,
endlagerung,auslagerung: → OB_{lagerauftragsart}

lagerauftragsstatus: SYMBOL

erteilt,erledigt: → OB_{lagerauftragsstatus}

reservierungsstatus: SYMBOL

frei,reserviert: → OB_{reservierungsstatus}

werkstückname: STRING

"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5",
"WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10",
"WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15",
"WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20",
"WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25",
"WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30",
"WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35",
"WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40",
"WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45",
"nil"→ OB_{werkstückname}

werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	22)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	23)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	24)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":	→ OB _{werkstücklagername}	
werkstückzugehörigkeit =	Zuordnung_ws(auftragsname); Zuordnung_ws_ka()		
werkstückzuordnung =	Zuordnung_wsbs(bearbeitungsstationsname); Zuordnung_wsls(werkstücklagername); Zuordnung_ws_ka()		
werkstück_vorlagerbeginn =	Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt); Vorlagerbeginn_ws_ka()		
werkstück_nachlagerende =	Nachlagerende_ws(zeitpunkt); Nachlagerende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsbeginn =	Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsbeginn_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsende =	Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt); Bearbeitungsende_ws_ka()		
werkstück_bearbeitungsdauer =	Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_transportdauer =	Transportdauer_ws(zeitdauer)		
werkstück_lagerdauer =	Lagerdauer_ws(zeitdauer)		

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)
werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)
werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
werkstück_bearbeitungsbeginn
werkstück_bearbeitungsdauer
werkstück_transportdauer
werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
werkstück_durchlaufzeit
werkstück_bearbeitungsende
werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)
werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)
werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)
werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)
werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)
werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)
werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)
werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)
werkstückkosten = Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
werkstück_bearbeitungskosten
werkstück_transportkosten
werkstück_lagerkosten
werkstück_kapitalbindungskosten
werkstück_herstellkosten)

werkstückinfo = Werkstückinformation(werkstückname werkstückklasse
werkstückzugehörigkeit werkstückzuordnung)

lagerauftragserteilung = Auftragserteilung(zeitpunkt)
werkstückeinlastungsanweisung = Einlastungsanweisung(zeitpunkt)
werkstückauslastungsanweisung = Auslastungsanweisung(zeitpunkt)
werkstückzeiten_wsa = Zeiten_wsa(werkstück_bearbeitungsdauer
werkstück_transportdauer werkstück_lagerdauer
werkstück_wartedauer werkstück_durchlaufzeit)
werkstückkosten_wsa = Kosten_wsa(werkstück_bearbeitungskosten
werkstück_transportkosten werkstück_lagerkosten
werkstück_kapitalbindungskosten
werkstück_herstellkosten)

einleitungsinfo = Auslastungseinleitung(werkstücklagername
 werkstückname werkstückzugehörigkeit
 werkstückverbleib werkstückauslastungsanweisung)

beendigungsinfo = Auslastungsbeendigung(werkstücklagername
 werkstückname werkstückzugehörigkeit
 werkstückzeiten_wsa
 werkstückkosten_wsa)

«m₁₇» = werkstücklagerauftrag = Informationsmarke_wsl(werkstücklagername 25)
 werkstückinfo lagerauftragserteilung
 lagerauftragsart lagerauftragsstatus)

«m₁₈» = werkstückeinlastung = Informationsmarke_wse(werkstücklagername
 werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstück_durchlaufzeit
 werkstück_herstellkosten reservierungsstatus
 werkstückeinlastungsanweisung)

«m₁₉» = werkstückauslastung = Informationsmarke_wsa_hin(einleitungsinfo);
 Informationsmarke_wsa_rück(beendigungsinfo)

«m_T» = syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)

«m_{WS}» = werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
 bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
 werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
 werkstückkosten)

Stellen/Prädikatssymbole:

s_{LP.1}: Lagerauftrag_werkstück(werkstücklagerauftrag)
 markenkapazität_{LP.1} = 10

s_{LP.2}: Einlastung_werkstück(werkstückeinlastung)
 markenkapazität_{LP.2} = ω

s_{LP.3}: Auslastung_werkstück(werkstückauslastung)
 markenkapazität_{LP.2} = ω

s_{TE.L1}: Eingangspuffer_LS_1(werkstück)
 markenkapazität_{TE.L1} = 2

s_{TA.L1}: Ausgangspuffer_LS_1(werkstück)
 markenkapazität_{TA.L1} = 2

s_z : Systemzeit(syszeit)
 markenkapazität_z = 1
 s_1 : Lagerraum_LS_1(werkstück)
 markenkapazität₁ = 40
 s_2 : Abgezogene_werkstücke(werkstück)
 markenkapazität₂ = ω

26)

Transitionen/Transaktionen:

t_1 : kein_werkstückabzug

$\langle m_{WS.alt} \rangle \approx$ lagerraum_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname, Werkstückklasse,
 Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus, Bearbeitungsstatus,
 Werkstückzuordnung, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsbeginn, Werkstück_bearbeitungsdauer,
 Werkstück_transportdauer, lagerdauer_ws(Lagdauer_alt),
 Werkstück_wartedauer, Werkstück_durchlaufzeit,
 Werkstück_bearbeitungsende, nachlagerende_ws_ka()),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Zeitpunkt_alt), Kapitalbindungsbetrag_alt),
 kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, Werkstück_bearbeitungskosten,
 Werkstück_transportkosten, lagerkosten_ws(Lagkosten_alt),
 kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt), herstellung_ws(Hstkosten_alt)))
 $\langle m_{I9.alt} \rangle \approx$ auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_hin(auslastungs-
 einleitung(Werkstücklagername, Werkstückname, Werkstückzugehörigkeit,
 Werkstückverbleib, auslastungsanweisung(Anwzeitpunkt)))
 $\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Bearbeitungsstatus = fertigbearbeitet

Werkstückverbleib = werkstücklager

for_1.1 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername = lagerstation_name

27)

\wedge Anwzeitpunkt = min { Anwzeitpunkte: ...

fakt(1, auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_hin(auslastungseinleitung(lagerstation_name, __, __, __,
 auslastungsanweisung(Anwzeitpunkte))))))

for_1.2 : \Leftrightarrow ...

Dauer := Time - Zeitpunkt_alt

\wedge Lagdauer_neu := Lagdauer_alt + Dauer

\wedge Zeitpunkt_neu := Time

\wedge Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt \cdot Dauer

\wedge Kapitalbindungsbetrag_neu := ...

Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme

\wedge Lagerkostenzunahme := lagerkostensatz
 \wedge Kapitalkostenzunahme := ...
 Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
 \wedge Lagkosten_neu := Lagkosten_alt + Lagerkostenzunahme
 \wedge Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
 \wedge Hstkosten_neu := ...
 Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Lagerkostenzunahme
 $\langle m_{I9_neu} \rangle$ = auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_rück(auslastungs-
 beendigung(Werkstücklagername, Werkstückname, Werkstückzugehörigkeit,
 zeiten_wsa(Werkstück_bearbeitungsdauer, Werkstück_transportdauer,
 lagerdauer_ws(Lagdauer_neu), Werkstück_wartedauer,
 Werkstück_durchlaufzeit), kosten_wsa(Werkstück_bearbeitungskosten,
 Werkstück_transportkosten, lagerkosten_ws(Lagkosten_neu),
 kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu), herstellung_ws(Hstkosten_neu)))
 $\langle m_{WS_neu} \rangle$ = lagerraum_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname, Werkstückklasse,
 Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus, Bearbeitungsstatus,
 Werkstückzuordnung, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsbeginn, Werkstück_bearbeitungsdauer,
 Werkstück_transportdauer, lagerdauer_ws(Lagdauer_neu),
 Werkstück_wartedauer, Werkstück_durchlaufzeit,
 Werkstück_bearbeitungsende, nachlagerende_ws_ka()),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Zeitpunkt_neu), Kapitalbindungsbetrag_neu),
 kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, Werkstück_bearbeitungskosten,
 Werkstück_transportkosten, Werkstück_lagerkosten,
 kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu), herstellung_ws(Hstkosten_neu)))

t_2 : werkstückabzug

$\langle m_{WS_alt} \rangle$ = lagerraum_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname, Werkstückklasse,
 Werkstückzugehörigkeit, Werkstückstatus_alt, Bearbeitungsstatus,
 Werkstückzuordnung, zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsbeginn, Werkstück_bearbeitungsdauer,
 Werkstück_transportdauer, lagerdauer_ws(Lagdauer_alt),
 Werkstück_wartedauer, Werkstück_durchlaufzeit,
 Werkstück_bearbeitungsende, nachlagerende_ws_ka()),
 kapitalbindung(letzte_ermittlung(Zeitpunkt_alt), Kapitalbindungsbetrag_alt),
 kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten, Werkstück_bearbeitungskosten,
 Werkstück_transportkosten, lagerkosten_ws(Lagkosten_alt),
 kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt), herstellung_ws(Hstkosten_alt)))

```

<m19.alt> ≈ auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_hin(auslastungs-
einleitung(Werkstücklagername,Werkstückname,Werkstückzugehörigkeit,
Werkstückverbleib,auslastungsanweisung(Anwzeitpunkt)))
<mT> ≈ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Bearbeitungsstatus = fertigbearbeitet
Werkstückverbleib = umsystem
for_2.1 :⇔ ...
    Werkstücklagername = lagerstation_name
    ^ Anwzeitpunkt = min { Anwzeitpunkte: ...
        fakt(1,auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_hin(ausla-
stungseinleitung(lagerstation_name,_,_,_,
auslastungsanweisung(Anwzeitpunkte))))))}
for_2.2 :⇔ ...
    Dauer := Time - Zeitpunkt_alt
    ^ Lagdauer_neu := Lagdauer_alt + Dauer
    ^ Lagerende := Time
    ^ Werkstückstatus_neu := nil
    ^ Zeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Lagerkostenzunahme := lagerkostensatz
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Lagkosten_neu := Lagkosten_alt + Lagerkostenzunahme
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ Hstkosten_neu := ...
        Hstkosten_alt + Kapitalkostenzunahme + Lagerkostenzunahme

<m19.neu> ≈ auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_rück(auslastungs-
beendigung(Werkstücklagername,Werkstückname,Werkstückzugehörigkeit,
zeiten_wsa(Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
lagerdauer_ws(Lagdauer_neu),Werkstück_wartedauer,
Werkstück_durchlaufzeit),kosten_wsa(Werkstück_bearbeitungskosten,
Werkstück_transportkosten,lagerkosten_ws(Lagkosten_neu),
kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),herstellung_ws(Hstkosten_neu)))
<mWS.neu> ≈ lagerraum_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname,Werkstückklasse,
Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu, Bearbeitungsstatus,
zuordnung_ws_ka(),zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,
Werkstück_bearbeitungsbeginn,Werkstück_bearbeitungsdauer,
Werkstück_transportdauer,lagerdauer_ws(Lagdauer_neu),

```

```

Werkstück_wartedauer,Werkstück_durchlaufzeit,
Werkstück_bearbeitungsende,nachlagerende_ws(Lagerende)),
kapitalbindung(letzte_ermittlung(Zeitpunkt_neu),
Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
lagerkosten_ws(Lagkosten_neu),kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

```

t_3 : werkstückreservierung

```

<mWS.alt> ≈ lagerraum_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname_ws,
Werkstückklasse_ws,Werkstückzugehörigkeit_alt,Werkstückstatus,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten))
<mI8.alt> ≈ einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname_alt,Werkstückklasse_wse,
zugehörigkeit_wspa(Auftragsname),Werkstück_durchlaufzeit,
Werkstück_herstellkosten,Reservierungsstatus_alt,
einlastungsanweisung(Anwzeitpunkt)))

```

Bearbeitungsstatus = unbearbeitet

for_{3.1} : \Leftrightarrow ...

```

Werkstückzugehörigkeit_alt = zugehörigkeit_wspa_ka()
^ Werkstücklagername = lagerstation_name
^ Werkstückname_alt = "nil"
^ Werkstückklasse_wse = Werkstückklasse_ws
^ Reservierungsstatus_alt = frei
^ Anwzeitpunkt = min { Anwzeitpunkte: ...
fakt(1,einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(lager-
station_name,_,_,frei,einlastungsanweisung(Anwzeitpunkte))))}

```

for_{3.2} : \Leftrightarrow ...

```

Werkstückzugehörigkeit_neu := zugehörigkeit_wspa(Auftragsname)
^ Werkstückname_neu := Werkstückname_ws
^ Reservierungsstatus_neu := reserviert
<mWS.neu> ≈ lagerraum_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname_ws,
Werkstückklasse_ws,Werkstückzugehörigkeit_neu,Werkstückstatus,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,Werkstückzeiten,
Werkstückkapitalbindung,Werkstückkosten))
<mI8.neu> ≈ einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname_neu,Werkstückklasse_wse,
zugehörigkeit_wspa(Auftragsname),Werkstück_durchlaufzeit,
Werkstück_herstellkosten,Reservierungsstatus_neu,

```


einlastungsanweisung(Anwzeitpunkt)))

t₄: einlagerung_werkstück

```
<mWS.alt> ≈ eingangspuffer_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_alt,
Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung,
zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
Werkstück_lagerdauer,wartedauer_ws(Wrtdauer_alt),
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_alt),Werkstück_bearbeitungsende_alt,
Werkstück_nachlagerende),kapitalbindung(letzte_ermittlung(Zeitpunkt_alt),
Kapitalbindungsbetrag_alt),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
Werkstück_lagerkosten,kapitalbindung_ws(Kapkosten_alt),
herstellung_ws(Hstkosten_alt))))
```

```
<mI7.alt> ≈ lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername,
werkstückinformation(Werkstückname,Werkstückklasse,
Werkstückzuordnung,Werkstückzugehörigkeit),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,
Lagerauftragsstatus_alt))
```

```
<mT> ≈ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
```

```
Werkstückstatus_alt = auf_einlagerung_wartend
```

```
Lagerauftragsstatus_alt = erteilt
```

```
for_4.1 :⇔ ...
```

```
    Werkstücklagername = lagerstation_name
  ^ Werkstückzuordnung = lagerstation_name
  ^ Lagerauftragsart ∈ {zwischenlagerung,endlagerung}
  ^ Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: ...
    fakt(1,lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(lager-
    station_name,_,_,auftragserteilung(Ertzeitpunkte),_,erteilt)))}
```

```
Lagerauftragsstatus_neu := erledigt
```

```
for_4.2 :⇔ ...
```

```
    Dauer := Time - Zeitpunkt_alt
  ^ (Lagerauftragsart = zwischenlagerung
    → (Werkstückstatus_neu := zwischengelagert
      ^ Werkstück_bearbeitungsende_neu := bearbeitungsende_ws_ka()))
  ^ (Lagerauftragsart = endlagerung
    → (Werkstückstatus_neu := nachgelagert
      ^ Werkstück_bearbeitungsende_neu := Time))
  ^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Dauer
```

- ^ $\text{Durchlauf_neu} := \text{Durchlauf_alt} + \text{Dauer}$
- ^ $\text{Kapitalbindungszunahme} := \text{Hstkosten_alt} \cdot \text{Dauer}$
- ^ $\text{Zeitpunkt_neu} := \text{Time}$
- ^ $\text{Kapitalbindungsbetrag_neu} := \dots$
 $\text{Kapitalbindungsbetrag_alt} + \text{Kapitalbindungszunahme}$
- ^ $\text{Kapitalkostenzunahme} := \dots$
 $\text{Kapitalbindungszunahme} \cdot \text{zinssatz} \cdot \text{zinszeitverrechnung}$
- ^ $\text{Kapkosten_neu} := \text{Kapkosten_alt} + \text{Kapitalkostenzunahme}$
- ^ $\text{Hstkosten_neu} := \text{Hstkosten_alt} + \text{Kapitalkostenzunahme}$

$\langle m_{\text{WS,neu}} \rangle = \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse},$
 $\text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Bearbeitungsstatus},$
 $\text{Werkstückzuordnung}, \text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn},$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsdauer},$
 $\text{Werkstück_transportdauer}, \text{Werkstück_lagerdauer},$
 $\text{wartedauer_ws}(\text{Wrtdauer_neu}), \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_neu}),$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsende_neu}, \text{Werkstück_nachlagerende}),$
 $\text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Zeitpunkt_neu}), \text{Kapitalbindungsbetrag_neu}),$
 $\text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten}, \text{Werkstück_bearbeitungskosten},$
 $\text{Werkstück_transportkosten}, \text{Werkstück_lagerkosten},$
 $\text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_neu}), \text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_neu})))$

$\langle m_{\text{I7,neu}} \rangle = \text{lagerauftrag_werkstück}(\text{informationsmarke_wsl}(\text{Werkstücklagername},$
 $\text{werkstückinformation}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzuordnung},$
 $\text{Werkstückzugehörigkeit}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Lagerauftragsart},$
 $\text{Lagerauftragsstatus_neu}))$

$t_5:$ $\text{auslagerung_werkstück}$

$\langle m_{\text{WS,alt}} \rangle = \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse},$
 $\text{Werkstückzugehörigkeit}, \text{Werkstückstatus_alt}, \text{Bearbeitungsstatus},$
 $\text{Werkstückzuordnung_alt}, \text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlagerbeginn},$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsbeginn}, \text{Werkstück_bearbeitungsdauer},$
 $\text{Werkstück_transportdauer}, \text{lagerdauer_ws}(\text{Lagdauer_alt}),$
 $\text{Werkstück_wartedauer}, \text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_alt}),$
 $\text{Werkstück_bearbeitungsende}, \text{Werkstück_nachlagerende}),$
 $\text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(\text{Zeitpunkt_alt}), \text{Kapitalbindungsbetrag_alt}),$
 $\text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten}, \text{Werkstück_bearbeitungskosten},$
 $\text{Werkstück_transportkosten}, \text{lagerung_ws}(\text{Lagkosten_alt}),$
 $\text{kapitalbindung_ws}(\text{Kapkosten_alt}), \text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_alt})))$

$\langle m_{\text{I7,alt}} \rangle = \text{lagerauftrag_werkstück}(\text{informationsmarke_wsl}(\text{Werkstücklagername},$
 $\text{werkstückinformation}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse},$
 $\text{Werkstückzuordnung_la}, \text{Werkstückzugehörigkeit}),$

```

    auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus_alt))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Werkstückstatus_alt = vorgelagert ∨ Werkstückstatus_alt = zwischengelagert
Lagerauftragsstatus_alt = erteilt
for_5.1 :⇔ ...
    Werkstücklagername = lagerstation_name
    ^ Werkstückzuordnung = lagerstation_name
    ^ Lagerauftragsart ∈ {zwischenlagerung,endlagerung}
    ^ Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: ...
        fakt(1,lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(lager-
            station_name,_,_,auftragserteilung(Ertzeitpunkte),_,erteilt)))}
Lagerauftragsstatus_neu := erledigt
for_5.2 :⇔ ...
    Dauer := Time - Zeitpunkt_alt
    ^ Werkstückstatus_neu := auf_transportmittelzuordnung_wartend
    ^ Werkstückzuordnung_neu := Werkstückzuordnung_la
    ^ Lagdauer_neu := Lagdauer_alt + Dauer
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Dauer
    ^ Kapitalbindungszunahme := Hstkosten_alt • Dauer
    ^ Zeitpunkt_neu := Time
    ^ Kapitalbindungsbetrag_neu := ...
        Kapitalbindungsbetrag_alt + Kapitalbindungszunahme
    ^ Lagerkostenzunahme := lagerkostensatz
    ^ Kapitalkostenzunahme := ...
        Kapitalbindungszunahme • zinssatz • zinszeitverrechnung
    ^ Lagkosten_neu := Lagkosten_alt + Lagerkostenzunahme
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapitalkostenzunahme
    ^ (Bearbeitungsstatus = unbearbeitet
        → Hstkosten_neu := Werkstück_bereitstellungskosten
            + Lagerkostenzunahme + Kapitalkostenzunahme)
    ^ (Bearbeitungsstatus = angearbeitet
        → Hstkosten_neu := Hstkosten_alt
            + Lagerkostenzunahme + Kapitalkostenzunahme)

<mI7.neu> = lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername,
    werkstückinformation(Werkstückname,Werkstückklasse,
    Werkstückzuordnung_la,Werkstückzugehörigkeit),
    auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,
    Lagerauftragsstatus_neu))

<mWS.neu> = ausgangspuffer_LS_1(werkstückmarke(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,Werkstückstatus_neu,

```

Bearbeitungsstatus,Werkstückzuordnung_neu,
 zeiten_ws(Werkstück_vorlagerbeginn,Werkstück_bearbeitungsbeginn,
 Werkstück_bearbeitungsdauer,Werkstück_transportdauer,
 lagerdauer_ws(Lagdauer_neu),Werkstück_wartedauer,
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_neu),Werkstück_bearbeitungsende,
 Werkstück_nachlagerende),kapitalbindung(letzte_ermittlung(Zeitpunkt_neu),
 Kapitalbindungsbetrag_neu),kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten,
 Werkstück_bearbeitungskosten,Werkstück_transportkosten,
 lagerung_ws(Lagkosten_neu),kapitalbindung_ws(Kapkosten_neu),
 herstellung_ws(Hstkosten_neu))))

Fakten:

$\langle m_{WS,1} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_1"}, \text{"WSK_3"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(),$
 vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0), bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 bearbeitungsdauer_ws(0), transportdauer_ws(0), lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0), durchlaufzeit_ws(0), bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()), kapitalbindung(letzte_ermittlung(0), 10.00),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00), bearbeitung_ws(0), transport_ws(0),
 lagerung_ws(0), kapitalbindung_ws(0), herstellung_ws(0))))))

$\langle m_{WS,2} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_2"}, \text{"WSK_1"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(),$
 vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0), bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 bearbeitungsdauer_ws(0), transportdauer_ws(0), lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0), durchlaufzeit_ws(0), bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()), kapitalbindung(letzte_ermittlung(0), 10.00),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00), bearbeitung_ws(0), transport_ws(0),
 lagerung_ws(0), kapitalbindung_ws(0), herstellung_ws(0))))))

$\langle m_{WS,3} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_3"}, \text{"WSK_3"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(),$
 vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0), bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 bearbeitungsdauer_ws(0), transportdauer_ws(0), lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0), durchlaufzeit_ws(0), bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()), kapitalbindung(letzte_ermittlung(0), 12.25),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(12.25), bearbeitung_ws(0), transport_ws(0),
 lagerung_ws(0), kapitalbindung_ws(0), herstellung_ws(0))))))

$\langle m_{WS,4} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_4"}, \text{"WSK_7"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(),$
 vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0), bearbeitungsbeginn_ws_ka(),

bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),33.00),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(33.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
 lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.5}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_5","WSK_1",zuordnung_wspa_ka()),
 vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 •
 bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),10.00),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
 lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.6}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_6","WSK_2",zuordnung_wspa_ka()),
 vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
 lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.7}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_7","WSK_1",zuordnung_wspa_ka()),
 vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),10.00),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
 lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.8}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_8","WSK_2",zuordnung_wspa_ka()),
 vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
 zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
 bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
 wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
 nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
 kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
 lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.9}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_9","WSK_3",zuordnung_wspa_ka()),
 vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),

```
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),12.25),
kosten_ws(bereitstellung_ws(12.25),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))
```

```
<mws.10> = fakt0(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_10","WSK_1",zuord-
nung_wspa_ka()),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),10.00),
kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))
```

```
<mws.11> = fakt0(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_11","WSK_2",zuord-
nung_wspa_ka()),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))
```

```
<mws.12> = fakt0(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_12","WSK_1",zuord-
nung_wspa_ka()),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),10.00),
kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))
```

```
<mws.13> = fakt0(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_13","WSK_3",zuord-
nung_wspa_ka()),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),12.25),
kosten_ws(bereitstellung_ws(12.25),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))
```

- $\langle m_{WS.14} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_14", "WSK_1", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(10.00), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$
- $\langle m_{WS.15} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_15", "WSK_1", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(10.00), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$
- $\langle m_{WS.16} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_16", "WSK_2", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 4.70), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(4.70), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$
- $\langle m_{WS.17} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_17", "WSK_1", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(10.00), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$
- $\langle m_{WS.18} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_18", "WSK_1", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert, unbearbeitet, zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(10.00), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.19} \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_19", "WSK_2", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 4.70), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(4.70), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.20} \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_20", "WSK_1", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(10.00), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.21} \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_21", "WSK_3", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 12.25), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(12.25), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.22} \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_22", "WSK_2", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 4.70), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(4.70), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.23} \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}("WS_23", "WSK_1", \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(10.00), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0),$

lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))))

$\langle m_{WS.24} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_24"}, \text{"WSK_2"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 4.70), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(4.70), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.25} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_25"}, \text{"WSK_2"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 4.70), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(4.70), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.26} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_26"}, \text{"WSK_2"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 4.70), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(4.70), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.27} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_27"}, \text{"WSK_3"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 12.25), \text{kosten_ws}(\text{bereitstellung_ws}(12.25), \text{bearbeitung_ws}(0), \text{transport_ws}(0), \text{lagerung_ws}(0), \text{kapitalbindung_ws}(0), \text{herstellung_ws}(0))))))$

$\langle m_{WS.28} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_1}(\text{werkstückmarke}(\text{"WS_28"}, \text{"WSK_1"}, \text{zuordnung_wspa_ka}(), \text{vorgelagert}, \text{unbearbeitet}, \text{zuordnung_wsls}(\text{lagerstation_name}), \text{zeiten_ws}(\text{vorlagerbeginn_ws}(0), \text{bearbeitungsbeginn_ws_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_ws}(0), \text{transportdauer_ws}(0), \text{lagerdauer_ws}(0), \text{wartedauer_ws}(0), \text{durchlaufzeit_ws}(0), \text{bearbeitungsende_ws_ka}(), \text{nachlagerende_ws_ka}()), \text{kapitalbindung}(\text{letzte_ermittlung}(0), 10.00),$

kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))))

<m_{WS.29}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_29","WSK_2",zuord-
nung_wspa_ka(),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))))

<m_{WS.30}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_30","WSK_3",zuord-
nung_wspa_ka(),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),12.25),
kosten_ws(bereitstellung_ws(12.25),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))))

<m_{WS.31}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_31","WSK_2",zuord-
nung_wspa_ka(),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))))

<m_{WS.32}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_32","WSK_1",zuord-
nung_wspa_ka(),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),10.00),
kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))))

<m_{WS.33}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_33","WSK_2",zuord-
nung_wspa_ka(),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka(),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka(),

nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.34}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_34","WSK_1",zuord-
nung_wspa_ka()),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka()),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka()),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),10.00),
kosten_ws(bereitstellung_ws(10.00),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

<m_{WS.35}> = fakt₀(1,lagerraum_LS_1(werkstückmarke("WS_35","WSK_2",zuord-
nung_wspa_ka()),vorgelagert,unbearbeitet,zuordnung_wsls(lagerstation_name),
zeiten_ws(vorlagerbeginn_ws(0),bearbeitungsbeginn_ws_ka()),
bearbeitungsdauer_ws(0),transportdauer_ws(0),lagerdauer_ws(0),
wartedauer_ws(0),durchlaufzeit_ws(0),bearbeitungsende_ws_ka()),
nachlagerende_ws_ka()),kapitalbindung(letzte_ermittlung(0),4.70),
kosten_ws(bereitstellung_ws(4.70),bearbeitung_ws(0),transport_ws(0),
lagerung_ws(0),kapitalbindung_ws(0),herstellung_ws(0))))

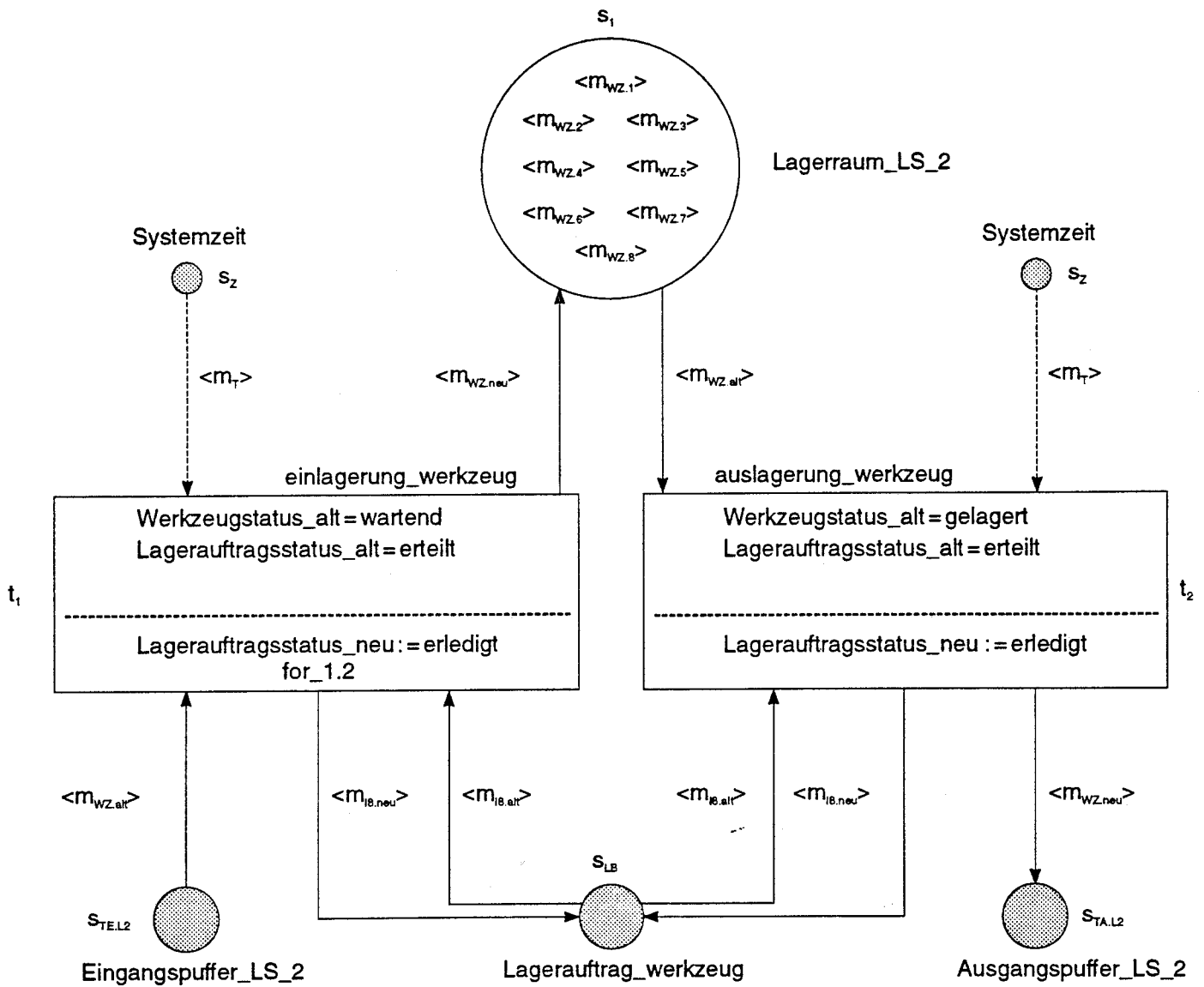


Abb. 176: Netzgraphik für das zentrale Werkzeuglager (Werkzeugmagazin)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

lagerstation_name = "LS_2"

zeitpunkt: INTEGER

werkzeuglagername: STRING

· "LS_2": → OB_{werkzeuglagername}

lagerauftragsart:SYMBOL

zwischenlagerung,

auslagerung:

→ OB_{lagerauftragsart} 30)

lagerauftragsstatus:SYMBOL

erteilt,erledigt:

→ OB_{lagerauftragsstatus}

werkzeugname: STRING

"WZ_1","WZ_2","WZ_3","WZ_4","WZ_5",
 "WZ_6","WZ_7","WZ_8","WZ_9","WZ_10",
 "WZ_11","WZ_12","WZ_13","WZ_14","WZ_15",
 "WZ_16","WZ_17","WZ_18","WZ_19","WZ_20",
 "WZ_21","WZ_22","WZ_23","WZ_24","WZ_25",
 "WZ_26","WZ_27","WZ_28","WZ_29","WZ_30":

→ OB_{werkzeugname}

werkzeugklasse: STRING

"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4",
 "WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":

→ OB_{werkzeugklasse}

werkzeugstatus: SYMBOL

gelagert,wartend,transportiert,eingesetzt:

→ OB_{werkzeugstatus}

bearbeitungsstationsname: STRING

"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":

→ OB_{bearbeitungsstationsname}

werkzeuglagername: STRING

"LS_2":

→ OB_{werkzeuglagername}

werkzeugzuordnung = Zuordnung_wzbs(bearbeitungsstationsname);

Zuordnung_wzls(werkzeuglagername)

werkzeuginfo = Werkzeuginformation(werkzeugklasse werkzeugzuordnung)

lagerauftragserteilung = Auftragserteilung(zeitpunkt)

«m₁₆» = werkzeuglagerauftrag = Informationsmarke_wzl(werkzeuglagername
 werkzeuginfo lagerauftragserteilung
 lagerauftragsart lagerauftragsstatus)

31)

$\langle m_T \rangle \approx \text{syszeit} = \text{Zeitmarke_sys}(\text{zeitpunkt})$
 $\langle m_{WZ} \rangle \approx \text{werkzeug} = \text{Werkzeugmarke}(\text{werkzeugname} \text{ werkzeugklasse}$
 $\text{werkzeugstatus} \text{ werkzeugzuordnung})$

Stellen/Prädikatssymbole:

s_1 : $\text{Lagerraum_LS_2}(\text{werkzeug})$
 $\text{markenkapazität}_1 = 20$
 $s_{TE.L2}$: $\text{Eingangspuffer_LS_2}(\text{werkzeug})$
 $\text{markenkapazität}_{TE.L2} = 2$
 $s_{TA.L2}$: $\text{Ausgangspuffer_LS_1}(\text{werkzeug})$
 $\text{markenkapazität}_{TA.L2} = 2$
 s_{LB} : $\text{Lagerauftrag_werkzeug}(\text{werkzeuglagerauftrag})$
 $\text{markenkapazität}_{LB} = 10$
 s_Z : $\text{Systemzeit}(\text{syszeit})$
 $\text{markenkapazität}_Z = 1$

Transitionen/Transaktionen:

t_1 : $\text{einlagerung_werkzeug}$
 $\langle m_{WZ.alt} \rangle \approx \text{eingangspuffer_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{Werkzeugname}, \text{Werkzeugklasse},$
 $\text{Werkzeugstatus_alt}, \text{Werkzeugzuordnung_alt}))$
 $\langle m_{I6.alt} \rangle \approx \text{lagerauftrag_werkzeug}(\text{informationsmarke_wzl}(\text{Werkzeuglagername},$
 $\text{werkzeuginformation}(\text{Werkzeugklasse}, \text{Werkzeugzuordnung_alt}),$
 $\text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Lagerauftragsart}, \text{Lagerauftragsstatus_alt}))$

$\text{Werkzeugstatus_alt} = \text{wartend}$

$\text{Lagerauftragsstatus_alt} = \text{erteilt}$

$\text{for}_{1.1} : \Leftrightarrow \dots$

$\text{Werkzeuglagername} = \text{lagerstation_name}$
 $\wedge \text{Lagerauftragsart} = \text{zwischenlagerung}$
 $\wedge \text{Ertzeitpunkt} = \min \{ \text{Ertzeitpunkte: } \dots$
 $\text{fakt}(1, \text{lagerauftrag_werkzeug}(\text{informationsmarke_wzl}(\text{lager-}$
 $\text{station_name}, \dots, \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkte}), \dots, \text{erteilt})) \}$

32)

$\text{Lagerauftragsstatus_neu} := \text{erledigt}$

$\text{for}_{1.2} : \Leftrightarrow \dots$

$\text{Werkzeugstatus_neu} := \text{gelagert}$
 $\wedge \text{Werkzeugzuordnung_neu} := \text{zuordnung_wzls}(\text{Werkzeuglagername})$

$\langle m_{WZ.neu} \rangle \approx \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{Werkzeugname}, \text{Werkzeugklasse},$
 $\text{Werkzeugstatus_neu}, \text{Werkzeugzuordnung_neu}))$

$\langle m_{I6.neu} \rangle \approx \text{lagerauftrag_werkzeug}(\text{informationsmarke_wzl}(\text{Werkzeuginformation}(\text{Werkzeugklasse}, \text{Werkzeugzuordnung_neu}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Lagerauftragsart}, \text{Lagerauftragsstatus_neu}))$

t_2 : auslagerung_werkzeug

$\langle m_{WZ.alt} \rangle \approx \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{Werkzeugname}, \text{Werkzeugklasse}, \text{Werkzeugstatus_alt}, \text{Werkzeugzuordnung_alt}))$

$\langle m_{I6.alt} \rangle \approx \text{lagerauftrag_werkzeug}(\text{informationsmarke_wzl}(\text{Werkzeuginformation}(\text{Werkzeugklasse}, \text{zuordnung_wzbs}(\text{Bearbeitungsstationsname})), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Lagerauftragsart}, \text{Lagerauftragsstatus_alt}))$

Werkzeugstatus_alt = gelagert

Lagerauftragsstatus_alt = erteilt

for_2.1 : \Leftrightarrow ...

Werkzeuginformation = lagerstation_name

33)

^ Lagerauftragsart = auslagerung

^ Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: ...

fakt(1, lagerauftrag_werkzeug(informationsmarke_wzl(lagerstation_name, _, _, auftragserteilung(Ertzeitpunkte), _, erteilt)))}

Lagerauftragsstatus_neu := erledigt

for_2.2 : \Leftrightarrow ...

Werkzeugstatus_neu := wartend

$\langle m_{WZ.neu} \rangle \approx \text{ausgangspuffer_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{Werkzeugname}, \text{Werkzeugklasse}, \text{Werkzeugstatus_neu}, \text{zuordnung_wzbs}(\text{Bearbeitungsstationsname})))$

$\langle m_{I6.neu} \rangle \approx \text{lagerauftrag_werkzeug}(\text{informationsmarke_wzl}(\text{Werkzeuginformation}(\text{Werkzeugklasse}, \text{zuordnung_wzbs}(\text{Bearbeitungsstationsname})), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Lagerauftragsart}, \text{Lagerauftragsstatus_neu}))$

Fakten:

$\langle m_{WZ.1} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_1"}, \text{"WZK_3"}, \text{gelagert}, \text{zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.3} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_3"}, \text{"WZK_1"}, \text{gelagert}, \text{zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.7} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_7"}, \text{"WZK_3"}, \text{gelagert}, \text{zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.8} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}(\text{"WZ_8"}, \text{"WZK_5"}, \text{gelagert}, \text{zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.14} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}("WZ_14", "WZK_5", \text{gelagert, zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.18} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}("WZ_18", "WZK_2", \text{gelagert, zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.23} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}("WZ_23", "WZK_9", \text{gelagert, zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

$\langle m_{WZ.28} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{lagerraum_LS_2}(\text{werkzeugmarke}("WZ_28", "WZK_4", \text{gelagert, zuordnung_wzls}(\text{lagerstation_name}))))$

Anmerkungen zum Kapitel:

1) In dieser Konzentration auf zwei zentrale Lagerstationen liegt keine wesentliche Einschränkung. Denn dezentrale Lager wurden bereits bei der Modellierung von Bearbeitungsstationen erfaßt. Sie betrafen einerseits die Ein- und Ausgangspuffer für die Zwischenlagerung von Werkstücken. Andererseits wurden Werkzeugpuffer für die Übergabe von Werkzeugen und lokale Werkzeugspeicher berücksichtigt. Weitere, aber nicht an Bearbeitungsstationen gebundene dezentrale Werkstück- oder Werkzeuglager ließen sich ähnlich gestalten, wie es hier für die zentralen Lagerstationen geschieht. Davon sind aber keine weiterführenden Erkenntnisse zu erwarten. Daher unterbleiben solche Erweiterungen der Fallstudie.

2) Die Ausstattung des Produktionssystems mit Werkzeugen wird daher als konstant unterstellt.

3) Wenn zwischen Werkstücken und -zeugen nicht näher differenziert werden soll, werden sie - im Kontext von Lagerstationen - gemeinsam als Lagerobjekte angesprochen.

4) Die Einheit der Lagerkapazität ist ein Objektträger, z.B. eine (Lager-)Palette. Auf ihm befindet sich in der Regel das eingelagerte Werkstück oder Werkzeug. Es wurden aber auch Mehrfachaufspannungen zugelassen. Daher kann die Einheit der Lagerkapazität ebenso mehrere Werkstücke oder -zeuge umfassen, die auf demselben Objektträger fixiert sind. In diesem Fall werden aber alle gemeinsam aufgespannten Werkstücke oder -zeuge als genau ein Objekt behandelt, das durch eine Kopie der Werkstück- bzw. -zeugmarke repräsentiert wird. Daher fällt die Lagerkapazität mit der Markenkapazität derjenigen Stelle zusammen, die das Lagerinnere wiedergibt.

Die voranstehend erläuterte Modellierung der Lagerkapazität bleibt recht grob. Denn die Inanspruchnahme der Lagerkapazität wird nur durch die *Anzahlen* von gelagerten Objektträgern gemessen. Diese Art der Kapazitätsmessung kann sich jedoch als unbefriedigend erweisen. Das ist immer dann der Fall, wenn sich die Knappheit der verfügbaren Lagerkapazität mit der Anzahl der lagerbaren Objektträger nur unvollständig ausdrücken läßt. Beispielsweise läßt sich vorstellen, daß der verfügbare Lagerraum knapp ist und daß dieser Lagerraum von unterschiedlichen Objektträgern in verschiedener, von den Objektträgerausmaßen abhängiger Weise beansprucht wird. In diesem Fall reicht das Zählen der eingelagerten Objektträger nicht aus, um die Inanspruchnahme der Lagerkapazität adäquat zu erfassen. Entsprechend unbefriedigend wäre es, die Lagerkapazität durch die Markenkapazität der lagerrepräsentierenden Stelle wiederzugeben und zu zählen, wie viele Kopien der Werkstück- oder -zeugmarke sich auf dieser Stelle befinden. Dennoch läßt sich auch dieser Fall bewältigen. Es muß dann auf eine verfeinerte Modellierung der Lagerkapazität zurückgegriffen werden: Das Lager wird zwar weiterhin durch eine lagerspezifische Stelle repräsentiert. Aber es wird eine neue Markenart - eine Lagermarke - eingeführt. Eine Kopie der Lagermarke befindet sich dauerhaft auf der lagerrepräsentierenden Stelle. Die Lagermarke umfaßt mindestens zwei Attribute. Das erste Attribut gibt durch seine konstante Ausprägung die bereitstehende Lagerkapazität an. Die Lagerkapazität kann in einer beliebigen Maßeinheit, wie z.B. dem verfügbaren Lagerraum, ausgedrückt sein. Das zweite Attribut besitzt eine variable, in derselben Maßeinheit ausgedrückte Ausprägung. Die Attributausprägung gibt an, in welchem Ausmaß die Lagerkapazität durch jene Objektträger in Anspruch genommen wird, die sich aktuell im Lager befinden. Zu diesem Zweck muß jede Kopie der Werkstück- oder -zeugmarke eine zusätzliche Angabe darüber enthalten, welchen absoluten Betrag der Lagerkapazität die Einlagerung desjenigen Objektträgers beansprucht, den die Markenkopie repräsentiert. Bei der Einlagerung eines Objektträgers wird durch die Schaltvoraussetzung einer Einlagerungstransition geprüft, ob die aktuell freie Kapazität des Lagers ausreicht, um den wartenden Objektträger aufzunehmen. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Kapazitätsbedarf des Objektträgers die Differenz aus bereitstehender und aktuell belegter Lagerkapazität nicht übersteigt. Die Erfüllung dieser Bedingung kann überprüft werden, indem die Attributausprägungen der Werkstück- oder -zeugmarkenkopie einerseits und der Lagermarkenkopie andererseits miteinander verglichen werden. Falls die Einlagerungstransition tatsächlich schaltet, wird die Ausprägung des zweiten Attributs der Lagermarkenkopie um genau jenen Betrag erhöht, um den die aktuell beanspruchte Lagerkapazität durch die Aufnahme des Objektträgers angestiegen ist. Von dieser verfeinerten - aber auch komplizierteren - Modellierung der Lagerkapazität wird in der Fallstudie der Einfachheit halber kein Gebrauch gemacht.

5) Lagerstrategien lassen sich aber bei Bedarf in die Netzmodule der Lagerstationen integrieren. Dann muß allerdings die eine Stelle, die das Lagerinnere repräsentiert, als eine Makrostelle interpretiert und durch ein stellenberandetes Subnetz verfeinert werden. In diesem Subnetz lassen sich durch die Anordnung seiner Stellen und Schaltvorschriften seiner Transitionen die jeweils erwünschten Lagerstrategien modellieren. Dabei kann auf entsprechende Netzmodelle zurückgegriffen werden, in denen Ansammlungen von Objekten nach vorgegebenen Strategien abgearbeitet werden. Die Netzmodelle repräsentieren Warteschlangensysteme, in denen die Objektbearbeitung nach der Maßgabe von Warteschlangendisziplinen erfolgt. Bei den Objekten handelt es sich zumeist um Kunden einer Servicestelle oder um Informationsverarbeitungsaufträge. Als Warteschlangendisziplin wird zumeist das FIFO-Prinzip (für: *First-In-First-Out*) verwendet. Aber auch andere Abarbeitungsstrategien lassen sich in den Netzmodellen berücksichtigen. Vgl. zu solchen Netzmodellen für die Repräsentation von Warteschlangensystemen SYMONS (1980a), S. 20ff., z.B. auf S. 22 u. 24 mit der Modellierung einer einfachen bzw. komplexen FIFO-Warteschlange. Es bereitet keine Schwierigkeiten, die Netzmodelle aus den vorgenannten Quellen auf die Modellierung einer Lagerstation zu übertragen. Dazu reicht es aus, die Warteschlangendisziplinen als Lagerstrategien zu interpretieren.

Zugleich werden die ein- oder auszulagernden Werkstücke und -zeuge als Objekte aufgefaßt, die auf ihre "Abarbeitung" warten. Die Lagerstation läßt sich als eine Servicestelle auffassen. Die Quellen widerlegen ebenso die Vorhaltung von LOCKEMANN (1975), S. 10, mit Petrinetzen ließen sich keine Warteschlangen modellieren.

Ein weiterer Einwand gegen die Modellierung von Warteschlangensystemen durch Netze findet sich bei GELENBE (1982), S. 224. Er beklagt, daß das Petrinetz-Konzept zur Theorie der Warteschlangensysteme keinen substantiellen Beitrag geleistet habe, weil es sich nicht in die Theorie stochastischer (Warteschlangen-)Netzwerke einbetten lasse. Diese Einlassung kann jedoch nicht aufrechterhalten werden. Denn die Stochastischen Netze, die in einem früheren Kapitel diskutiert wurden, besitzen ein beachtliches theoretisches Fundament. Sie beruhen auf der Theorie stochastischer MARKOV-Systeme. Dagegen erweist sich der Vorschlag von GELENBE (1982), S. 226ff., Petrinetze mit Warteschlangensystemen über den Umweg von Vektor-Additions-Systemen zu verknüpfen, als höchst bedenklich. Denn dieser Vorgehensweise liegt eine konfuse Netzdefinition zugrunde (vgl. S. 225f.). Z.B. fehlt eine präzise definierte Schaltregel. Darüber hinaus läßt die geringe Ausdruckskraft von Vektor-Additions-Systemen grundsätzlich nicht zu, den Formulationsreichtum strukturierter Marken zur Geltung zu bringen.

Schließlich wird auf die spätere Modellierung des Zuordnungsmoduls verwiesen. Dort bilden die Kopien der Informationsmarken "bearbeitungsofferte" und "bearbeitungsauftrag", die auf den Stellen "Bearbeitungsofferten_vorliegend" bzw. "Bearbeitungsaufträge_erteilt", jeweils eine stellenspezifische Warteschlange. Die beiden Warteschlangen werden nach Maßgabe der Prioritätsregeln abgearbeitet, die in der Schaltvorschrift der Transition "zuordnung" spezifiziert sind. Die Gesamtheit dieser Prioritätsregeln konstituiert eine komplex zusammengesetzte, hierarchische Warteschlangendisziplin. Allgemein lassen sich alle Modellierungen, die mit Prioritätsregeln arbeiten, als spezielle Ausformungen von Warteschlangensystemen auffassen. Für Synthetische Netze bereitet die Modellierung von Prioritätsregeln keine Schwierigkeiten. Folglich können auch alle Warteschlangensysteme, die auf Prioritätsregeln basieren, mit der Hilfe von Synthetischen Netzen modelliert werden.

6) Allerdings wird die Abarbeitung von Ein- und Auslagerungsaufträgen nach der Reihenfolge ihrer Erteilungszeitpunkte modelliert. Dies entspricht zwar grob dem FIFO-Prinzip. Doch liegt keine echte FIFO-Lagerstrategie vor, weil die Ein- und Auslagerung von Lagerobjekten nicht auf der Grundlage dieses Prinzips miteinander verknüpft werden.

7) Die nachfolgenden Erläuterungen zu Kostenaspekten erstrecken sich nicht auf Werkzeuge. Es wird unterstellt, daß die Kosten der Werkzeuglagerung für die Koordinierung von Produktionsprozessen keine Entscheidungsrelevanz besitzen.

8) Diese werkstückspezifischen Lagerkosten wurden in einer früheren Anmerkung festgelegt. Dort wurde auch hervorgehoben, daß sie die lagerbedingten Kapitalbindungskosten *nicht* umfassen.

9) Darüber hinaus wird er auch in jenem Sonderfall berücksichtigt, in dem die fertigbearbeiteten Werkstücke eines abgewickelten Produktionsauftrags endgültig im Zentrallager des Produktionssystems zurückgehalten werden. Denn auch in diesem Fall müssen die Kosten für die Einlagerung der fertigbearbeiteten Werkstücke und für ihre lagerinterne Behandlung erfaßt werden. Lediglich die Kosten für die Auslagerung der Werkstücke entfallen. Es wird darauf verzichtet, dieses Einsparen von auslagerungsbezogenen Lagerkosten durch einen speziellen - niedrigeren - Lagerkostensatz für den hier betrachteten Sonderfall zu würdigen.

10) Die Einlagerungszeit ist nur für die lagerbedingten Kapitalbindungskosten relevant, die separat erfaßt werden.

11) Es könnte z.B. daran gedacht werden, die Lagerkosten in Abhängigkeit von den werkstückspezifischen Bereitstellungs- oder Herstellkosten zu bemessen. Diesem Ansatz wird hier jedoch nicht gefolgt. Statt dessen wird unterstellt, daß werkstückspezifische Lagerkosten im wesentlichen für die lagerinterne Handhabung von Werkstücken anfallen. Die Werkstückhandhabung wird aber von den Werkstückkosten im allgemeinen nicht beeinflusst. Dagegen böte es sich an, etwa das Werkstückgewicht oder die Werkstückausmaße zu berücksichtigen. Denn sie können darauf einwirken, welches Handhabungsmittel eingesetzt wird. Davon hängen wiederum die handhabungsbedingten Lagerkosten ab. Auf diese verfeinerte Erfassung von werkstückspezifischen Lagerkosten wird im Rahmen der Fallstudie jedoch verzichtet. Dies entspricht der Modellierung von Werkstücken, die Werkstückgewichte und -abmessungen außer acht ließ.

12) Es handelt sich um die beiden Transitionen, die mit ihren Transaktionsnamen "kein_werkstückabzug" bzw. "werkstückabzug" beschriftet sind.

13) Weitere 10 Werkstücke befinden sich nicht zu Produktionsbeginn im Zentrallager des Produktionssystems, sondern gehen erst während der Auftragsabwicklung aus der gemeinschaftlichen Bearbeitung von anderen Werkstücken hervor (synthetische Produktion). Vgl. dazu die spätere Konstruktion des Auftragsnetzes.

14) Als Handlungsmodi werden das Zwischen-, das End- und das Auslagern von Werkstücken unterschieden. Eine Auslagerung muß immer dann geschehen, wenn ein zu bearbeitendes Werkstück auf dem Ausgangspuffer der Lagerstation bereitgestellt werden soll. Zwischen- und Endlagerung erstrecken sich dagegen auf die Einlagerung eines Werkstücks. Eine Zwischenlagerung erfolgt für alle Werkstücke, die aufgrund des Arbeitsplans ihres Produktionsauftrags noch nicht fertigbearbeitet sind. Für alle fertigbearbeiteten Werkstücke erfolgt hingegen bei ihrer Ein-

lagerung eine Endlagerung. Sie nehmen dann den Werkstückstatus "nachgelagert" an. In welcher Weise die Lagerobjekte behandelt werden sollen, gibt jeweils die aktuelle Ausprägung des Attributs "lagerauftragsart" der Informationsmarke "werkstücklagerauftrag" an.

15) Es wird unterstellt, daß die eintreffenden Werkstücklageraufträge in der zeitlichen Reihenfolge ihrer Erteilung abgearbeitet werden. Zu diesem Zweck enthält die Informationsmarke ein Attribut, dessen Ausprägung den Zeitpunkt der Auftragserteilung ausweist. Wie diese Attributausprägung generiert wird, wurde bereits für die Erteilung analoger Werkzeuglageraufträge dargestellt. Für Werkstücklageraufträge geschieht dies später im Rahmen des Netzmoduls für Produktionsaufträge. Darüber hinaus wird angenommen, daß von einer Lagerstation nur die Informationen über maximal 10 Lageraufträge verwaltet werden können. Die Markenkapazität ihrer Schnittstelle $s_{LP,1}$ wird daher auf 10 Kopien der Informationsmarke begrenzt. Falls in den Auftragsnetzen versucht werden sollte, mehr als 10 Werkstücklageraufträge zugleich zu erteilen, werden nur die ersten 10 zugelassen. Mit der Erteilung der anderen Werkstücklageraufträge muß so lange gewartet werden, bis an der Schnittstelle der Lagerstation wieder Kapazität für die Aufnahme von mindestens einer Kopie der Informationsmarke frei ist. Dies ist dann der Fall, wenn mindestens einer der früheren Lageraufträge abgearbeitet und die entsprechende Information darüber an das betroffene Auftragsnetz abgesandt worden ist. Durch diese Begrenzung des Informationsaustauschs an der Schnittstelle der Lagerstation wird eine Informationsüberlastung vermieden. Zugleich wird dadurch die Finitheit des Netzmoduls sichergestellt.

16) Die Transitionen t_1 , t_2 und t_3 , die auf Markenkopien zugreifen, die sich jeweils auf einer der beiden Schnittstellen $s_{LP,2}$ oder $s_{LP,3}$ befinden, arbeiten diese Kopien wiederum in der zeitlichen Reihenfolge der zugehörigen Ein- oder Auslastungsanweisungen ab. Allerdings werden für die beiden Schnittstellen unbeschränkte Markenkapazitäten zugelassen. Dies stellt sicher, daß die Markenkopien von gescheiterten Ein- oder Auslastungsversuchen eines Produktionsauftrags nicht die Schnittstellen für entsprechende Ein- bzw. Auslastungsversuche anderer Produktionsaufträge blockieren. Die Finitheit des Werkstücklagersnetzes wird hierdurch nicht beeinträchtigt.

17) Falls im Zentrallager nicht alle erforderlichen Werkstücke bereitstehen, kann die Auftragsabwicklung nicht begonnen werden. Dann besteht der Freiheitsgrad, alle bereits reservierten Werkstücke entweder reserviert zu lassen oder aber freizugeben. Für die Werkstückfreigabe spricht, daß die nicht mehr reservierten Werkstücke anderen Produktionsaufträgen zugeordnet werden können. Das Aufrechterhalten der Werkstückreservierung ermöglicht dagegen, die Bereitstellung zusätzlicher Werkstücke im Zentrallager abzuwarten, ohne die bereits erfolgte Werkstückreservierung wiederholen zu müssen. In der Fallstudie wird die Werkstückreservierung konserviert. Falls hingegen die Werkstückfreigabe bevorzugt wird, muß eine Konstruktion ergänzt werden, wie sie bei der versuchsweisen Einlastung von Arbeitsgängen erläutert wurde.

18) Sie werden jeweils durch den Ausdruck " m_{18} " notiert. Die beiden Attribute "werkstück_durchlaufzeit" und "werkstück_herstellkosten" erlangen erst bei der Modellierung von Produktionsaufträgen eine Rolle. Dort ermöglichen sie, vor- oder zwischengelagerte Werkstücke bei der Erteilung von Bearbeitungsaufträgen genau so zu behandeln, wie es für Werkstücke der Fall ist, die sich auf den Ausgangspuffern von Bearbeitungsstationen befinden. Vgl. dazu z.B. die Schaltvorschrift der Transition "bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG2/BS2".

19) Diese Markenkopien werden jeweils durch den Ausdruck " m_{19} " notiert.

20) Diese Information gibt die Ausprägung des Attributs "werkstückverbleib" wieder.

21) Der Ausdruck "lagerkostensatz" stellt wiederum ein Konstantensymbol dar. Sein numerischer Wert "3.00" wird in der Dimension "DM" gemessen. Der Lagerkostensatz wird für jede Abwicklung eines Lagerauftrags nur genau einmal angesetzt.

22) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

23) Neben den oben erläuterten Werkstückstatus wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertige Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

24) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

25) Die Informationsmarke "werkstücklagerauftrag" wurde bereits an früherer Stelle spezifiziert. Ihre Definition wird hier nur der Übersichtlichkeit halber noch einmal angeführt.

26) Erstens wird unterstellt, daß jedes Auftragspaket, dessen Abwicklung koordiniert werden soll, nur eine bekannte und endliche Anzahl von Produktionsaufträgen umfaßt. Zweitens wird angenommen, daß für jeden Produktionsauftrag eine auftragspezifische, aber ebenso bekannte und endliche Anzahl herzustellender Endprodukteinheiten (Losgröße) vorgegeben ist. Diese beiden Prämissen implizieren, daß die Anzahl aller Werkstücke, die aus dem Pro-

duktionssystem durch Auftragsauslastungen abgezogen werden können, bekannt und endlich ist. Daher verletzt die unbeschränkte Markkapazität der Stelle "Abgezogene_werkstücke" nicht die Finitheit des Netzmodells. Die Markkapazität wurde hier nicht beschränkt, damit das Netzmodul für das zentrale Werkstücklager mit beliebigen Auftragspaketen kombiniert werden kann. Insbesondere wird dabei die Anzahl der Werkstücke, die sich als Endprodukte aus dem Lager abziehen lassen, nicht nach oben begrenzt.

27) Die Überprüfung des Werkstücklagersnamens ist nicht unbedingt erforderlich, weil in der Fallstudie ohnehin nur genau ein Werkstücklager berücksichtigt wird. Diese Überprüfung muß aber spätestens dann erfolgen, wenn mehrere Lagerstationen für Werkstücke modelliert werden. Um diese Erweiterungsoption vorzubereiten, wurde die o.a. Restriktionsformel von vornherein angesetzt.

28) Die Überprüfung des Werkstücklagersnamens ist nicht notwendig.

29) Eine beschädigte Werkstück wird hier genau so wie ein angearbeitetes Werkstück zwischengelagert. Es kann jedoch auch ein Interesse daran bestehen, die Fallstudie so zu modifizieren, daß beschädigte Werkstücke eine besondere Behandlung erfahren. In diesem Fall wäre das Subjugat für zwischenzulagernde Werkstücke in zwei modifizierte Subjugate für einerseits angearbeitete und andererseits beschädigte Werkstücke aufzuspalten. Zu diesem Zweck wäre die Prämisse des ersten (zweiten) Subjugats um den Bearbeitungsstatus "angearbeitet" ("beschädigt") zu erweitern, der mit der Lagerauftragsart "zwischenlagerung" konjunktiv verknüpft wird. Die Konklusion des Subjugats für angearbeitete Werkstücke bliebe unverändert. Die Konklusion des Subjugats für beschädigte Werkstücke ließe sich dagegen so überarbeiten, daß die jeweils erwünschte Sonderbehandlung geschieht.

30) Eine Endlagerung von Werkzeugen wird in der Fallstudie nicht berücksichtigt. Werkzeuge werden allenfalls zwischengelagert, wenn sie vorübergehend an keiner Bearbeitungsstation benötigt werden. Daher braucht die Attributausprägung "endgelagert", die bei der Modellierung des zentralen Werkstücklagers eine Rolle spielte, hier nicht mehr erfaßt zu werden.

31) Die Informationsmarke "werkzeuagelagerauftrag" wurde bereits spezifiziert. Ihre Definition wird hier nur der Übersichtlichkeit halber nochmals angeführt.

32) Die Überprüfung des Werkzeuglagersnamens ist nicht unbedingt erforderlich, da nur eine Lagerstation für Werkzeuge modelliert wird. Diesbezüglich gelten die Ausführungen, die das zentrale Werkstücklager betrafen, analog.

33) Die Überprüfung des Werkzeuglagersnamens ist abermals nicht notwendig.

7.2.2 Modellierung der abstrakten Objektart "Aufträge"

Jeder Produktionsauftrag wird durch ein eigenständiges Netzmodul repräsentiert. Das auftragsdarstellende Teilnetz wird als Auftragsnetz bezeichnet. Für seine Konstruktion werden die Ergebnisse von Arbeits(struktur)- und Arbeitsablaufplanung¹⁾ als bekannt vorausgesetzt. Dazu gehören auch die Bearbeitungsstationen, auf denen die erforderlichen Arbeitsgänge ausgeführt werden können. Ebenso wird unterstellt, daß im Rahmen der Auftragsumwandlung aus auftragsunabhängigen Arbeitsplänen bereits auftragsabhängige Arbeitspläne abgeleitet wurden²⁾. Des weiteren wird angenommen, daß die Zusammensetzung der herzustellenden Endprodukte aus Vor- und Zwischenprodukten in der Gestalt eines GOZINTO-Graphen vorliegt³⁾. Schließlich wird festgesetzt, daß unterschiedliche Aufträge nur in der Weise voneinander abhängen können, daß sie um gemeinsam benötigte, aber knappe Ressourcen konkurrieren⁴⁾.

Jedes Auftragsnetz stellt die graphische Repräsentation eines auftragsabhängigen Arbeitsplans - zusammen mit Informationen über Bearbeitungsstationen und Produktzusammensetzungen - dar⁵⁾. Dieser netzartige Arbeitsplan weicht von seinen konventionellen Pendanten in dreifacher Weise ab. Erstens wird die graphische Visualisierung der dynamischen Auftragsstruktur besonders betont⁶⁾. Zweitens wird das konventionell vorherrschende Denken in sequentiellen Arbeitsgang- und Maschinenfolgen durch eine nebenläufige Auftragsausführung ersetzt. Bei einem Auftragsnetz handelt es sich daher um einen nonlinearen Arbeitsplan. Drittens wird herausgestellt, daß Ausführungsalternativen für Arbeitsgänge und Bearbeitungsstationen bestehen⁷⁾. Auf diese Weise wird erreicht, Anpassungsspielräume für die Reaktion auf Produktionsstörungen so weit offenzuhalten, wie es aufgrund produktionstechnischer Restriktionen möglich ist.

Ausgangspunkt der Modellierung eines Produktionsauftrags durch ein Auftragsnetz ist der auftragspezifische GOZINTO-Graph. Er beschreibt zunächst die Aufbaustruktur des Produktionsauftrags. Sie legt fest, aus welchen und aus wie vielen Vor- und Zwischenprodukten eine Einheit der auftragspezifischen Endproduktart zusammengesetzt ist. Darüber hinaus vermittelt der GOZINTO-Graph einen ersten Einblick in die Ablaufstruktur des Produktionsauftrags⁸⁾. Denn er zeigt an, in welcher Weise bei der Auftragsabwicklung Vor- und Zwischenprodukte miteinander kombiniert werden müssen, um schließlich eine Endprodukteinheit herzustellen. Jeder Knoten des GOZINTO-Graphen stellt eine Vor-, Zwischen- oder Endproduktart dar. Jede Kante drückt aus, daß eine Vor- oder Zwischenproduktart an der Herstellung einer Zwischen- oder Endproduktart teilnimmt⁹⁾. Die natürlichzahligen Kantenanschriften geben an, wie viele Einheiten einer Vor- oder Zwischenproduktart erforderlich sind, um eine Einheit der daraus hergestellten Zwischen- oder Endproduktart zu erhalten. Abb. 177 auf der nächsten Seite zeigt den GOZINTO-Graphen desjenigen Produktionsauftrags, für den in der hier präsentierten Fallstudie ein exemplarisches Auftragsnetz konstruiert wird. Dabei wird die eine auftragspezifische Endproduktart EP_1 aus zwei Zwischenproduktarten ZP_2 und ZP_3 sowie aus drei Vorproduktarten VP_4 , VP_5 und VP_6 hergestellt.

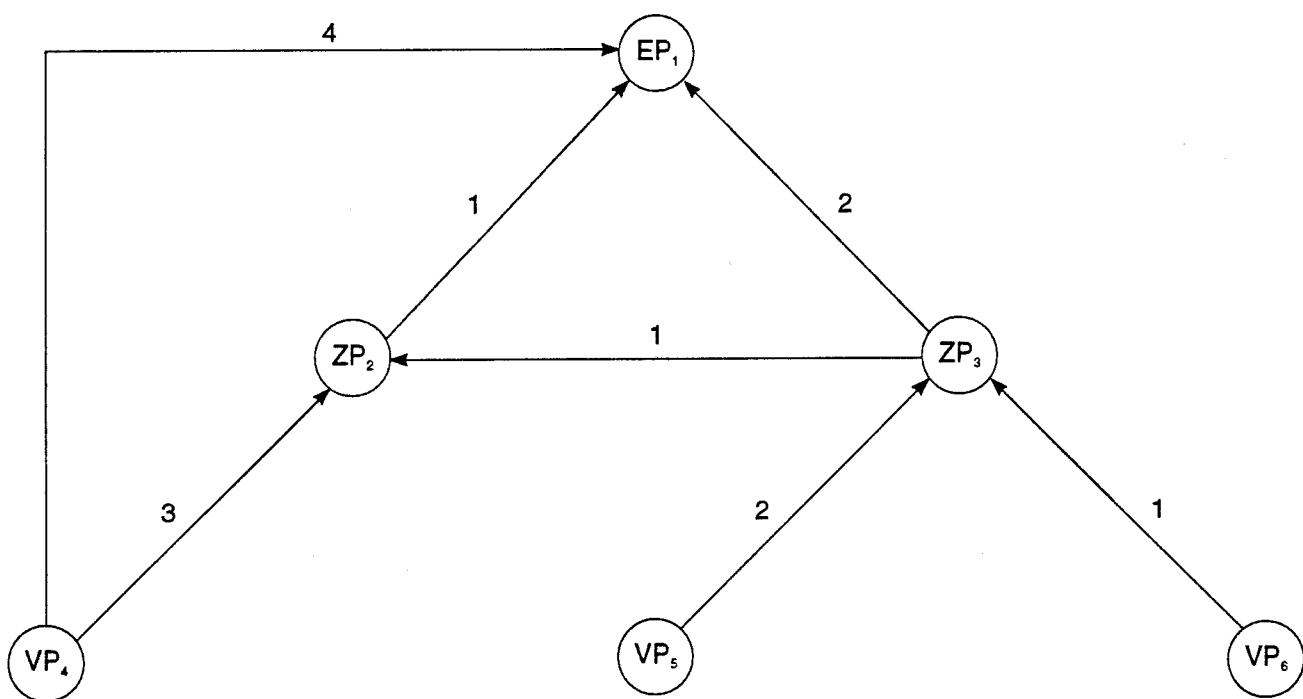


Abb. 177: GOZINTO-Graph eines Produktionsauftrags

Der GOZINTO-Graph wird zu einem Präzedenzgraphen¹⁰⁾ erweitert. Er dient dazu, die Ablaufstruktur des betrachteten Produktionsauftrags vollständig zu erfassen. Für diesen Zweck müssen zunächst die Arbeitsgänge berücksichtigt werden, mit denen sich die Zwischen- und Endprodukte jeweils herstellen lassen¹¹⁾. Gleiches gilt für die Bearbeitungsstationen, auf denen die Arbeitsgänge ausgeführt werden können. Daher wird der zugrundeliegende GOZINTO-Graphen auf zweistufige Weise in einen Präzedenzgraphen transformiert. Die beiden Transformationsstufen leisten die Einbeziehung zunächst der Arbeitsgänge und danach der Bearbeitungsstationen.

Erstens wird der GOZINTO-Graphen so weit verfeinert¹²⁾, daß jeder Übergang zwischen einer Vor- oder Zwischenproduktart und einer Zwischen- oder Endproduktart durch die Ausführung von genau einem Arbeitsgang bewirkt wird¹³⁾. Jeder solche Übergang wird durch eine vorläufige Kante des Präzedenzgraphen dargestellt. Die Knoten des Präzedenzgraphen stellen alle Vor-, Zwischen- oder Endproduktarten dar, die entweder bereits im GOZINTO-Graphen enthalten waren oder aber aus dessen Verfeinerung hervorgegangen sind. Jede Kante wird wie im GOZINTO-Graphen mit einer natürlichen Zahl für die Anzahl derjenigen Vor- oder Zwischenprodukte beschriftet, die in die Herstellung einer Zwischen- oder Endprodukteinheit eingehen. Hinzu kommt als zweite Komponente der Kantenanschrift derjenige Arbeitsgang, dessen Ausführung die Zwischen- oder Endproduktherstellung bewirkt. Auf diese Weise lassen sich sowohl alternative Arbeitsgänge als auch alternative Produktionsverfahren erfassen. Falls die vorgenannte Verfeinerungsbedingung bereits durch den vorgegebenen GOZINTO-Graphen erfüllt wird¹⁴⁾, kann jede seiner Kanten unmittelbar als eine vorläufige Kante des Präzedenzgraphen übernommen werden. Sie braucht nur noch um die Beschriftung mit demjenigen Arbeitsgang erweitert zu werden, den sie repräsentiert¹⁵⁾.

Zweitens werden jedem Arbeitsgang alle Bearbeitungsstationen zugeordnet, auf denen er sich grundsätzlich ausführen läßt. Falls dies auf mehreren Bearbeitungsstationen möglich ist, wird die vorläufige Kante des Arbeitsgangs durch ein Kantenbündel aus disjunktiv verknüpften Einzelkanten ersetzt. Es enthält für jede Bearbeitungsstation genau eine Einzelkante, die weiterhin mit der Anzahl eingehender Vor- oder Zwischenprodukteinheiten und mit dem jeweils auszuführenden Arbeitsgang beschriftet ist. Danach repräsentiert jede Kante des Präzedenzgraphen die Ausführung von genau einem Arbeitsgang auf genau einer Bearbeitungsstation. Ihre Kantenanschrift wird um die Bearbeitungsstation, auf der die Arbeitsgangausführung geschehen soll, als dritte Komponente der Kantenanschrift erweitert¹⁶⁾. Dabei wird vor dem Hintergrund der hier besonders interessierenden Flexiblen Fertigungssysteme berücksichtigt, ob sich die Arbeitsgänge auf den Bearbeitungsstationen entweder vollautomatisch ausführen lassen oder aber eine Arbeitskraft für die Bedienung der Bearbeitungsstation erfordern¹⁷⁾: Eine Bearbeitungsstation, die sich für die vollautomatische Arbeitsgangausführung eignet, wird durch das Superskript "*" gekennzeichnet.

Nun liegt der Präzedenzgraph in seiner endgültigen Form vor. Abb. 178 auf der nächsten Seite gibt diesen Präzedenzgraphen für den zuvor spezifizierten GOZINTO-Graphen wieder. Der Präzedenzgraph repräsentiert die vollständige Ablaufstruktur eines Produktionsauftrags¹⁸⁾. Sie umfaßt einerseits die Gesamtheit aller Präzedenzbeziehungen, die zwischen den auszuführenden Arbeitsgängen bestehen. Insofern gibt der Präzedenzgraph den Teilaspekt der Präzedenzstruktur eines Auftrags wieder¹⁹⁾. Andererseits enthält der Präzedenzgraph auch alle Möglichkeiten, zwischen alternativen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen auszuwählen. Aus dieser Perspektive stellt er die Alternativenstruktur eines Produktionsauftrags dar. Zusätzlich verknüpft der Präzedenzgraph die auszuführenden Arbeitsgänge mit den Objekten der Arbeitsgangausführungen. Es handelt sich um die Werkstücke, die im zugrundeliegenden GOZINTO-Graphen als Vor-, Zwischen- oder Endprodukte ausgewiesen sind.

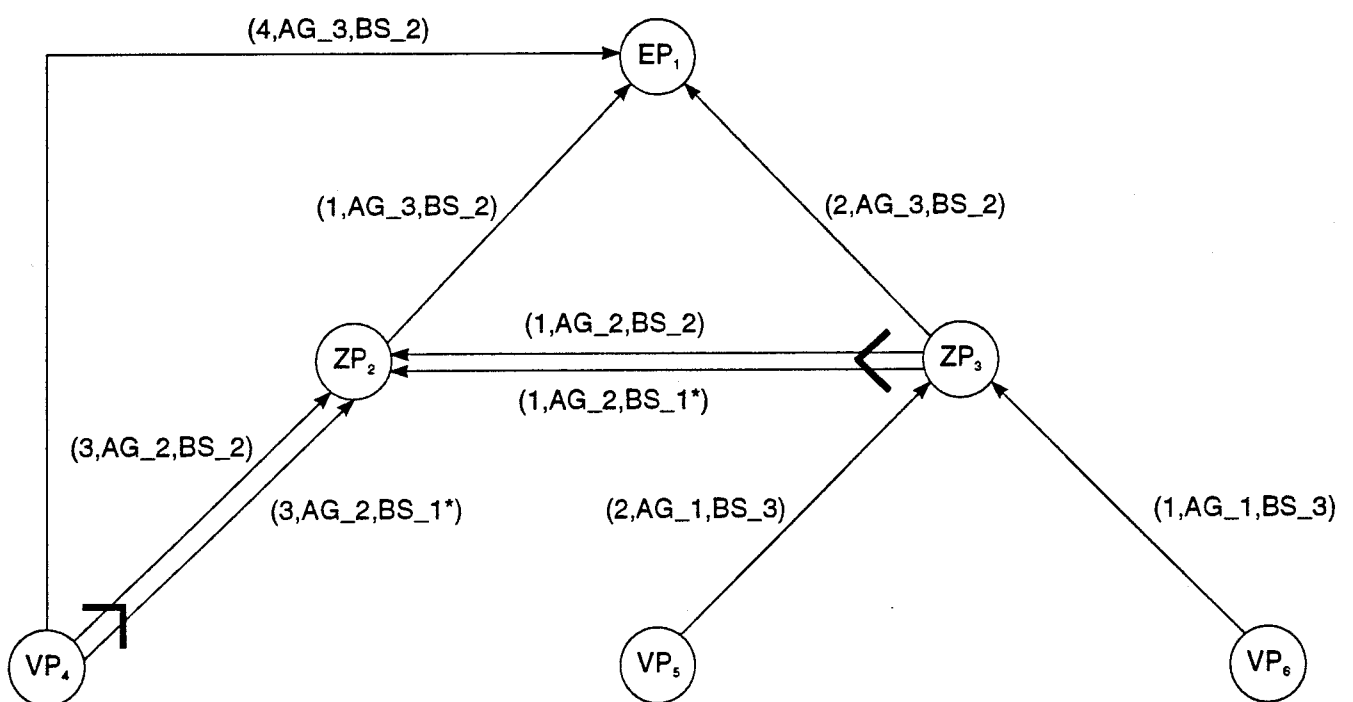


Abb. 178: Präzedenzgraph eines Produktionsauftrags

Der Präzedenzgraph, der aus der Transformation eines GOZINTO-Graphen hervorgeht, leistet bereits eine ausdrucksstarke Repräsentation der Aufbau- und Ablaufstruktur des jeweils zugrundeliegenden Produktionsauftrags. Insbesondere lassen sich auf diese Weise nicht-lineare Ablaufstrukturen darstellen. Dies schließt sowohl alternative als auch nebenläufige Arbeitsgangausführungen ein²⁰⁾. Aufgrund seiner charakteristischen Nonlinearität reicht das Ausdrucksvermögen eines Präzedenzgraphen deutlich über den Gehalt eines konventionellen, linearen Arbeitsplans hinaus. Zugleich kann jeder Präzedenzgraph als ein Prototyp nonlinearer Arbeitspläne aufgefaßt werden²¹⁾.

Allerdings leiden Präzedenzgraphen noch unter einem Repräsentationsmangel. Zugrundeliegt der Sachverhalt, daß jeder Knoten eine Vor-, Zwischen- oder Endproduktart und jede Kante die Ausführung eines Arbeitsgangs auf einer Bearbeitungsstation darstellt. Dabei ist es möglich, daß sich dieselbe Arbeitsgangausführung auf derselben Bearbeitungsstation über *mehrere* Kanten des Präzedenzgraphen erstreckt. Dies ist genau dann der Fall, wenn mehrere Kanten mit demselben Arbeitsgang und derselben Bearbeitungsstation beschriftet sind. Diese Beschriftungsübereinstimmung²²⁾ tritt ein, falls mehrere verschiedenartige Vor- oder Zwischenprodukte in die Herstellung desselben Zwischen- oder Endprodukts einfließen. Es widerspricht jedoch der Intuition einer "natürlichen" Modellierungsweise, daß *ein* Modellierungsobjekt durch *mehrere* Modellkonstrukte repräsentiert wird. Dies bedeutet hier: Die Repräsentation *einer* Arbeitsgangausführung auf derselben Bearbeitungsstation durch *mehrere* beschriftete Kanten erscheint "unnatürlich".

Dieses Modellierungsdefizit wird überwunden, indem der bisher entwickelte Präzedenzgraph durch ein Kanal/Instanz-Netz ersetzt wird²³⁾. Dabei wird die charakteristische Eigenschaft des Petrinetz-Konzepts ausgenutzt, daß Petrinetze durch *bipartite* Graphen repräsentiert werden: Jeder Knoten aus dem Präzedenzgraphen wird im Kanal/Instanz-Netz durch genau einen entsprechenden stellenartigen Knoten wiedergegeben. Jeder stellenartige Knoten vertritt daher auch im Kanal/Instanz-Netz eine Vor-, Zwischen- oder Endproduktart. Als Neuerung wird jedoch jede Arbeitsgangausführung auf einer Bearbeitungsstation durch einen eigenständigen - nunmehr transitionsartigen - Knoten repräsentiert²⁴⁾. Jeder solche transitionsartige Knoten wird über Ein- oder Ausgangskanten mit denjenigen stellenartigen Knoten verknüpft, deren Vor-, Zwischen- oder Endproduktarten zum In- bzw. Output der Arbeitsgangausführung des transitionsartigen Knotens gehören²⁵⁾. Das resultierende Kanal/Instanz-Netz leistet eine "natürliche" Modellierung der Ablaufstruktur des betrachteten Produktionsauftrags. Denn in ihr entspricht jedem Modellierungsobjekt nur noch genau ein Modellkonstrukt: Jede Produktart und jede Arbeitsgangausführung auf einer Bearbeitungsstation wird durch genau einen stellen- bzw. genau einen transitionsartigen Knoten wiedergegeben.

Aus der Terminologie der GOZINTO-Graphen wurde bisher die Bezugnahme auf Vor-, Zwischen- oder Endprodukte übernommen. Fortan werden sie jedoch als diejenigen Werkstücke angesprochen, die bei der Abwicklung eines Produktionsauftrags bearbeitet werden²⁶⁾. Im Kanal/Instanz-Netz läßt sich jedes Werkstück durch die Kopie einer auftragsspezifischen Werkstückmarke anschaulich darstellen. Diese Werkstückmarke ist mit der früher eingeführten Attributmarke für die auftragsunspezifische Repräsentation von Werkstücken eng verwandt, aber nicht identisch²⁷⁾. Zu Beginn der Abwicklung eines Produktionsauftrags befinden sich auf jeder Stelle, die einer Vorproduktart aus dem GOZINTO-Graphen entspricht, genau so viele Kopien der auftragsspezifischen Werkstückmarke, wie Einheiten des jeweils betroffenen Vorprodukts zur Herstellung der auftragsspezifischen Endproduktmenge erforderlich sind²⁸⁾. Abb. 179 auf der nächsten Seite zeigt das Kanal/Instanz-Netz, das aus der voranstehend skizzierten Modifizierung des Präzedenzgraphen aus Abb. 178 hervorgeht.

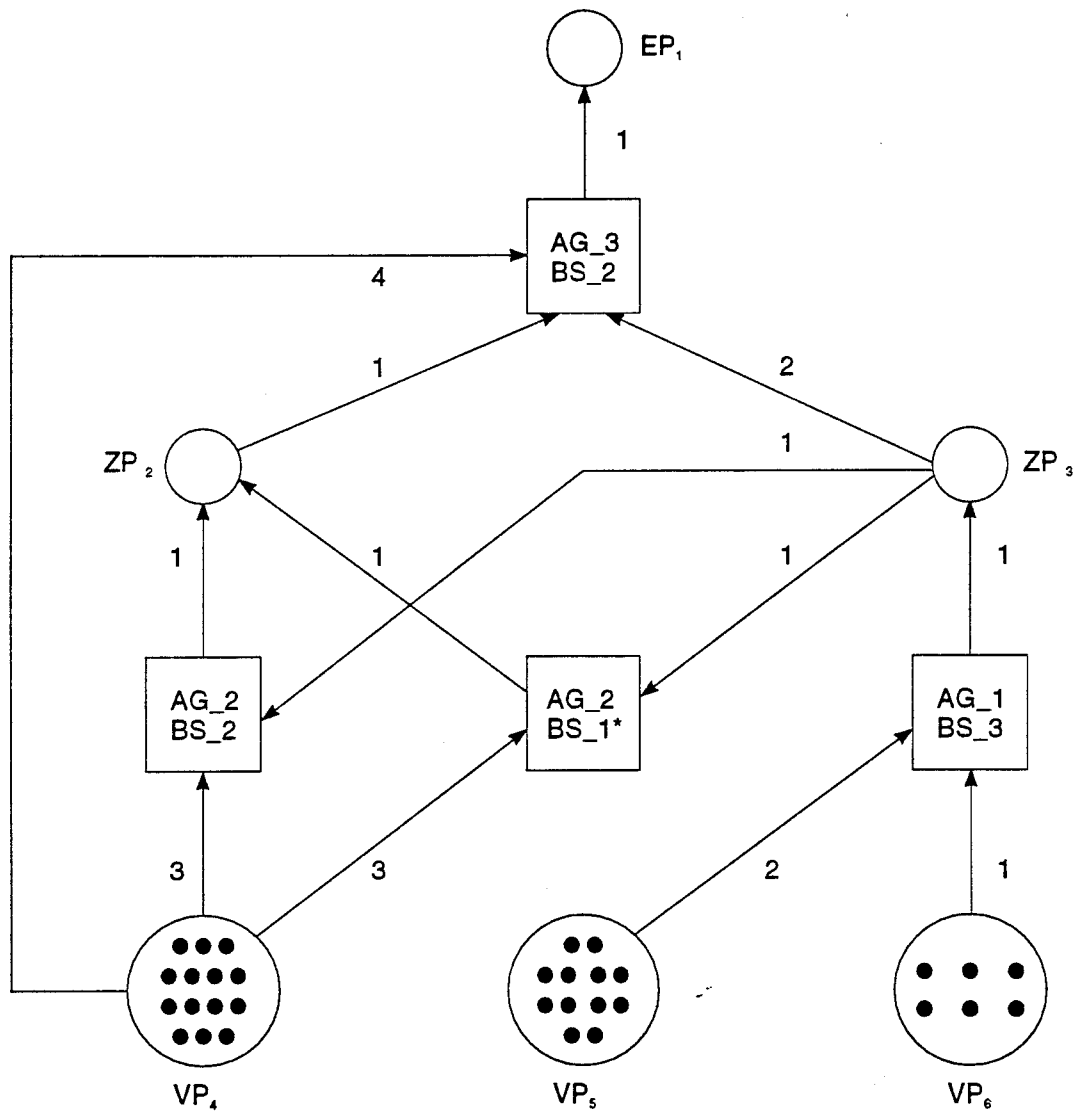


Abb. 179: Kanal/Instanz-Netz eines Produktionsauftrags

Jede Stelle im Kanal/Instanz-Netz, auf der sich unter der aktuellen Netzmarkierung eine (Kopie der)²⁹⁾ Werkstückmarke befindet, zeigt den aktuellen Bearbeitungszustand³⁰⁾ desjenigen Werkstücks an, das durch die jeweils betrachtete Werkstückmarke repräsentiert wird³¹⁾. Der Bearbeitungszustand wird durch die Werkstückart charakterisiert, zu der das Werkstück in der aktuellen Produktionssituation gehört. Dabei werden die Werkstückarten mit denjenigen Vor-, Zwischen- oder Endproduktarten identifiziert, die im Kanal/Instanz-Netz durch jeweils einen stellenartigen Knoten repräsentiert werden³²⁾. Entsprechend dem Fortschritt der Werkstückbearbeitung gehört das Werkstück zunächst zu einer Vorproduktart, durchläuft dann in der Regel³³⁾ mehrere Zwischenproduktarten, um schließlich in die eine auftragspezifische Endproduktart einzugehen³⁴⁾.

Im selben Kanal/Instanz-Netz lassen sich beliebig viele Werkstücke, die an der Abwicklung desselben Auftrags beteiligt sind, durch eine entsprechende Anzahl von Werkstückmarken berücksichtigen³⁵⁾. Darüber hinaus brauchen die Werkstücke keineswegs die gleichen Bearbeitungszustände einzunehmen. Denn die Werkstückmarken können in unterschiedlichster Weise über die Stellen des Kanal/Instanz-Netzes verteilt sein. Jede aktuelle Belegung aller Stellen des Netzes mit werkstückrepräsentierenden Marken stellt die Gesamtheit der Bearbeitungszustände aller auftragszugehörigen Werkstücke in der aktuellen Produktionssituation dar. Sie wird auch als Abwicklungszustand des betroffenen Produktionsauftrags bezeichnet³⁶⁾.

Aus dem Kanal/Instanz-Netz wird schließlich auf dem Wege der sukzessiven Verfeinerung und Erweiterung ein Synthetisches Netz abgeleitet. Dabei wird der zugrundeliegende Präzedenzgraph um arbeitsplanspezifische Informationen über die auszuführenden Arbeitsgänge ergänzt. Es resultiert das intendierte Netzmodul für die Repräsentation eines Produktionsauftrags. Zugleich stellt das Auftragsnetz einen nonlinearen Arbeitsplan dar, der sich in graphischer Weise visualisieren läßt.

Zunächst wird das Kanal/Instanz-Netz in ein übersichtliches Stelle/Transition-Netz transformiert. Das Stelle/Transition-Netz interpretiert die transitionsartigen Knoten des Kanal/Instanz-Netzes als atomare Bearbeitungsoperationen. Sie gehören jeweils zu einem Arbeitsgang, der auf einer Bearbeitungsstation ausgeführt werden soll³⁷⁾. Dabei werden die transitionsartigen Knoten des Kanal/Instanz-Netzes als Makrotransitionen aufgefaßt, die im Stelle/Transition-Netz durch transitionenberandete Subnetze verfeinert werden³⁸⁾. Jedes Subnetz besteht aus einer Starttransition für den Bearbeitungsbeginn und einer Schlußtransition für das Bearbeitungsende. Hinzu kommt eine Stelle, die so lange markiert ist, wie die Arbeitsgangausführung andauert. Darüber hinaus wird die Anordnung der Werkstückarten (Produktarten) gegenüber dem Kanal/Instanz-Netz invertiert³⁹⁾. Abb. 180 auf der nächsten Seite zeigt das resultierende Stelle/Transition-Netz.

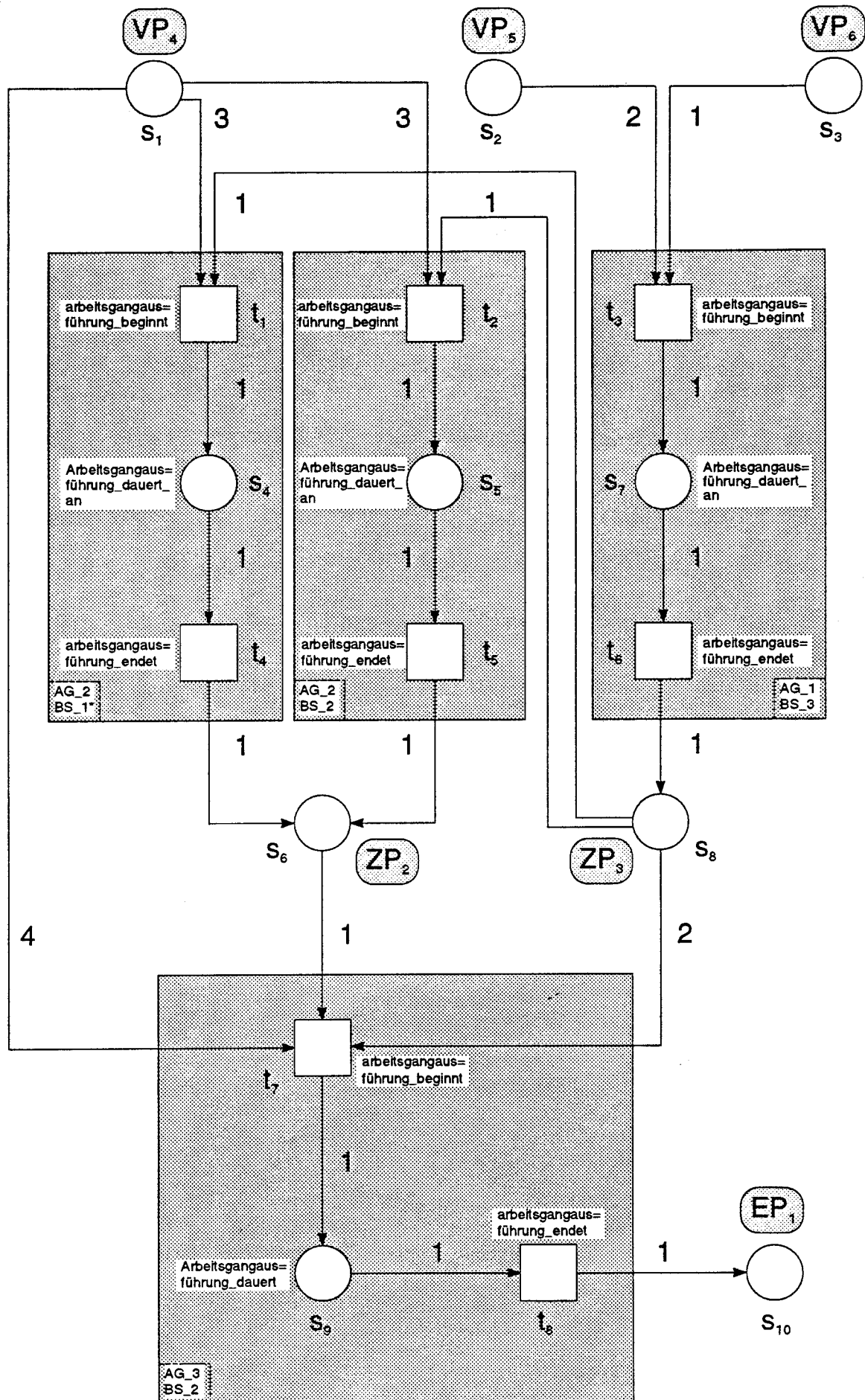


Abb. 180: Stelle/Transition-Netz für einen Produktionsauftrag

Das Stelle/Transition-Netz veranschaulicht nur die grobe Aufbau- und Ablaufstruktur des hier betrachteten Produktionsauftrags. Um diese Strukturen verfeinert darstellen zu können, erhält zunächst die Werkstückmarke des Kanal/Instanz-Netzes eine innere Struktur. Zu diesem Zweck wird die Werkstückmarke im Auftragsnetz als eine Attributmarke ausgestaltet. Diese Attributmarke stimmt jedoch nicht mit derjenigen Werkstückmarke überein, die früher für die Modellierung von Transport-, Bearbeitungs- und Lagernetzen eingeführt wurde. Denn die Kopien jener letztgenannten Werkstückmarke repräsentieren Werkstücke unabhängig davon, zu welchen Produktionsaufträgen sie zugeordnet sind⁴⁰). Daher wird auch von einer *auftragsunspezifischen* Werkstückmarke gesprochen. Die hier neu vorgestellte Werkstückmarke ist dagegen nur innerhalb des jeweils modellierten Produktionsauftrags definiert. Sie stellt deshalb eine *auftragspezifische* Werkstückmarke dar⁴¹). Die auftragspezifische und die auftragsunspezifische Werkstückmarke stimmen nur in vier Markenattributen überein⁴²). Dabei handelt es sich um:

- den Namen des Werkstücks⁴³);
- die Werkstückklasse;
- den Werkstückstatus;
- den Bearbeitungsstatus des Werkstücks.

Darüber hinaus unterscheiden sich die Attributstrukturen der beiden Werkstückmarken aber deutlich. Denn es wurde darauf verzichtet, in die auftragspezifische Werkstückmarke Attribute aus ihrem auftragsunspezifischen Pendant zu übernehmen, die im Netzmodul für die Auftragsabwicklung keine unmittelbare Rolle spielen. Dies betrifft insbesondere⁴⁴) diejenigen Attribute, die in der auftragsunspezifischen Werkstückmarke die werkstückbeschreibenden Zeit-, Kapitalbindungs- und Kostengrößen ausdrücken⁴⁵). Statt dessen besitzt die auftragspezifische Werkstückmarke aber ein fünftes Attribut mit der Sorte "werkstückort". Es kommt in der Attributstruktur der auftragsunspezifischen Werkstückmarke überhaupt nicht vor. Allerdings erfüllt dieses fünfte Attribut bei der späteren Modellierung von Produktionsaufträgen lediglich eine Hilfsfunktion⁴⁶).

Neben der auftragspezifischen Werkstückmarke wird eine zusätzliche Auftragsmarke eingeführt. Sie dient dazu, die globalen Aspekte der Auftragsabwicklung im Netzmodul darzustellen. Dies betrifft insbesondere die Reservierung von Werkstücken im Eingangslager des Produktionssystems, die als Vorprodukte in die auftragszugehörigen Arbeitsgänge eingehen sollen. Sobald für mindestens einen⁴⁷) ersten Arbeitsgang alle erforderlichen Werkstücke im Eingangslager reserviert werden konnten, ist es möglich, den Arbeitsgang dadurch einzuleiten, daß seine zu bearbeitenden Werkstücke aus dem Eingangslager abgerufen werden⁴⁸). Ebenso wird die Auftragsmarke benutzt, um am Ende der Auftragsabwicklung produktionswirtschaftlich interessante Informationen über das Abwicklungsergebnis vorzuhalten. Beispielsweise gibt sie Auskunft über die Durchlaufzeit und die Produktionskosten eines Auftrags. Die voranstehend skizzierten Aspekte werden durch den Fluß der Auftragsmarke durch einen ausgezeichneten Teil des Auftragsnetzes modelliert⁴⁹). Um diese Aufgabe zu erfüllen, wird die Auftragsmarke wiederum als eine Attributmarke konstituiert⁵⁰). Als konstante Markenattribute werden berücksichtigt:

- der Auftragsname;
- die Losgröße des Auftrags⁵¹);
- der spätest zulässige Termin für die Auftragsfertigstellung (Fertigstellungstermin)⁵²);
- der veranschlagte Auftragswert⁵³);
- eine fest vorgegebene Priorität für die Auftragsabwicklung⁵⁴).

Die variablen Attribute der Auftragsmarke enthalten Informationen über Zeit- und Kostengrößen, welche die Auftragsabwicklung beschreiben:

- den Zeitpunkt, in dem der Produktionsauftrag in das Produktionssystem eingelastet wurde (Abwicklungsbeginn)⁵⁵;
- der Zeitpunkt, in dem unbearbeitete Werkstücke aus dem Eingangslager des Produktionssystems erstmals abgerufen werden, um als Bearbeitungsobjekte für die erste Arbeitsgangausführung des Produktionsauftrags bereitgestellt zu werden (auftragsspezifischer Bearbeitungsbeginn);
- die Zeitspanne, die zwischen dem Abwicklungsbeginn und dem aktuellen Zeitpunkt verstrichen ist (Auftragsalter)⁵⁶;
- der Zeitpunkt, in dem das letzte fertigbearbeitete Werkstück des Produktionsauftrags vom Ausgangslager des Produktionssystems übernommen worden ist (auftragsspezifisches Bearbeitungsende);
- der Zeitpunkt, in dem der Produktionsauftrag aus dem Produktionssystem ausgelastet wird (Abwicklungsende)⁵⁷;
- die Zeitspanne zwischen dem Abwicklungsbeginn und dem Abwicklungsende des Produktionsauftrags (Abwicklungsdauer);
- die Zeitspanne zwischen dem Abwicklungsbeginn und dem Bearbeitungsende des Produktionsauftrags (auftragsspezifische Durchlaufzeit)⁵⁸;
- die Zeitspanne zwischen dem Bearbeitungsbeginn und dem Bearbeitungsende des Produktionsauftrags (auftragsspezifische Bearbeitungsdauer)⁵⁹;
- der bearbeitungsbedingte Durchlaufzeitanteil⁶⁰;
- der transportbedingte Durchlaufzeitanteil⁶¹;
- der lagerbedingte Durchlaufzeitanteil⁶²;
- der wartebedingte Durchlaufzeitanteil⁶³;
- die Kosten, die für die Bearbeitung von Werkstücken des Auftrags zwischen seinem Bearbeitungsbeginn und -ende insgesamt angefallen sind (auftragsspezifische Bearbeitungskosten)⁶⁴;
- die Kosten, die durch den Einsatz von Transportmitteln für den Transport von Werkstücken des Auftrags zwischen seinem Bearbeitungsbeginn und -ende insgesamt verursacht worden sind⁶⁵ (auftragsspezifische Transportkosten)⁶⁶;
- die Kosten, die während der Lagerung von Werkstücken des Auftrags in Lagerstationen zwischen seinem Abwicklungsbeginn und -ende insgesamt entstanden sind (auftragsspezifische Lagerkosten)⁶⁷;
- die Kosten, die durch die Kapitalbindung bei Bereitstellung, Bearbeitung, Transport und Lagerung der Werkstücke eines Auftrags während seiner Abwicklung insgesamt angefallen sind (auftragsspezifische Kapitalbindungskosten)⁶⁸;
- die Kosten, die bei der Abwicklung des Produktionsauftrags durch Bereitstellung, Bearbeitung, Transport, Lagerung und Kapitalbindung insgesamt verursacht worden sind (auftragsspezifische Herstellkosten)⁶⁹.

Zwei Informationsmarken ermöglichen schließlich die Kommunikation zwischen dem Netzmodul eines Produktionsauftrags und den beiden Netzmodulen für Bearbeitungs- und Lagerstationen. Die Marke für den Informationsaustausch mit einer Lagerstation wurde schon früher als Informationsmarke der Sorte "lagerauftrag" vorgestellt. Die Marke, die dem Informationsaustausch mit Bearbeitungsstationen dient, wurde ebenso als Informationsmarke der Sorte

"bearbeitungsauftrag" kurz erwähnt. Sie wird nachfolgend näher beschrieben, weil die Erläuterung ihrer Zusammensetzung den Kontext eines abzuwickelnden Produktionsauftrags voraussetzt.

Die Attribute der Informationsmarke für einen Bearbeitungsauftrag identifizieren zunächst diejenigen Optionen, die in der aktuellen Produktionssituation hinsichtlich der Fortsetzung der Werkstückbearbeitung offenstehen. Ihre Ausprägungen charakterisieren jeweils einen Arbeitsgang, der sich als nächster ausführen läßt⁷⁰). Dabei bestimmen die aktuellen Bearbeitungszustände aller bisher bearbeiteten Werkstücke und der Arbeitsplan desjenigen Produktionsauftrags, zu dem die Werkstücke gehören, welche Arbeitsgänge grundsätzlich in Betracht kommen⁷¹). Falls mehrere solche Arbeitsgänge existieren oder wenn derselbe Arbeitsgang auf unterschiedliche Weise ausgeführt werden kann, werden entsprechend viele Kopien der Informationsmarke erzeugt⁷²). Über die Arbeitsgangidentifizierung hinaus umfaßt die Informationsmarke zusätzliche Attribute⁷³). Sie können herangezogen werden, um Prioritätsregeln für die Zuordnung von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen zu formulieren⁷⁴). Dabei lassen sich Arbeitsgänge mit bestimmten⁷⁵), jeweils arbeitsgang-⁷⁶) oder auftragsspezifischen⁷⁷) Eigenschaften bevorzugen. Im einzelnen gehören zu den arbeitsgangbeschreibenden Attributen der Informationsmarke für einen Bearbeitungsauftrag⁷⁸):

- der Name eines Arbeitsgangs, der als nächster ausgeführt werden kann (Folgearbeitsgang);
- der Name des Produktionsauftrags, zu dem der Arbeitsgang gehört (Arbeitsgangzugehörigkeit);
- der Name einer Bearbeitungsstation, auf der sich der Folgearbeitsgang grundsätzlich ausführen läßt (Folgebearbeitungsstation);
- der Sollrüstzustand, in dem sich die Folgebearbeitungsstation zur Ausführung des Folgearbeitsgangs befinden muß;
- die Zeitspanne, die zur Ausführung des Folgearbeitsgangs auf der Folgebearbeitungsstation vorgesehen ist (Ausführungsdauer)⁷⁹);
- eine Werkzeugliste, die für jedes Werkzeug, das auf der Folgebearbeitungsstation zur Ausführung des Folgearbeitsgangs erforderlich ist, die zugehörige Werkzeugklasse angibt⁸⁰);
- eine Werkstückeingangsliste, die für jedes Werkstück, das als Bearbeitungsobjekt in den auszuführenden Folgearbeitsgang eingehen soll, die zugehörige Werkstückklasse spezifiziert⁸¹);
- der Werkstückausgang, der den Namen und die Werkstückklasse desjenigen Werkstücks festlegt, das am Ende der Ausführung des Folgearbeitsgangs vorliegen soll⁸²);
- eine Angabe darüber, ob die Ausführung des Folgearbeitsgangs auf der Folgebearbeitungsstation entweder eine Arbeitskraft erfordert oder aber vollautomatisch erfolgen kann (Automatisierungsgrad);
- die Summe der Durchlaufzeiten aller Werkstücke, die als Bearbeitungsobjekte für die Ausführung des Folgearbeitsgangs bei seiner Zuordnung zu einer Folgebearbeitungsstation bereitstehen⁸³);
- die Summe der Herstellkosten aller Werkstücke, die als Bearbeitungsobjekte für die Ausführung des Folgearbeitsgangs bei seiner Zuordnung zu einer Folgebearbeitungsstation bereitstehen⁸⁴);
- die Schlupfzeit des Arbeitsgangs⁸⁵);
- die Abwicklungspriorität des Auftrags, zu dem der Arbeitsgang gehört;
- der veranschlagte Wert des arbeitsgangzugehörigen Produktionsauftrags.

Darüber hinaus werden in der Informationsmarke für einen Bearbeitungsauftrag noch berücksichtigt:

- der Zeitpunkt, in dem der Bearbeitungsauftrag zwecks Fortsetzung der Auftragsabwicklung erteilt wurde;
- der Bearbeitungsauftragsstatus⁸⁶⁾.

Das Netzmodul für die Repräsentation eines Produktionsauftrags stellt ein Synthetisches Netz dar. Es faßt alle voranstehend erörterten Verfeinerungen und Erweiterungen zusammen, die für das oben eingeführte Kanal/Instanz-Netz und das daraus abgeleitete Stelle/Transition-Netz⁸⁷⁾ erfolgten. Aufgrund seines Umfangs mußte das resultierende Auftragsnetz in zehn Teile zerlegt werden. Abb. 181 bis 190 auf den nächsten Seiten zeigen die Netzgraphiken der Teilnetze. Auf den anschließenden Seiten findet sich die zugehörige Netzlegende für das Gesamtnetz.

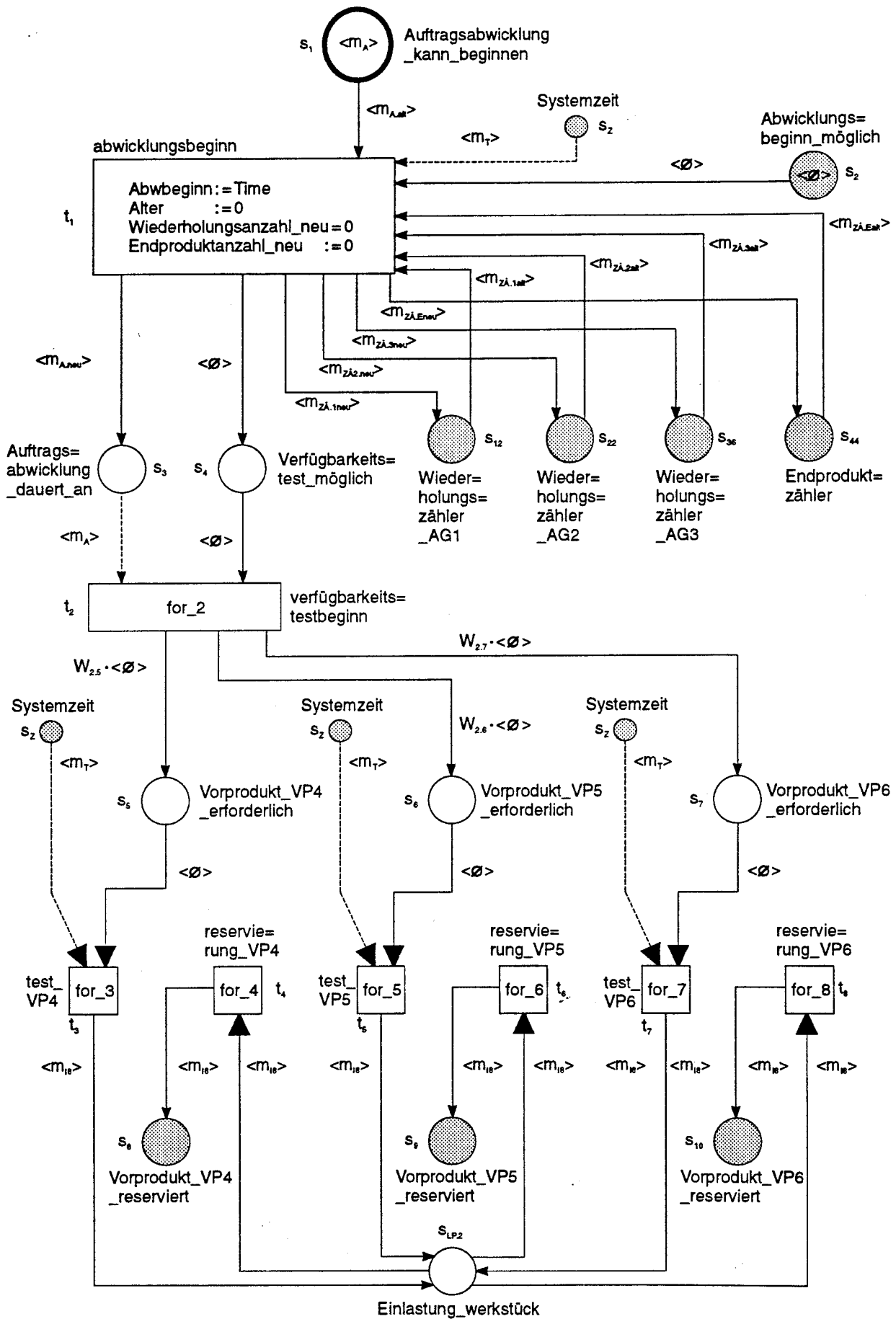


Abb. 181: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: erstes Teilnetz für die Initialisierung der Auftragsausführung

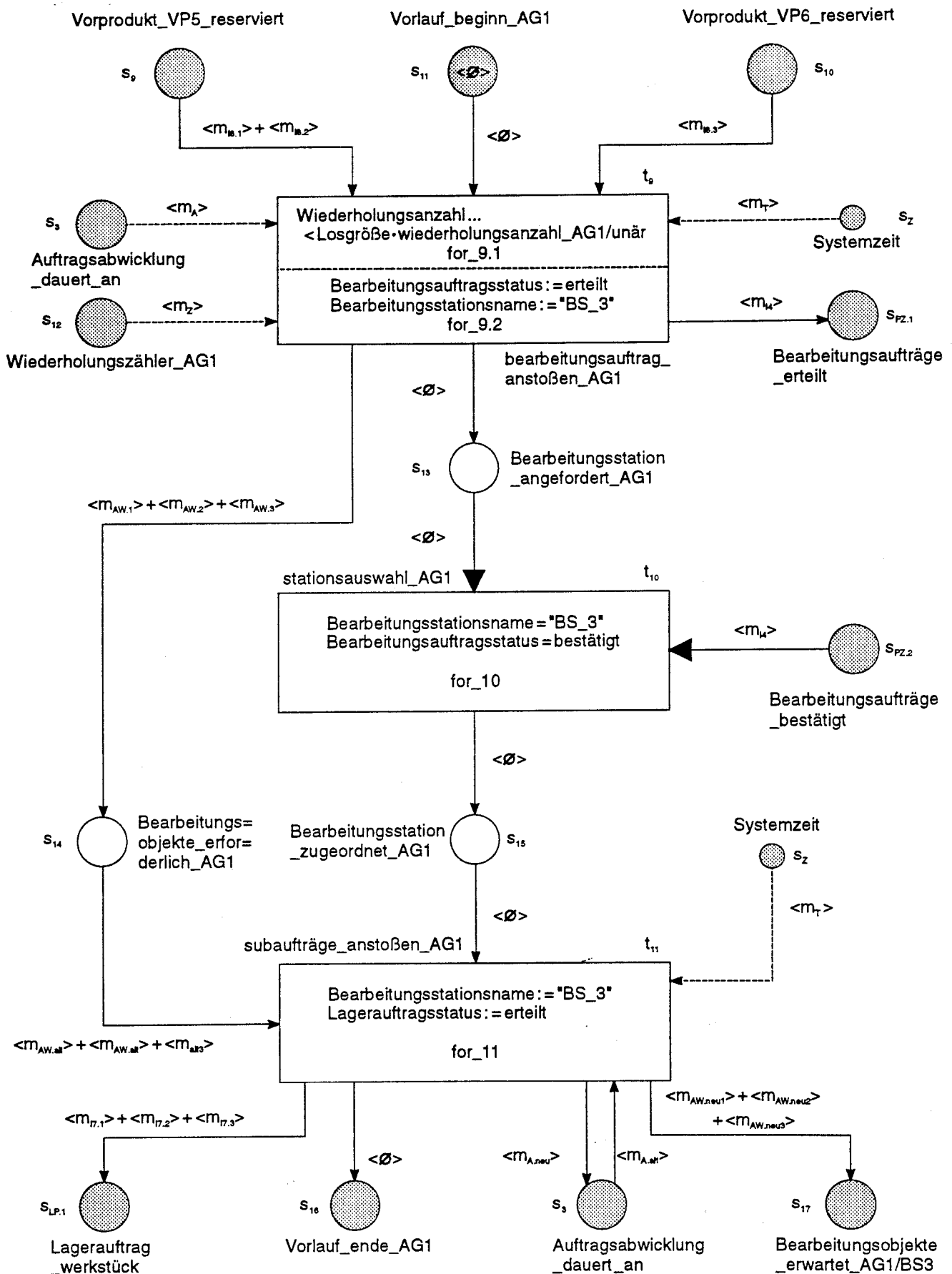


Abb. 182: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: zweites Teilnetz für die Vorbereitung des ersten Arbeitsgangs

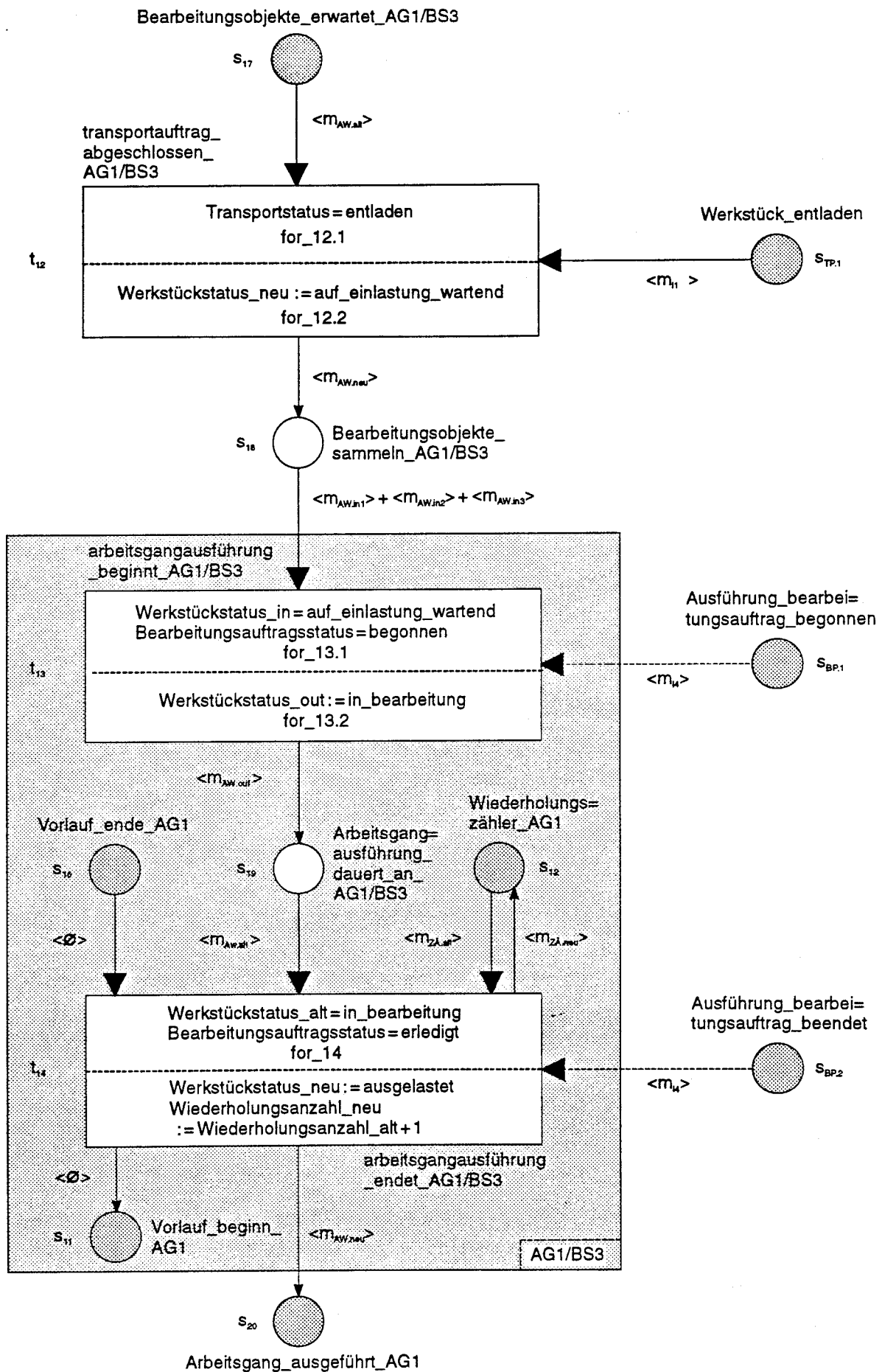


Abb. 183: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: drittes Teilnetz für die Ausführung des ersten Arbeitsgangs

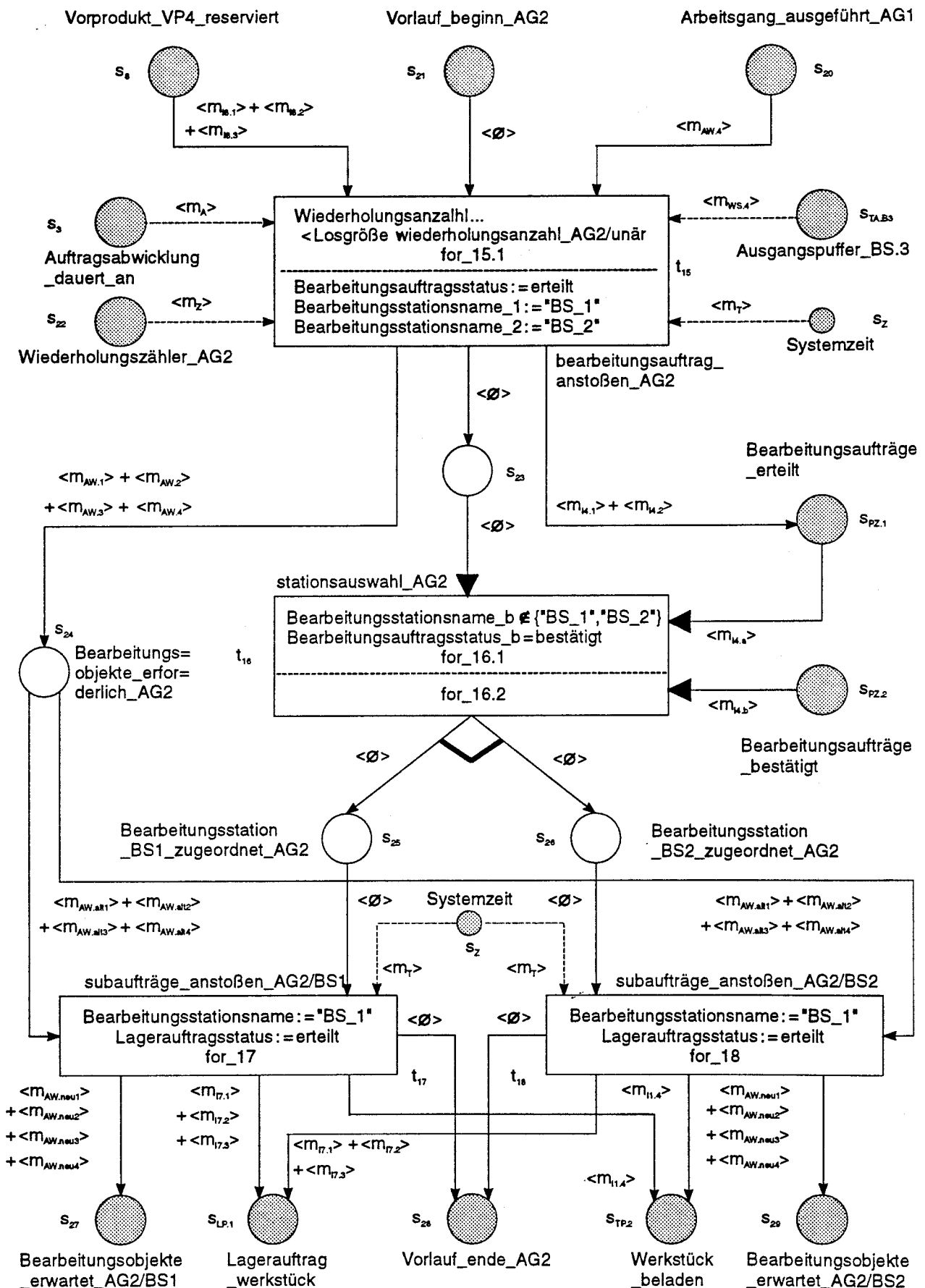


Abb. 184: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: viertes Teilnetz für die Vorbereitung des zweiten Arbeitsgangs

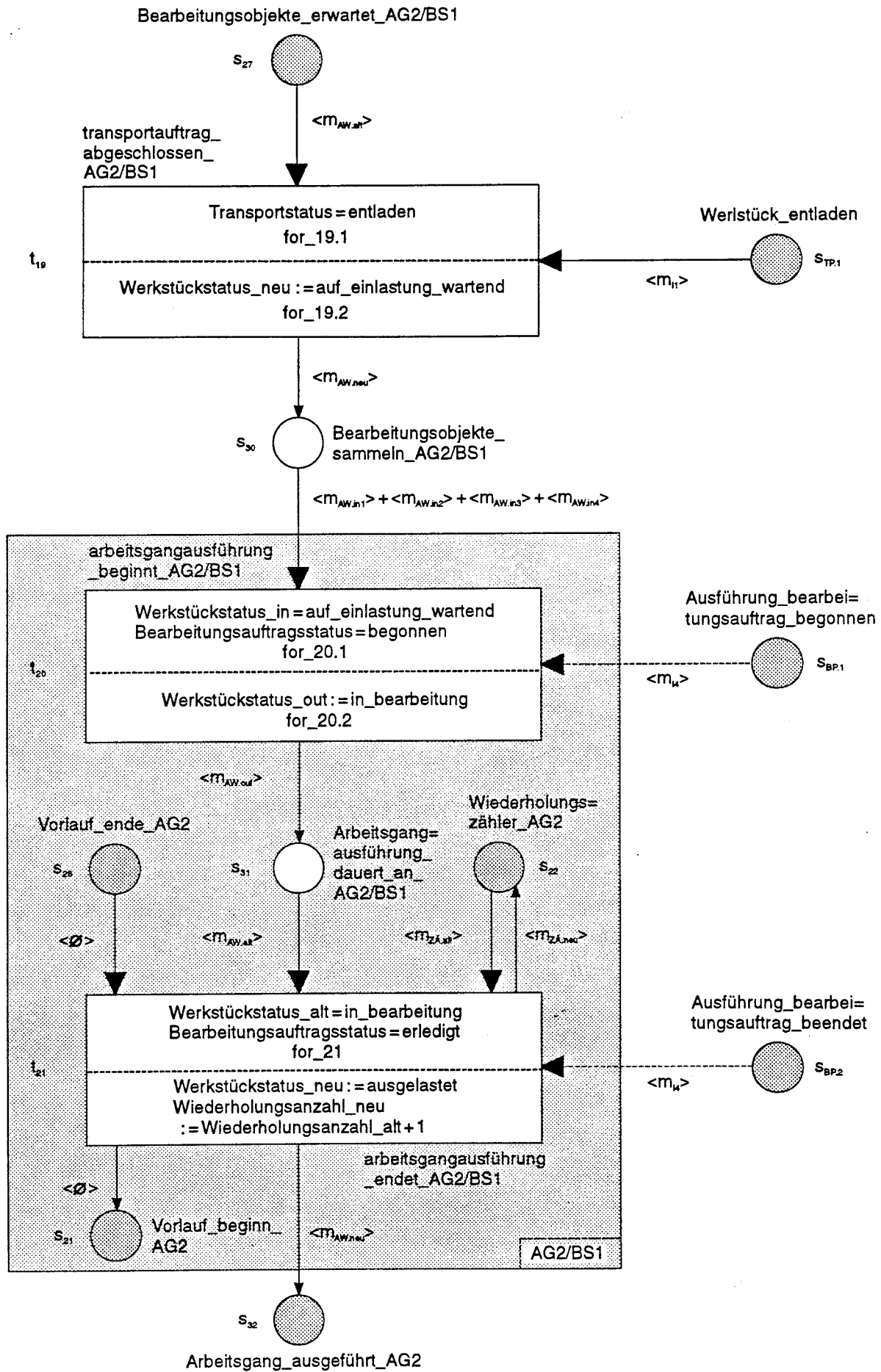


Abb. 185: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: fünftes Teilnetz für die Ausführung des zweiten Arbeitsgangs auf der Bearbeitungsstation "BS_1"

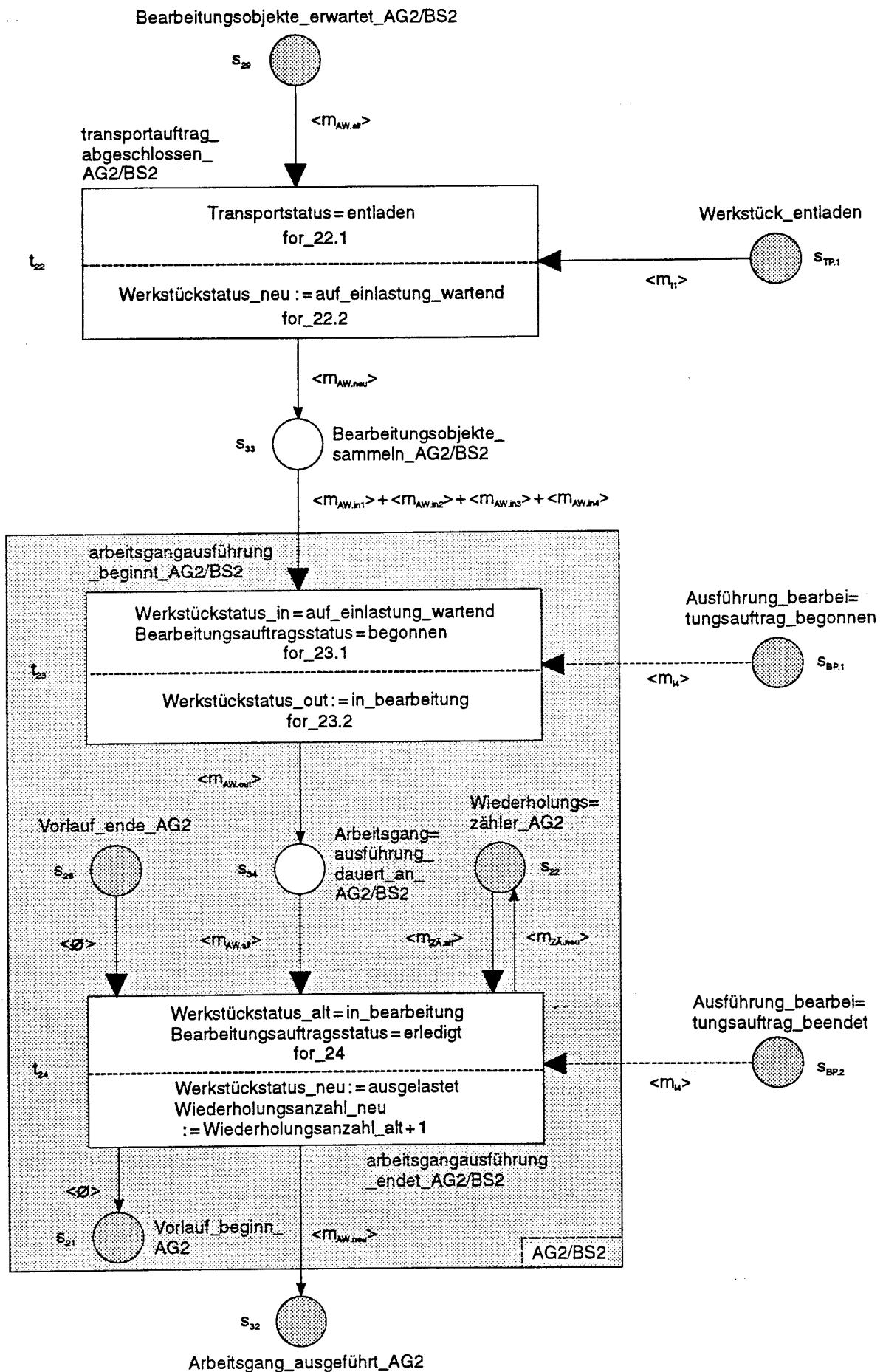


Abb. 186: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: sechstes Teilnetz für die Ausführung des zweiten Arbeitsgangs auf der Bearbeitungsstation "BS_2"

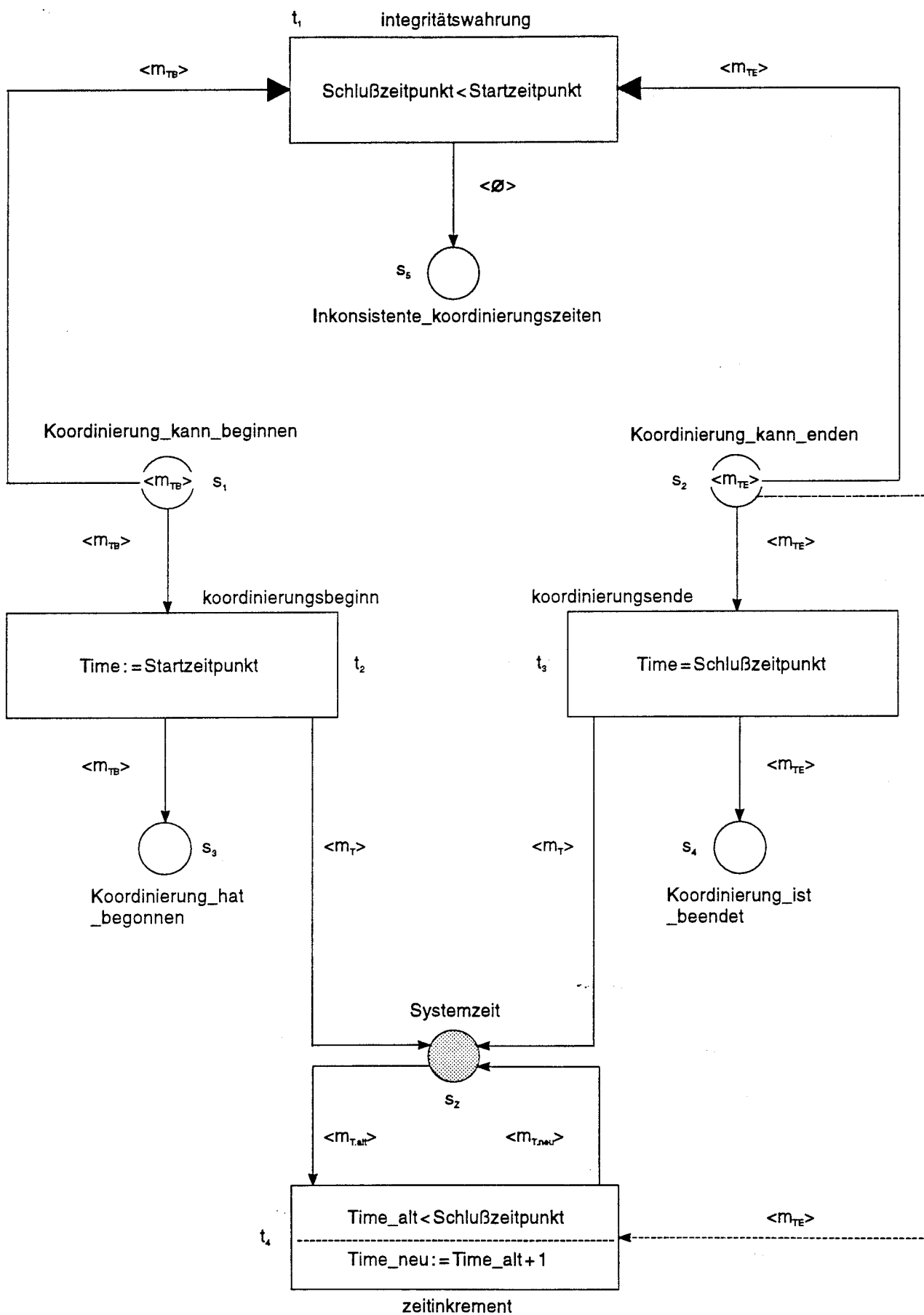


Abb. 187: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: siebtes Teilnetz für die Vorbereitung des dritten Arbeitsgangs

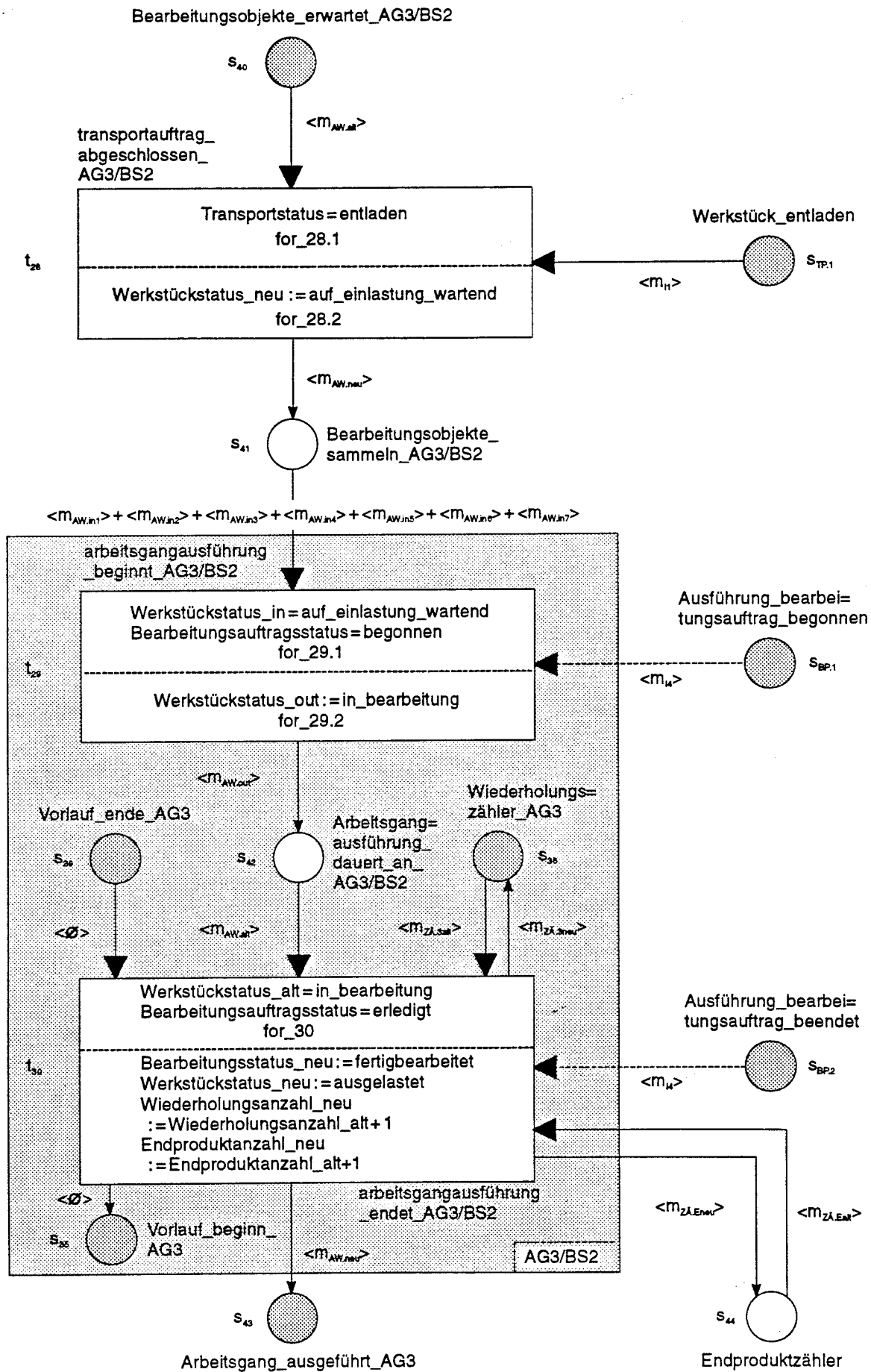


Abb. 188: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: achtes Teilnetz für die Ausführung des dritten Arbeitsgangs

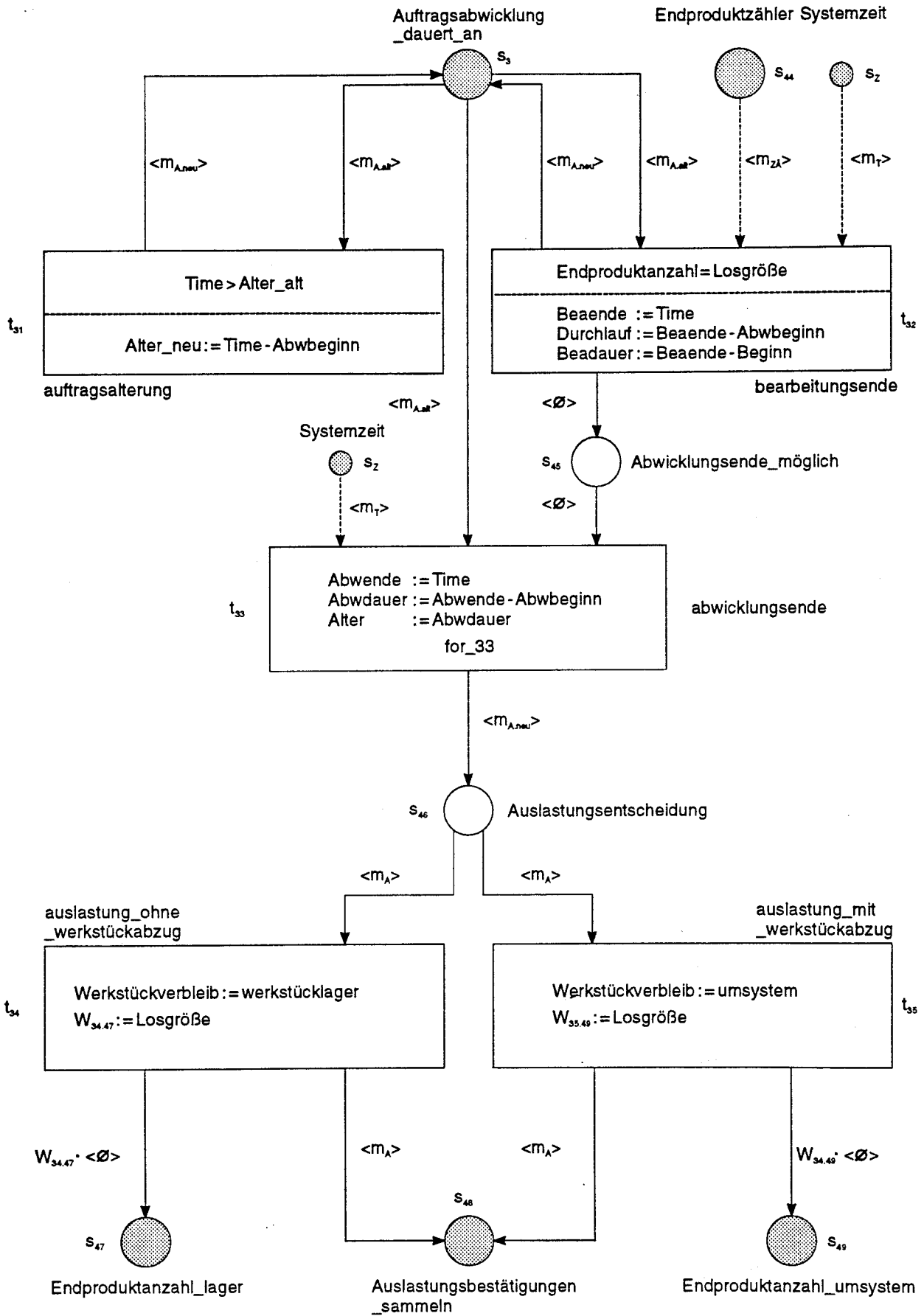


Abb. 189: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: neuntes Teilnetz für die Nachbereitung der Auftragsausführung (erster Teil)

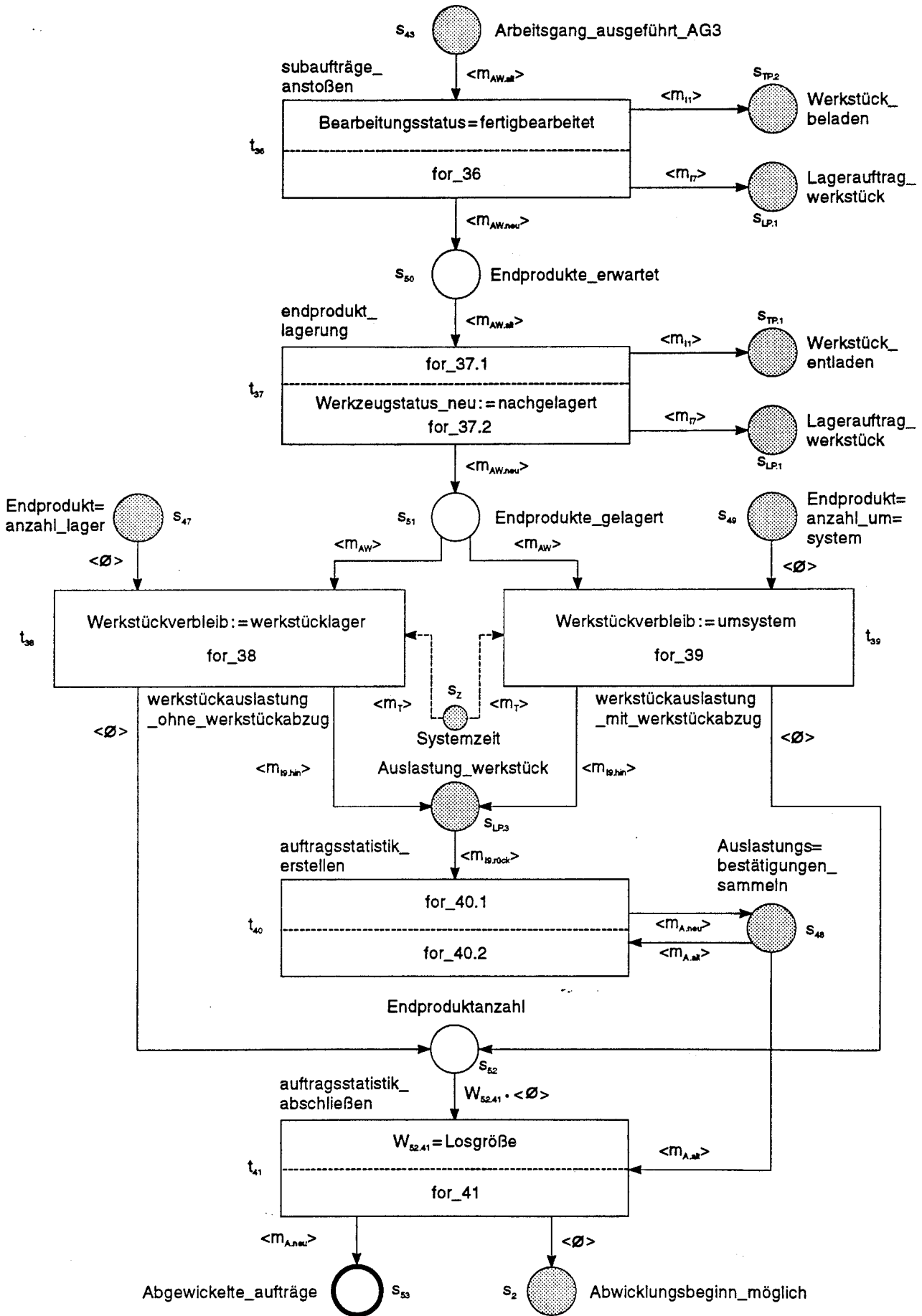


Abb. 190: Netzgraphik eines Produktionsauftrags: zehntes Teilnetz für die Nachbereitung der Auftragsausführung (zweiter Teil)

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

eingangspufferkapazität_BS_1 = 4

eingangspufferkapazität_BS_2 = 10

eingangspufferkapazität_BS_3 = 4

ausgangspufferkapazität_BS_1 = 3

ausgangspufferkapazität_BS_2 = 5

ausgangspufferkapazität_BS_3 = 2

werkstückklasse_EP_1 = "WSK_6"

werkstückklasse_ZP_2 = "WSK_4"

werkstückklasse_ZP_3 = "WSK_5"

werkstückklasse_VP_4 = "WSK_1"

werkstückklasse_VP_5 = "WSK_2"

werkstückklasse_VP_6 = "WSK_3"

lagerstation_name = "LS_1"

auftrag_name = "PA_1"

wiederholungsanzahl_AG1/unär = 3

88)

wiederholungsanzahl_AG2/unär = 1

wiederholungsanzahl_AG3/unär = 1

ausführungsdauer_AG1/BS3 = 25

89)

ausführungsdauer_AG2/BS1 = 18

ausführungsdauer_AG2/BS2 = 12

ausführungsdauer_AG3/BS2 = 33

werkzeugklassen_AG1/BS3 = ["WZK_2", "WZK_5", "WZK_9"]

werkzeugklassen_AG2/BS1 = ["WZK_3"]

werkzeugklassen_AG2/BS2 = ["WZK_1", "WZK_4"]

werkzeugklassen_AG3/BS2 = ["WZK_4", "WZK_7"]

werkstückklasse_out_AG_1 = "WSK_5"

werkstückklasse_out_AG_2 = "WSK_4"

werkstückklasse_out_AG_3 = "WSK_6"

sollrüstzustand_AG1/BS3 = gerüstet_1

sollrüstzustand_AG2/BS1 = gerüstet_2

sollrüstzustand_AG2/BS2 = gerüstet_2

sollrüstzustand_AG3/BS2 = gerüstet_3

automatisierungsgrad_AG1/BS3 = bemannt

automatisierungsgrad_AG2/BS1 = vollautomatisch

automatisierungsgrad_AG2/BS2 = bemannt

automatisierungsgrad_AG3/BS2 = bemannt

zeitpunkt:

INTEGER

zeitdauer:	INTEGER		
zeitanteil:	REAL		
kosten:	REAL		
kapitalbindungsbetrag:	REAL		
werkstückort:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3", "BS_4","LS_1":	→ OB _{werkstückort}	
werkstückname:	STRING		
	"WS_1","WS_2","WS_3","WS_4","WS_5", "WS_6","WS_7","WS_8","WS_9","WS_10", "WS_11","WS_12","WS_13","WS_14","WS_15", "WS_16","WS_17","WS_18","WS_19","WS_20", "WS_21","WS_22","WS_23","WS_24","WS_25", "WS_26","WS_27","WS_28","WS_29","WS_30", "WS_31","WS_32","WS_33","WS_34","WS_35", "WS_36","WS_37","WS_38","WS_39","WS_40", "WS_41","WS_42","WS_43","WS_44","WS_45", "nil"	→ OB _{werkstückname}	
werkstückklasse:	STRING		
	"WSK_1","WSK_2","WSK_3", "WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:	→ OB _{werkstückklasse}	
auftragsname:	STRING		
	"PA_1":	→ OB _{auftragsname}	90)
werkstückstatus:	SYMBOL		
	nil,vorgelagert,auf_einlastung_wartend, eingelastet,in_bearbeitung,ausgelastet, auf_einlagerung_wartend,zwischengelagert, auf_transportmittelzuordnung_wartend, auf_transportmittelbeladung_wartend, transportiert,nachgelagert:	→ OB _{werkstückstatus}	91)
bearbeitungsstatus:	SYMBOL		
	unbearbeitet,angearbeitet, fertigbearbeitet,beschädigt:	→ OB _{bearbeitungsstatus}	
bearbeitungsstationsname:	STRING		
	"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4":	→ OB _{bearbeitungsstationsname}	92)
werkstücklagername:	STRING		
	"LS_1":	→ OB _{werkstücklagername}	

übergabestationsname:	STRING	
"BS_1","BS_2","BS_3","BS_4",		
"LS_1","LS_2":		→ OB _{übergabestationsname}
transportstatus:SYMBOL		
beladung_erwartend,		
beladen,entladen:		→ OB _{transportstatus}
bearbeitungsauftragsstatus:	SYMBOL	
erteilt,bestätigt,begonnen,		
erledigt,abgebrochen:		→ OB _{bearbeitungsauftragsstatus}
losgröße:	INTEGER	
auftragswert:	REAL	
priorität:	INTEGER	
auftragsname:	STRING	
rüstzustand:	SYMBOL	
gerüstet_0,gerüstet_1,		
gerüstet_2,gerüstet_3:		→ OB _{rüstzustand}
priorität:	INTEGER	
auftragswert:	REAL	
automatisierungsgrad:	SYMBOL	
vollautomatisch,bemannt:		→ OB _{automatisierungsgrad}
werkzeugklasse:	STRING	
"WZK_1","WZK_2","WZK_3","WZK_4",		
"WZK_5","WZK_6","WZK_7","WZK_8","WZK_9":		→ OB _{werkzeugklasse}
werkzeugklassenliste =	werkzeugklasse*	
arbeitsgangname:	STRING	
lagerauftragsart:	SYMBOL	
zwischenlagerung,		
auslagerung:		→ OB _{lagerauftragsart}
lagerauftragsstatus:	SYMBOL	
erteilt,erledigt:		→ OB _{lagerauftragsstatus}
lagerauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)	
reservierungsstatus:	SYMBOL	
frei,reserviert:		→ OB _{reservierungsstatus}
anzahl	INTEGER	

```

werkstückzugehörigkeit = Zuordnung_ws(auftragsname);
                        Zuordnung_ws_ka()

werkstückzuordnung = Zuordnung_ws(bearbeitungsstationsname);
                     Zuordnung_wsls(werkstücklagername);
                     Zuordnung_ws_ka()

werkstück_vorlagerbeginn = Vorlagerbeginn_ws(zeitpunkt);
                          Vorlagerbeginn_ws_ka()

werkstück_nachlagerende = Nachlagerende_ws(zeitpunkt);
                          Nachlagerende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsbeginn = Bearbeitungsbeginn_ws(zeitpunkt);
                               Bearbeitungsbeginn_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsende = Bearbeitungsende_ws(zeitpunkt);
                             Bearbeitungsende_ws_ka()

werkstück_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_transportdauer = Transportdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_lagerdauer = Lagerdauer_ws(zeitdauer)

werkstück_wartedauer = Wartedauer_ws(zeitdauer)

werkstück_durchlaufzeit = Durchlaufzeit_ws(zeitdauer)

werkstückzeiten = Zeiten_ws(werkstück_vorlagerbeginn
                             werkstück_bearbeitungsbeginn
                             werkstück_bearbeitungsdauer
                             werkstück_transportdauer
                             werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer
                             werkstück_durchlaufzeit
                             werkstück_bearbeitungsende
                             werkstück_nachlagerende)

letzter_zeitpunkt = Letzte_ermittlung(zeitpunkt)

werkstückkapitalbindung = Kapitalbindung(letzter_zeitpunkt kapitalbindungsbetrag)

werkstück_bereitstellungskosten = Bereitstellung_ws(kosten)

werkstück_bearbeitungskosten = Bearbeitung_ws(kosten)

werkstück_transportkosten = Transport_ws(kosten)

werkstück_lagerkosten = Lagerung_ws(kosten)

werkstück_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_ws(kosten)

werkstück_herstellkosten = Herstellung_ws(kosten)

```

```

werkstückkosten =          Kosten_ws(werkstück_bereitstellungskosten
                             werkstück_bearbeitungskosten
                             werkstück_transportkosten
                             werkstück_lagerkosten
                             werkstück_kapitalbindungskosten
                             werkstück_herstellkosten)

bearbeitungsauftragserteilung =  Auftragserteilung(zeitpunkt)

arbeitsgang_zugehörigkeit =      Zuordnung_agpa(auftragsname)

arbeitsgang_rüsterfordernis =    Sollrüstung(rüstzustand)

arbeitsgang_ausführungsdauer =    Ausführung_ag(zeitdauer)

arbeitsgang_werkzeuge =          Werkzeuge_ag(werkzeugklassenliste)

arbeitsgang_werkstückeingang =    Input(werkstückklassenliste)

arbeitsgang_werkstückausgang =    Output(werkstückname werkstückklasse)

arbeitseingang_durchlaufzeiten =  Durchlaufzeit_age(zeitdauer)

arbeitseingang_herstellkosten =   Herstellung_age(kosten)

arbeitsgang_schlupfzeit =         Schlupfzeit_ag(zeitdauer);
                                  Schlupfzeit_ag_ka()

arbeitsganginfo =                Arbeitsgang(arbeitsgangname arbeitsgang_zugehörigkeit
                                             arbeitsgang_rüsterfordernis
                                             arbeitsgang_ausführungsdauer
                                             arbeitsgang_werkzeuge
                                             arbeitsgang_werkstückeingang
                                             arbeitsgang_werkstückausgang
                                             automatisierungsgrad
                                             arbeitseingang_durchlaufzeiten
                                             arbeitseingang_herstellkosten
                                             arbeitsgang_schlupfzeit
                                             priorität auftragswert)

fertigstellungstermin =          Fertigstellung_pa(zeitpunkt);
                                  Fertigstellung_pa_ka()

auftrags_abwicklungsbeginn =     Abwicklungsbeginn_pa(zeitpunkt);
                                  Abwicklungsbeginn_pa_ka()

auftrags_bearbeitungsbeginn =    Bearbeitungsbeginn_pa(zeitpunkt);
                                  Bearbeitungsbeginn_pa_ka()

auftrags_alter =                 Alter_pa(zeitdauer);
                                  Alter_pa_ka()

```

```

auftrags_bearbeitungsende =   Bearbeitungsende_pa(zeitpunkt);
                              Bearbeitungsende_pa_ka()

auftrags_abwicklungsende =   Abwicklungsende_pa(zeitpunkt);
                              Abwicklungsende_pa_ka()

auftrags_abwicklungsdauer =  Abwicklungsdauer_pa(zeitdauer);
                              Abwicklungsdauer_pa_ka()

auftrags_durchlaufzeit =    Durchlaufzeit_pa(zeitdauer);
                              Durchlaufzeit_pa_ka()

auftrags_bearbeitungsdauer = Bearbeitungsdauer_pa(zeitdauer);
                              Bearbeitungsdauer_pa_ka()

summe_bearbeitungsdauern =  bearbeitungsdauer_da(zeitdauer)

summe_transportdauern =    Transportdauer_da(zeitdauer)

summe_lagerdauern =        Lagerdauer_da(zeitdauer)

summe_wartedauern =        Wartedauer_da(zeitdauer)

summe_durchlaufzeiten =    Durchlaufzeit_da(zeitdauer)

absolut =                   Absolutanteile(summe_bearbeitungsdauern
                                           summe_transportdauern summe_lagerdauern
                                           summe_wartedauern summe_durchlaufzeiten)

durchlaufzeitanteil_bearbeitung = Bearbeitunganteil(zeitanteil)

durchlaufzeitanteil_transport =  Transportanteil(zeitanteil)

durchlaufzeitanteil_lagerung =   Lagerungsanteil(zeitanteil)

durchlaufzeitanteil_warten =     Warteanteil(zeitanteil)

relativ =                    Relativanteile(durchlaufzeitanteil_bearbeitung
                                           durchlaufzeitanteil_transport durchlaufzeitanteil_lagerung
                                           durchlaufzeitanteil_warten);
                              Relativanteile_ka()

auftrags_durchlaufzeitanteile =  Durchlaufzeitanteile_pa(absolut relativ);
                              Durchlaufzeitanteile_pa_ka()

auftrags_bearbeitungskosten =   Bearbeitung_pa(kosten)

auftrags_transportkosten =      Transport_pa(kosten)

auftrags_lagerkosten =          Lagerung_pa(kosten)

auftrags_kapitalbindungskosten = Kapitalbindung_pa(kosten)

auftrags_herstellkosten =       Herstellung_pa(kosten)

```


auftrags_zeiten =	Zeiten_pa(fertigstellungstermin auftrags_abwicklungsbeginn auftrags_bearbeitungsbeginn auftrags_alter auftrags_bearbeitungsende auftrags_abwicklungsende auftrags_abwicklungsdauer auftrags_durchlaufzeit auftrags_bearbeitungsdauer auftrags_durchlaufzeitanteile)
auftrags_kosten =	Kosten_pa(auftrags_bearbeitungskosten auftrags_transportkosten auftrags_lagerkosten auftrags_kapitalbindungskosten auftrags_herstellkosten)
werkstückinfo =	Werkstückinformation(werkstückname werkstückklasse werkstückzugehörigkeit werkstückzuordnung)
lagerauftragserteilung =	Auftragserteilung(zeitpunkt)
werkstückeinlastungsanweisung =	Einlastungsanweisung(zeitpunkt)
werkstückauslastungsanweisung =	Auslastungsanweisung(zeitpunkt)
werkstückzeiten_wsa =	Zeiten_wsa(werkstück_bearbeitungsdauer werkstück_transportdauer werkstück_lagerdauer werkstück_wartedauer werkstück_durchlaufzeit)
werkstückkosten_wsa =	Kosten_wsa(werkstück_bearbeitungskosten werkstück_transportkosten werkstück_lagerkosten werkstück_kapitalbindungskosten werkstück_herstellkosten)
einleitungsinfo =	Auslastungseinleitung(werkstücklagername werkstückname.werkstückzugehörigkeit werkstückverbleib werkstückauslastungsanweisung)
beendigungsinfo =	Auslastungsbeendigung(werkstücklagername werkstückname werkstückzugehörigkeit werkstückzeiten_wsa werkstückkosten_wsa)
«Ø» ≈ bas_marke =	Marke ₀ (), marke ₀ () = Ø
«m _A » ≈ auftrag =	Auftragsmarke(auftragsname losgröße auftragswert priorität auftrags_zeiten auftrags_kosten)

- «m_{AW}» ≈ auftragswerkstück = Werkstückmarke_auftrag(werkstückname werkstückklasse
 werkstückstatus werkstückort bearbeitungsstatus)
- «m_{I1}» ≈ werkstücktransport = Informationsmarke_wst(werkstückname 94)
 werkstückzugehörigkeit werkstückzuordnung
 übergabestationsname transportstatus)
- «m_{I4}» ≈ bearbeitungsauftrag = Informationsmarke_ba(bearbeitungsstationsname
 arbeitsganginfo bearbeitungsauftragserteilung
 bearbeitungsauftragsstatus)
- «m_{I7}» ≈ werkstücklagerauftrag = Informationsmarke_wsl(werkstücklagername
 werkstückinfo lagerauftragserteilung
 lagerauftragsart lagerauftragsstatus)
- «m_{I8}» ≈ werkstückeinlastung = Informationsmarke_wse(werkstücklagername
 werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstück_durchlaufzeit
 werkstück_herstellkosten reservierungsstatus
 werkstückeinlastungsanweisung)
- «m_{I9}» ≈ werkstückauslastung = Informationsmarke_wsa_hin(einleitungsinfo);
 Informationsmarke_wsa_rück(beendigungsinfo)
- «m_T» ≈ syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
- «m_{WS}» ≈ werkstück = Werkstückmarke(werkstückname werkstückklasse
 werkstückzugehörigkeit werkstückstatus
 bearbeitungsstatus werkstückzuordnung
 werkstückzeiten werkstückkapitalbindung
 werkstückkosten)
- «m_{ZÄ}» ≈ wiederholungen = Zählermarke(anzahl)

Stellen/Prädikatssymbole:

- s_{BP.1}: Ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(bearbeitungsauftrag)
 markenkapazität_{BP.1} = 1
- s_{BP.2}: Ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(bearbeitungsauftrag)
 markenkapazität_{BP.2} = 1
- s_{LP.1}: Lagerauftrag_werkstück(werkstücklagerauftrag)
 markenkapazität_{LP.1} = 10
- s_{LP.2}: Einlastung_werkstück(werkstückeinlastung)
 markenkapazität_{LP.2} = ω

- $s_{LP.3}$: Auslastung_werkstück(werkstückauslastung)
 markenkapazität $_{LP.3} = \omega$
- $s_{PZ.1}$: Bearbeitungsaufträge_erteilt(bearbeitungsauftrag)
 markenkapazität $_{PZ.1} = \omega$ 95)
- $s_{PZ.2}$: Bearbeitungsaufträge_bestätigt(bearbeitungsauftrag)
 markenkapazität $_{PZ.2} = \omega$ 96)
- $s_{TA.B1}$: Ausgangspuffer_BS_1(werkstück)
 markenkapazität $_{TA.B1} = \text{ausgangspufferkapazität_BS_1}$
- $s_{TA.B2}$: Ausgangspuffer_BS_2(werkstück)
 markenkapazität $_{TA.B2} = \text{ausgangspufferkapazität_BS_2}$
- $s_{TA.B3}$: Ausgangspuffer_BS_3(werkstück)
 markenkapazität $_{TA.B3} = \text{ausgangspufferkapazität_BS_3}$
- $s_{TP.1}$: Werkstück_entladen(werkstücktransport)
 markenkapazität $_{TP.1} = 1$
- $s_{TP.2}$: Werkstück_beladen(werkstücktransport)
 markenkapazität $_{TP.2} = 1$
- s_Z : Systemzeit(syszeit)
 markenkapazität $_Z = 1$
- s_1 : Auftragsabwicklung_kann_beginnen(auftragsmarke)
 markenkapazität $_1 = 1$
- s_2 : Abwicklungsbeginn_möglich(bas_marke)
 markenkapazität $_2 = 1$
- s_3 : Auftragsabwicklung_dauert_an(auftrag)
 markenkapazität $_3 = 1$
- s_4 : Verfügbarkeitstest_möglich(bas_marke)
 markenkapazität $_4 = 1$
- s_5 : Vorprodukt_VP4_erforderlich(bas_marke)
 markenkapazität $_5 = \omega$ 97)
- s_6 : Vorprodukt_VP5_erforderlich(bas_marke)
 markenkapazität $_6 = \omega$
- s_7 : Vorprodukt_VP6_erforderlich(bas_marke)
 markenkapazität $_7 = \omega$
- s_8 : Vorprodukt_VP4_reserviert(werkstückeinlastung)
 markenkapazität $_8 = \omega$ 98)

- s_9 : Vorprodukt_VP5_reserviert(werkstückeinlastung)
markenkapazität₉ = ω
- s_{10} : Vorprodukt_VP6_reserviert(werkstückeinlastung)
markenkapazität₁₀ = ω
- s_{11} : Vorlauf_beginn_AG1(bas_marke)
markenkapazität₁₁ = 1
- s_{12} : Wiederholungszähler_AG1(wiederholungen)
markenkapazität₁₂ = 1
- s_{13} : Bearbeitungsstation_angefordert_AG1(bas_marke)
markenkapazität₁₃ = 1
- s_{14} : Bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(auftragswerkstück)
markenkapazität₁₄ = 3
- s_{15} : Bearbeitungsstation_zugeordnet_AG1(bas_marke)
markenkapazität₁₅ = 1
- s_{16} : Vorlauf_ende_AG1(bas_marke)
markenkapazität₁₆ = 1
- s_{17} : Bearbeitungsobjekte_erwartet_AG1(auftragswerkstück)
markenkapazität₁₇ = 3
- s_{18} : Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG1(auftragswerkstück)
markenkapazität₁₈ = 3
- s_{19} : Arbeitsgangausführung_dauert_an_AG1(auftragswerkstück) ⁹⁹⁾
markenkapazität₁₉ = 1
- s_{20} : Arbeitsgang_ausgefuehrt_AG1(auftragswerkstück) ¹⁰⁰⁾
markenkapazität₂₀ = 1
- s_{21} : Vorlauf_beginn_AG2(bas_marke)
markenkapazität₂₁ = 1
- s_{22} : Wiederholungszähler_AG2(wiederholungen)
markenkapazität₂₂ = 1
- s_{23} : Bearbeitungsstation_angefordert_AG2(bas_marke)
markenkapazität₂₃ = 1
- s_{24} : Bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(auftragswerkstück)
markenkapazität₂₄ = 4
- s_{25} : Bearbeitungsstation_BS1_zugeordnet_AG2(bas_marke)
markenkapazität₂₅ = 1

- s₂₆: Bearbeitungsstation_BS2_zugeordnet_AG2(bas_marke)
markenkapazität₂₆ = 1
- s₂₇: Bearbeitungsobjekte_erwartet_AG2/BS1(auftragswerkstück)
markenkapazität₂₇ = 4
- s₂₈: Vorlauf_ende_AG2(bas_marke)
markenkapazität₂₈ = 1
- s₂₉: Bearbeitungsobjekte_erwartet_AG2/BS2(auftragswerkstück)
markenkapazität₂₉ = 4
- s₃₀: Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS1(auftragswerkstück)
markenkapazität₃₀ = 4
- s₃₁: Arbeitsgangausführung_dauert_an_AG2/BS1(auftragswerkstück)
markenkapazität₃₁ = 1
- s₃₂: Arbeitsgang_ausgefuehrt_AG2(auftragswerkstück)
markenkapazität₃₂ = 1
- s₃₃: Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS2(auftragswerkstück)
markenkapazität₃₃ = 4
- s₃₄: Arbeitsgangausführung_dauert_an_AG2/BS2(auftragswerkstück)
markenkapazität₃₄ = 1
- s₃₅: Vorlauf_beginn_AG3(bas_marke)
markenkapazität₃₅ = 1
- s₃₆: Wiederholungszähler_AG3(wiederholungen)
markenkapazität₃₆ = 1
- s₃₇: Bearbeitungsstation_angefordert_AG3(bas_marke)
markenkapazität₃₇ = 1
- s₃₈: Bearbeitungsstation_zugeordnet_AG3(bas_marke)
markenkapazität₃₈ = 1
- s₃₉: Vorlauf_ende_AG3(bas_marke)
markenkapazität₃₉ = 1
- s₄₀: Bearbeitungsobjekte_erwartet_AG3(auftragswerkstück)
markenkapazität₄₀ = 7
- s₄₁: Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(auftragswerkstück)
markenkapazität₄₁ = 7
- s₄₂: Arbeitsgangausführung_dauert_an_AG3(auftragswerkstück)
markenkapazität₄₂ = 1

- s₄₃: Arbeitsgang_ausgefuehrt_AG3(auftragswerkstück)
markenkapazität₄₃ = 1
- s₄₄: Endproduktzähler(wiederholungen)
markenkapazität₄₄ = 1
- s₄₅: Abwicklungsende_möglich(bas_marke)
markenkapazität₄₅ = 1
- s₄₆: Auslastungsentscheidung(auftrag)
markenkapazität₄₆ = 1
- s₄₇: Endproduktanzahl_lager(bas_marke)
markenkapazität₄₇ = ω
- s₄₈: Auslastungsbestätigungen_sammeln(auftrag)
markenkapazität₄₈ = 1
- s₄₉: Endproduktanzahl_umsystem(bas_marke)
markenkapazität₄₉ = ω
- s₅₀: Endprodukte_erwartet(auftrag)
markenkapazität₅₀ = ω
- s₅₁: Endprodukte_gelagert(auftrag)
markenkapazität₅₁ = ω
- s₅₂: Endproduktanzahl(bas_marke)
markenkapazität₅₂ = ω
- s₅₃: Abgewickelte_aufträge(auftrag) 101)
markenkapazität₅₃ = ω

Transitionen/Transaktionen:

- t₁: abwicklungsbeginn
- <m_{A.alt}> ≈ auftragsabwicklung_kann_beginnen(auftragsmarke(Auftragsname, Losgröße, Auftragswert, Priorität, zeiten_pa(Fertigstellungstermin, abwicklungsbeginn_pa_ka(), bearbeitungsbeginn_pa_ka(), alter_pa_ka(), bearbeitungsende_pa_ka(), abwicklungsende_pa_ka(), abwicklungsdauer_pa_ka(), durchlaufzeit_pa_ka(), bearbeitungsdauer_pa_ka(), durchlaufzeitanteile_pa_ka()), kosten_pa(bearbeitung_pa_ka(Beakosten), transport_pa_ka(Tptkosten), lagerung_pa_ka(Lagkosten), kapitalbindung_pa(Kapkosten), herstellung_pa(Hstkosten))))
- <m_{ZÄ.1alt}> ≈ wiederholungszähler_AG1(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))
- <m_{ZÄ.2alt}> ≈ wiederholungszähler_AG2(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))

$\langle m_{Z\ddot{A}.3alt} \rangle \approx$ wiederholungszähler_AG3(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))

$\langle m_{Z\ddot{A}.Ealt} \rangle \approx$ endproduktzähler(zählermarke(Endproduktanzahl_alt))

$\langle \emptyset \rangle \approx$ abwicklungsbeginn_möglich(\emptyset)

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Abwbeginn := Time

Alter := 0

Wiederholungsanzahl_neu := 0

Endproduktanzahl_neu := 0

$\langle m_{A.neu} \rangle \approx$ auftragsabwicklung_kann_beginnen(auftragsmarke(Auftragsname, Losgröße,Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin, abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa_ka(), alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa_ka(),abwicklungsende_pa_ka(), abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa_ka(), bearbeitungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeitanteile_pa_ka()), kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),transport_pa(Tptkosten), lagerung_pa(Lagkosten),kapitalbindung_pa(Kapkosten), herstellung_pa(Hstkosten))))

$\langle m_{Z\ddot{A}.1neu} \rangle \approx$ wiederholungszähler_AG1(zählermarke(wiederholungsanzahl_neu))

$\langle m_{Z\ddot{A}.2neu} \rangle \approx$ wiederholungszähler_AG2(zählermarke(wiederholungsanzahl_neu))

$\langle m_{Z\ddot{A}.3neu} \rangle \approx$ wiederholungszähler_AG3(zählermarke(wiederholungsanzahl_neu))

$\langle m_{Z\ddot{A}.Eneu} \rangle \approx$ endproduktzähler(zählermarke(Endproduktanzahl_neu))

$\langle \emptyset \rangle \approx$ verfügbarkeitstest_möglich(\emptyset)

t_2 : verfügbarkeitstestbeginn

$\langle m_A \rangle \approx$ auftragsabwicklung_dauert_an(auftragsmarke(Auftragsname, Losgröße,Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin, abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa_ka(), alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa_ka(),abwicklungsende_pa_ka(), abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa_ka(), bearbeitungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeitanteile_pa_ka()), kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),transport_pa(Tptkosten), lagerung_pa(Lagkosten),kapitalbindung_pa(Kapkosten), herstellung_pa(Hstkosten))))

$\langle \emptyset \rangle \approx$ verfügbarkeitstest_möglich(\emptyset)

for_2 := \Leftrightarrow ...

$W_{2.5} := ((3 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG2/unär}) + (4 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG3/unär}) \cdot \text{Losgröße})$

$\wedge W_{2.6} := (2 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG1/unär}) \cdot \text{Losgröße}$

$\wedge W_{2.7} := (1 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG1/unär}) \cdot \text{Losgröße}$

$$W_{2.5}\langle\emptyset\rangle \approx \text{vorprodukt_VP4_erforderlich}(W_{2.5}\bullet\emptyset)$$

$$W_{2.6}\langle\emptyset\rangle \approx \text{vorprodukt_VP5_erforderlich}(W_{2.6}\bullet\emptyset)$$

$$W_{2.7}\langle\emptyset\rangle \approx \text{vorprodukt_VP6_erforderlich}(W_{2.7}\bullet\emptyset)$$

t₃: test_VP4

$$\langle\emptyset\rangle \approx \text{vorprodukt_VP4_erforderlich}(\emptyset)$$

$$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$$

for_3 : \Leftrightarrow ...

103)

Werkstücklagername := lagerstation_name

^ Werkstückname := "nil"

^ Werkstückklasse := werkstückklasse_VP_4

^ Auftragsname := auftrag_name

^ Reservierungsstatus := unreserviert

^ Anzeitpunkt := Time

$$\langle m_{18} \rangle \approx \text{einlastung_werkstück}(\text{informationsmarke_wse}(\text{Werkstücklagername}, \\ \text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{zugehörigkeit_wspa}(\text{Auftragsname}), \\ \text{Werkstück_durchlaufzeit}, \text{Werkstück_herstellkosten}, \\ \text{Reservierungsstatus}, \text{einlastungsanweisung}(\text{Anzeitpunkt})))$$

t₄: reservierung_VP4

$$\langle m_{18} \rangle \approx \text{einlastung_werkstück}(\text{informationsmarke_wse}(\text{Werkstücklagername}, \\ \text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \\ \text{Werkstück_durchlaufzeit}, \text{Werkstück_herstellkosten}, \\ \text{Reservierungsstatus}, \text{Werkstückeinlastungsanweisung}))$$

for_4 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername = lagerstation_name

^ Werkstückklasse = werkstückklasse_VP_4

^ Auftragsname = auftrag_name

^ Reservierungsstatus = reserviert

$$\langle m_{18} \rangle \approx \text{vorprodukt_VP4_reserviert}(\text{informationsmarke_wse}(\text{Werkstücklagername}, \\ \text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückzugehörigkeit}, \\ \text{Werkstück_durchlaufzeit}, \text{Werkstück_herstellkosten}, \\ \text{Reservierungsstatus}, \text{Werkstückeinlastungsanweisung}))$$

t₅: test_VP5

$$\langle\emptyset\rangle \approx \text{vorprodukt_VP5_erforderlich}(\emptyset)$$

$$\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$$

for_5 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername := lagerstation_name

\wedge Werkstückname := "nil"

\wedge Werkstückklasse := werkstückklasse_VP_5

\wedge Auftragsname := auftrag_name

\wedge Reservierungsstatus := frei

\wedge Anzeitpunkt := Time

$\langle m_{I8} \rangle \approx$ einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname,Werkstückklasse,zugehörigkeit_wspa(Auftragsname),
Werkstück_durchlaufzeit,Werkstück_herstellkosten,
Reservierungsstatus,einlastungsanweisung(Anzeitpunkt)))

t₆: reservierung_VP5

$\langle m_{I8} \rangle \approx$ einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname, Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,
Werkstück_durchlaufzeit,Werkstück_herstellkosten,
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung))

for_6 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername = lagerstation_name

\wedge Werkstückklasse = werkstückklasse_VP_5

\wedge Auftragsname = auftrag_name

\wedge Reservierungsstatus = reserviert

$\langle m_{I8} \rangle \approx$ vorprodukt_VP5_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname,Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,
Werkstück_durchlaufzeit,Werkstück_herstellkosten,
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung))

t₇: test_VP6

$\langle \emptyset \rangle \approx$ vorprodukt_VP6_erforderlich(\emptyset)

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

for_7 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername := lagerstation_name

\wedge Werkstückname := "nil"

\wedge Werkstückklasse := werkstückklasse_VP_6

\wedge Auftragsname := auftrag_name

\wedge Reservierungsstatus := unreserviert

\wedge Anzeitpunkt := Time

$\langle m_{I8} \rangle \approx$ einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname,Werkstückklasse,zugehörigkeit_wspa(Auftragsname),
Werkstück_durchlaufzeit,Werkstück_herstellkosten,
Reservierungsstatus,einlastungsanweisung(Anwzeitpunkt)))

t_8 : reservierung_VP6

$\langle m_{I8} \rangle \approx$ einlastung_werkstück(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname,Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,
Werkstück_durchlaufzeit,Werkstück_herstellkosten,
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung))

for_8 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername = lagerstation_name

\wedge Werkstückklasse = werkstückklasse_VP_6

\wedge Auftragsname = auftrag_name

\wedge Reservierungsstatus = reserviert

$\langle m_{I8} \rangle \approx$ vorprodukt_VP6_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname,Werkstückklasse,Werkstückzugehörigkeit,
Werkstück_durchlaufzeit,Werkstück_herstellkosten,
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung))

t_9 : bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG1

104)

$\langle m_{I8.1} \rangle + \langle m_{I8.2} \rangle \approx$...

vorprodukt_VP5_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname_1,Werkstückklasse_1,Werkstückzugehörigkeit,
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_1),herstellung_ws(Hstkosten_1),
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung_1))

+ vorprodukt_VP5_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname_2,Werkstückklasse_2,Werkstückzugehörigkeit,
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_2),herstellung_ws(Hstkosten_2),
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung_2))

$\langle m_{I8.3} \rangle \approx$ vorprodukt_VP6_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername,
Werkstückname_3,Werkstückklasse_3,Werkstückzugehörigkeit,
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_3),herstellung_ws(Hstkosten_3),
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung_3))

$\langle \emptyset \rangle \approx$ vorlauf_beginn_AG1(\emptyset)

$\langle m_A \rangle \approx$ auftragsabwicklung_dauert_an(auftragsmarke(Auftragsname,
Losgröße,Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa_ka(),
alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa_ka(),abwicklungsende_pa_ka(),
abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa_ka()),

```

        bearbeitungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeitanteile_pa_ka()),
        kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten_pa),transport_pa(Tptkosten_pa),
        lagerung_pa(Lagkosten_pa),kapitalbindung_pa(Kapkosten_pa),
        herstellung_pa(Hstkosten_pa))))
<m_ZÄ.alt> = wiederholungszähler_AG1(zählermarke(Wiederholungsanzahl))
<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
105)

Wiederholungsanzahl < Losgröße • wiederholungsanzahl_AG1/unär
for_9.1 :⇔ ...
106)
    Werkstückklasse_1 = werkstückklasse_VP_5
    ^ Werkstückklasse_2 = werkstückklasse_VP_5
    ^ Werkstückklasse_3 = werkstückklasse_VP_6
    Bearbeitungsauftragsstatus := erteilt
    Bearbeitungsstationsname := "BS_3"
    for_9.2 :⇔ ...
        Arbeitsgangname := "AG_1"
        ^ Sollrüstzustand := sollrüstzustand_AG1/BS3
        ^ Agadauer := ausführungsdauer_AG1/BS3
        ^ Werkzeugklassenliste := werkzeugklassen_AG1/BS3
        ^ Werkstückklassenliste := ...
            [Werkstückklasse_1,Werkstückklasse_2,Werkstückklasse_3]
        ^ Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1
        ^ Namenszähler := Wiederholungsanzahl_neu + 35
        ^ str_int(Namensstring,Namenszähler)
        ^ concat("WS_",Namensstring,Neuer_name)
        ^ Werkstückname_ag := Neuer_name
        ^ Werkstückklasse_ag := werkstückklasse_out_AG1
        ^ Automatisierungsgrad := automatisierungsgrad_AG1/BS3
        ^ Durchlauf_ag := Durchlauf_1 + Durchlauf_2 + Durchlauf_3
        ^ Hstkosten_ag := Hstkosten_1 + Hstkosten_2 + Hstkosten_3
        ^ (Fertigstellungstermin = fertigstellung_pa(Termin)
        → (Restzeit := 33 + 25 • (6-Wiederholungsanzahl_alt)
        ^ Schlupf := Termin - Time - Restzeit
        ^ Arbeitsgang_schlupfzeit := schlupfzeit_ag(Schlupf))
        ^ (Fertigstellungstermin = fertigstellung_pa_ka()
        → Arbeitsgang_schlupfzeit := schlupfzeit_ag_ka())
        ^ Ertzeitpunkt := Time
        ^ Werkstückstatus := vorgelagert
        ^ Werkstückort_1 := lagerstation_name
        ^ Werkstückort_2 := lagerstation_name
        ^ Werkstückort_3 := lagerstation_name
107)
108)
109)

```

^ Bearbeitungsstatus := unbearbeitet

$\langle m_{I4} \rangle =$ bearbeitungsaufträge_erteilt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,zuordnung_agpa(Auftragsname),
sollrüstung(Sollrüstzustand),ausführung_ag(Agadauer),
werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),input(Werkstückklassenliste),
output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{AW.1} \rangle + \langle m_{AW.2} \rangle + \langle m_{AW.3} \rangle = \dots$

bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus,Werkstückort_1,
Lagerstationsname,Bearbeitungsstatus))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus,Werkstückort_2,
Bearbeitungsstatus))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus,Werkstückort_3,
Bearbeitungsstatus))

$\langle \emptyset \rangle =$ bearbeitungsstation_angefordert_AG1(\emptyset)

t₁₀: stationsauswahl_AG1

$\langle \emptyset \rangle =$ bearbeitungsstation_angefordert_AG1(\emptyset)

$\langle m_{I4} \rangle =$ bearbeitungsauftrag_bestätigt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,zuordnung_agpa(Auftragsname),
Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,
Arbeitsgang_werkzeuge,Arbeitsgang_werkstückeingang,
output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
Arbeitseingang_durchlaufzeiten,Arbeitseingang_herstellkosten,
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))

Bearbeitungsstationsname = "BS_3"

Bearbeitungsauftragsstatus = bestätigt

for_10 : \Leftrightarrow ...

Arbeitsgangname = "AG_1"

^ Auftragsname = auftrag_name

$\langle \emptyset \rangle =$ bearbeitungsstation_zugeordnet_AG1(\emptyset)

t₁₁: subaufträge_anstoßen_AG1

110)

```

<mAW.alt1>+<mAW.alt2>+<mAW.alt3> = ...
    bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus,Werkstückort_1,
    Bearbeitungsstatus))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus,Werkstückort_2,
    Bearbeitungsstatus))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus,Werkstückort_3,
    Bearbeitungsstatus))
<mA.alt> = auftragsabwicklung_dauert_an(auftragsmarke(Auftragsname,
    Losgröße,Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
    abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),Bearbeitungsbeginn_alt,
    alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa_ka(),abwicklungsende_pa_ka(),
    abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa_ka(),
    bearbeitungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeitanteile_pa_ka()),
    kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),transport_pa(Tptkosten),
    lagerung_pa(Lagkosten),kapitalbindung_pa(Kapkosten),
    herstellung_pa(Hstkosten))))
<∅> = bearbeitungsstation_zugeordnet_AG1(∅)
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Bearbeitungsstationsname := "BS_3"
Lagerauftragsstatus := erteilt
for_11 :⇔ ...
    Werkstücklagername_1 := Werkstückort_1
    ^ Werkstücklagername_2 := Werkstückort_2
    ^ Werkstücklagername_3 := Werkstückort_3
    ^ Ertzeitpunkt := Time
    ^ Lagerauftragsart := auslagerung
    ^ (Bearbeitungsbeginn_alt = bearbeitungsbeginn_pa_ka()
    → Beabeginn := Time)
    ^ (Bearbeitungsbeginn_alt = bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn)
    → Bearbeitungsbeginn_neu := Bearbeitungsbeginn_alt)

<mI7.1>+<mI7.2>+<mI7.3> = ...
    lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_1,
    werkstückinformation(Werkstückname_1,Werkstückklasse_1,
    Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)),
    auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))

```

```

+ lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_2,
werkstückinformation(Werkstückname_2,Werkstückklasse_2,
Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
+ lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_3,
werkstückinformation(Werkstückname_3,Werkstückklasse_3,
Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
<mA.neu> = auftragsabwicklung_dauert_an(auftragsmarke(Auftragsname,
Losgröße,Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),Bearbeitungsbeginn_neu,
alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa_ka(),abwicklungsende_pa_ka(),
abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa_ka(),
bearbeitungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeitanteile_pa_ka()),
kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),transport_pa(Tptkosten),
lagerung_pa(Lagkosten),kapitalbindung_pa(Kapkosten),
herstellung_pa(Hstkosten))))
<mAW.neu1>+<mAW.neu2>+<mAW.neu3> = ...
bearbeitungsobjekte_erwartet_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus,Werkstückort_1,
Bearbeitungsstatus))
+ bearbeitungsobjekte_erwartet_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus,Werkstückort_2,
Bearbeitungsstatus))
+ bearbeitungsobjekte_erwartet_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus,Werkstückort_3,
Bearbeitungsstatus))
<∅> = vorlauf_ende_AG1(∅)

```

t₁₂: transportauftrag_abgeschlossen_AG1

111)

```

<mAW.alt> = bearbeitungsobjekte_erwartet_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_wse,Werkstückklasse,Werkstückstatus_alt,Werkstückort_alt,
Bearbeitungsstatus))
<mI1> = werkstück_entladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_wst,
zuordnung_wspa(Auftragsname),zuordnung_wsbs(Bearbeitungs-
stationsname_wst),Übergabestationsname,Transportstatus))

```

Transportstatus = entladen

```

for_12.1 :⇔ ...
    Auftragsname = auftrag_name
    ^ Werkstückname_wst = Werkstückname_wse
    ^ Bearbeitungsstationsname_wst = "BS_3"
    ^ Übergabestationsname = "BS_3"
Werkstückstatus_neu := auf_einlastung_wartend
for_12.2 :⇔ Werkstückort_neu := "BS_3"
<mAW.neu> = bearbeitungsobjekte_sammeln_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werk-
    stückname_wse,Werkstückklasse,Werkstückstatus_neu,Werkstückort_neu,
    Bearbeitungsstatus))

```

t₁₃: arbeitsgangausführung_beginnt_AG1

112)

```

<mAW.in1>+<mAW.in2>+<mAW.in3> = ...
    bearbeitungsobjekte_sammeln_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
        name_in1,Werkstückklasse_in1,Werkstückstatus_in,Werkstückort,
        Bearbeitungsstatus_in))
    + bearbeitungsobjekte_sammeln_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
        name_in2,Werkstückklasse_in2,Werkstückstatus_in,Werkstückort,
        Bearbeitungsstatus_in))
    + bearbeitungsobjekte_sammeln_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
        name_in3,Werkstückklasse_in3,Werkstückstatus_in,Werkstückort,
        Bearbeitungsstatus_in))
<mI4> = ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informationsmarke_ba(Bear-
    beitungstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
    zuordnung_agpa(Auftragsname),Arbeitsgang_rüsterfordernis,
    Arbeitsgang_ausführungsdauer,Arbeitsgang_werkzeuge,
    Arbeitsgang_werkstückeingang,output(Werkstückname_ag,
    Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,Arbeitseingang_durchlaufzeiten,
    Arbeitseingang_herstellkosten,Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,
    Auftragswert),Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))

```

Werkstückstatus_in = auf_einlastung_wartend

Bearbeitungsauftragsstatus = begonnen

```

for_13.1 :⇔ ...
    Auftragsname = auftrag_name
    ^ Werkstückort = "BS_3"
    ^ Arbeitsgangname = "AG_1"
    ^ Bearbeitungsstationsname = "BS_3"
    ^ Bearbeitungsstatus_in = unbearbeitet
Werkstückstatus_out := in_bearbeitung

```

for_13.2 : \Leftrightarrow ...

Werkstückname_out := Werkstückname_ag

\wedge Werkstückklasse_out := Werkstückklasse_ag

\wedge Bearbeitungsstatus_out := angearbeitet

$\langle m_{AW.out} \rangle \approx$ arbeitsgangausführung_dauert_an_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_out, Werkstückklasse_out, Werkstückstatus_out, Werkstückort, Bearbeitungsstatus_out))

t₁₄: arbeitsgangausführung_endet_AG1

113)

$\langle m_{AW.alt} \rangle \approx$ arbeitsgangausführung_dauert_an_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname, Werkstückklasse, Werkstückstatus_alt, Werkstückort, Bearbeitungsstatus))

$\langle m_{I4} \rangle \approx$ ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname), Arbeitsgang_rüsterfordernis, Arbeitsgang_ausführungsdauer, Arbeitsgang_werkzeuge, Arbeitsgang_werkstückeingang, output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, Arbeitseingang_durchlaufzeiten, Arbeitseingang_herstellkosten, Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert), Bearbeitungsauftragserteilung, Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{ZÄ.alt} \rangle \approx$ wiederholungszähler_AG1(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))

$\langle \emptyset \rangle \approx$ vorlauf_ende_AG1(\emptyset)

Werkstückstatus_alt = in_bearbeitung

Bearbeitungsauftragsstatus = erledigt

for_14 : \Leftrightarrow ...

Auftragsname = auftrag_name

\wedge Werkstückort = "BS_3"

\wedge Arbeitsgangname = "AG_1"

\wedge Bearbeitungsstationsname = "BS_3"

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1

$\langle m_{AW.neu} \rangle \approx$ arbeitsgang_ausgeführt_AG1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname, Werkstückklasse, Werkstückstatus_neu, Werkstückort, Bearbeitungsstatus))

$\langle m_{ZÄ.neu} \rangle \approx$ wiederholungszähler_AG1(zählermarke(wiederholungsanzahl_neu))

$\langle \emptyset \rangle \approx$ vorlauf_beginn_AG1(\emptyset)

t₁₅: ... bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG2

$\langle m_{I8.1} \rangle + \langle m_{I8.2} \rangle + \langle m_{I8.3} \rangle = \dots$

vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_1,
Werkstückname_1,Werkstückklasse_1,Werkstückzugehörigkeit,
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_1),herstellung_ws(Hstkosten_1),
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung_1))

+ vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_2,
Werkstückname_2,Werkstückklasse_2,Werkstückzugehörigkeit,
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_2),herstellung_ws(Hstkosten_2),
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung_2))

+ vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_3,
Werkstückname_3,Werkstückklasse_3,Werkstückzugehörigkeit,
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_3),herstellung_ws(Hstkosten_3),
Reservierungsstatus,Werkstückeinlastungsanweisung_3))

$\langle m_{AW.4} \rangle = \text{arbeitsgang_ausgefuehrt_AG1}(\text{werkstueckmarke_auftrag}(\text{Werkstückname_4},$
 $\text{Werkstückklasse_4},\text{Werkstückstatus_4},\text{Werkstückort_4},\text{Bearbeitungsstatus_4}))$

$\langle m_{WS.4} \rangle = \text{ausgangspuffer_BS_3}(\text{werkstueckmarke}(\text{Werkstückname_4},$
 $\text{Werkstückklasse_4},\text{zugehörigkeit_ws}(\text{Auftragsname}),\text{Werkstückstatus_4},$
 $\text{Bearbeitungsstatus_4},\text{zuordnung_ws_ka}(),\text{zeiten_ws}(\text{Werkstück_vorlager-}$
 $\text{beginn_4},\text{Werkstück_bearbeitungsbeginn_4},\text{Werkstück_bearbeitungsdauer_4},$
 $\text{Werkstück_transportdauer_4},\text{Werkstück_wartedauer_4},$
 $\text{durchlaufzeit_ws}(\text{Durchlauf_4}),\text{bearbeitungsende_ka}(),$
 $\text{nachlagerende_ka}()),\text{Werkstückkapitalbindung_4},$
 $\text{kosten_ws}(\text{Werkstück_bereitstellungskosten_4},$
 $\text{Werkstück_bearbeitungskosten_4},\text{Werkstück_transportkosten_4},$
 $\text{Werkstück_lagerkosten_4},\text{Werkstück_kapitalbindungskosten_4},$
 $\text{herstellung_ws}(\text{Hstkosten_4}))))$

$\langle m_A \rangle = \text{auftragsabwicklung_dauert_an}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname},$
 $\text{Losgröße},\text{Auftragswert},\text{Priorität},\text{zeiten_pa}(\text{Fertigstellungstermin},$
 $\text{abwicklungsbeginn_pa}(\text{Abwbeginn}),\text{bearbeitungsbeginn_pa_ka}(),$
 $\text{alter_pa}(\text{Alter}),\text{bearbeitungsende_pa_ka}(),\text{abwicklungsende_pa_ka}(),$
 $\text{abwicklungsdauer_pa_ka}(),\text{durchlaufzeit_pa_ka}(),$
 $\text{bearbeitungsdauer_pa_ka}(),\text{durchlaufzeitanteile_pa_ka}()),$
 $\text{kosten_pa}(\text{bearbeitung_pa}(\text{Beakosten_pa}),\text{transport_pa}(\text{Tptkosten_pa}),$
 $\text{lagerung_pa}(\text{Lagkosten_pa}),\text{kapitalbindung_pa}(\text{Kapkosten_pa}),$
 $\text{herstellung_pa}(\text{Hstkosten_pa}))))$

$\langle m_{ZÄ.alt} \rangle = \text{wiederholungszähler_AG2}(\text{zählermarke}(\text{Wiederholungsanzahl}))$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

$\langle \emptyset \rangle = \text{vorlauf_beginn_AG2}(\emptyset)$

Wiederholungsanzahl < Losgröße • wiederholungsanzahl_AG2/unär

```

for_15.1 :⇔ ...
    Werkstückklasse_1 = werkstückklasse_VP_4
    ^ Werkstückklasse_2 = werkstückklasse_VP_4
    ^ Werkstückklasse_3 = werkstückklasse_VP_4
    ^ Werkstückklasse_4 = werkstückklasse_ZP_3
    ^ werkstückort_4 = "BS_3"
    Bearbeitungsauftragsstatus := erteilt
    Bearbeitungsstationsname_1 := "BS_1"
    Bearbeitungsstationsname_2 := "BS_2"
for_15.2 :⇔ ...
    Arbeitsgangname := "AG_2"
    ^ Sollrüstzustand_1 := sollrüstzustand_AG2/BS1
    ^ Sollrüstzustand_2 := sollrüstzustand_AG2/BS2
    ^ Agadauer_1 := ausführungsdauer_AG2/BS1
    ^ Agadauer_2 := ausführungsdauer_AG2/BS2
    ^ Werkzeugklassenliste_1 := werkzeugklassen_AG2/BS1
    ^ Werkzeugklassenliste_2 := werkzeugklassen_AG2/BS2
    ^ Werkstückklassenliste := [Werkstückklasse_1,Werkstückklasse_2,
        Werkstückklasse_3,Werkstückklasse_4]
    ^ Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1
    ^ Namenszähler := Wiederholungsanzahl_neu + 41
    ^ str_int(Namensstring,Namenszähler)
    ^ concat("WS_",Namensstring,Neuer_name)
    ^ Werkstückname_ag := Neuer_name
    ^ Werkstückklasse_ag := werkstückklasse_out_AG2
    ^ Automatisierungsgrad_1 := automatisierungsgrad_AG2/BS1
    ^ Automatisierungsgrad_2 := automatisierungsgrad_AG2/BS2
    ^ Durchlauf_ag := Durchlauf_1 + Durchlauf_2 + Durchlauf_3 + Durchlauf_4
    ^ Hstkosten_ag := Hstkosten_1 + Hstkosten_2 + Hstkosten_3 + Hstkosten_4
    ^ (Fertigstellungstermin = fertigstellung_pa(Termin)
    → Restzeit1 := 18 + 33 • (2 - Wiederholungsanzahl_alt)
        ^ Pestzeit2 := (12 + 33) • (2 - Wiederholungsanzahl_alt)
        ^ Schlupf_1 := Termin - Time - Restzeit1
        ^ Schlupf_2 := Termin - Time - Restzeit2
        ^ Arbeitsgang_schlupfzeit_1 := schlupfzeit_ag(Schlupf_1)
        ^ Arbeitsgang_schlupfzeit_2 := schlupfzeit_ag(Schlupf_2))
    ^ (Fertigstellungstermin = fertigstellung_pa_ka()
    → Arbeitsgang_schlupfzeit_1 := schlupfzeit_ag_ka()
        ^ Arbeitsgang_schlupfzeit_2 := schlupfzeit_ag_ka())
    ^ Ertzeitpunkt := Time
    ^ Werkstückstatus_1 := vorgelagert

```

- ^ Werkstückstatus_2 := vorgelagert
- ^ Werkstückstatus_3 := vorgelagert
- ^ Werkstückstatus_4 := ausgelastet ¹¹⁵⁾
- ^ Bearbeitungsstatus_1 := unbearbeitet
- ^ Bearbeitungsstatus_2 := unbearbeitet
- ^ Bearbeitungsstatus_3 := unbearbeitet
- ^ Bearbeitungsstatus_4 := angearbeitet
- ^ Werkstückort_1 := Werkstücklagername_1
- ^ Werkstückort_2 := Werkstücklagername_2
- ^ Werkstückort_3 := Werkstücklagername_3

$\langle m_{AW.1} \rangle + \langle m_{AW.2} \rangle + \langle m_{AW.3} \rangle + \langle m_{AW.4} \rangle = \dots$

- bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückstatus_1, Werkstückort_1, Bearbeitungsstatus_1))
- + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückstatus_2, Werkstückort_2, Bearbeitungsstatus_2))
- + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückstatus_3, Werkstückort_3, Bearbeitungsstatus_3))
- + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_4, Werkstückklasse_4, Werkstückstatus_4, Werkstückort_4, Bearbeitungsstatus_4))

$\langle m_{I4.1} \rangle + \langle m_{I4.2} \rangle = \dots$

- bearbeitungsaufträge_erteilt(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname_1, arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname), sollrüstung(Sollrüstzustand_1), ausführung_ag(Agadauer_1), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste_1), input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad_1, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit_1, Priorität, Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Bearbeitungsauftragsstatus))
- + bearbeitungsaufträge_erteilt(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname_2, arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname), sollrüstung(Sollrüstzustand_2), ausführung_ag(Agadauer_2), werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste_2), input(Werkstückklassenliste), output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad_2, durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag), herstellung_age(Hstkosten_ag), Arbeitsgang_schlupfzeit_2, Priorität, Auftragswert), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_angefordert_AG2}(\emptyset)$

t₁₆: stationsauswahl_AG2

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_angefordert_AG2}(\emptyset)$

$\langle m_{I4,a} \rangle = \text{bearbeitungsaufträge_erteilt}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungsstations-116}$
 $\text{name_a, arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname, zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname}),$
 $\text{Arbeitsgang_rüsterfordernis_a, Arbeitsgang_ausführungsdauer_a,}$
 $\text{Arbeitsgang_werkzeuge_a, Arbeitsgang_werkstückeingang,}$
 $\text{output}(\text{Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad_1,}$
 $\text{Arbeitseingang_durchlaufzeiten, Arbeitseingang_herstellkosten,}$
 $\text{Arbeitsgang_schlupfzeit_a, Priorität, Auftragswert),}$
 $\text{Bearbeitungsauftragserteilung, Bearbeitungsauftragsstatus_a})$

$\langle m_{I4,b} \rangle = \text{bearbeitungsauftrag_bestätigt}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungs-}$
 $\text{stationsname_b, arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname,}$
 $\text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname}), \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis_b,}$
 $\text{Arbeitsgang_ausführungsdauer_b, Arbeitsgang_werkzeuge_b,}$
 $\text{Arbeitsgang_werkstückeingang, output}(\text{Werkstückname_ag,}$
 $\text{Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad_b,}$
 $\text{Arbeitseingang_durchlaufzeiten, Arbeitseingang_herstellkosten,}$
 $\text{Arbeitsgang_schlupfzeit_b, Priorität, Auftragswert),}$
 $\text{Bearbeitungsauftragserteilung, Bearbeitungsauftragsstatus_b})$

$\text{Bearbeitungsstationsname_b} \in \{ "BS_1", "BS_2" \}$

$\text{Bearbeitungsauftragsstatus_b} = \text{bestätigt}$

for_{16.1} : \Leftrightarrow ...

$\text{Bearbeitungsauftragsstatus_a} = \text{erteilt}$

$\wedge \text{Auftragsname} = \text{auftrag_name}$

$\wedge \text{Arbeitsgangname} = "AG_2"$

for_{16.2} : \Leftrightarrow ...

$(\text{Bearbeitungsstationsname_b} = "BS_1"$

$\rightarrow \text{fakt}(1, \text{bearbeitungsstation_BS1_zugeordnet_AG2}(\emptyset))$

$\wedge (\text{Bearbeitungsstationsname_b} = "BS_2"$

$\rightarrow \text{fakt}(1, \text{bearbeitungsstation_BS2_zugeordnet_AG2}(\emptyset))$

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_BS1_zugeordnet_AG2}(\emptyset)$

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_BS2_zugeordnet_AG2}(\emptyset)$

t₁₇: subaufträge_anstoßen_AG2/BS1

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_BS1_zugeordnet_AG2}(\emptyset)$

$\langle m_{AW.alt1} \rangle + \langle m_{AW.alt2} \rangle + \langle m_{AW.alt3} \rangle + \langle m_{AW.alt4} \rangle \approx \dots$

$\text{bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2}(\text{werkstückmarke_auftrag}(\text{Werkstück-}$

```

    name_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus_1,Werkstückort_1,
    Bearbeitungsstatus_1))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus_2,Werkstückort_2,
    Bearbeitungsstatus_2))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus_3,Werkstückort_3,
    Bearbeitungsstatus_3))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_4,Werkstückklasse_4,Werkstückstatus_4,Werkstückort_4,
    Bearbeitungsstatus_4))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Bearbeitungsstationsname := "BS_1"
Lagerauftragsstatus := erteilt
for_17 :⇔ ...
    Ertzeitpunkt := Time
    ^ Lagerauftragsart := auslagerung
    ^ Werkstücklagername_1 := Werkstückort_1
    ^ Werkstücklagername_2 := Werkstückort_2
    ^ Werkstücklagername_3 := Werkstückort_3
    ^ Übergabestationsname := Werkstückort_4

<mAW.neu1>+<mAW.neu2>+<mAW.neu3>+<mAW.neu4> = ...
    bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus_1,Werkstückort_1,
    Bearbeitungsstatus_1))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus_2,Werkstückort_2,
    Bearbeitungsstatus_2))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus_3,Werkstückort_3,
    Bearbeitungsstatus_3))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_4,Werkstückklasse_4,Werkstückstatus_4,Werkstückort_4,
    Bearbeitungsstatus_4))

<mI7.1>+<mI7.2>+<mI7.3> = ...
    lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_1,
    werkstückinformation(Werkstückname_1,Werkstückklasse_1,
    Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)),
    auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))

```

```

+ lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_2,
werkstückinformation(Werkstückname_2,Werkstückklasse_2,
Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
+ lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_3,
werkstückinformation(Werkstückname_3,Werkstückklasse_3,
Werkstückzugehörigkeit,zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
<mII.4> = werkstück_beladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_4,
zuordnung_wspa(Auftragsname),zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname),
Übergabestationsname,Transportstatus))
<∅> = vorlauf_ende_AG2(∅)

```

t₁₈: subaufträge_anstoßen_AG2/BS2

```

<∅> = bearbeitungsstation_BS2_zugeordnet_AG2(∅)
<mAW.alt1>+<mAW.alt2>+<mAW.alt3>+<mAW.alt4> = ...
bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus_1,Werkstückort_1,
Bearbeitungsstatus_1))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus_2,Werkstückort_2,
Bearbeitungsstatus_2))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus_3,Werkstückort_3,
Bearbeitungsstatus_3))
+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_4,Werkstückklasse_4,Werkstückstatus_4,Werkstückort_4,
Bearbeitungsstatus_4))
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

```

Bearbeitungsstationsname := "BS_2"

Lagerauftragsstatus := erteilt

for_18 :⇔ ...

```

    Ertzeitpunkt := Time
  ^ Lagerauftragsart := auslagerung
  ^ Werkstücklagername_1 := Werkstückort_1
  ^ Werkstücklagername_2 := Werkstückort_2
  ^ Werkstücklagername_3 := Werkstückort_3
  ^ Übergabestationsname := Werkstückort_4
  ^ Transportstatus := beladung_erwartend

```

$\langle m_{AW.neu1} \rangle + \langle m_{AW.neu2} \rangle + \langle m_{AW.neu3} \rangle + \langle m_{AW.neu4} \rangle = \dots$
 bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückstatus_1, Werkstückort_1, Bearbeitungsstatus_1))
 + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückstatus_2, Werkstückort_2, Bearbeitungsstatus_2))
 + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückstatus_3, Werkstückort_3, Bearbeitungsstatus_3))
 + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_4, Werkstückklasse_4, Werkstückstatus_4, Werkstückort_4, Bearbeitungsstatus_4))
 $\langle m_{I7.1} \rangle + \langle m_{I7.2} \rangle + \langle m_{I7.3} \rangle = \dots$
 lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_1, werkstückinformation(Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))
 + lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_2, werkstückinformation(Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))
 + lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_3, werkstückinformation(Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))
 $\langle m_{I1.4} \rangle =$ werkstück_beladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_4, zuordnung_wspa(Auftragsname), zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname), Übergabestationsname, Transportstatus))
 $\langle \emptyset \rangle =$ vorlauf_ende_AG2(\emptyset)

t_{19} : transportauftrag_abgeschlossen_AG2/BS1

$\langle m_{AW.alt} \rangle =$ bearbeitungsobjekte_erwartet_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_wse, Werkstückklasse, Werkstückstatus_alt, Werkstückort_alt, Bearbeitungsstatus))
 $\langle m_{I1} \rangle =$ werkstück_entladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_wst, zuordnung_wspa(Auftragsname), zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname_wst), Übergabestationsname, Transportstatus))

Transportstatus = entladen

for_19.1 : \Leftrightarrow ...

Auftragsname = auftrag_name

\wedge Werkstückname_wst = Werkstückname_wse

\wedge Bearbeitungsstationsname_wst = "BS_1"

\wedge Übergabestationsname = "BS_1"

Werkstückstatus_neu := auf_einlastung_wartend

for_19.2 : \Leftrightarrow Werkstückort_neu := "BS_1"

$\langle m_{AW,neu} \rangle \approx$ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_wse, Werkstückklasse, Werkstückstatus_neu, Werkstückort_neu, Bearbeitungsstatus))

t₂₀: arbeitsgangausführung_beginnt_AG2/BS1

$\langle m_{AW.in1} \rangle + \langle m_{AW.in2} \rangle + \langle m_{AW.in3} \rangle + \langle m_{AW.in4} \rangle \approx \dots$

bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_in1, Werkstückklasse_in1, Werkstückstatus_in, Werkstückort, Bearbeitungsstatus_in1))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_in2, Werkstückklasse_in2, Werkstückstatus_in, Werkstückort, Bearbeitungsstatus_in2))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_in3, Werkstückklasse_in3, Werkstückstatus_in, Werkstückort, Bearbeitungsstatus_in3))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_in4, Werkstückklasse_in4, Werkstückstatus_in, Werkstückort, Bearbeitungsstatus_in4))

$\langle m_{I4} \rangle \approx$ ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname, zuordnung_agpa(Auftragsname), Arbeitsgang_rüsterfordernis, Arbeitsgang_ausführungsdauer, Arbeitsgang_werkzeuge, Arbeitsgang_werkstückeingang, output(Werkstückname_ag, Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, Arbeitseingang_durchlaufzeiten, Arbeitseingang_herstellkosten, Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert), Bearbeitungsauftragserteilung, Bearbeitungsauftragsstatus))

Werkstückstatus_in = auf_einlastung_wartend

Bearbeitungsauftragsstatus = begonnen

for_20.1 : \Leftrightarrow ...

Auftragsname = auftrag_name

\wedge Werkstückort = "BS_1"

\wedge Arbeitsgangname = "AG_2"

\wedge Bearbeitungsstationsname = "BS_1"

- ^ Bearbeitungsstatus_in1 ∈ {unbearbeitet,angearbeitet}
- ^ Bearbeitungsstatus_in2 ∈ {unbearbeitet,angearbeitet}
- ^ Bearbeitungsstatus_in3 ∈ {unbearbeitet,angearbeitet}
- ^ Bearbeitungsstatus_in4 ∈ {unbearbeitet,angearbeitet}

Werkstückstatus_out := in_bearbeitung

for_20.2 := ⇔ ...

Werkstückname_out := Werkstückname_ag

- ^ Werkstückklasse_out := Werkstückklasse_ag
- ^ Bearbeitungsstatus_out := angearbeitet

<m_{AW.out}> = arbeitsgangausführung_dauert_an_AG2/BS1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_out,Werkstückklasse_out,Werkstückstatus_out,Werkstückort,Bearbeitungsstatus_out))

t₂₁: arbeitsgangausführung_endet_AG2/BS1

<m_{AW.alt}> = arbeitsgangausführung_dauert_an_AG2/BS1(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname,Werkstückklasse,Werkstückstatus_alt,Werkstückort,Bearbeitungsstatus))

<m_{I4}> = ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informationsmarke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,zuordnung_agpa(Auftragsname),Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer,Arbeitsgang_werkzeuge,Arbeitsgang_werkstückeingang,output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,Arbeitseingang_durchlaufzeiten,Arbeitseingang_herstellkosten,Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))

<m_{ZÄ.alt}> = wiederholungszähler_AG2(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))

Werkstückstatus_alt = in_bearbeitung

Bearbeitungsauftragsstatus = erledigt

for_21 := ⇔ ...

Auftragsname = auftrag_name

- ^ Werkstückort = "BS_1"
- ^ Arbeitsgangname = "AG_2"
- ^ Bearbeitungsstationsname = "BS_1"

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1

<m_{AW.neu}> = arbeitsgang_ausgeführt_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname,Werkstückklasse,Werkstückstatus_neu,Werkstückort,Bearbeitungsstatus))

<m_{ZÄ.neu}> = wiederholungszähler_AG2(zählermarke(wiederholungsanzahl_neu))

t₂₂: transportauftrag_abgeschlossen_AG2/BS2

$\langle m_{AW.alt} \rangle \approx$ bearbeitungsobjekte_erwartet_AG2(werkstück-
marke_auftrag(Werkstückname_wse, Werkstückklasse,
Werkstückstatus_alt, Werkstückort_alt, Bearbeitungsstatus))

$\langle m_{I1} \rangle \approx$ werkstück_entladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_wst,
zuordnung_wspa(Auftragsname), zuordnung_wsbs(Bearbeitungs-
stationsname_wst), Übergabestationsname, Transportstatus))

Transportstatus = entladen

for_22.1 : \Leftrightarrow ...

Auftragsname auftrag_name

^ Werkstückname_wst = Werkstückname_wse

^ Bearbeitungsstationsname_wst = "BS_2"

^ Übergabestationsname = "BS_2"

Werkstückstatus_neu := auf_einlastung_wartend

for_22.2 : \Leftrightarrow Werkstückort_neu := "BS_2"

$\langle m_{AW.neu} \rangle \approx$ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2(werkstückmarke_auftrag(Werk-
stückname_wse, Werkstückklasse, Werkstückstatus_neu, Werkstückort_neu,
Bearbeitungsstatus))

t₂₃: arbeitsgangausführung_beginnt_AG2/BS2

$\langle m_{AW.in1} \rangle + \langle m_{AW.in2} \rangle + \langle m_{AW.in3} \rangle + \langle m_{AW.in4} \rangle = \dots$

bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS2(werkstückmarke_auftrag(Werk-
stückname_in1, Werkstückklasse_in1, Werkstückstatus_in, Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in1))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS2(werkstückmarke_auftrag(Werk-
stückname_in2, Werkstückklasse_in2, Werkstückstatus_in, Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in2))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS2(werkstückmarke_auftrag(Werk-
stückname_in3, Werkstückklasse_in3, Werkstückstatus_in, Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in3))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG2/BS2(werkstückmarke_auftrag(Werk-
stückname_in4, Werkstückklasse_in4, Werkstückstatus_in, Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in4))

$\langle m_{I4} \rangle \approx$ ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informations-
marke_ba(Bearbeitungsstationsname, arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname), Arbeitsgang_rüsterfordernis,
Arbeitsgang_ausführungsdauer, Arbeitsgang_werkzeuge,
Arbeitsgang_werkstückeingang, output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag), Automatisierungsgrad, Arbeitseingang_durchlaufzeiten,
Arbeitseingang_herstellkosten, Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität,

Auftragswert),Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))

Werkstückstatus_in = auf_einlastung_wartend

Bearbeitungsauftragsstatus = begonnen

for_23.1 : \Leftrightarrow ...

Auftragsname = auftrag_name

^ Arbeitsgangname = "AG_2"

^ Bearbeitungsstationsname = "BS_2"

^ Bearbeitungsstatus_in1 \in {unbearbeitet,angearbeitet}

^ Bearbeitungsstatus_in2 \in {unbearbeitet,angearbeitet}

^ Bearbeitungsstatus_in3 \in {unbearbeitet,angearbeitet}

^ Bearbeitungsstatus_in4 \in {unbearbeitet,angearbeitet}

Werkstückstatus_out := in_bearbeitung

for_23.2 : \Leftrightarrow ...

Werkstückname_out := Werkstückname_ag

^ Werkstückklasse_out := Werkstückklasse_ag

^ Bearbeitungsstatus_out := angearbeitet

$\langle m_{AW.out} \rangle$ = arbeitsgangausführung_dauert_an_AG2/BS2(werkstück-
marke_auftrag(Werkstückname_out,Werkstückklasse_out,
Werkstückstatus_out,Werkstückort,Bearbeitungsstatus_out))

t₂₄: arbeitsgangausführung_endet_AG2/BS1

$\langle m_{AW.alt} \rangle$ = arbeitsgangausführung_dauert_an_AG2/BS2(werkstück-
marke_auftrag(Werkstückname,Werkstückklasse,
Werkstückstatus_alt,Werkstückort,Bearbeitungsstatus))

$\langle m_{I4} \rangle$ = ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informations-
marke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),Arbeitsgang_rüsterfordernis,
Arbeitsgang_ausführungsdauer,Arbeitsgang_werkzeuge,
Arbeitsgang_werkstückeingang,output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,Arbeitseingang_durchlaufzeiten,
Arbeitseingang_herstellkosten,Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,
Auftragswert),Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{ZÄ.alt} \rangle$ = wiederholungszähler_AG2(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))

Werkstückstatus_alt = in_bearbeitung

Bearbeitungsauftragsstatus = erledigt

for_24 : \Leftrightarrow ...

Auftragsname = auftrag_name

^ Arbeitsgangname = "AG_2"

^ Bearbeitungsstationsname = "BS_2"

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1

$\langle m_{AW,neu} \rangle = \text{arbeitsgang_ausgefuehrt_AG2}(\text{werkstueckmarke_auftrag}(\text{Werkstückname},$
 $\text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Werkstückort}, \text{Bearbeitungsstatus}))$

$\langle m_{ZÄ,neu} \rangle = \text{wiederholungszähler_AG2}(\text{zählermarke}(\text{wiederholungsanzahl_neu}))$

t₂₅: bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG3

117)

$\langle m_{I8.1} \rangle + \langle m_{I8.2} \rangle + \langle m_{I8.3} \rangle + \langle m_{I8.4} \rangle = \dots$

vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_1,
 Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückzugehörigkeit,
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_1), herstellung_ws(Hstkosten_1),
 Reservierungsstatus, Werkstückeinlastungsanweisung_1))

+ vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_2,
 Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückzugehörigkeit,
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_2), herstellung_ws(Hstkosten_2),
 Reservierungsstatus, Werkstückeinlastungsanweisung_2))

+ vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_3,
 Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückzugehörigkeit,
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_3), herstellung_ws(Hstkosten_3),
 Reservierungsstatus, Werkstückeinlastungsanweisung_3))

+ vorprodukt_VP4_reserviert(informationsmarke_wse(Werkstücklagername_4,
 Werkstückname_4, Werkstückklasse_4, Werkstückzugehörigkeit,
 durchlaufzeit_ws(Durchlauf_4), herstellung_ws(Hstkosten_4),
 Reservierungsstatus, Werkstückeinlastungsanweisung_4))

$\langle \emptyset \rangle = \text{vorlauf_beginn_AG3}(\emptyset)$

$\langle m_A \rangle = \text{auftragsabwicklung_dauert_an}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname}, \text{Losgröße},$
 $\text{Auftragswert}, \text{Priorität}, \text{zeiten_pa}(\text{Fertigstellungstermin},$
 $\text{abwicklungsbeginn_pa}(\text{Abwbeginn}), \text{bearbeitungsbeginn_pa_ka}(),$
 $\text{alter_pa}(\text{Alter}), \text{bearbeitungsende_pa_ka}(), \text{abwicklungsende_pa_ka}(),$
 $\text{abwicklungsdauer_pa_ka}(), \text{durchlaufzeit_pa_ka}(),$
 $\text{bearbeitungsdauer_pa_ka}(), \text{durchlaufzeitanteile_pa_ka}()),$
 $\text{kosten_pa}(\text{bearbeitung_pa}(\text{Beakosten_pa}), \text{transport_pa}(\text{Tptkosten_pa}),$
 $\text{lagerung_pa}(\text{Lagkosten_pa}), \text{kapitalbindung_pa}(\text{Kapkosten_pa}),$
 $\text{herstellung_pa}(\text{Hstkosten_pa}))))$

$\langle m_{ZÄ,alt} \rangle = \text{wiederholungszähler_AG3}(\text{zählermarke}(\text{Wiederholungsanzahl}))$

$\langle m_{AW,5} \rangle + \langle m_{AW,6} \rangle = \dots$

arbeitsgang_ausgefuehrt_AG1(werkstueckmarke_auftrag(Werkstückname_5,
 Werkstückklasse_5, Werkstückstatus_5, Werkstückort_5, Bearbeitungsstatus_5))

+ arbeitsgang_ausgefuehrt_AG1(werkstueckmarke_auftrag(Werkstückname_6,
 Werkstückklasse_6, Werkstückstatus_6, Werkstückort_6, Bearbeitungsstatus_6))

```

<mAW.7> = arbeitsgang_ausgefuehrt_AG2(werkstueckmarke_auftrag(Werkstueckname_7,
    Werkstueckklasse_7,Werkstueckstatus_7,Werkstueckort_7,Bearbeitungsstatus_7))
<mWS.5>+<mWS.6> = ...
    ausgangspuffer_BS_3(werkstueckmarke(Werkstueckname_5,
    Werkstueckklasse_5,zugehoerigkeit_ws(Auftragsname),Werkstueckstatus_5,
    Bearbeitungsstatus_5,Werkstueckzuordnung,zeiten_ws(Werkstueck_vorlager-
    beginn_5,Werkstueck_bearbeitungsbeginn_5,Werkstueck_bearbeitungsdauer_5,
    Werkstueck_transportdauer_5,Werkstueck_wartedauer_5,
    durchlaufzeit_ws(Durchlauf_5),bearbeitungsende_ka(),nachlagerende_ka()),
    Werkstueckkapitalbindung_5,kosten_ws(Werkstueck_bereitstellungskosten_5,
    Werkstueck_bearbeitungskosten_5,Werkstueck_transportkosten_5,
    Werkstueck_lagerkosten_5,Werkstueck_kapitalbindungskosten_5,
    herstellung_ws(Hstkosten_5))))
+   ausgangspuffer_BS_3(werkstueckmarke(Werkstueckname_6,
    Werkstueckklasse_6,zugehoerigkeit_ws(Auftragsname),Werkstueckstatus_6,
    Bearbeitungsstatus_6,Werkstueckzuordnung,zeiten_ws(Werkstueck_vorlager-
    beginn_6,Werkstueck_bearbeitungsbeginn_6,Werkstueck_bearbeitungsdauer_6,
    Werkstueck_transportdauer_6,Werkstueck_wartedauer_6,
    durchlaufzeit_ws(Durchlauf_6),bearbeitungsende_ka(),nachlagerende_ka()),
    Werkstueckkapitalbindung_6,kosten_ws(Werkstueck_bereitstellungskosten_6,
    Werkstueck_bearbeitungskosten_6,Werkstueck_transportkosten_6,
    Werkstueck_lagerkosten_6,Werkstueck_kapitalbindungskosten_6,
    herstellung_ws(Hstkosten_6))))
<mWS.7/1> = ausgangspuffer_BS_1(werkstueckmarke(Werkstueckname_7/1,
    Werkstueckklasse_7/1,zugehoerigkeit_ws(Auftragsname),
    Werkstueckstatus_7/1,Bearbeitungsstatus_7/1,
    Werkstueckzuordnung,zeiten_ws(Werkstueck_vorlagerbeginn_7/1,
    Werkstueck_bearbeitungsbeginn_7/1,Werkstueck_bearbeitungsdauer_7/1,
    Werkstueck_transportdauer_7/1,Werkstueck_wartedauer_7/1,
    durchlaufzeit_ws(Durchlauf_7/1),bearbeitungsende_ka(),
    nachlagerende_ka()),Werkstueckkapitalbindung_7/1,
    kosten_ws(Werkstueck_bereitstellungskosten_7/1,
    Werkstueck_bearbeitungskosten_7/1,Werkstueck_transportkosten_7/1,
    Werkstueck_lagerkosten_7/1,Werkstueck_kapitalbindungskosten_7/1,
    herstellung_ws(Hstkosten_7/1))))
<mWS.7/2> = ausgangspuffer_BS_2(werkstueckmarke(Werkstueckname_7/2,
    Werkstueckklasse_7/2,zugehoerigkeit_ws(Auftragsname),
    Werkstueckstatus_7/2,Bearbeitungsstatus_7/2,
    Werkstueckzuordnung,zeiten_ws(Werkstueck_vorlagerbeginn_7/2,
    Werkstueck_bearbeitungsbeginn_7/2,Werkstueck_bearbeitungsdauer_7/2,
    Werkstueck_transportdauer_7/2,Werkstueck_wartedauer_7/2,

```

```

durchlaufzeit_ws(Durchlauf_7/2),bearbeitungsende_ka(),
nachlagerende_ka()),Werkstückkapitalbindung_7/2,
kosten_ws(Werkstück_bereitstellungskosten_7/2,
Werkstück_bearbeitungskosten_7/2,Werkstück_transportkosten_7/2,
Werkstück_lagerkosten_7/2,Werkstück_kapitalbindungskosten_7/2,
herstellung_ws(Hstkosten_7/2))))

```

<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Wiederholungsanzahl < Losgröße • wiederholungsanzahl_AG3/unär

for_25.1 :⇔ ...

```

Werkstückklasse_1 = werkstückklasse_VP_4
^ Werkstückklasse_2 = werkstückklasse_VP_4
^ Werkstückklasse_3 = werkstückklasse_VP_4
^ Werkstückklasse_4 = werkstückklasse_VP_4
^ Werkstückklasse_5 = werkstückklasse_ZP_3
^ Werkstückklasse_6 = werkstückklasse_ZP_3
^ Werkstückklasse_7 = werkstückklasse_ZP_2
^ werkstückort_5 = "BS_3"
^ werkstückort_6 = "BS_3"
^ (Werkstückort_7 = "BS_1"
  v Werkstückort_7 = "BS_2")
^ (Werkstückname_7 = Werkstückname_7/1
  v Werkstückname_7 = Werkstückname_7/2)

```

Bearbeitungsauftragsstatus := erteilt

Bearbeitungsstationsname := "BS_2"

for_25.2 :⇔ ...

```

Arbeitsgangname := "AG_3"
^ Sollrüstzustand := sollrüstzustand_AG3/BS2
^ Agadauer := ausführungsdauer_AG3/BS2
^ Werkzeugklassenliste := werkzeugklassen_AG3/BS2
^ Werkstückklassenliste := [Werkstückklasse_1,
  Werkstückklasse_2,Werkstückklasse_3,Werkstückklasse_4,
  Werkstückklasse_5,Werkstückklasse_6,Werkstückklasse_7]
^ Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1
^ Namenszähler := Wiederholungsanzahl_neu + 43
^ str_int(Namensstring,Namenszähler)
^ concat("WS_",Namensstring,Neuer_name)
^ Werkstückname_ag := Neuer_name
^ Werkstückklasse_ag := werkstückklasse_out_AG3
^ Automatisierungsgrad := automatisierungsgrad_AG3/BS2

```

\wedge ((Werkstückname_7 = Werkstückname_7/1)
 \rightarrow (Durchlauf_7:=Durchlauf_7/1 \wedge Kosten_7 := Kosten_7/1))
 \wedge ((Werkstückname_7 = Werkstückname_7/2)
 \rightarrow (Durchlauf_7:=Durchlauf_7/2 \wedge Kosten_7 := Kosten_7/2))
 \wedge Durchlauf_ag := Durchlauf_1 + Durchlauf_2 + Durchlauf_3
+ Durchlauf_4 + Durchlauf_5 + Durchlauf_6 + Durchlauf_7
 \wedge Hstkosten_ag := Hstkosten_1 + Hstkosten_2 + Hstkosten_3
+ Hstkosten_4 + Hstkosten_5 + Hstkosten_6 + Hstkosten_7
 \wedge (Fertigstellungstermin = fertigstellung_pa(Termin)
 \rightarrow Restzeit := 33 • (2 - Wiederholungsanzahl_alt)
 \wedge Schlupf := Termin - Time - Restzeit
 \wedge Arbeitsgang_schlupfzeit := schlupfzeit_ag(Schlupf))
 \wedge (Fertigstellungstermin = fertigstellung_pa_ka()
 \rightarrow Arbeitsgang_schlupfzeit := schlupfzeit_ag_ka())
 \wedge Ertzeitpunkt := Time
 \wedge Werkstückstatus_1 := vorgelagert
 \wedge Werkstückstatus_2 := vorgelagert
 \wedge Werkstückstatus_3 := vorgelagert
 \wedge Werkstückstatus_4 := vorgelagert
 \wedge Werkstückstatus_5 := ausgelastet
 \wedge Werkstückstatus_6 := ausgelastet
 \wedge Werkstückstatus_7 := ausgelastet
 \wedge Bearbeitungsstatus_1 := unbearbeitet
 \wedge Bearbeitungsstatus_2 := unbearbeitet
 \wedge Bearbeitungsstatus_3 := unbearbeitet
 \wedge Bearbeitungsstatus_4 := unbearbeitet
 \wedge Bearbeitungsstatus_5 := angearbeitet
 \wedge Bearbeitungsstatus_6 := angearbeitet
 \wedge Bearbeitungsstatus_7 := angearbeitet
 \wedge Werkstückort_1 := Werkstücklagername_1
 \wedge Werkstückort_2 := Werkstücklagername_2
 \wedge Werkstückort_3 := Werkstücklagername_3
 \wedge Werkstückort_4 := Werkstücklagername_4
 $\langle m_{14} \rangle$ = bearbeitungsaufträge_erteilt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,zuordnung_agpa(Auftragsname),
sollrüstung(Sollrüstzustand),ausführung_ag(Agadauer),
werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),input(Werkstückklassenliste),
output(Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),

auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus))

$\langle m_{AW.1} \rangle + \langle m_{AW.2} \rangle + \langle m_{AW.3} \rangle + \langle m_{AW.4} \rangle + \langle m_{AW.5} \rangle + \langle m_{AW.6} \rangle + \langle m_{AW.7} \rangle = \dots$

bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_1,Werkstückklasse_1,Werkstückstatus_1,Werkstückort_1, Bearbeitungsstatus_1))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_2,Werkstückklasse_2,Werkstückstatus_2,Werkstückort_2, Bearbeitungsstatus_2))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_3,Werkstückklasse_3,Werkstückstatus_3,Werkstückort_3, Bearbeitungsstatus_3))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_4,Werkstückklasse_4,Werkstückstatus_4,Werkstückort_4, Bearbeitungsstatus_4))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_5,Werkstückklasse_5,Werkstückstatus_5,Werkstückort_5, Bearbeitungsstatus_5))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_6,Werkstückklasse_6,Werkstückstatus_6,Werkstückort_6, Bearbeitungsstatus_6))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_7,Werkstückklasse_7,Werkstückstatus_7,Werkstückort_7, Bearbeitungsstatus_7))

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_angefordert_AG3}(\emptyset)$

t₂₆: stationsauswahl_AG3

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_angefordert_AG3}(\emptyset)$

$\langle m_{I4} \rangle = \text{bearbeitungsauftrag_bestätigt}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname,zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname}), \text{Arbeitsgang_rüsterfordernis,Arbeitsgang_ausführungsdauer}, \text{Arbeitsgang_werkzeuge,Arbeitsgang_werkstückeingang}, \text{output}(\text{Werkstückname_ag,Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad}, \text{Arbeitseingang_durchlaufzeiten,Arbeitseingang_herstellkosten}, \text{Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert}), \text{Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus}))$

Bearbeitungsstationsname = "BS_2"

Bearbeitungsauftragsstatus = bestätigt

for₂₆ : \Leftrightarrow ...

Arbeitsgangname = "AG_3"

^ Auftragsname = auftrag_name

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_zugeordnet_AG3}(\emptyset)$

t_{27} : subaufträge_anstoßen_AG3

118)

$\langle m_{AW.alt1} \rangle + \langle m_{AW.alt2} \rangle + \langle m_{AW.alt3} \rangle + \langle m_{AW.alt4} \rangle + \langle m_{AW.alt5} \rangle + \langle m_{AW.alt6} \rangle + \langle m_{AW.alt7} \rangle = \dots$

bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückstatus_1, Werkstückort_1, Bearbeitungsstatus_1))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückstatus_2, Werkstückort_2, Bearbeitungsstatus_2))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückstatus_3, Werkstückort_3, Bearbeitungsstatus_3))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_4, Werkstückklasse_4, Werkstückstatus_4, Werkstückort_4, Bearbeitungsstatus_4))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_5, Werkstückklasse_5, Werkstückstatus_5, Werkstückort_5, Bearbeitungsstatus_5))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_6, Werkstückklasse_6, Werkstückstatus_6, Werkstückort_6, Bearbeitungsstatus_6))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_7, Werkstückklasse_7, Werkstückstatus_7, Werkstückort_7, Bearbeitungsstatus_7))

$\langle \emptyset \rangle = \text{bearbeitungsstation_zugeordnet_AG3}(\emptyset)$

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Bearbeitungsstationsname := "BS_2"

Lagerauftragsstatus := erteilt

for_27 : \Leftrightarrow ...

Werkstücklagername_1 := Werkstückort_1

^ Werkstücklagername_2 := Werkstückort_2

^ Werkstücklagername_3 := Werkstückort_3

^ Werkstücklagername_4 := Werkstückort_4

^ Übergabestationsname_5 := Werkstückort_5

^ Übergabestationsname_6 := Werkstückort_6

^ Übergabestationsname_7 := Werkstückort_7

^ Ertzeitpunkt := Time

^ Lagerauftragsart := auslagerung

$\langle m_{I7.1} \rangle + \langle m_{I7.2} \rangle + \langle m_{I7.3} \rangle + \langle m_{I7.4} \rangle \approx \dots$

- lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_1, werkstückinformation(Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))
- + lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_2, werkstückinformation(Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))
- + lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_3, werkstückinformation(Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))
- + lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername_4, werkstückinformation(Werkstückname_4, Werkstückklasse_4, Werkstückzugehörigkeit, zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname)), auftragserteilung(Ertzeitpunkt), Lagerauftragsart, Lagerauftragsstatus))

$\langle m_{I1.5} \rangle + \langle m_{I1.6} \rangle + \langle m_{I1.7} \rangle \approx \dots$

- werkstück_beladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_5, zuordnung_wspa(Auftragsname), zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname), Übergabestationsname_5, Transportstatus))
- + werkstück_beladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_6, zuordnung_wspa(Auftragsname), zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname), Übergabestationsname_6, Transportstatus))
- + werkstück_beladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_7, zuordnung_wspa(Auftragsname), zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname), Übergabestationsname_7, Transportstatus))

$\langle m_{AW.neu1} \rangle + \langle m_{AW.neu2} \rangle + \langle m_{AW.neu3} \rangle + \dots$

$\langle m_{AW.neu4} \rangle + \langle m_{AW.neu5} \rangle + \langle m_{AW.neu6} \rangle + \langle m_{AW.neu7} \rangle \approx \dots$

- bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_1, Werkstückklasse_1, Werkstückstatus_1, Werkstückort_1, Bearbeitungsstatus_1))
- + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_2, Werkstückklasse_2, Werkstückstatus_2, Werkstückort_2, Bearbeitungsstatus_2))
- + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_3, Werkstückklasse_3, Werkstückstatus_3, Werkstückort_3, Bearbeitungsstatus_3))
- + bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_4, Werkstückklasse_4, Werkstückstatus_4, Werkstückort_4, Bearbeitungsstatus_4))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_5,Werkstückklasse_5,Werkstückstatus_5,Werkstückort_5, Bearbeitungsstatus_5))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_6,Werkstückklasse_6,Werkstückstatus_6,Werkstückort_6, Bearbeitungsstatus_6))

+ bearbeitungsobjekte_erforderlich_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_7,Werkstückklasse_7,Werkstückstatus_7,Werkstückort_7, Bearbeitungsstatus_7))

<∅> = vorlauf_ende_AG1(∅)

t₂₈: transportauftrag_abgeschlossen_AG3

<m_{AW.alt}> = bearbeitungsobjekte_erwartet_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_wse,Werkstückklasse, Werkstückstatus_alt,Werkstückort_alt,Bearbeitungsstatus))

<m_{I1}> = werkstück_entladen(informationsmarke_wst(Werkstückname_wst,zuordnung_wspa(Auftragsname),zuordnung_wsbs(Bearbeitungsstationsname_wst), Übergabestationsname,Transportstatus))

Transportstatus = entladen

for_28.1 :⇔ ...

Auftragsname = auftrag_name

∧ Werkstückname_wst = Werkstückname_wse

∧ Bearbeitungsstationsname_wst = "BS_2"

∧ Übergabestationsname = "BS_2"

Werkstückstatus_neu := auf_einlastung_wartend

for_28.2 :⇔ Werkstückort_neu := "BS_2"

<m_{AW.neu}> = bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_wse,Werkstückklasse, Werkstückstatus_neu,Werkstückort_neu,Bearbeitungsstatus))

t₂₉: arbeitsgangausführung_beginnt_AG3

<m_{AW.in1}>+<m_{AW.in2}>+<m_{AW.in3}>+ ...

<m_{AW.in4}>+<m_{AW.in5}>+<m_{AW.in6}>+<m_{AW.in7}> ≈ ...

bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_in1,Werkstückklasse_in1,Werkstückstatus_in,Werkstückort, Bearbeitungsstatus_in))

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname_in2,Werkstückklasse_in2,Werkstückstatus,Werkstückort, Bearbeitungsstatus_in))

```

+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_in3,Werkstückklasse_in3,Werkstückstatus_in,Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in))
+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_in4,Werkstückklasse_in4,Werkstückstatus,Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in))
+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_in5,Werkstückklasse_in5,Werkstückstatus_in,Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in))
+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_in6,Werkstückklasse_in6,Werkstückstatus,Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in))
+ bearbeitungsobjekte_sammeln_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstück-
name_in7,Werkstückklasse_in7,Werkstückstatus_in,Werkstückort,
Bearbeitungsstatus_in))
<m14> = ausführung_bearbeitungsauftrag_begonnen(informations-
marke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),Arbeitsgang_rüsterfordernis,
Arbeitsgang_ausführungsdauer,Arbeitsgang_werkzeuge,
Arbeitsgang_werkstückeingang,output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
Arbeitseingang_durchlaufzeiten,Arbeitseingang_herstellkosten,
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))

```

Werkstückstatus_in = auf_einlastung_wartend

Bearbeitungsauftragsstatus = begonnen

for_29.1 : \Leftrightarrow ...

```

    Auftragsname = auftrag_name
    ^ Werkstückort = "BS_2"
    ^ Arbeitsgangname = "AG_3"
    ^ Bearbeitungsstationsname = "BS_2"
    ^ Bearbeitungsstatus_in ∈ {unbearbeitet,angearbeitet}

```

Werkstückstatus_out := in_bearbeitung

for_29.2 : \Leftrightarrow ...

```

    Werkstückname_out := Werkstückname_ag
    ^ Werkstückklasse_out := Werkstückklasse_ag
    ^ Bearbeitungsstatus_out := angearbeitet

```

```

<mAW,out> = arbeitsgangausführung_dauert_an_AG3(werkstück-
marke_auftrag(Werkstückname_out,Werkstückklasse_out,
Werkstückstatus_out,Werkstückort,Bearbeitungsstatus_out))

```

t₃₀: arbeitsgangausführung_endet_AG3

```

<mAW.alt> ≈ arbeitsgangausführung_dauert_an_AG3(werkstück-
    marke_auftrag(Werkstückname,Werkstückklasse,
    Werkstückstatus_alt,Werkstückort,Bearbeitungsstatus_alt))
<mI4> ≈ ausführung_bearbeitungsauftrag_beendet(informations-
    marke_ba(Bearbeitungsstationsname,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
    zuordnung_agpa(Auftragsname),Arbeitsgang_rüsterfordernis,
    Arbeitsgang_ausführungsdauer,Arbeitsgang_werkzeuge,
    Arbeitsgang_werkstückeingang,output(Werkstückname_ag,
    Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
    Arbeitseingang_durchlaufzeiten,Arbeitseingang_herstellkosten,
    Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
    Bearbeitungsauftragserteilung,Bearbeitungsauftragsstatus))
<mZÄ.3alt> ≈ wiederholungszähler_AG3(zählermarke(Wiederholungsanzahl_alt))
<mZÄ.Ealt> ≈ endproduktzähler(zählermarke(Endproduktanzahl_alt))
<∅> ≈ vorlauf_ende_AG3(∅)

```

Werkstückstatus_alt = in_bearbeitung

Bearbeitungsauftragsstatus = erledigt

for_30 :⇔ ...

```

    Auftragsname = auftrag_name
    ^ Werkstückort = "BS_2"
    ^ Arbeitsgangname = "AG_3"
    ^ Bearbeitungsstationsname = "BS_2"

```

Werkstückstatus_neu := ausgelastet

Bearbeitungsstatus_neu := fertigbearbeitet

Wiederholungsanzahl_neu := Wiederholungsanzahl_alt + 1

Endproduktanzahl_neu := Endproduktanzahl_alt + 1

119)

```

<mAW.neu> ≈ arbeitsgang_ausgeführt_AG3(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname,
    Werkstückklasse,Werkstückstatus_neu,Werkstückort,Bearbeitungsstatus_neu))
<mZÄ.3neu> ≈ wiederholungszähler_AG3(zählermarke(wiederholungsanzahl_neu))
<mZÄ.Eneu> ≈ endproduktzähler(zählermarke(Endproduktanzahl_neu))
<∅> ≈ vorlauf_beginn_AG3(∅)

```

t₃₁: auftragsalterung

```

<mA.alt> ≈ auftragsabwicklung_dauert_an(auftragsmarke(Auftragsname,Losgröße,
    Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
    abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),Bearbeitungsbeginn,
    alter_pa(Alter_alt),Bearbeitungsende,abwicklungsende_pa_ka()),

```

abwicklungsdauer_pa_ka(),Durchlaufzeit,Bearbeitungsdauer,
 durchlaufzeitanteile_pa_ka()),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),
 transport_pa(Tptkosten),lagerung_pa(Lagkosten),
 kapitalbindung_pa(Kapkosten),herstellung_pa(Hstkosten))))

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Time > Alter_alt

Alter_neu := Time - Abwbeginn

$\langle m_{A.\text{neu}} \rangle = \text{auftragsabwicklung_dauert_an}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname,Losgröße,}$
 Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
 abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),Bearbeitungsbeginn,
 alter_pa(Alter_neu),Bearbeitungsende,abwicklungsende_pa_ka(),
 abwicklungsdauer_pa_ka(),Durchlaufzeit,Bearbeitungsdauer,
 durchlaufzeitanteile_pa_ka()),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),
 transport_pa(Tptkosten),lagerung_pa(Lagkosten),
 kapitalbindung_pa(Kapkosten),herstellung_pa(Hstkosten))))

t₃₂: bearbeitungsende

$\langle m_{Z\ddot{A}} \rangle = \text{endproduktzähler}(\text{zählermarke}(\text{Endproduktanzahl}))$

$\langle m_{A.\text{alt}} \rangle = \text{auftragsabwicklung_dauert_an}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname,Losgröße,}$
 Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
 abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn),
 alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa_ka(),abwicklungsende_pa_ka(),
 abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa_ka(),bearbeitungsdauer_pa_ka(),
 durchlaufzeitanteile_pa_ka()),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),
 transport_pa(Tptkosten),lagerung_pa(Lagkosten),
 kapitalbindung_pa(Kapkosten),herstellung_pa(Hstkosten))))

$\langle m_T \rangle = \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Endproduktanzahl = Losgröße

Beaende := Time

Durchlauf := Beaende - Abwbeginn

Beadauer := Beaende - Beabeginn

$\langle m_{A.\text{neu}} \rangle = \text{auftragsabwicklung_dauert_an}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname,Losgröße,}$
 Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
 abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn),
 alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa(Beaende),abwicklungsende_pa_ka(),
 abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa(Durchlauf),
 bearbeitungsdauer_pa(Beadauer),durchlaufzeitanteile_pa_ka(),
 kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),transport_pa(Tptkosten),
 lagerung_pa(Lagkosten),kapitalbindung_pa(Kapkosten),

herstellung_pa(Hstkosten))))))
 $\langle \emptyset \rangle \approx$ abwicklungsende_möglich(\emptyset)

t₃₃: abwicklungsende

$\langle \emptyset \rangle \approx$ abwicklungsende_möglich(\emptyset)

$\langle m_{A.alt} \rangle \approx$ auftragsabwicklung_dauert_an(auftragsmarke(Auftragsname,Losgröße,
 Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
 abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn),
 alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa(Beaende),abwicklungsende_pa_ka(),
 abwicklungsdauer_pa_ka(),durchlaufzeit_pa(Durchlauf),
 bearbeitungsdauer_pa(Beadauer),durchlaufzeitanteile_pa_ka(),
 kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),transport_pa(Tptkosten),
 lagerung_pa(Lagkosten),kapitalbindung_pa(Kapkosten),
 herstellung_pa(Hstkosten))))))

$\langle m_T \rangle \approx$ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Abwende := Time

Abwdauer := Abwende - Abwbeginn

Alter := Abwdauer

for_33 : \Leftrightarrow ...

Beadauer_sum := 0

\wedge Tptdauer_sum := 0

\wedge Lagdauer_sum := 0

\wedge Wrtdauer_sum := 0

\wedge Durchlauf_sum := 0

$\langle m_{A.neu} \rangle \approx$ auslastungsentscheidung(auftragsmarke(Auftragsname,Losgröße,
 Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
 abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn),
 alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa(Beaende),
 abwicklungsende_pa(Abwende),abwicklungsdauer_pa(Abwdauer),
 durchlaufzeit_pa(Durchlauf),bearbeitungsdauer_pa(Beadauer),
 durchlaufzeitanteile_pa(absolutanteile(bearbeitungsdauer_da(Beadauer_sum),
 transportdauer_da(Tptdauer_sum),lagerdauer_da(Lagdauer_sum),
 wartedauer_da(Wrtdauer_sum),durchlaufzeit_da(Durchlauf_sum)),
 relativanteile_ka(),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),
 transport_pa(Tptkosten),lagerung_pa(Lagkosten),
 kapitalbindung_pa(Kapkosten),herstellung_pa(Hstkosten))))))

- t₃₄: auftragsauslastung_ohne_werkstückabzug 120)
- $\langle m_A \rangle \approx \text{auslastungsentscheidung}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname}, \text{Losgröße}, \text{Auftragswert}, \text{Priorität}, \text{Auftragszeiten}, \text{Auftragskosten}))$
- werkstückverbleib := werkstücklager
- $W_{34.47} := \text{Losgröße}$
- $\langle m_A \rangle \approx \text{auslastungsbestätigungen_abwarten}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname}, \text{Losgröße}, \text{Auftragswert}, \text{Priorität}, \text{Auftragszeiten}, \text{Auftragskosten}))$
- $W_{34.47} \langle \emptyset \rangle \approx W_{34.47} \cdot \text{endproduktanzahl_lager}(\emptyset)$
- t₃₅: auftragsauslastung_mit_werkstückabzug
- $\langle m_A \rangle \approx \text{auslastungsentscheidung}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname}, \text{Losgröße}, \text{Auftragswert}, \text{Priorität}, \text{Auftragszeiten}, \text{Auftragskosten}))$
- werkstückverbleib := umsystem
- $W_{35.49} := \text{Losgröße}$
- $\langle m_A \rangle \approx \text{auslastungsbestätigungen_abwarten}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname}, \text{Losgröße}, \text{Auftragswert}, \text{Priorität}, \text{Auftragszeiten}, \text{Auftragskosten}))$
- $W_{35.49} \langle \emptyset \rangle \approx W_{35.49} \cdot \text{endproduktanzahl_lager}(\emptyset)$
- t₃₆: subaufträge_anstoßen 121)
- $\langle m_{AW.alt} \rangle \approx \text{arbeitsgang_ausgefuehrt_AG3}(\text{werkstückmarke_auftrag}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückstatus_alt}, \text{Werkstückort}, \text{Bearbeitungsstatus}))$
- $\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$
- Bearbeitungsstatus = fertigbearbeitet
- for_36 := \Leftrightarrow ... 122)
- Werkstückstatus_neu := transportiert
 - ^ Werkstücklagername := lager_name
 - ^ Auftragsname := auftrag_name
 - ^ Übergabestationsname := Werkstückort
 - ^ Transportstatus := beladung_erwartet
 - ^ Ertzeitpunkt := Time
 - ^ Lagerauftragsart := endlagerung
 - ^ Lagerauftragsstatus := erteilt
- $\langle m_{AW.neu} \rangle \approx \text{endprodukte_erwartet}(\text{werkstückmarke_auftrag}(\text{Werkstückname}, \text{Werkstückklasse}, \text{Werkstückstatus_neu}, \text{Werkstückort}, \text{Bearbeitungsstatus}))$
- $\langle m_{II} \rangle \approx \text{werkstück_beladen}(\text{informationsmarke_wst}(\text{Werkstückname}, \text{zuordnung_wspa}(\text{Auftragsname}), \text{zuordnung_wsls}(\text{Werkstücklagername}), \text{Übergabestationsname}, \text{Transportstatus}))$


```
<mI7> = lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername,
werkstückinformation(Werkstückname,Werkstückklasse,
zuordnung_wspa(Auftragsname),zuordnung_wsls(Werkstücklagername),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
```

t₃₇: endproduktlagerung

```
<mAW.alt> = endprodukte_erwartet(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückstatus_alt,Werkstückort_alt,Bearbeitungsstatus))
```

```
<mI1> = werkstück_entladen(informationsmarke_wst(Werkstückname,
zuordnung_wspa(Auftragsname),zuordnung_wsls(Werkstücklagername),
Übergabestationsname,Transportstatus))
```

```
<mI7> = lagerauftrag_werkstück(informationsmarke_wsl(Werkstücklagername,
werkstückinformation(Werkstückname,Werkstückklasse,
zuordnung_wspa(Auftragsname),zuordnung_wsls(Werkstücklagername),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Lagerauftragsart,Lagerauftragsstatus))
```

for_37.1 : \Leftrightarrow ...

```
Werkstückstatus_alt = transportiert
```

```
^ Bearbeitungsstatus = fertigbearbeitet
```

```
^ Auftragsname = auftrag_name
```

```
^ Übergabestationsname = lager_name
```

```
^ Transportstatus = entladen
```

```
^ Werkstücklagername = lager_name
```

```
^ Bearbeitungsstatus = fertigbearbeitet
```

```
^ Lagerauftragsart = endlagerung
```

```
^ Lagerauftragsstatus = erledigt
```

```
Werkstückstatus_neu := nachgelagert
```

for_37.2 : \Leftrightarrow Werkstückort_neu := lager_name

```
<mAW.neu> = endprodukte_gelagert(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückstatus_neu,Werkstückort_neu,Bearbeitungsstatus))
```

t₃₈: werkstückauslastung_ohne_werkstückabzug

```
<mAW> = endprodukte_gelagert(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname,
Werkstückklasse,Werkstückstatus,Werkstückort,Bearbeitungsstatus))
```

```
<∅> = endproduktanzahl_umsystem(∅)
```

```
<mT> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
```

```
Werkstückverbleib := werkstücklager
```

for_38 : \Leftrightarrow ...

```
Werkstücklagername := lagerstation_name
```

```
^ Auftragsname := auftrag_name
```

^ Anzeitpunkt := Time

<Ø> = endproduktanzahl(Ø)

<m_{I9.hin}> = auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_hin(auslastungseinleitung(Werkstücklagername,Werkstückname, zuordnung_wspa(Auftragsname),Werkstückverbleib, auslastungsanweisung(Anzeitpunkt))))

t₃₉: werkstückauslastung_mit_werkstückabzug

<m_{AW}> = endprodukte_gelagert(werkstückmarke_auftrag(Werkstückname, Werkstückklasse,Werkstückstatus,Werkstückort,Bearbeitungsstatus))

<Ø> = endproduktanzahl_lager(Ø)

<m_T> = systemzeit(zeitmarke_sys(Time))

Werkstückverbleib := umsystem

for_39 :⇔ ...

Werkstücklagername := lagerstation_name

^ Auftragsname := auftrag_name

^ Anzeitpunkt:= Time

<Ø> = endproduktanzahl(Ø)

<m_{I9.hin}> = auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_hin(auslastungseinleitung(Werkstücklagername,Werkstückname, zuordnung_wspa(Auftragsname),Werkstückverbleib, auslastungsanweisung(Anzeitpunkt))))

t₄₀: auftragsstatistik_erstellen

<m_{A.alt}> = auslastungsbestätigungen_sammeln(auftragsmarke(Auftragsname, Losgröße,Auftragswert,Priorität,zeiten_pa(Fertigstellungstermin, abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn), alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa(Beaende), abwicklungsende_pa(Abwende),abwicklungsdauer_pa(Abwdauer), durchlaufzeit_pa(Durchlauf_pa),bearbeitungsdauer_pa(Beadauer_pa), durchlaufzeitanteile_pa(absolutanteile(bearbeitungsdauer_da(Beadauer_alt), transportdauer_da(Tptdauer_alt),lagerdauer_da(Lagdauer_alt), wartedauer_da(Wrtdauer_alt),durchlaufzeit_da(Durchlauf_alt)), relativanteile_ka(),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten_alt), transport_pa(Tptkosten_alt),lagerung_pa(Lagkosten_alt), kapitalbindung_pa(Kapkosten_alt),herstellung_pa(Hstkosten_alt))))))

<m_{I9.rüc}> = auslastung_werkstück(informationsmarke_wsa_rück(auslastungsbeendigung(Werkstücklagername,Werkstückname, zuordnung_wspa(Auftragsname),zeiten_ws(bearbeitungs-

```
dauer_ws(Beadauer_ws),transportdauer_ws(Tptdauer_ws),
lagerdauer_ws(Lagdauer_ws),wartedauer_ws(Wrtdauer_ws),
durchlaufzeit_ws(Durchlauf_ws)),kosten_ws(bearbeitung_ws(Beakosten_ws),
transport_ws(Tptkosten_ws),lagerung_ws(Lagkosten_ws),
kapitalbindung_ws(Kapkosten_ws),herstellung_ws(Hstkosten_ws))))
```

```
for_40.1 := Auftragsname = auftrag_name
```

```
for_40.2 := ...
```

```
    Beadauer_neu := Beadauer_alt + Beadauer_ws
```

```
    ^ Tptdauer_neu := Tptdauer_alt + Tptdauer_ws
```

```
    ^ Lagdauer_neu := Lagdauer_alt + Lagdauer_ws
```

```
    ^ Wrtdauer_neu := Wrtdauer_alt + Wrtdauer_ws
```

```
    ^ Durchlauf_neu := Durchlauf_alt + Durchlauf_ws
```

```
    ^ Beakosten_neu := Beakosten_alt + Beakosten_ws
```

```
    ^ Tptkosten_neu := Tptkosten_alt + Tptkosten_ws
```

```
    ^ Lagkosten_neu := Lagkosten_alt + Lagkosten_ws
```

```
    ^ Kapkosten_neu := Kapkosten_alt + Kapkosten_ws
```

```
    ^ Hstkosten_neu := Hstkosten_alt + Hstkosten_ws
```

```
<mA.neu> = auslastungsbestaetigungen_sammeln(auftragsmarke(Auftragsname,
Losgraeue,Auftragswert,Prioritaet,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn),
alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa(Beaende),
abwicklungsende_pa(Abwende),abwicklungsdauer_pa(Abwdauer),
durchlaufzeit_pa(Durchlauf_pa),bearbeitungsdauer_pa(Beadauer_pa),
durchlaufzeitanteile_pa(absolutanteile(bearbeitungsdauer_da(Beadauer_neu),
transportdauer_da(Tptdauer_neu),lagerdauer_da(Lagdauer_neu),
wartedauer_da(Wrtdauer_neu),durchlaufzeit_da(Durchlauf_neu)),
relativanteile_ka(),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten_neu),
transport_pa(Tptkosten_neu),lagerung_pa(Lagkosten_neu),
kapitalbindung_pa(Kapkosten_neu),herstellung_pa(Hstkosten_neu))))))
```

```
<Ø> = endproduktanzahl(Ø)
```

```
t41: auftragsstatistik_abschluss
```

```
<mA.alt> = auslastungsbestaetigungen_sammeln(auftragsmarke(Auftragsname,
Losgraeue,Auftragswert,Prioritaet,zeiten_pa(Fertigstellungstermin,
abwicklungsbeginn_pa(Abwbeginn),bearbeitungsbeginn_pa(Beabeginn),
alter_pa(Alter),bearbeitungsende_pa(Beaende),
abwicklungsende_pa(Abwende),abwicklungsdauer_pa(Abwdauer),
durchlaufzeit_pa(Durchlauf_pa),bearbeitungsdauer_pa(Beadauer_pa),
durchlaufzeitanteile_pa(absolutanteile(bearbeitungsdauer_da(Beadauer_sum),
transportdauer_da(Tptdauer_sum),lagerdauer_da(Lagdauer_sum),
```

wartedauer_da(Wrtdauer_sum),durchlaufzeit_da(Durchlauf_sum)),
 relativanteile_ka(),kosten_pa(bearbeitung_pa(Beakosten),
 transport_pa(Tptkosten),lagerung_pa(Lagkosten),
 kapitalbindung_pa(Kapkosten),herstellung_pa(Hstkosten))))))

$W_{52.41} \bullet \langle \emptyset \rangle = \text{endproduktanzahl}(\emptyset)$

$W_{52.41} = \text{Losgröße}$

$\text{for}_{41} : \Leftrightarrow \dots$

 Beadauer_ant := Beadauer_sum : Durchlauf_sum
 ^ Tptdauer_ant := Tptdauer_sum : Durchlauf_sum
 ^ Lagdauer_ant := Lagdauer_sum : Durchlauf_sum
 ^ Wrtdauer_ant := Wrtdauer_sum : Durchlauf_sum

$\langle m_{A.\text{neu}} \rangle = \text{abgewickelte_aufträge}(\text{auftragsmarke}(\text{Auftragsname, Losgröße, Auftragswert, Priorität, zeiten_pa}(\text{Fertigstellungstermin, abwicklungsbeginn_pa}(\text{Abwbeginn}), \text{bearbeitungsbeginn_pa}(\text{Beabeginn}), \text{alter_pa}(\text{Alter}), \text{bearbeitungsende_pa}(\text{Beaende}), \text{abwicklungsende_pa}(\text{Abwende}), \text{abwicklungsdauer_pa}(\text{Abwdauer}), \text{durchlaufzeit_pa}(\text{Durchlauf_pa}), \text{bearbeitungsdauer_pa}(\text{Beadauer_pa}), \text{durchlaufzeitanteile_pa}(\text{absolutanteile}(\text{bearbeitungsdauer_da}(\text{Beadauer_sum}), \text{transportdauer_da}(\text{Tptdauer_sum}), \text{lagerdauer_da}(\text{Lagdauer_sum}), \text{wartedauer_da}(\text{Wrtdauer_sum}), \text{durchlaufzeit_da}(\text{Durchlauf_sum})), \text{relativanteile}(\text{bearbeitungsanteil}(\text{Beadauer_ant}), \text{transportanteil}(\text{Tptdauer_ant}), \text{lagerungsanteil}(\text{Lagdauer_ant}), \text{warteanteil}(\text{Wrtdauer_ant}))), \text{kosten_pa}(\text{bearbeitung_pa}(\text{Beakosten}), \text{transport_pa}(\text{Tptkosten}), \text{lagerung_pa}(\text{Lagkosten}), \text{kapitalbindung_pa}(\text{Kapkosten}), \text{herstellung_pa}(\text{Hstkosten}))))))$

$\langle \emptyset \rangle = \text{abwicklungsbeginn_möglich}(\emptyset)$

Fakten:

$\langle m_A \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{auftragsabwicklung_kann_beginnen}(\text{auftragsmarke}("PA_1", 2,750, 1, \text{zeiten_pa}(\text{fertigstellung_pa}(11940), \text{abwicklungsbeginn_pa_ka}(), \text{bearbeitungsbeginn_pa_ka}(), \text{alter_pa_ka}(), \text{bearbeitungsende_pa_ka}(), \text{abwicklungsende_pa_ka}(), \text{abwicklungsdauer_pa_ka}(), \text{durchlaufzeit_pa_ka}(), \text{bearbeitungsdauer_pa_ka}(), \text{durchlaufzeitanteile_pa_ka}(), \text{kosten_pa}(0,0,0,0,0))))))$

123)

$\langle \emptyset \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{abwicklungsbeginn_möglich}(\emptyset))$

$\langle \emptyset \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{vorlauf_beginn_AG1}(\emptyset))$

$\langle \emptyset \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{vorlauf_beginn_AG2}(\emptyset))$

$\langle \emptyset \rangle = \text{fakt}_0(1, \text{vorlauf_beginn_AG3}(\emptyset))$

Bislang wurden bei der Auftragsabwicklung nur die drei eng aufgefaßten Bearbeitungsstationen "BS_1", "BS_2" und "BS_3" berücksichtigt, auf denen sich auftragszugehörige Arbeitsgänge ausführen lassen. Die Spannstation "BS_4", die eine Bearbeitungsstation i.w.S. darstellt, fand jedoch noch keine Beachtung. Dies folgt aus der eingangs erläuterten Transformation von GOZINTO-Graphen in Kanal/Instanz-Netze und daraus abgeleitete Auftragsnetze. Denn die Transformationsschritte beschäftigten sich nur mit Arbeitsgängen, deren Ausführungen Vor- oder Zwischenprodukte in Zwischen- oder Endprodukte verwandelten. Das Aufspannen von Vor- und das Abspannen von Endprodukten blieben deswegen außer acht. Diese Modellierungslücke läßt sich dadurch schließen, daß Arbeitsgänge sui generis für das Auf- und das Abspannen von Werkstücken eingeführt werden¹²⁴⁾. Abb. 191 auf der nächsten Seite zeigt ein modifiziertes Kanal/Instanz-Netz, in dem alle Werkstückauf- und -abspannungen in der Spannstation "BS_4" erfaßt sind. Hieraus läßt sich ein modifiziertes Auftragsnetz ableiten. Es entspricht - bis auf die zusätzlichen Spannarbeitsgänge - dem zuvor konstruierten Auftragsnetz¹²⁵⁾.

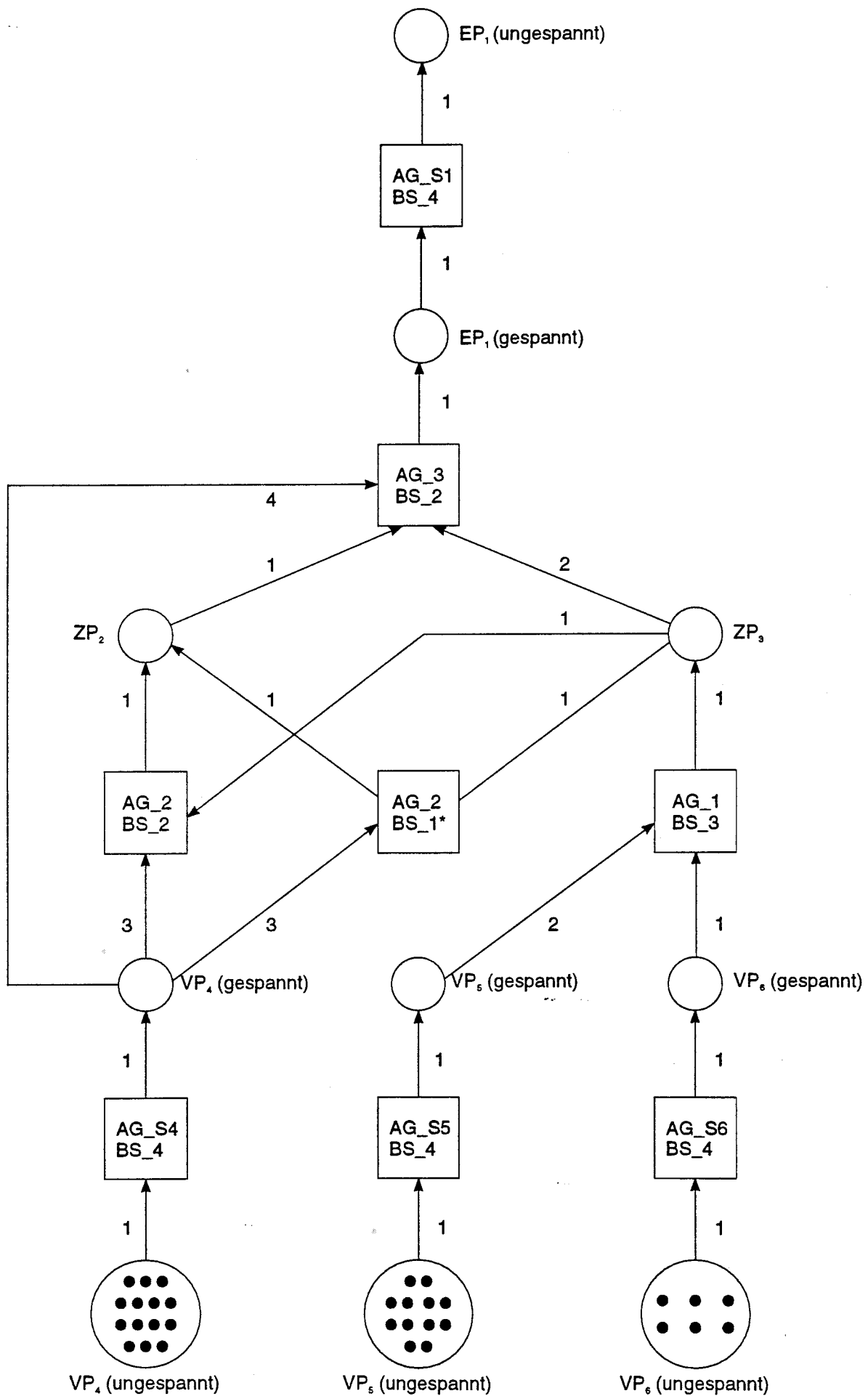


Abb. 191: Modifiziertes Kanal/Instanz-Netz mit Spannarbeitsgängen

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. DÖTTLING (1981), S. 45ff.; REFA (1985c), S. 134ff., insbesondere S. 166ff. (REFA-Lehrarbeitsplan); KERN, W. (1990a), S. 285ff.; EVERSHEIM (1989g), S. 27f.

2) Vgl. zu dieser Differenzierung des Auftragsbezugs von Arbeitsplänen REFA (1985c), S. 164f.; KERN, W. (1990a), S. 290.

3) Falls die Endproduktstruktur auf andere Weise - z.B. mit der Hilfe von Stücklisten - spezifiziert ist, werden diese zunächst in die kompakte Repräsentationsform eines GOZINTO-Graphen transformiert.

4) Dies entspricht auf den ersten Blick der Prämisse von WINTER, RO. (1991), S. 172 u. 175, eine grundsätzliche Entkopplung aller Produktionsaufträge zu unterstellen. Auf dieser Grundlage behandelt auch WINTER jeden Auftrag als einen eigenständigen "Teilplan". Bei genauerem Hinsehen zeigt sich jedoch, daß in der Fallstudie dieser Arbeit eine weitaus schwächere Konzeptualisierungsprämisse vertreten wird. Denn WINTER, RO. (1991), S. 172, fordert u.a. auch, daß die entkoppelten Produktionsaufträge um keine knappen Ressourcen (Materialien oder Kapazitäten) konkurrieren dürfen. Dagegen wird hier die Ressourcenkonkurrenz zwischen den Produktionsaufträgen ausdrücklich zugelassen.

Statt dessen wird lediglich unterstellt, daß keine technischen oder dispositiven Restriktionen beachtet zu werden brauchen, denen die Ausführungen von Arbeitsgängen aus *verschiedenen* Aufträgen gehorchen müßten. Daher existieren keine zwei Arbeitsgänge, die zu unterschiedlichen Aufträgen gehören und zwischen deren Start- oder Schlußereignissen mindestens eine Ausführungsrestriktion besteht. Wenn diese Prämisse durch ein Realproblem verletzt sein sollte, werden die derart abhängigen Aufträge als Komponenten eines einzigen Auftrags Konzeptualisiert. Unter dieser Voraussetzung brauchen die Beziehungen zwischen unterschiedlichen Produktionsaufträgen nicht beachtet zu werden. Denn die allein zugelassenen Auftragsabhängigkeiten, die durch Ressourcenkonkurrenz entstehen können, werden durch die Zuordnung von auftragszugehörigen Arbeitsgängen zu Bearbeitungsstationen und Transportmitteln erfaßt. Vgl. dazu die entsprechenden Konstruktionen für die erforderlichen Zuordnungsentscheidungen, die in dieser Fallstudie präsentiert werden.

Darüber hinaus wird sich zeigen, daß die Fallstudie ohne die Minimal- oder Maximalfristen auskommt, die für Zeitnetze spezifiziert wurden. Diese fristenfreie Modellierung beruht aber auf keiner einschränkenden Modellierungsprämisse. Sie resultiert vielmehr aus der relativ einfachen Strukturierung der Fallstudie. Es wird jedoch keineswegs ausgeschlossen, zwischen den Start- oder Schlußereignissen der hier betrachteten Arbeitsgänge eines Auftrags zusätzliche Minimal- oder Maximalfristen einzuführen. Sie lassen sich in das Netzmodul für die Repräsentation von Produktionsaufträgen ohne Schwierigkeiten integrieren. Durch solche Fristen können sogar Ausführungsrestriktionen festgelegt werden, die von Arbeitsgängen aus *verschiedenen* Aufträgen eingehalten werden müssen. Dadurch würde die vorgenannte Modellierungsprämisse aufgehoben. Allerdings müßten dann zusätzliche Schnittstellen berücksichtigt werden, welche die fristbedingte Abhängigkeit zwischen den Netzmodulen der jeweils betroffenen Aufträge vermitteln. Auf diese Komplizierung wird hier jedoch verzichtet.

5) Ein ähnlicher Ansatz wird bei IDS (1990), S. 12, als "Auftrags-/Arbeitsgangnetz" angedeutet. Allerdings werden dort keine Bearbeitungsstationen berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Produktzusammensetzung nicht anhand eines GOZINTO-Graphen, sondern auf der Basis des Baumgraphen einer Strukturliste entfaltet.

Vgl. des weiteren WINTER, RO. (1991), S. 246. Er benutzt einen produktspezifischen "Fertigungsplan", in dem die Stückliste des betroffenen Produkts mit dem zugehörigen Arbeitsplan für die Produktherstellung integriert werden. Solche Fertigungspläne werden ebenso angesprochen von MERTENS (1988a), S. 140, und SCHEER (1988a), S. 211f. (dort als erweiterte Stücklisten thematisiert). Allerdings läßt nur SCHEER klar erkennen, wie prozedurale Informationen eines Arbeitsplans über auszuführende Arbeitsgänge in einen Fertigungsplan konkret aufgenommen werden. Dagegen belassen es WINTER und MERTENS bei globalen Andeutungen. Zwar findet sich bei WINTER, RO. (1991), S. 266ff. u. 326ff., eine detaillierte Datenmodellierung für (Grob-)Fertigungspläne. Aber gerade dort hat der Verf. in den aufgelisteten Datenstrukturen vergeblich nach arbeitgangbezogenen Informationen gesucht.

Darüber hinaus kann auch eine Verwandtschaft des hier entwickelten Auftragsnetzes mit auftragspezifischen Netzplänen gesehen werden. Die Möglichkeit, Netzpläne für die Koordinierung von Produktionsprozessen einzusetzen, wird später ausführlicher thematisiert. Die Gestaltung von *auftragspezifischen* Netzplänen wird besonders deutlich bei GROB, M. (1991b), S. 97ff. Aus der Ablaufskizze des Bilds 5 auf S. 99 und aus der Erläuterung auf S. 100 läßt sich entnehmen, daß in die Konstruktion eines auftragspezifischen Netzplans Informationen über die auftragspezifische Produktzusammensetzung einfließen. Die Einbindung von Arbeitsplänen und von Informationen über Bearbeitungsstationen bleiben dagegen bei GROB, M. (1991b), S. 99f., im Unklaren.

Schließlich ähnelt das hier vorgelegte Auftragsnetz manchen graphischen Darstellungen, die den auftragsabhängigen Werkstückfluß durch ein Produktionssystem veranschaulichen. Vgl. zu solchen graphischen Werkstückflußdarstellungen z.B. NAUNDORF (1991), S. 66, Bild 1 ("Möglichkeiten des Werkstückflusses eines Auftrags im flexiblen Fertigungssystem"). Allerdings bleiben solche Veranschaulichungen auf ihre Visualisierungsfunktion beschränkt. Ihnen liegt kein präzise definiertes, formalsprachlich ausformuliertes Modell zugrunde. Dadurch unterscheiden sie sich vom Auftragsnetz mit seiner formalen Netzlegende grundsätzlich. Darüber hinaus werden die

Werkstückflußdarstellungen weder auf Arbeitspläne noch auf Informationen über Produktzusammensetzungen bezogen.

6) Vgl. zu unterschiedlichen graphischen Repräsentationsformen von Arbeitsplänen DÖTTLING (1981), S. 46ff.; vgl. auch die Präzedenzgraphen, die bereits eingeführt später wiederaufgenommen werden. Eine besonders anschauliche graphische Repräsentation der Arbeitsgänge, die in einem Flexiblen Fertigungssystem für die Abwicklung eines exemplarischen Produktionsauftrags erforderlich sind, findet sich bei GUNN (1982), S. 95 (Abb. 11). Sie erreicht zwar in produktionstechnischer Hinsicht bei weitem nicht die Aussagekraft eines Arbeitsplans. Dafür läßt sie aber die Ablaufstruktur der auszuführenden Arbeitsgänge und den damit verknüpften Werkstückfluß im Produktionssystem um so deutlicher hervortreten.

Konventionelle Arbeitspläne beruhen dagegen auf einer nicht-graphischen Darstellungsweise. Dabei dominiert die Listendarstellung; vgl. z.B. REFA (1985c), S. 166ff. (REFA-Lehrarbeitsplan), und KERN, W. (1990a), Abb. 90 auf S. 288. Eine seltene Matrizendarstellung findet sich dagegen bei DÖTTLING (1981), S. 54ff.

7) Auch dies trägt zur Nonlinearität der Arbeitspläne bei, die durch Auftragsnetze repräsentiert werden.

8) Es handelt sich aber nur um einen ersten Einblick, weil die Ablaufstruktur auch von den Arbeitsgängen abhängt, die zur Herstellung der Zwischen- und Endprodukte erforderlich sind. Hinzu kommen die Bearbeitungsstationen, auf denen sich die Arbeitsgänge jeweils ausführen lassen. Beide Ablaufstruktur Aspekte werden durch GOZINTO-Graphen nicht erfaßt. Sie lassen sich aber nachträglich durch die Transformation in Präzedenzgraphen berücksichtigen. Darauf wird in Kürze näher eingegangen.

9) Kanten, die entweder die Ein- oder aber die Ausgangskanten desselben Knotens darstellen, gelten jeweils als konjunktiv verknüpft.

10) Präzedenzgraphen werden des öfteren verwendet, um die zeitlichen Reihenfolgebeziehungen zwischen den Arbeitsgängen eines nonlinearen Arbeitsplans auszudrücken. Da Reihenfolgebeziehungen einen asymmetrischen Charakter besitzen, handelt es sich bei Präzedenzgraphen stets um gerichtete Graphen. Die hier verwendeten Präzedenzgraphen gehören zur Klasse der Zustandsgraphen. Denn ihre Knoten dienen dazu, sowohl die Bearbeitungszustände einzelner Werkstücke als auch den Abwicklungszustand eines Produktionsauftrags zu repräsentieren. Darauf wird noch näher eingegangen. Das allgemeine Konzept der Zustandsgraphen wurde bereits für Werkstücke eingeführt. Vgl. speziell zu Zustandsgraphen, die als Präzedenzgraphen die Ablaufstrukturen von Produktionsaufträgen oder Arbeitsplänen widerspiegeln, STUTE (1978a), S. 89; DÖTTLING (1981), S. 47ff., insbesondere S. 52ff.; HELBERG (1987), S. 195f. Vgl. ebenso die "Assembly Partial-Order Graphs" von LEE, S. (1988), S. 383 u. 387ff. Sie stellen Zustandsgraphen dar, die mit der expliziten Repräsentation von Restriktionen ("liaisons") kombiniert sind. In ihnen ist eine erste Knotenart ("nodes") für Montagezustände einzelner Werkstücke vorgesehen. Eine zweite Knotenart ("super-nodes") deckt dagegen die Restriktionen ab.

Die Präzedenzgraphen aus der Klasse der Zustandsgraphen sind eng verwandt mit den Arbeitsganggraphen, die bereits in einer früheren Anmerkung angesprochen wurden. In Arbeitsganggraphen werden allerdings die Arbeitsgänge als *Knoten*beschriftungen dargestellt, während die Präzedenzbeziehungen als Kanten erfaßt werden. Solche Präzedenzgraphen entsprechen Netzplänen vom Vorgangsknotentyp, deren Vorgänge als Arbeitsgänge gedeutet werden. Die hier entwickelten Präzedenzgraphen verhalten sich komplementär: Sie ähneln Netzplänen vom Vorgangskantentyp. Denn die Arbeitsgänge werden hier - zusammen mit den involvierten Bearbeitungsstationen - als *Kanten*beschriftungen repräsentiert. Die Knoten vertreten dagegen Vor-, Zwischen- oder Endproduktarten. Zugleich stellen sie Bearbeitungszustände derjenigen Werkstücke dar, die bei der Abwicklung eines Produktionsauftrags bearbeitet werden sollen. Die Präzedenzbeziehungen werden durch den Kantenzusammenhang in gemeinsamen Knoten abgedeckt: Wenn zwei Arbeitsgänge aufeinander folgen, dann stößt die Kante, die mit dem vorangehenden Arbeitsgang beschriftet ist, mit ihrer Spitze auf einen Knoten, von dem diejenige Kante ausgeht, die mit dem nachfolgenden Arbeitsgang beschriftet ist.

Für die Auswahl des Zustandsgraphenkonzepts zur Transformation von auftragspezifischen Arbeitsplänen in auftragsrepräsentierende Netzmodule sprechen im wesentlichen drei Argumente. Erstens lassen sich nur Zustandsgraphen unmittelbar mit GOZINTO-Graphen kombinieren. Dies wird durch die Transformation von GOZINTO- in Zustandsgraphen an anderer Stelle konkret nachgewiesen. Für Arbeitsganggraphen existiert keine entsprechende Kombinationsmöglichkeit. Zweitens können mit der Hilfe von Zustandsgraphen Bearbeitungsalternativen explizit, kompakt und transparent dargestellt werden. Diese Bearbeitungsalternativen erstrecken sich sowohl auf unterschiedliche Arbeitsgänge, die zur Bearbeitung derselben Werkstücke mit demselben Bearbeitungsergebnis eingesetzt werden können, als auch auf verschiedene Bearbeitungsstationen, auf denen sich dieselben Arbeitsgänge ausführen lassen. Durch Kombination der beiden Aspekte lassen sich auch alternative Produktionsverfahren erfassen. Vgl. zu solchen Bearbeitungsalternativen die früheren Erläuterungen zu Arbeitsplänen und ihre spätere Berücksichtigung bei der Transformation von GOZINTO-Graphen. Zwar sind auch Arbeitsganggraphen in der Lage, Bearbeitungsalternativen zu repräsentieren. Vgl. dazu die "verzweigte" Darstellungsweise von Bearbeitungsalternativen bei STUTE (1978a), S. 89; DÖTTLING (1981), S. 47ff., insbesondere S. 48f. u. 51. Aber Zustandsgraphen erlauben bei komplexen Alternativenstrukturen eine tendenziell übersichtlichere Repräsentation als Arbeitsganggraphen; vgl. das plastische Beispiel von DÖTTLING (1981), S. 50ff. Drittens erlaubt es die zustandsbezogene Konzeptualisierung der

Ablaufstruktur eines Produktionsauftrags, das störungsbedingte Unterbrechen der Bearbeitung eines Werkstücks so zu repräsentieren, daß dessen spätere Weiterbearbeitung am zuletzt erreichten Bearbeitungszustand ohne Schwierigkeiten anknüpfen kann. Vgl. dazu auch DÖTTLING (1981), S. 49, der allerdings - zurückhaltender - nur von der schlechten oder schwierigen Repräsentationsmöglichkeit solcher Werkstückzustände spricht. Auf Bearbeitungsunterbrechungen wird später bei der Modellierung von Bearbeitungsstationen näher eingegangen. Die Darstellung störungsbedingter Bearbeitungsunterbrechungen ist bei Arbeitsganggraphen dagegen nicht möglich, weil dort Werkstückzustände nicht explizit repräsentiert werden. Gleicher Ansicht ist DÖTTLING (1981), S. 48f.

11) Präzedenzbeziehungen zwischen Arbeitsgängen sind schon durch den sachlichen Bearbeitungszusammenhang zwischen den Vor-, Zwischen- und Endproduktarten innerhalb des GOZINTO-Graphen vorgegeben. Sie werden durch die nachfolgende Konstruktion des Präzedenzgraphen übernommen. Darüber hinaus kann der Präzedenzgraph zusätzliche Präzedenzbeziehungen zwischen den Start- und Schlußereignissen seiner Arbeitsgänge enthalten. Dazu gehören vor die Minimal- und Maximalfristen, die aus technischen oder dispositiven Gründen zu beachten sind. In der hier präsentierten Fallstudie werden der Übersichtlichkeit halber keine weiteren Präzedenzbeziehungen erfaßt.

12) Die Verfeinerung kann zur Einführung neuer Kanten im Präzedenzgraphen führen, die entweder sequentiell aufeinander folgen (sequentielle Kantenverfeinerung) oder aber sich wechselseitig ausschließen (disjunktive Kantenverfeinerung). Eine sequentielle Kantenverfeinerung tritt ein, wenn eine Kante aus dem GOZINTO-Graphen derart zerlegt wird, daß im Präzedenzgraphen eine Sequenz aus vorläufigen Kanten für Arbeitsgänge mit zwischengeschalteten Knoten für verfeinerte Zwischenprodukte resultiert. Eine disjunktive Kantenverfeinerung liegt dagegen vor, wenn eine Kante aus dem GOZINTO-Graphen im Präzedenzgraphen durch ein Kantenbündel aus disjunktiv verknüpften Einzelkanten wiedergegeben wird, die dasselbe Knotenpaar verknüpfen. Die Einzelkanten repräsentieren dann alternative Arbeitsgänge, mit denen der gleiche Übergang zwischen einer Vor- oder Zwischenproduktart und einer Zwischen- oder Endproduktart bewirkt werden kann.

Disjunktive und sequentielle Kantenverfeinerung können auch so miteinander kombiniert werden, daß zunächst eine Kantenerlegung in wechselseitig ausschließende Kanten erfolgt und danach die disjunktiv verknüpften Kanten desselben Kantenbündels jeweils in Sequenzen aus verfeinerten Kanten und Knoten weiterzerlegt werden. Dieser Kombinationsfall geschieht in der Regel, wenn sich ein Produktionsschritt des GOZINTO-Graphen durch unterschiedliche Produktionsverfahren realisieren läßt. Es wird aber nicht ausgeschlossen, daß sich alternative Produktionsverfahren auch durch eine einfache disjunktive Kantenerlegung erfassen lassen. Dieser degenerierte Fall tritt ein, wenn die beteiligten Produktionsverfahren jeweils aus nur einem Arbeitsgang bestehen. Eine einfache disjunktive Kantenerlegung erfolgt aber auch dann, wenn für einen Arbeitsgang mindestens ein Ausweicarbeitsgang in Betracht kommt. Dann stellen der zunächst berücksichtigte Arbeitsgang und alle seine Ausweicarbeitsgänge ebenso alternative Arbeitsgänge dar, die den gleichen Übergang zwischen einer Vor- oder Zwischenproduktart und einer Zwischen- oder Endproduktart bewirken. Ob bei der Existenz solcher Ausweicarbeitsgänge bereits ein (degenerierter) Fall alternativer Produktionsverfahren vorliegt, hängt von der jeweils vorausgesetzten Definition eines Produktionsverfahrens ab. Dies wird hier aber nicht weiter vertieft. Alle disjunktiv verknüpften Einzelkanten aus demselben Kantenbündel werden in der gleichen Weise dargestellt, wie dies an früherer Stelle für Kanal/ Instanz-Netze eingeführt wurde.

Eine abweichende Repräsentationsweise findet sich bei DÖTTLING (1981), S. 53. Dort werden alternative Arbeitsgänge dargestellt, indem nur eine Kante des Präzedenzgraphen mit der Adjunktion der in Frage kommenden Arbeitsgänge beschriftet wird. Entsprechend werden von DÖTTLING (1981), S. 53f., ausschließlich konjunktive Kantenverknüpfungen berücksichtigt. Der Verf. folgt dieser Vorgehensweise aus zwei Gründen nicht. Erstens ist die adjunktive Arbeitsgangverknüpfung sachlogisch falsch, da tatsächlich ein disjunktives Verknüpfungsverhältnis vorliegt. Dieser Mangel ließe sich jedoch ohne Schwierigkeiten dadurch heilen, daß die adjunktiven durch disjunktive Kantenbeschriftungen ersetzt werden. Zweitens werden jedoch Arbeitsgangalternativen nicht mehr in der Graphentopologie explizit repräsentiert, sondern in der Beschriftung topologischer Graphenkomponenten "versteckt". Der Verf. vertritt jedoch die "formal-ästhetische" Einstellung, daß sich alle wichtigen Problemeterminanten in entsprechenden Komponenten der Graphentopologie widerspiegeln sollten.

13) Die Umkehrung gilt jedoch nicht. Denn derselbe Arbeitsgang kann *mehrere* Übergänge zwischen jeweils zwei auftragszugehörigen Vor-, Zwischen- oder Endproduktarten bewirken. Dies stellt bei synthetischer Produktionsweise sogar den Regelfall dar. Dort gehen wenigstens einmal durch die Ausführung desselben Arbeitsgangs mindestens zwei Vor- oder Zwischenproduktarten in eine gemeinsame Zwischen- oder Endproduktart ein.

14) Dies trifft auf die hier vorgelegte Fallstudie zu.

15) Die Arbeitsgänge werden in der Fallstudie durch Ausdrücke der Form "AG_k" notiert. Dabei vertritt das Konstantensymbol "k" eine beliebige natürlichzahlige, aber eindeutig identifizierende Kennung des jeweils betroffenen Arbeitsgangs.

16) Die Kantenanschriften des Präzedenzgraphen stellen daher Triplets dar: Ihre erste Komponente gibt an, wie viele Einheiten einer Vor- oder Zwischenproduktart bei der Herstellung einer Zwischen- oder Endprodukteinheit einzusetzen sind. Diese Information wird aus den Kantenanschriften des GOZINTO-Graphen übernommen. Die

zweite Komponente ist der Arbeitsgang, mit dem die Zwischen- oder Endprodukteinheit hergestellt werden soll. Die dritte Komponente spezifiziert die Bearbeitungsstation, auf welcher der Arbeitsgang ausgeführt werden soll.

17) Entsprechend wird zwischen einer "bemannten" und einer "vollautomatischen" ("unbemannten") Arbeitsgangausführung unterschieden.

18) Der Begriff der Ablaufstruktur eines Auftrags stellt den Oberbegriff zu den nachstehend eingeführten Präzedenz- und Alternativenstrukturen dar.

19) Daher rührt die Bezeichnung "Präzedenzgraph".

20) Die Nonlinearität von Präzedenzgraphen äußert sich erstens in den Verzweigungen bei der Ausführung von alternativen Arbeitsgängen. Diese Ausführungsverzweigungen liegen immer dann vor, wenn mehrere Ein- oder Ausgangskanten desselben Knotens miteinander disjunktiv verknüpft sind. Zweitens kommen nebenläufige Arbeitsgangausführungen in Betracht. Dies ist immer dann der Fall, wenn mehrere Ein- oder Ausgangskanten desselben Knotens miteinander konjunktiv verknüpft sind.

Die vorgenannten beiden Aspekte der Nonlinearität führen dazu, daß Präzedenzgraphen keineswegs - im Gegensatz zu den früher erwähnten Arbeitsganggraphen - Monographen darstellen müssen. Statt dessen kann es sich auch um Multigraphen handeln. Ein Präzedenzgraph nimmt die Gestalt eines Multigraphen an, wenn in ihm mindestens zwei Knoten existieren, die durch mehrere gleichsinnig gerichtete Kanten verknüpft sind. Eine solche Kantenschar kann auf zweifache Weise zustandekommen: Entweder läßt sich der Übergang zwischen den beiden benachbarten Knoten durch alternative Arbeitsgangausführungen realisieren. Oder es ist möglich, den Übergang durch nebenläufig ausgeführte Arbeitsgänge zu bewirken.

21) Den Präzedenzgraphen fehlen zwar noch einige Informationen, die für die Ausgestaltung von Arbeitsplänen erforderlich sind. Z.B. enthalten sie noch keine Angaben über die Ausführungsdauern von Arbeitsgängen. Gleiches gilt für die Werkzeuge, die zur Arbeitsgangausführung erforderlich sind. Doch lassen sich Präzedenzgraphen im Rahmen des Petrinetz-Konzepts so fortentwickeln, daß auch jene arbeitsplanspezifischen Informationen integriert werden. Dies wird nachfolgend bei der Konstruktion des Netzmoduls für die Repräsentation von Produktionsaufträgen konkret nachgewiesen. Dort werden die oben exemplarisch angeführten Informationen über Ausführungsdauern und Werkzeuge berücksichtigt. Daher bedeutet die Verfeinerung eines Präzedenzgraphen durch ein Auftragsnetz, daß der Prototyp eines nonlinearen Arbeitsplans zu einem echten nonlinearen Arbeitsplan ausreift.

22) Die Übereinstimmung braucht jedoch nicht für die erste Komponente der Anschriftentriplets zuzutreffen. Sie gibt die Anzahl der jeweils zu bearbeitenden Vor- oder Zwischenprodukte an. Diese Produktanzahlen können unterschiedlich ausfallen, obwohl sie zur selben Arbeitsgangausführung auf derselben Bearbeitungsstation gehören.

23) Die gleiche Konstruktionsidee, die dem hier entwickelten Kanal/Instanz-Netz zugrundeliegt, findet sich auch bei HILLION (1988a), S. 176f. Dort wird allerdings nur ein Stelle/Transition-Netz entworfen, dessen Transitionen stochastische Schaltdauern besitzen. Das prädikatenlogische Ausdrucksvermögen der hier behandelten Fallstudie wird daher von HILLION nicht erschlossen.

24) Der Knoten wird mit den Namen des Arbeitsgangs und der Bearbeitungsstation beschriftet.

25) Die Kanten werden mit denjenigen Produktanzahlen gewichtet, die bereits durch den ursprünglich vorgegebenen GOZINTO-Graphen eingeführt wurden. Die zuvor verwendeten Namen von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen entfallen dagegen in den Kantenanschriften, weil sie bereits zur Beschriftung der transitionsartigen Knoten dienen (vgl. die voranstehende Anmerkung). Da synthetische Produktionen zugelassen wurden, können die Eingangskanten von transitionsartigen Knoten mit einem Gewicht versehen sein, das mehrere Einheiten derselben Produktart ausweist. Ebenso kann jeder transitionsartige Knoten mehrere Eingangskanten für mehrere eingehende Vor- oder Zwischenproduktarten besitzen. Allerdings wurden analytische und austauschende Produktionen ausgeschlossen. Daher kann jeder transitionsartige Knoten nur genau eine Ausgangskante mit dem Gewicht "Eins" besitzen. Sie repräsentiert die eine Einheit der jeweils hergestellten Zwischen- oder Endproduktart.

26) Vgl. dazu die Ausführungen zur Konzeptualisierung von Werkstücken, insbesondere die Anmerkung zur Relativität des Produktbegriffs.

27) Die auftragsunspezifischen Werkstückmarken repräsentieren konkrete Objekte der Art "Werkstück", die zwecks Bearbeitung durch ein real vorhandenes Produktionssystem fließen. Die Werkstückmarken des hier angesprochenen Kanal/Instanz-Netzes und des daraus abgeleiteten Auftragsnetzes stellen hingegen abstrakte Objekte dar, die bei der Abwicklung eines Produktionsauftrages durch das zugehörige Auftragsnetz bewegt werden. Zwischen diesen abstrakten, jeweils auftragspezifischen Werkstückmarken einerseits und den konkreten, auftragsunspezifischen Werkstückmarken andererseits wird zwar später mittels der Synchronisationsstellen ein sachlicher Zusammenhang hergestellt. Aber es handelt sich um verschiedenartige Werkstückmarken. Das läßt schon daran erkennen, daß die Attributstruktur der auftragspezifischen Werkstückmarken mit der analogen Attributstruktur der früher definierten auftragsunspezifischen Werkstückmarken nicht übereinstimmt, sobald das hier betrachtete Kanal/Instanz-Netzes durch ein Synthetisches Netz als Auftragsnetz verfeinert wird.

Aus den vorgenannten Gründen müßte stets zwischen auftragsspezifischen und auftragsunspezifischen Werkstückmarken differenziert werden. Dies würde die Diktion jedoch erheblich aufblähen. Daher werden beide Markenarten gemeinsam nur als Werkstückmarken angesprochen, solange aus dem jeweils aktuellen Argumentationskontext ersichtlich ist, welche Art von Werkstückmarken thematisiert wird. Dagegen werden die beiden Markenarten in den Netzmodulen dieser Fallstudie immer eindeutig gekennzeichnet: Die auftragsunspezifische Werkstückmarke erhält in den Netzlegenden die Markensorte "werkstück". Ihr auftragsspezifisches Pendant wird durch die Markensorte "auftragswerkstück" erfaßt. Kopien der auftragsunspezifischen Werkstückmarke werden in den Netzgraphiken durch die Ausdrücke " m_{ws} " dargestellt, während die Kopien der auftragsspezifischen Werkstückmarke durch die Ausdrücke " m_{aw} " vertreten werden.

28) Diese Vorproduktanzahl läßt sich durch retrograde Auswertung des GOZINTO-Graphen ohne Schwierigkeiten ermitteln. Dabei kann auf die Matrizendarstellung von GOZINTO-Graphen zurückgegriffen werden; vgl. z.B. STEPAN (1988), S. 36f.; KERN, W. (1990a), S. 224.

Ebenso ist es möglich, die Vorproduktanzahl aus dem Kanal/Instanz-Netz selbst abzuleiten. Zu diesem Zweck wird das Netz zunächst als ein Stelle/Transition-Netz dargestellt (vgl. die nachfolgende Abb. 194). Die Kantengewichte werden dabei aus dem Kanal/Instanz-Netz übernommen. Danach wird die Richtung aller Netzkanten invertiert, so daß sie von der Stelle für die Endproduktart zu den Stellen für die Vorproduktarten zurückweisen. Alle Stellen des Netzes sind - mit einer Ausnahme - zunächst unmarkiert. Nur auf derjenigen Stelle, die der Endproduktart aus dem GOZINTO-Graphen entspricht, befinden sich unter der Ausgangsmarkierung genau so viele Kopien der Basismarke, wie Endprodukteinheiten hergestellt werden sollen. Für die hier betrachtete Fallstudie wird angenommen, daß genau 2 Einheiten der einen Endproduktart vorgegeben sind. Die aktivierten Transitionen dieses Stelle/Transition-Netzes werden so lange geschaltet, bis eine - nunmehr erwünschte - Deadlockmarkierung erreicht ist. Unter ihr befinden sich auf jeder Stelle, die einer Vorproduktart entspricht, genau so viele Kopien der Basismarke, wie Einheiten dieser Vorproduktart für die herzustellende Endproduktmenge erforderlich sind. Genau diese Markenanzahlen waren für die Ausgangsmarkierung des Kanal/Instanz-Netzes gesucht. Auf allen anderen Stellen des Stelle/Transition-Netzes befinden sich unter der schließlich erreichten Deadlockmarkierung keine Marken. Abb. 192 zeigt das modifizierte Stelle/Transition-Netz, das aus dem Kanal/Instanz-Netz der Abb. 179 abgeleitet ist. Abb. 193 stellt das gleiche modifizierte Stelle/Transition-Netz unter seiner erwünschten Deadlockmarkierung dar.

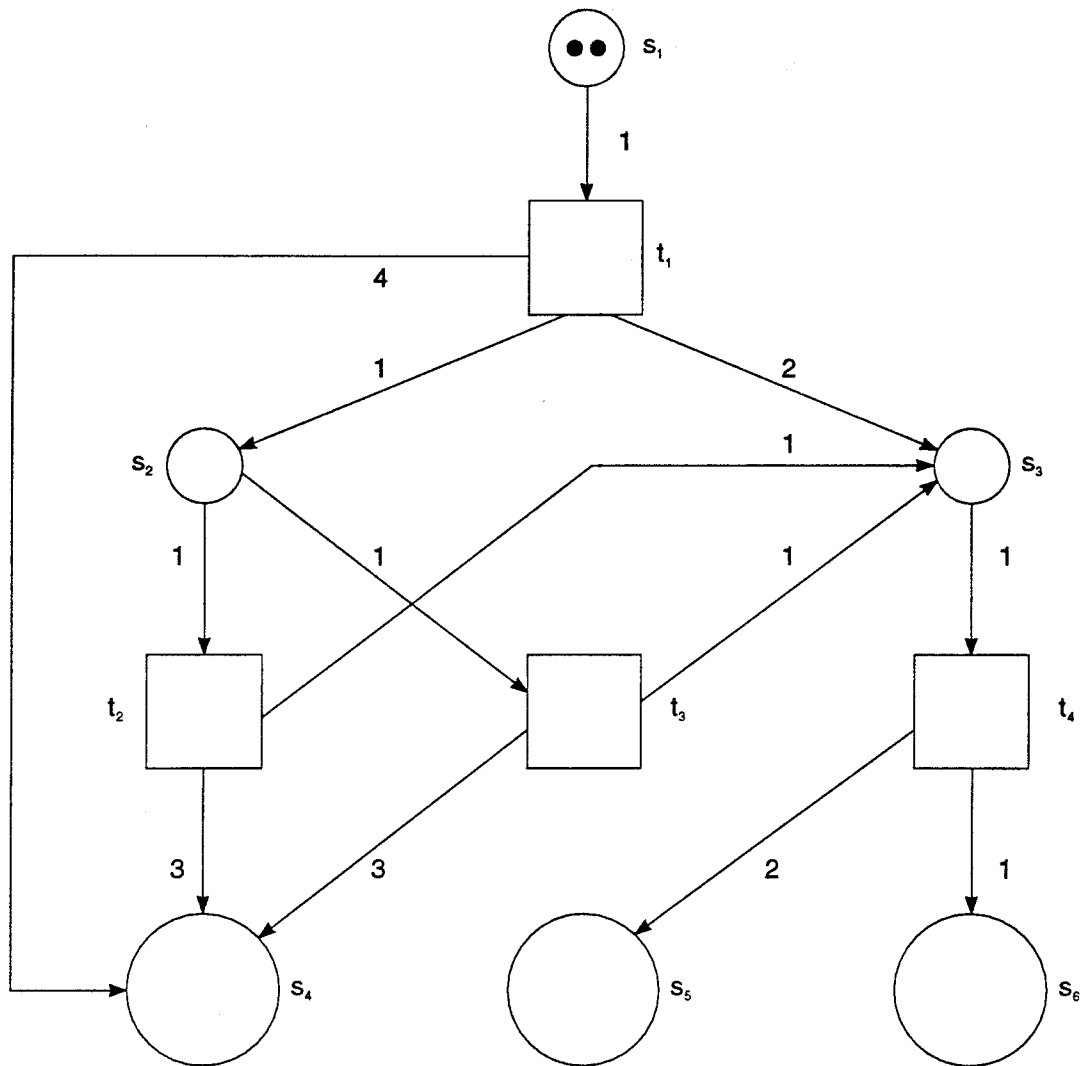


Abb. 192: Stelle/Transition-Netz eines Produktionsauftrags: Ausgangsmarkierung

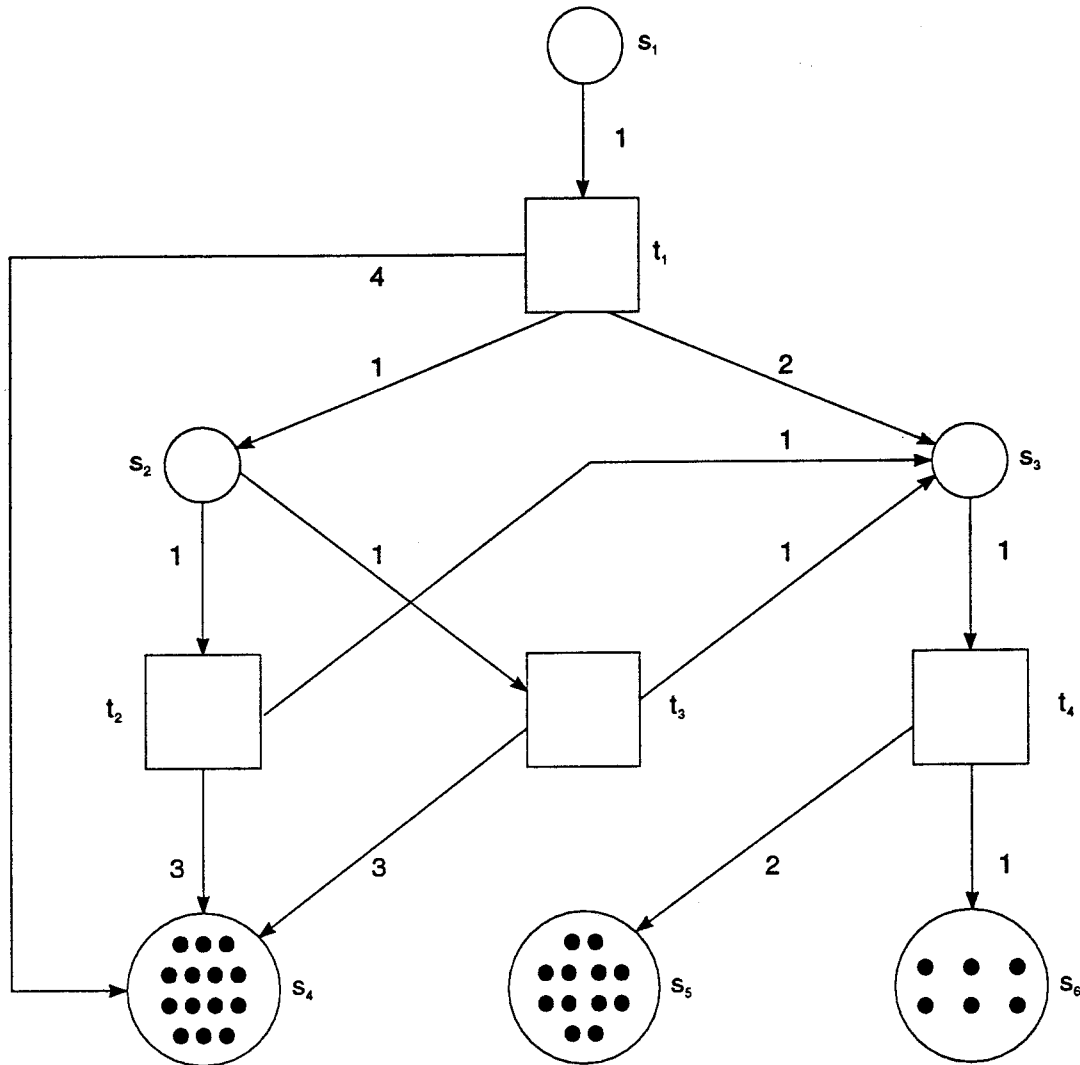


Abb. 193: Stelle/Transition-Netz eines Produktionsauftrags: erwünschte Endmarkierung

Die Berechnung der Vorproduktanzahlen mit der Hilfe eines Stelle/Transition-Netzes besitzt keine nennenswerte Praxisrelevanz, weil die eingangs erwähnte Auswertung von GOZINTO-Graphen rascher erfolgen kann. Dennoch wurde die netzgestützte Berechnungsweise angeführt, um zu verdeutlichen, daß sich das Petrinetz-Konzept auch für die Modellierung numerischer Aufgaben eignet. Es ist sogar möglich, beliebige rekursive Funktionen durch "Petrinetz-Computer" berechnen zu lassen. Dieser Aspekt "rechnender Netze" wurde bereits in einer früheren Anmerkung angedeutet.

29) Die Kopie einer auftragsspezifischen Werkstückmarke wird fortan der Einfachheit halber auch kurz als auftragsspezifische Werkstückmarke angesprochen. Darüber hinaus wird diese auftragsspezifische Werkstückmarke nur noch knapp als Werkstückmarke angesprochen, solange keine Verwechslungen mit (Kopien der) auftragsunspezifischen Werkstückmarke zu befürchten sind.

30) Der Bearbeitungszustand eines Werkstücks erfaßt keineswegs jeden Werkstückzustand, der im Zeitablauf vorgestellt werden kann. Er erstreckt sich vielmehr nur auf solche Werkstückzustände, die ein Werkstück einnimmt, bevor ein neuer Arbeitsgang an ihm ausgeführt wird. Alle anderen Werkstückzustände, die während der Ausführung von Arbeitsgängen bei kontinuierlicher Zeitskala stetig ineinander übergehen können, werden dagegen von den Bearbeitungszuständen nicht erfaßt. Statt dessen entsprechen die Bearbeitungszustände den diskreten Zeitskalen, die für die Konzeptualisierung der dynamischen Struktur von Produktionssystemen an früherer Stelle eingeführt wurden.

31) Beispielsweise ist der Bearbeitungszustand eines Werkstücks, dessen Marke sich auf der Stelle für ein Zwischenprodukt befindet, weiter vorangeschritten als der Bearbeitungszustand eines anderen Werkstücks, dessen Marke auf der Stelle für ein Vorprodukt liegt.

32) Die Identifizierung geschieht durch die Beschriftung der Stellen des Kanal/Instanz-Netzes mit jeweils einer Vor-, Zwischen- oder Endproduktart: Ein Werkstück, das durch eine Werkstückmarke im Kanal/Instanz-Netz repräsentiert wird, gehört in der aktuellen Produktionssituation zu derjenigen Produktart, mit der diejenige Stelle beschriftet ist, auf der sich die Werkstückmarke aktuell befindet.

Die Werkstückarten sind nicht mit den Werkstückklassen zu verwechseln, die an früherer Stelle eingeführt wurden. Denn die Werkstückarten qualifizieren Werkstücke in auftragsspezifischer Weise. Die Werkstückklassen gelten dagegen auftragsunabhängig. Beispielsweise kann ein Werkstück, das genau *einer* Werkstückklasse angehört, bei einem Produktionsauftrag zur Werkstückart "Zwischenprodukt" rechnen, während es bei einem anderen Auftrag zur Werkstückart "Endprodukt" zählt.

33) In Ausnahmefällen kann es auch nur eine oder überhaupt keine Zwischenproduktart durchlaufen.

34) Auf die problematische Frage, wie lange ein Werkstück seine Identität behält - und wann es in einem *anderen* Werkstück aufgeht, wird an anderer Stelle näher eingegangen.

35) Die Möglichkeit, mehrere Werkstücke zugleich zu erfassen, besteht dagegen nicht in den Präzedenzgraphen, die zum voranstehend erläuterten Typ der Zustandsgraphen gehören. Denn dort wird unterstellt, daß sich ein Produktionsauftrag auf die Bearbeitung von nur einem Werkstück erstreckt. Unter dieser einengenden Voraussetzung repräsentiert jeder Knoten im Zustandsgraphen den jeweils aktuellen Zustand dieses einen Werkstücks; vgl. DÖTTLING (1981), S. 47. Ein solcher Zustandsgraph entspricht aus der Perspektive des Petrinetz-Konzepts einem Netz, in dem unter jeder Markierung genau eine Stelle mit genau einer Marke belegt ist. Solche Netze gehören zur Klasse der Zustandsautomaten-Netze.

36) Das gilt entsprechend für das nachfolgend abgeleitete Auftragsnetz: Jede Markierung dieses Netzmoduls zeigt den Abwicklungszustand des repräsentierten Produktionsauftrags an. Allerdings enthält das Auftragsnetz neben Werkstückmarken auch noch andere Marken und verfeinerte Subnetze, die mit den Bearbeitungszuständen der auftragszugehörigen Werkstücke nicht unmittelbar zusammenhängen. Daher enthält der Abwicklungszustand eines Produktionsauftrags in der Gestalt, wie er durch die Markierung eines Auftragsnetzes dargestellt wird, mehr Informationen als die Gesamtheit der Bearbeitungszustände aller zugehörigen Werkstücke.

37) Die betroffenen Arbeitsgänge und Bearbeitungsstationen gehen jeweils aus den Beschriftungen der transitionsartigen Knoten des Kanal/Instanz-Netzes eindeutig hervor.

38) Die Subnetze entsprechen in einer groben Annäherung jeweils dem Kernnetz, das in Abb. 164 für die Modellierung einer Bearbeitungsstation vorgestellt wurde. Unterschiede bestehen allerdings bei genauerer Betrachtung hinsichtlich der Ein- und Ausgangspuffer der Bearbeitungsstationen. Darüber hinaus werden in den Subnetzen des Stelle/Transition-Netzes ausschließlich Kopien der unstrukturierten Basismarke verwendet. Durch das Kernnetz einer Bearbeitungsstation fließen dagegen Kopien der strukturierten Werkstückmarke.

39) Dies ermöglicht die hier bevorzugte Darstellungsweise von Petrinetzen, ihre Stellen so anzuordnen, daß der Markenfluß die Netze von oben nach unten durchsetzt.

40) Die Werkstücke brauchen noch nicht einmal einem Produktionsauftrag zugeordnet zu sein. Dies kann auf vorgelagerte Werkstücke zutreffen, die sich im zentralen Werkstücklager befinden.

41) Die Sorte der auftragsspezifischen Werkstückmarke wird daher als "auftragswerkstück" bezeichnet.

42) Bei einem Attribut, das sowohl in der auftragsspezifischen als auch in der auftragsunspezifischen Werkstückmarke enthalten ist, gilt es eine modellierungstechnische Besonderheit zu beachten. Sie betrifft je eine Kopie der auftragsspezifischen und eine Kopie der auftragsunspezifischen Werkstückmarke, die beide gemeinsam dasselbe Werkstück in unterschiedlichen Netzmodulen repräsentieren. Dennoch können beide Markenkopien unter derselben Markierung des gesamten Netzmodells für dasselbe gemeinsame Attribut unterschiedliche Ausprägungen aufweisen. Diese potentielle Inkongruenz von Ausprägungen desselben Markenattributs aus den beiden unterschiedlichen Werkstückmarken hat eine formale und eine materielle Bedeutung.

In formaler Hinsicht knüpft sie an die Lokalität der Variablendefinition an, die in einer früheren Anmerkung dargelegt wurde. Denn es kann nicht ausgeschlossen werden, daß im Netzmodell die Ausprägungen desselben Markenattributs in unterschiedlichen Werkstückmarken durch die gleiche Variable vertreten werden. Wäre diese Variable global definiert, so müßten alle ihre Vorkommnisse durch dieselbe konstante Attributausprägung gebunden werden. Dann könnte es zu der oben erwähnten Inkongruenz überhaupt nicht kommen. Sie ist aber - wie in Kürze dargelegt wird - erforderlich, um endliche Kommunikationsgeschwindigkeiten zu berücksichtigen. Daher ermöglichen erst lokal definierte Variablen, daß verschiedene Vorkommnisse derselben Variable in unterschiedlichen Werkstückmarken durch verschiedene konstante Attributausprägungen gebunden werden.

Die materielle Bedeutung der potentiellen Inkongruenz von Ausprägungen desselben Markenattributs in unterschiedlichen Werkstückmarken hängt damit zusammen, daß die auftragsunspezifische und die auftragspezifische Werkstückmarke zu verschiedenen Netzmodulen gehören. Die auftragspezifische Werkstückmarke ist auf das Netzmodul beschränkt, das einen Produktionsauftrag repräsentiert. Die auftragsunspezifische Werkstückmarke bewegt sich dagegen in der Gestalt ihrer Kopien durch die Netzmodule der Bearbeitungs- und Lagerstationen sowie durch das Transportnetz. Das auftragsdarstellende Netzmodul wird mit allen anderen Netzmodulen über Synchronisationsstellen verknüpft. Sie dienen dazu, Informationen zwischen den Netzmodulen auszutauschen. Diese Informationen geben Auskunft über Entscheidungsmöglichkeiten und -resultate, die innerhalb eines Netzmoduls offen- bzw. feststehen, aber für die umgebenden anderen Netzmodule von Interesse sein können. Die Informationen werden durch spezielle Attributmarken modelliert, die als Informationsmarken eingeführt wurden. Ihre Attributausprägungen drücken die aktuellen Informationsinhalte aus. Durch Absenden, Lesen und Empfangen von (Kopien der) Informationsmarken wird der Informationsaustausch zwischen den Netzmodulen realisiert. Die Bewegungen der Informationsmarken zwischen dem Innern der Netzmodule und den Synchronisationsstellen an den Moduloberflächen konstituiert einen Kommunikationsfluß zwischen den Netzmodulen. Da eine Informationsmarke nicht zur selben Zeit an verschiedenen Stellen zugleich sein kann, besitzt dieser Kommunikationsfluß eine endliche Geschwindigkeit für die Informationsübertragung. In dieser Hinsicht kommt das Petrinetz-Konzept den physikalischen Randbedingungen realer Informationsverarbeitungssysteme erstaunlich nahe. Denn auch dort werden systeminterne Kommunikationsflüsse durch endliche Informationsübertragungsgeschwindigkeiten eingeschränkt. Die Restriktion endlicher Kommunikationsgeschwindigkeiten bedeutet für die modulare Gestaltung eines Netzmodells, daß Veränderungen, die in einem Netzmodul geschehen sind, durch Informationsaustausch mit einem anderen Netzmodul dort erst verzögert bekannt werden. Zwischen dem Absenden und dem Empfangen der Information über die eingetretene Veränderung wird derselbe Sachverhalt in den beiden involvierten Netzmodulen inkongruent repräsentiert: Im erstgenannten Netzmodul ist die sachverhaltskonstituierte Veränderung bereits eingetreten - im letztgenannten Netzmodul liegt noch keine Information über diesen Sachverhalt vor. Genau dieser Inkongruenzfall liegt auch bei der oben dargestellten Unterschiedlichkeit von Ausprägungen desselben Attributs vor, die das eine Mal zu einer Kopie der auftragsunspezifischen und das andere Mal zu einer Kopie der auftragspezifischen Werkstückmarke gehören.

Beispielsweise kann ein Werkstück in den Ausgangspuffer einer Bearbeitungsstation nach dem Abschluß der letzten Arbeitsgangausführung abgelegt worden sein. Das Attribut "werkstückstatus" nimmt zunächst sowohl bei der auftragsunspezifischen als auch bei der auftragspezifischen Werkstückmarke die Ausprägung "ausgelastet" an. Die Kopie der auftragsunspezifischen Werkstückmarke aus dem Transportnetz nimmt danach für ihr Attribut "werkstückstatus" die Ausprägungen "auf_Transportmittelzuordnung_wartend", "auf_Transportmittelbeladung_wartend" und "transportiert" an, sobald das repräsentierte Werkstück mit seinem nächsten Arbeitsgang einer neuen Bearbeitungsstation zugeordnet worden ist, ein Transportmittel angefordert hat bzw. auf das Transportmittel geladen wurde. Diese Ausprägungsveränderungen des Attributs "werkstückstatus" werden dagegen auf dem geringeren Detaillierungsniveau des Auftragsnetzes nicht erfaßt. Dort bleibt die Ausprägung "ausgelastet" für das Attribut "werkstückstatus" so lange erhalten, bis die Nachricht eintrifft, daß das Werkstück in den Eingangspuffer der neuen Bearbeitungsstation abgelegt worden ist. Erst dann nimmt die Kopie der auftragspezifischen Werkstückmarke die neue Attributausprägung "auf_einlastung_wartend" an. Aber auch diese neue Attributausprägung stellt sich im Auftragsnetz nur mit einer Verzögerung ein. Denn zunächst wird nur eine Kopie der Informationsmarke in dem Augenblick erzeugt, in dem das Werkstück vom Transportmittel an den Eingangspuffer der neuen Bearbeitungsstation übergeben wird. Die Kopie der Informationsmarke wird an das Auftragsnetz abgesandt. Bevor die zugehörige Informationsmarkenkopie via Synchronisationsstelle dort zur Kenntnis gelangt ist, weist das Attribut "werkstückstatus" der Kopie der auftragspezifischen Werkstückmarke weiterhin die Ausprägung "ausgelastet" auf. Dennoch besitzt die Kopie der auftragsunspezifischen Werkstückmarke im Transportnetz bereits die Ausprägung "auf_einlastung_wartend". Solange diese Informationslücke klafft, liegt der o.a. Inkongruenzfall vor: Dasselbe Attribut "werkstückstatus" besitzt bei der auftragsunspezifischen Werkstückmarkenkopie im Transportnetz die aktuelle Ausprägung "auf_einlastung_wartend", während es bei der auftragspezifischen Werkstückmarkenkopie im Auftragsnetz noch die Ausprägung "ausgelastet" anzeigt. Erst wenn im Auftragsnetz die Information über das Entladen des Werkstücks am Eingangspuffer der neuen Bearbeitungsstation eingetroffen und verarbeitet ist, nimmt auch dort das Attribut "werkstückstatus" in der Kopie der auftragspezifischen Werkstückmarke die aktuelle Ausprägung "auf_einlastung_wartend" an. Dann ist die voranstehende Inkongruenz beseitigt.

Die endliche Kommunikationsgeschwindigkeit bei der Informationsübertragung zwischen Netzmodulen erfordert also, daß die Inkongruenz von Ausprägungen desselben Markenattributs in unterschiedlichen (Kopien von) Marken grundsätzlich zugelassen werden muß. Zugleich hat das Beispiel der Werkstückmarken verdeutlicht, daß diese Inkongruenz nur vorübergehenden Charakter besitzt (sofern der Informationsaustausch zwischen den Netzmodulen "korrekt" modelliert ist). Sie besteht nur so lange, bis Informationsungleichgewichte zwischen Netzmodulen durch Informationsaustausch ausgeglichen sind. Darüber hinaus läßt sich noch eine Berührung mit dem Konzept der (trans-)aktionsorientierten Informationsverarbeitung erkennen. Auch bei diesem Informationsverarbeitungskonzept wird eine temporäre Inkongruenz zugelassen, die so lange andauern darf, wie eine informationsverarbeitende Transaktion begonnen, aber noch nicht abgeschlossen ist. Schließlich wird auf die Vorbehalte gegenüber dem naiven Abbildungsbegriff verwiesen, die früher im modelltheoretischen Kontext skizziert wurden. Es zeigt sich hier, daß

dasselbe reale Objekt - ein Werkstück - innerhalb eines begrenzten Zeitraums durch zwei inkongruente Repräsentationsformen vertreten wird. Beide Objektrepräsentationen können aufgrund ihrer *verschiedenen* Attributausprägungen nicht zugleich "das" - im naiven Sinne verstandene - Abbild des modellierten realen Objekts darstellen.

Allerdings ist auf eine Besonderheit der hier vorgenommenen Modellierung von Kommunikationsflüssen hinzuweisen. Es werden zwar (mindestens) zwei Netzmarkierungen unterschieden: Die erste repräsentierte den Zustand des Netzmodells, nachdem die Kopie einer Informationsmarke von einem Netzmodul zwar abgesandt, aber von einem anderen Netzmodul noch nicht empfangen worden ist. Die zweite gibt dagegen den Modellzustand wieder, in dem die Informationsmarkenkopie das andere Netzmodul erreicht hat und dort zur Kenntnis genommen worden ist. Diese Abfolge von Netzmarkierungen entspricht der endlichen Informationsausbreitungsgeschwindigkeit. Jedoch werden die Kopien von Informationsmarken durch Transitionen fortgeschaltet, die im Netzmodell der Fallstudie *keine* Zeit verbrauchen. Daher liegen die zuvor skizzierten, aufeinander folgenden Netzmarkierungen im *selben* Zeitpunkt vor. Daraus könnte gefolgert werden, die Informationen breiteten sich doch unendlich schnell aus. Dies wäre aber ein Fehlschluß. Denn die Gleichzeitigkeit der involvierten Netzmarkierungen beruht lediglich auf der *Abstraktion* des Netzmodells von allen positiven Zeitdauern, die für das reale Übermitteln von Informationen immer anfallen. Diese Zeitdauern könnten jedoch von den Transitionen, welche die Kopien der Informationsmarken im Netzmodell fortschalten, genau so erfaßt werden, wie es für alle zeitverbrauchenden Arbeitsgangausführungen geschieht. Auf diese realitätsnähere Modellierung des Informationsaustausch wurde lediglich verzichtet, um eine weitere Komplizierung des Netzmodells zu vermeiden. Darüber hinaus erlangen endliche Kommunikationsgeschwindigkeiten für die Prozeßkoordinierung in Produktionssystemen keine praktische Bedeutung.

43) Der Werkstückname bleibt so lange unspezifiziert, wie die (Kopie der) Werkstückmarke ein beliebiges Werkstück repräsentiert. Dies ist zu Beginn der Auftragsabwicklung der Fall, wenn nur feststeht, wie viele Werkstücke welcher Werkstückarten im Eingangslager des Produktionssystems für die Auftragsabwicklung bereitstehen müssen. Dann nimmt das Attribut der Sorte "werkstückname" die Variable "Name" als Ausprägung an. Erst wenn im Eingangslager bestimmte Werkstücke dem Produktionsauftrag fest zugeordnet sind, nimmt der Werkstückname die entsprechende konstante Ausprägung an. Daher handelt es sich beim Attribut "werkstückname" grundsätzlich um ein *variables* Attribut, auch wenn ihm nach der Werkstückzuordnung im Eingangslager feste Ausprägungen zugewiesen werden. Gleiches gilt für die nachstehende Werkstückklasse.

44) Darüber hinaus entfallen die Attribute "werkstückzugehörigkeit" und "werkstückzuordnung". Das erstgenannte Attribut wäre abundant, da das Netzmodul ohnehin speziell auf denjenigen Produktionsauftrag zugeschnitten ist, zu dem das auftragsspezifische Werkstück gehört. Die Werkstückzuordnung geht dagegen aus der Topologie des Auftragsnetzes und derjenigen Stelle, auf der sich eine Kopie der auftragsspezifischen Werkstückmarke aktuell befindet, eindeutig hervor. Daher braucht auch das letztgenannte Attribut nicht berücksichtigt zu werden.

45) Diese werkstückbeschreibenden Attribute können zwar bei der Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen eine Rolle spielen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn die Arbeitsgangzuordnung berücksichtigen soll, welche Herstellkosten bisher für die Bearbeitungsobjekte (Werkstücke) des jeweils betrachteten Arbeitsgangs angefallen sind. Solche Attributausprägungen können jedoch jederzeit über Informationskanten von solchen Stellen erfragt werden, auf denen sich die betroffenen Werkstücke befinden. Dies geschieht auch im hier entfalteten Netzmodul durch die Schnittstelle $s_{P.A.B2}$.

46) Die Ausprägung dieses Attributes wird vor allem für das Schalten der Transition "subaufträge_anstoßen_AG3" (t_{27}) benötigt. Bei der Spezifizierung ihrer Schaltvorschrift erlangt das Markenattribut "werkstückort" allerdings eine wesentliche Rolle. Denn nur mit Hilfe seiner aktuellen Ausprägung ist es möglich, eine Informationsmarke der Sorte "werkstücktransport" so an das Netzmodul des Transportsystems abzusenden, daß dort der Ausgangspuffer derjenigen Bearbeitungsstation aufgefunden wird, auf sich dem das betroffene Werkstück aktuell befindet. Ein solches Lokalisierungsproblem kann immer dann eintreten, wenn sich der jeweils vorangehende Arbeitsgang (hier: "AG_2") auf alternativen Bearbeitungsstationen ausführen ließ. In diesem Fall bleibt es im Rahmen der Arbeitsplanung unbestimmt, auf welchem der Ausgangspuffer jener alternativen Bearbeitungsstationen das bearbeitete Werkstück schließlich vorliegt. Daher muß dem nächsten Arbeitsgang (hier: "AG_3") mitgeteilt werden, auf welchem Ausgangspuffer das Werkstück am Ende der vorangehenden Arbeitsgangausführung tatsächlich abgelegt worden ist. Genau diese Mitteilungsfunktion erfüllt das Attribut "werkstückort" in der auftragsspezifischen Werkstückmarke. Auf dieselbe Mitteilungsfunktion wird in der Schaltvorschrift der Transition t_{36} am Ende der Auftragsabwicklung zurückgegriffen.

47) In der hier betrachteten Fallstudie läßt sich nur der eine Arbeitsgang "AG_1" als erster ausführen. Die Menge aller Arbeitsgänge, mit deren Ausführungen sich die Abwicklung eines Produktionsauftrags beginnen läßt, kann jedoch auch mehrere Elemente umfassen. Wenn dies der Fall ist, ist es möglich, mehrere erste Arbeitsgänge nebenläufig auszuführen.

48) Um festzustellen, ob eine erste Arbeitsgangausführung begonnen werden kann, werden zunächst durch das Schalten der Transition "vorproduktverfügbarkeit" für jede Vorproduktart des betrachteten Produktionsauftrags so viele Kopien der Basismarke erzeugt, wie Einheiten der betroffenen Vorproduktart für die Auftragsabwicklung ins-

gesamt benötigt werden. Mit Hilfe der Informationsmarke "werkstückeinlastung", wird überprüft, ob sich im Eingangslager des Produktionssystems entsprechend viele geeignete Werkstücke befinden. Ein Werkstück ist genau dann geeignet, wenn es noch nicht für einen Produktionsauftrag reserviert ist und wenn seine Werkstückklasse der jeweils untersuchten Vorproduktart entspricht. Für die Entsprechungen zwischen Werkstückklassen und Vorproduktarten wird vereinbart, daß den Vorproduktarten VP_4 , VP_5 und VP_6 die Werkstückklassen WSK_1 , WSK_2 bzw. WSK_3 zugeordnet sind. Analog dazu werden den Zwischen- und Endproduktarten ZP_2 , ZP_3 und EP_1 die Werkstückklassen WSK_4 , WSK_5 bzw. WSK_6 zugeordnet. Diese Festlegungen werden später als Wertzuweisungen für Konstantensymbole wiedergegeben, die zu Beginn der Netzlegende des Auftragsnetzes erfolgen. Sobald festgestellt wird, daß sich für (mindestens) einen ersten Arbeitsgang alle benötigten Werkstücke im Eingangslager reservieren ließen, wird die Ausführung dieses Arbeitsgangs eingeleitet. (Falls diese Feststellung auf mehrere erste Aufträge zutrifft, können ihre Ausführungen nebenläufig eingeleitet werden.) Zu diesem Zweck werden Lageraufträge an das Eingangslager des Produktionssystems erteilt, die benötigten und reservierten Werkstücke im Ausgangspuffer der Lagerstation bereitzustellen. Von dort sind sie zu derjenigen Bearbeitungsstation zu transportieren, die für die Arbeitsgangausführung nach Maßgabe des zugrundeliegenden Arbeitsplans vorgesehen ist.

Es kann jedoch auch der Fall eintreten, daß sich für keinen ersten Arbeitsgang alle benötigten Werkstücke im Eingangslager des Produktionssystems reservieren lassen. In diesem Fall hat die Auftragsabwicklung zwar schon dispositionsbedingt begonnen. Aber sie kann nicht fortgesetzt werden, weil es unmöglich ist, eine erste Arbeitsgangausführung einzuleiten. Es kann sogar noch schärfer gefordert werden, daß die Abwicklung des Produktionsauftrags frühestens dann fortgesetzt werden kann, wenn *alle* Werkstücke im Eingangslager reserviert worden sind, die während der Auftragsabwicklung benötigt werden. Um diese Anforderung zu modellieren, reicht es in der Fallstudie aus, die Transition "lageraufträge_erteilen_AG_1" mit den Stellen "Erforderliche_vorproduktanzahl_VP_4", "Erforderliche_vorproduktanzahl_VP_5" und "Erforderliche_vorproduktanzahl_VP_6" durch jeweils eine Inhibitorkante zu verknüpfen. Diese Konstruktion unterbleibt hier jedoch, um dem Koordinierungsträger den Freiheitsgrad einzuräumen, die Ausführung einzelner Arbeitsgänge auch dann schon beginnen zu dürfen, wenn noch nicht die Vorprodukteinheiten für *alle* auftragszugehörigen Arbeitsgänge im Eingangslager bereitstehen. Es steht in der (größtmöglichen) Auswahlfreiheit des Koordinierungsträgers, ob er entweder mit der Arbeitsgangausführung schon frühzeitig beginnen oder aber erst die Bereitstellung aller Vorprodukteinheiten abwarten möchte.

49) Die Topologie und die festen Anschriften des Netzausschnitts, durch den die Kopie der Auftragsmarke fließt, drücken jene Aspekte aus, die sich gegenüber wiederholten Abwicklungen des gleichen Auftrags invariant verhalten. Dazu gehören insbesondere die Klassen und Anzahlen der Werkstücke, die bei Abwicklungsbeginn im Eingangslager des Produktionssystems bereitstehen müssen. Andere Auftragsaspekte, deren Ausprägungen sich bei wiederholter Auftragsabwicklung verändern können, werden dagegen als Attributausprägungen der Auftragsmarke modelliert. Auf diese Weise ist es möglich, durch unterschiedliche Ausgangsmarkierungen des Auftragsnetzes verschiedene Abwicklungsvarianten des gleichen Auftrags zu berücksichtigen. Beispielsweise muß damit gerechnet werden, daß der veranschlagte Auftragswert in Abhängigkeit von den aktuellen Absatzmarktbedingungen variiert oder daß sich die Losgröße bei Auftragswiederholungen verändert.

50) Ihre Attribute stimmen zum Teil mit den oben eingeführten Attributen der auftragspezifischen Werkstückmarke überein. Insofern werden sie hier nicht noch einmal erläutert.

51) Die Auftragslosgröße gibt an, wie viele Einheiten der einen auftragspezifischen Endproduktart hergestellt werden sollen. Durch eine spezielle Schaltregel und entsprechende Kantenanschriften wird im Teilnetz der Auftragsmarke erreicht, daß im Eingangslager des Produktionssystems von jeder Vorproduktart (Werkstückklasse) genau so viele Einheiten angefordert werden, wie für die Herstellung der Auftragslosgröße erforderlich ist. Dabei fließt in die Schaltregel die Information des GOZINTO-Graphen ein, wie viele Einheiten jeder Vorproduktart zur Erzeugung einer Endprodukteinheit benötigt werden. Durch Kombination mit der Ausprägung des Losgrößenattributs in der (Kopie der) Auftragsmarke wird daraus die insgesamt erforderliche Vorproduktanzahl für jede Vorproduktart erzeugt. Mit Hilfe einer variablen Kantenanschrift werden entsprechend viele Kopien der Werkstückmarke auf jenen Stellen des Auftragsnetzes abgelegt, welche die jeweils betroffenen Vorproduktarten repräsentieren. Auf diese Weise wird die o.a. Ausgangsmarkierung des zunächst präsentierten Kanal/Instanz-Netzes im verfeinerten Synthetischen Netz systematisch generiert.

52) Ebenso könnte aus Überlegungen, die Kapitalbindungskosten niedrig zu halten, ein Fertigstellungstermin spezifiziert werden, der nach Möglichkeit nicht unterschritten werden soll. Darauf wird in dieser Fallstudie jedoch der Übersichtlichkeit halber verzichtet. Da nur der spätest zulässige Fertigstellungstermin Berücksichtigung findet, wird er in der Fallstudie auch kurz als Fertigstellungstermin bezeichnet. Die konkrete Angabe des Fertigstellungstermins fällt in der Fallstudie unbefriedigend aus, weil für die Systemzeit die einfache ganzzahlige Zeitskala in der Dimension "Minuten" vorausgesetzt wurde. Auf deren geringe Ausdrucksmächtigkeit und die Unmöglichkeit, Kalenderdaten unmittelbar wiederzugeben, wurde bereits in einer früheren Anmerkung hingewiesen. Dort klang allerdings auch schon an, daß die Fallstudie ohne Schwierigkeiten durch eine komfortablere Darstellungsweise der Systemzeit erweitert werden könnte. Dies Option wird hier aber nicht verwirklicht. Statt dessen bleibt es bei der ganzzahligen Systemzeitmessung. Für die Umrechnung von Kalenderdaten auf Minutenangaben wird wiederum auf das Zeitraster

62) Es handelt sich um den Quotienten aus der Summe aller werkstückspezifischen Lagerdauern einerseits und der Summe aller werkstückspezifischen Durchlaufzeiten andererseits.

63) Er wird als der Quotient aus der Summe aller werkstückspezifischen Wartedauern einerseits und der Summe aller werkstückspezifischen Durchlaufzeiten andererseits bestimmt.

Auf den ersten Blick mag es irritieren, daß im Divisor der bearbeitungs-, transport-, lager- und wartebedingten Durchlaufzeitanteil nicht die *auftragsspezifische* Durchlaufzeit (multipliziert mit der auftragszugehörigen Werkstückanzahl), sondern die *werkstückspezifischen* Durchlaufzeiten angesetzt werden. Diese Vorgehensweise empfiehlt sich jedoch aus zwei Gründen. Erstens führt die Werkstückanzahl eines Produktionsauftrags als Multiplikator der Auftragsdurchlaufzeit zu Verzerrungen, sobald eine synthetische Produktion vorliegt. Denn dann werden mindestens einmal alte Werkstücke zu einem neuen Werkstück verschmolzen. Die korrekte Behandlung solcher Verschmelzungsfälle wurde bereits erörtert. Die Addition der werkstückspezifischen Durchlaufzeiten verhält sich dagegen auch bei synthetischen Produktionen verzerrungsfrei. Zweitens kann der Einheitswert 1,0 für die Summe der vier o.a. Durchlaufzeitanteile nur dann garantiert werden, wenn die werkstückspezifischen Durchlaufzeiten benutzt werden. Denn der Vorlagerbeginn jedes Werkstücks braucht nicht mit dem Abwicklungsbeginn des Produktionsauftrags zusammenzufallen, zu dem sie gehören. Statt dessen können sich Werkstücke im Eingangslager des Produktionssystems befinden, noch bevor die Abwicklung ihres Produktionsauftrags eingeleitet wird. Daher ist es möglich, daß sowohl die Lagerdauern als auch die Durchlaufzeiten einzelner Werkstücke zum Teil zeitlich früher positioniert sind als die auftragsspezifische Durchlaufzeit. Diese Diskrepanz wird jedoch nicht wirksam, weil in den Berechnungsvorschriften der vier o.a. Durchlaufzeitanteile stets auf die werkstückspezifischen Durchlaufzeiten Bezug genommen wurde.

64) Die Bearbeitungskosten eines Auftrags werden als Summe der werkstückspezifischen Bearbeitungskosten für alle zugehörigen Werkstücke berechnet. Dies geschieht, sobald sich alle fertigbearbeiteten Werkstücke im Ausgangslager des Produktionssystems befinden, durch das Schalten der Transition für das Bearbeitungsende.

65) Diese Transportkosten werden als transportauftragsspezifische Transportkosten von Transportmitteln berechnet.

66) Die Transportkosten eines Auftrags ergeben sich als Summe der werkstückspezifischen Transportkosten für alle zugehörigen Werkstücke. Wenn alle Werkstücke fertigbearbeitet und im Ausgangslager des Produktionssystems eingetroffen sind, werden ihre individuellen Transportkosten durch das Schalten der Transition für das Bearbeitungsende zu den auftragsspezifischen Transportkosten addiert.

67) Die auftragsspezifischen Lagerkosten werden als Summe der werkstückspezifischen Lagerkosten für alle Werkstücke berechnet, die zum Produktionsauftrag gehören. Das Schalten der Transition für das Abwicklungsende veranlaßt zu diesem Zweck, daß alle auftragszugehörigen Werkstücke aus dem Ausgangslager des Produktionssystems entfernt werden. Dabei werden die werkstückspezifischen Lagerkosten ein letztes Mal ermittelt und aufaddiert. Auf diese Weise lassen sich noch alle Lagerkosten berücksichtigen, die während der Nachlagerzeit der Werkstücke angefallen sind.

68) Die Kapitalbindungskosten eines Auftrags sind die Summe der werkstückspezifischen Kapitalbindungskosten aller Werkstücke, die sich beim Abwicklungsende fertigbearbeitet im Ausgangslager des Produktionssystems befinden. Wie schon bei den Transportkosten geschehen, wird die Entfernung dieser Werkstücke aus dem Ausgangslager veranlaßt. Dabei werden die werkstückspezifischen Kapitalbindungskosten ein letztes Mal berechnet und zusammengefaßt. Dadurch werden die alten Kapitalbindungskosten jedes fertigbearbeiteten Werkstücks um die kalkulatorischen Zinsen auf diejenige Kapitalbindungszunahme erhöht, die während der Nachlagerzeit des Werkstücks eingetreten ist.

69) Die auftragsspezifischen Herstellkosten werden ebenso als auftragsspezifische Produktionskosten bezeichnet. Sie sind die Summe der werkstückspezifischen Herstellkosten. Die Berechnung der werkstückspezifischen Herstellkosten wird im Zeitpunkt des Abwicklungsendes ein letztes Mal angestoßen. Dies geschieht durch die Entscheidung, den Produktionsauftrag auszulasten. Dabei werden die werkstückspezifischen Herstellkosten in der gleichen Weise ermittelt, wie es für die werkstückspezifischen Transport- und Kapitalbindungskosten der Fall war.

70) Es werden nur diejenigen Informationen berücksichtigt, die für die Zuordnung einer Bearbeitungsstation und für die Arbeitsgangeinlastung an einer Bearbeitungsstation benötigt werden. Die Arbeitsgangeinlastung wurde bereits modelliert. Auf die Stationszuordnung wird an späterer Stelle näher eingegangen werden. Die Vielfalt der Informationen, die aus produktionstechnischer Perspektive für die Ausführung eines Arbeitsgangs eine Rolle spielen könnten, wird dabei keineswegs ausgeschöpft. (Dies wurde schon in einer früheren Anmerkung begründet.) Vgl. statt dessen die detaillierten Darstellungen bei SPUR (1980), S. 35ff. u. 392ff., insbesondere S. 38 u. 394; vgl. auch REFA (1985c), S. 134f., 164f., 166(ff.), 194ff. u. 246ff.; KRAUSE, F. (1989b), S. 554; HEBBELER (1991), S. 272, 274 u. 283ff.

Die vorgenannten Quellen beziehen sich überwiegend auf Arbeitspläne, in denen die ausführungrelevanten Informationen über Arbeitsgänge dokumentiert sind. Beispielsweise können Arbeitspläne Auskünfte über Fertigungszeichnungen umfassen, die bei der Arbeitsgangausführung visuell unterstützen; vgl. REFA (1985c), S. 167

("Zeichnungsnummer") u. 248; KERN,W. (1990a), S. 288, Abb. 90 (Zeichnungs-Nr.); HEBBELER (1991), S. 275. Ebenso kommen Steuerungsprogramme (Teileprogramme) von Bearbeitungsmaschinen in Betracht; vgl. STUTE (1978a), S. 88; HEBBELER (1991), S. 275. Es wird davon abgesehen, ob diese Programme für die Steuerung der Arbeitsgangausführung auf Bearbeitungsmaschinen im Arbeitsplan selbst stehen oder ob sich dort nur ein Verweis auf den Speicherplatz befindet, von dem aus sie abgerufen werden können. Schließlich kommen auch noch ergänzende Arbeitsanweisungen in Betracht, die z.B. bei REFA (1985c), S. 248ff., näher erläutert werden. Vgl. darüber hinaus die Hinweise in nachfolgenden Anmerkungen auf weitere Informationen, die in Arbeitsplänen zur Unterstützung Arbeitsgangausführungen enthalten sein können.

71) Die Menge aller Arbeitsgänge, die als jeweils nächste ausgeführt werden können, heißt die Folgearbeitsgangmenge des Werkstücks.

72) Daher zeigt jede Markenkopie durch die Kombination der Ausprägungen ihrer gruppenspezifischen Attribute genau eine konkrete Ausführungsoption für einen nächsten Arbeitsgang an.

73) Vgl. ALDINGER (1985a), S. 68f. Er befaßt sich mit den "zuordnungsrelevanten Eigenschaften" von Arbeitsgängen. Sie sollen im Rahmen einer Maschinenbelegungsplanung herangezogen werden, um die auszuführenden Arbeitsgänge den noch nicht belegten Maschinen zuzuweisen.

74) Es werden hier ausschließlich "dynamische" Prioritätsregeln erfaßt. Sie sind so ausgelegt, daß die aktuelle Priorität eines Arbeitsgangs in Abhängigkeit von der arbeitsgangzugehörigen Attributen und von den entsprechenden Attributen aller konkurrierenden Arbeitsgänge berechnet wird. Als weitere Determinanten können Aspekte der aktuellen Produktionssituation hinzukommen, wie z.B. die Kapazitätsauslastung der Bearbeitungsstation, an der mehrere Arbeitsgänge um ihre Einlastung konkurrieren. Solche weiterführenden Determinanten werden aber hier in der Fallstudie nicht berücksichtigt.

Einen anderen Ansatz verfolgt dagegen KLEINER,F. (1991), S. 53, 67f. u. 156f. Dort werden statische Prioritätsregeln verwendet. Sie legen unabhängig von anderen Arbeitsgängen und aktueller Produktionssituation fest, mit welcher Priorität ein Arbeitsgang einer Bearbeitungsstation zugeordnet wird, falls derselbe Arbeitsgang auf mehreren Bearbeitungsstationen ausgeführt werden kann. Eine derart starre Prioritätenfixierung wird aber der immanenten Flexibilität von flexiblen Fertigungssystemen weniger gerecht als die zuvor skizzierten dynamischen Prioritätsregeln. Daher finden die statischen Prioritätsregeln keine weitere Beachtung.

75) Die Relevanz der Werkstückeigenschaften für die Arbeitsgangzuordnung zu Bearbeitungsstationen wird von der Gestalt der jeweils angewandten Prioritätsregel bestimmt.

76) Strenggenommen handelt es sich nicht um arbeitsgang-, sondern um arbeitsgangausführungsspezifische Informationen. Sie können sich auf alle Zeit-, Kapitalbindungs- und Kostenattribute von Werkstücken erstrecken, die als Bearbeitungsobjekte in die Ausführung des jeweils betrachteten Arbeitsgangs einfließen sollen. Vgl. dazu die Definition dieser werkstückbeschreibenden Attribute für die auftragspezifische Werkstückmarke. Um die Fallstudie nicht unnötig aufzublähen, werden hier jedoch nur zwei solche werkstückbeschreibenden Attribute berücksichtigt: die bisher angefallene Durchlaufzeitsumme aller Werkstücke, die zum Input der Arbeitsgangausführung gehören, und die Summe der Herstellkosten, die für diese Werkstücke bisher entstanden sind. Auf diese Weise lassen sich für die Zuordnung von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen z.B. solche Prioritätsregeln benutzen, die Arbeitsgänge mit den größten bisher eingetretenen Werkstückdurchlaufzeiten oder -kosten bevorzugen.

77) Zu den auftragspezifischen Eigenschaften gehören die Abwicklungspriorität und der Auftragswert. Die Schlupfzeit stellt eine sowohl arbeitsgang- als auch auftragspezifische Größe dar. Denn sie beruht einerseits auf dem spätest zulässigen Fertigstellungstermin des Produktionsauftrags. Andererseits hängt sie auch vom jeweils betrachteten Arbeitsgang ab.

78) Die Gesamtheit dieser arbeitsgangbeschreibenden Attribute wird - mit einer Ausnahme - in dem Komplexattribut der Sorte "arbeitsganginfo" zusammengefaßt. Ausgenommen ist lediglich der Name der Folgebearbeitungsstation. Er wird als separates Attribut erfaßt, weil er in die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen den gleichen Rang wie der Folgearbeitsgang einnimmt.

79) Die Ausführungsdauer eines Arbeitsgangs stellt weder eine realisierte noch eine vollständige Zeitangabe für dasjenige Zeitintervall dar, innerhalb dessen die Folgebearbeitungsstation durch die Ausführung des Folgearbeitsgangs in Anspruch genommen wird. Denn bei der Ausführungsdauer handelt es sich nur um eine Vorgabezeit (Sollzeit) für die Arbeitsgangausführung. Die Ergebnisse der Planung von Vorgabezeiten für Arbeitsgangausführungen werden in der Fallstudie als bekannt vorausgesetzt. Vgl. zu einem Überblick über Aspekte dieser Zeitplanung RAUSCH (1984), S. 59f. (mit speziellem Bezug auf Zeitplanungen für hochgradig automatisierte Produktionssysteme); ARNING (1987), S. 34ff. u. 129ff.; KERN,W. (1990a), S. 287 u. 292ff.; HEBBELER (1991), S. 288ff.; FRICKE,W. (1991), S. 294ff.

Die vorgegebenen Ausführungsdauern von Arbeitsgängen erstrecken sich im allgemeinen nur auf die Bearbeitungsoperationen, die zu den Arbeitsgängen gehören. Ausführungsdauern von Rüstoperationen sind dagegen in der Regel noch nicht enthalten. Dies gilt auf jeden Fall dann, wenn reihenfolgeabhängige Umrüstzeiten berücksichtigt werden.

Sie können aus einem auftragsspezifischen Arbeitsplan grundsätzlich nicht entnommen werden. Die tatsächliche Ausführungsdauer von Bearbeitungsoperationen (und Rüstoperationen) steht ohnehin erst nach der Arbeitsgangausführung fest. Die geplante Dauer der Arbeitsgangausführung wird aber dennoch in die Informationsmarke aufgenommen, weil sie ein Entscheidungskriterium für diejenigen Prioritätsregeln darstellen kann, die der Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen dienen.

Die Ausführungsdauer muß für einen Folgearbeitsgang keineswegs festliegen. Vielmehr kann sie in Abhängigkeit von derjenigen Bearbeitungsstation variieren, auf welcher der Folgearbeitsgang ausgeführt werden soll. Vgl. KNOOP (1986), S. 67; HINTZ (1987), S. 59. Beispielsweise läßt sich derselbe Arbeitsgang auf unterschiedlichen Bearbeitungsstationen mit jeweils konstanten, aber von Station zu Station verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten (Intensitäten) ausführen.

Darüber hinaus ermöglicht die Spezifizierung der Ausführungsdauer, einen weiteren Freiheitsgrad zu berücksichtigen. Denn es lassen sich mehrere Kopien der Werkstückmarke erzeugen, die sich *nur* durch die Ausführungsdauern unterscheiden, ansonsten aber in allen Attributausprägungen übereinstimmen. Dies bedeutet vor allem, daß der Folgearbeitsgang und die Folgebearbeitungsstation identisch sind. Unter diesen Voraussetzungen repräsentieren die Kopien der Werkstückmarke unterschiedliche Nutzungsintensitäten (Arbeitsgeschwindigkeiten) derselben Bearbeitungsstation bei der Ausführung desselben Arbeitsgangs. Auf diese Weise lassen sich also auch intensitätsmäßige Anpassungen der Prozeßausführung als Koordinierungsoptionen modellieren. Vgl. zur Berücksichtigung unterschiedlicher Arbeitsgeschwindigkeiten in Arbeitsplänen z.B. REFA (1985c), S. 134f.

Allerdings wurde der Aspekt variabler Nutzungsintensitäten von Bearbeitungsstationen in der einleitenden Rahmensezung ausgeschlossen. Daher wird er hier in der Fallstudie nicht weiter verfolgt. Die voranstehende Erläuterung verdeutlicht jedoch die Gestaltungsstrategie der präsentierten Fallstudie: Sie wird von vornherein so flexibel angelegt, daß sie die spätere Integration von zusätzlichen, in dieser Arbeit ausgeklammerten Koordinierungsaspekten zuläßt.

80) Vgl. zur Erfassung von Werkzeugen bei der Erstellung von Arbeitsplänen z.B. HEBBELER (1991), S. 283 u. 285. Die Werkzeuge stehen hier stellvertretend für eine breite Palette von passiven Betriebsmitteln mit direkter Produktionsbeteiligung, die an Bearbeitungsstationen die Ausführung von Arbeitsgängen unterstützen können. Sie müssen in vollständigen Arbeitsplänen ebenso berücksichtigt werden. Vgl. dazu die arbeitsplanbezogene Erwähnung von Fertigungshilfsmitteln bei REFA (1985c), S. 134f. u. 250f.; KNOOP (1986), S. 140; HELBERG (1987), S. 184; KERN, W. (1990a), S. 286 u. 288; HEBBELER (1991), S. 275 u. 285 (Spannmittel). Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Prüfmitteln (Meßzeugen) in Arbeitsplänen; vgl. REFA (1985c), S. 135; KERN, W. (1990a), S. 286.

81) Bei linearer Produktion enthält diese Liste auf jeder Produktionsstufe immer nur genau einen Werkstücknamen. Bei synthetischer Produktion kann die Liste auf jeder Produktionsstufe mehrere Werkstücknamen umfassen.

82) Früher wurden analytische und umgruppierende Produktionen ausgeschlossen. Daher braucht der Fall, daß am Ende der Arbeitsgangausführung mehrere bearbeitete Werkstücke vorliegen, nicht berücksichtigt zu werden. Eine entsprechende Erweiterung würde aber keine größeren Schwierigkeiten bereiten. Statt dessen bräuchte nur eine Liste für die bearbeiteten Werkstücke angesetzt zu werden. Bei linearer Produktion fällt der Name des bearbeiteten Werkstücks mit dem Namen desjenigen Werkstücks zusammen, das als Bearbeitungsobjekt des ausgeführten Arbeitsgangs festgelegt war.

83) Es handelt sich um Werkstücke, die in den Ausgangspuffern von Lager- oder Bearbeitungsstationen bereitstehen, zu dem abgewickelten Produktionsauftrag gehören und zu der jeweils festzulegenden Folgebearbeitungsstation transportiert werden können. Ihre werkstückspezifischen Durchlaufzeiten werden über diejenigen Informationskanten abgefragt, die im Netzmodul des Produktionsauftrags von den pufferrepräsentierenden Stellen ausgehen. Über diese Informationskanten lassen sich bei Bedarf auch beliebige andere werkstückbeschreibende Zeit-, Kapitalbindungs- oder Kostengrößen abfragen.

84) Die Ausführungen der voranstehenden Anmerkung gelten analog. Sie brauchen lediglich von Durchlaufzeiten auf Herstellkosten übertragen zu werden.

85) Die Schlupfzeit mißt die Zeitspanne, die für die Ausführung des betrachteten Arbeitsgangs bis zum spätest zulässigen Fertigstellungstermin des zugehörigen Produktionsauftrags angesichts der noch auszuführenden Arbeitsgänge verbleibt (Schlupfzeit). Es dient dazu, bei der Koordinierung der Arbeitsgangausführungen den Aspekt der Ausführungsdringlichkeit berücksichtigen zu können. Die Schlupfzeit konnte für die *auftragsspezifische* Werkstückmarke noch nicht definiert werden, weil sie voraussetzt, daß der *auftragsspezifische* spätest zulässige Fertigstellungstermin und der ebenso *auftragsspezifische* Arbeitsplan (Präcedenzgraph) bekannt sind. Bei Produktionsaufträgen, für die kein spätest zulässiger Fertigstellungstermin spezifiziert ist, entfällt dagegen die Schlupfzeit. Denn Arbeitsgänge aus solchen Produktionsaufträgen besitzen keine terminbedingte Ausführungsdringlichkeit.

Zwar ist die Schlupfzeit eines Arbeitsgangs für die Prozeßkoordinierung im Rahmen der hier präsentierten Fallstudie nicht erforderlich. Dennoch wird sie hier aus zwei Gründen aufgeführt. Erstens richten sich Prioritätsregeln, die in der betrieblichen Koordinierungspraxis weit verbreitet sind, oftmals nach dem Kriterium der kürzesten Schlupfzeit. Vgl. zur Beliebtheit von schlupfzeitbezogenen Prioritätsregeln KNOOP (1986), S. 35 (in der dort ange-

fürten dynamischen Variante); HINTZ (1987), S. 78, 153, 155, 167f. u. 172f.; MÜLLER, A. (1987), S. 363f.; MERTENS (1988a), S. 177. Zweitens läßt sich anhand der Arbeitsgangschlupfzeit ein besonderes Ermittlungsproblem veranschaulichen, das mit der Konzeptualisierung nebenläufiger Arbeitspläne zusammenhängt. Um diese Schwierigkeit offenzulegen, wird die Schlupfzeitdefinition präzisiert: Die Schlupfzeit einer Arbeitsgangausführung ist der zeitliche Abstand des aktuellen Koordinierungszeitpunkts vom spätest zulässigen Fertigstellungstermin des zugehörigen Produktionsauftrags, vermindert um die Restarbeitszeit, die für die Ausführungen aller noch nicht abgeschlossenen Arbeitsgänge erforderlich ist. Dabei wird unterstellt, daß alle Arbeitsgangausführungen, die noch nicht begonnen und von der betrachteten Arbeitsgangausführung verschieden sind, jeweils in ihren spätest zulässigen Zeitpunkten begonnen werden. Vgl. dazu auch die exemplarische Schlupfzeiterläuterung, die in einer anderen Anmerkung erfolgt, und das dort vorgelegte Ablaufdiagramm.

Durch die Schlupfzeitdefinition werden aber nur diejenigen Zeitverbräuche von Bearbeitungsoperationen berücksichtigt, die als Vorgabezeiten für die Ausführungsdauern der Arbeitsgänge festgelegt wurden. Unter Umständen kommen noch die Zeitverbräuche von Rüstoperationen hinzu, falls sie unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge an der jeweils betroffenen Bearbeitungsstation festliegen. Alle anderen zeitverbrauchenden Operationsausführungen bleiben ausgeklammert. Dazu gehören sowohl reihenfolgeabhängige Umrüstungen der Bearbeitungsstation als auch die Ausführungen von Transportoperationen. Daher bedeutet die Schlupfzeit eine formale Abstraktion von der tatsächlichen Ablaufstruktur einer Auftragsabwicklung. Sie darf deshalb - im Gegensatz zur Einlassung von HINTZ (1987), S. 157, - nicht mit einem zeitlichen Puffer gleichgesetzt werden, der für die noch ausstehende Arbeitsgangausführung tatsächlich zur Verfügung steht. Ebensowenig wird beachtet, daß Arbeitsgangausführungen infolge von Produktionsstörungen länger andauern können, als es in ihren Vorgabezeiten veranschlagt wurde. Die voranstehend skizzierten Sachverhalte bedeuten allerdings noch nicht das oben angedeutete Ermittlungsproblem.

Grundsätzliche Schwierigkeiten drohen bei der Bestimmung der Schlupfzeit eines Arbeitsgangs aber immer dann, wenn der Arbeitsplan für den Produktionsauftrag, zu dem der betrachtete Arbeitsgang gehört, für die zukünftig noch auszuführenden Arbeitsgänge mehrere Ausführungsoptionen mit unterschiedlichen Ausführungsdauern offenläßt. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn für noch nicht ausgeführte Arbeitsgänge alternative Bearbeitungsstationen zur Auswahl stehen, die den gleichen Arbeitsgang verschieden schnell auszuführen vermögen. Ebenso kann an alternative technische Produktionsverfahren mit unterschiedlichen, zukünftig noch auszuführenden Arbeitsgangmengen gedacht werden. Den vorgenannten Fällen gemeinsam ist ein charakteristischer Indeterminismus: Im Koordinierungszeitpunkt ist nicht genau bekannt, welche Ausführungsdauern für die noch ausstehenden Arbeitsgänge in Zukunft erforderlich sein werden. Daher läßt sich die Schlupfzeit nicht exakt ermitteln; vgl. HINTZ (1987), S. 153 u. 167. Dies gilt zumindest dann, wenn die vorgenannten Optionen für die zukünftigen Arbeitsgangausführungen nicht durch vorzeitige Planfixierungen vernichtet, sondern als Anpassungsspielräume für zukünftige Produktionssituationen offengehalten werden. Das wurde schon früher als Postulat wirkungsminimaler Spielraumschließungen gefordert. Daher können Prioritätsregeln auf Schlupfzeitbasis unter den zuvor skizzierten Bedingungen zunächst nicht angewendet werden, weil nicht sichergestellt ist, die Schlupfzeiten konkret ermitteln zu können. Diese Schwierigkeit läßt sich jedoch dadurch überwinden, daß die Restarbeitszeit für noch auszuführende Arbeitsgänge als diejenige Zeitdauer veranschlagt wird, die im zugrundeliegenden nonlinearen Arbeitsplan durch zulässige Arbeitsgangausführungen minimal möglich ist. Ähnlich geht auch HINTZ (1987), S. 157, vor. Allerdings läßt sich die aktuelle Schlupfzeit einer Arbeitsgangausführung nur dann erfassen, wenn das Netzmodul des Produktionsauftrags, zu dem der Arbeitsgang gehört, die Information über minimale Restarbeitszeiten enthält. Zu diesem Zweck werden die Schaltvorschriften von Transitionen, bei deren Schaltakten Schlupfzeiten eine Rolle spielen, mit entsprechenden Berechnungsformeln versehen. Vgl. dazu die Transition t_3 und die exemplarische Erläuterung ihrer Schlupfzeitformel in der zugehörigen Anmerkung.

Die Schlupfzeit dient hier nur als *pars pro toto*. Sie vertritt eine Reihe anderer Arbeitsgangeigenschaften, für die eine verwandte Koordinierungsproblematik besteht: Die Arbeitsgangeigenschaft ist einerseits für das Fällen von Koordinierungsentscheidungen auf der Basis von Prioritätsregeln interessant. Andererseits kann aber die konkrete Ausprägung der Arbeitsgangeigenschaft von Koordinierungsentscheidungen abhängen, die erst in Zukunft getroffen werden - und daher beim Fällen einer Entscheidung in der aktuellen Produktionssituation noch unbekannt sind. Beispielsweise zählt zu diesen problematischen Eigenschaften eines Arbeitsgangs ebenso der Arbeitsinhalt seiner Bearbeitungsobjekte. Der Arbeitsinhalt eines Werkstücks ist die Summe der Ausführungsdauern aller Arbeitsgänge, die erforderlich sind, um das Werkstück fertig zu bearbeiten, deren Ausführungen im aktuellen Koordinierungszeitpunkt aber noch nicht abgeschlossen worden sind. Die unmittelbare Verwandtschaft mit der Schlupfzeit liegt auf der Hand: Der Arbeitsinhalt aller Werkstücke, die als Bearbeitungsobjekte in einen auszuführenden Arbeitsgang eingehen sollen, ist der Subtrahend, der bei der Schlupfzeitberechnung als Restarbeitszeit vom spätest zulässigen Fertigstellungstermin des zugehörigen Produktionsauftrags abgezogen wird. Da der letztgenannte Minuend im allgemeinen konstant ist, verhalten sich Prioritätsregeln äquivalent, die entweder auf der Basis von Schlupfzeiten oder aber auf der Grundlage von Arbeitsinhalten definiert sind. Deshalb wird hier darauf verzichtet, den Arbeitsinhalt als weitere, aber hinsichtlich prioritätsregelgestützter Koordinierungsentscheidungen redundante Arbeitsgangeigenschaft zu berücksichtigen. Falls er dennoch an anderer Stelle - z.B. als Alternative zur Schlupfzeit - eingesetzt werden sollte, droht abermals das Problem seiner Unterbestimmtheit: Wenn in Zukunft Optionen für die alternative Arbeitsgangausführungen mit verschiedenen Ausführungsdauern offenstehen, ist der Arbeitsinhalt der Bearbei-

tungsobjekte eines Arbeitsgangs nicht eindeutig bestimmt. Dann muß der Arbeitsinhalt wiederum geschätzt werden. Beispielsweise läßt er sich - analog zur Schlupfzeit - als derjenige Arbeitsinhalt veranschlagen, der aufgrund des zugrundeliegenden nonlinearen Arbeitsplans durch zulässige Arbeitsgangausführungen minimal möglich ist.

86) Der Bearbeitungsauftragsstatus drückt zunächst aus, ob die Zuordnung des Folgearbeitsgangs zu einer Folgebearbeitungsstation entweder angefordert oder aber bestätigt ist. Nachdem die Ausführung des Folgearbeitsgangs auf der Folgebearbeitungsstation abgeschlossen ist, gibt der Bearbeitungsauftragsstatus an, ob die Arbeitsgangausführung entweder erfolgreich beendet werden konnte oder aber wegen einer Produktionsstörung vorzeitig abgebrochen werden mußte.

87) Die Stellen- und Transitionenindizes im Stelle/Transition-Netz einerseits und im Synthetischen Netz andererseits sind nicht aufeinander bezogen.

88) Die Wertzuweisung für das Konstantensymbol "wiederholungsanzahl_AG1/unär" gibt an, wie oft die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" wiederholt werden muß, um genau eine Einheit der erwünschten Endproduktart EP₁ herzustellen. Das Gleiche gilt für die Wiederholungsanzahlen der beiden anderen Arbeitsgänge "AG_2" und "AG_3". Diese Wiederholungsanzahlen können unmittelbar aus dem GOZINTO-Graphen abgelesen werden, der in Abb. 177 für den hier modellierten Produktionsauftrag präsentiert wurde. Sie lassen sich ebenso mit Hilfe des Stelle/Transition-Netzes gewinnen, das in Abb. 192 u. 193 vorgestellt wurde. Zu diesem Zweck ist seine Stelle s_{10} mit einer Kopie der Basismarke zu markieren, während alle anderen Stellen unmarkiert bleiben. Es wird ein Schaltprozeß ermittelt, der zu der erwünschten Deadlockmarkierung führt. Die Schaltanzahlen der Transitionen in jedem dieser Schaltprozesse liefert per constructionem genau die Wiederholungsanzahlen aller Arbeitsgänge je herzustellender Endprodukteinheit.

89) Den Konstantensymbolen "ausführungsdauer_AGi/BSj" mit $i \in \{1,2,3\}$ und $j \in \{1,2,3\}$ wird jeweils derjenige Wert zugewiesen, der für die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_i" auf der Bearbeitungsstation "BS_j" als Vorgabezeit veranschlagt ist. Die Ausführungsdauer wird in der Dimension "Minuten" gemessen. Die zwei unterschiedlichen Ausführungsdauern für den Arbeitsgang "AG_2" zeigen an, daß er auf der Bearbeitungsstation "BS_2", die durch eine Arbeitskraft bedient wird, rascher ausgeführt werden kann, als es bei der vollautomatischen Ausführung auf der Bearbeitungsstation "BS_1" der Fall ist. Diese Divergenz kann im Sinne unterschiedlicher Nutzungsintensitäten der beiden vorgenannten Bearbeitungsstationen interpretiert werden. Sie läßt sich ebenso als eine produktionsstechnisch bedingte Verlangsamung der Arbeitsgangausführung bei vollautomatischen Stationsbetrieb deuten.

90) In der Fallstudie wird nur ein exemplarischer Produktionsauftrag mit dem Namen "PA_1" behandelt. Falls mehrere Produktionsaufträge berücksichtigt werden sollen, lassen sich der Attributsorte "auftragsname" beliebige weitere Auftragsnamen als Ausprägungen zuweisen, wie z.B. "PA_2", "PA_3" usw.

91) Neben den oben erläuterten Werkstückstati wird hier als zusätzliche Statusangabe die neutrale Attributausprägung "nil" zugelassen. Sie ist später im Netzmodul des zentralen Werkstücklagers nötig, wenn ein Werkstück aus dem Werkstücklager abgezogen und an das Umsystem des Produktionssystems abgegeben wird. Dann besitzt das fertiggearbeitete Werkstück am Ende seiner Nachlagerung keinen wohldefinierten Werkstückstatus mehr.

92) Die Fallstudie erstreckt sich auf insgesamt 4 Bearbeitungsstationen.

93) Es wird hier die Freiheit ausgenutzt, die Kopien der Basismarke durch die Ausdrücke " m_0 " und " \emptyset " gleichberechtigt notieren zu können. Im Rahmen der Modellierung einer Bearbeitungsstation wurde die erste Notationsweise " m_0 " verwendet. Um die Austauschbarkeit beider Notationsalternativen zu demonstrieren, wird hier der Ausdruck " \emptyset " verwendet.

94) Die Informationsmarke der Sorte "werkstücktransport" wurde bereits definiert. Ihre Festlegung wird hier nur der Übersichtlichkeit halber noch einmal in Erinnerung gerufen. Gleiches gilt für die drei nachfolgenden Informationsmarken mit den Sorten "bearbeitungsauftrag", "lagerauftrag", "werkstückeinlastung" und "werkstückauslastung".

95) Die unbeschränkte Markenkapazität der Stelle $s_{PZ,1}$ verstößt nicht gegen die vorausgesetzte Finitheit des hier entfalteten Netzmodells. Dies folgt aus zwei Prämissen. Erstens wird unterstellt, daß jeder Produktionsauftrag nur eine endliche und wohlbestimmte Anzahl von Arbeitsgangausführungen umfaßt. Dadurch werden einerseits alle Produktionsaufträge ausgegrenzt, zu denen *unendlich* viele Arbeitsgänge gehören. Andererseits werden ebenso alle Produktionsaufträge ausgeschlossen, deren Arbeitsganganzahl zwar endlich ist, für deren Abwicklung aber mindestens ein Arbeitsgang *unbestimmt* oft wiederholt werden muß. Zyklische Arbeitsgangausführungen mit unbestimmter Wiederholungsanzahl werden also nicht berücksichtigt. Zweitens wird nur die Koordinierung der Abwicklung solcher Auftragspakete betrachtet, die aus endlich vielen Produktionsaufträgen bestehen. Daher kann sich bei der Abwicklung eines Auftragspakets immer nur eine endliche und wohlbestimmte Anzahl von Kopien der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" auf der Stelle "Bearbeitungsaufträge_erteilt" befinden. Dennoch wird dieser Stelle eine unbeschränkte Markenkapazität zugewiesen. Dadurch wird sichergestellt, daß sie die Abwicklung von *beliebigen* Auftragspaketen nicht behindert, sofern die beiden vorgenannten Prämissen erfüllt werden.

96) Die Ausführungen der voranstehenden Anmerkung treffen hier analog zu.

97) Die unbeschränkte Markenkapazität der Stelle s_5 verstößt abermals nicht gegen die vorausgesetzte Finitheit des hier entfalteten Netzmodells. Denn es werden drei Konzeptualisierungsprämissen vorausgesetzt: Erstens besteht jeder Produktionsauftrag nur aus einer endlichen und wohlbestimmten Anzahl von Arbeitsgangausführungen. Zweitens wird unterstellt, daß jede Arbeitsgangausführung nur eine endliche und wohlbestimmte Anzahl von Werkstücken als Bearbeitungsobjekte benötigt. Drittens wird eine endliche und wohlbestimmte Losgröße für jeden Produktionsauftrag vorausgesetzt. Aus den drei vorgenannten Prämissen folgt, daß die Werkstückanzahl, die für einen Produktionsauftrag als Vorprodukte erforderlich sind, notwendig eine endliche und wohlbestimmte Größe darstellt. Daher ist die Anzahl der Basismarkenkopien, die auf der Stelle s_5 durch das Schalten der Transition t_2 abgelegt werden können, immer nach oben beschränkt. Folglich verletzt die unbeschränkte Markenkapazität dieser Stelle auch nicht die Finitheit des Netzmodells (q.e.d). Auch die nachfolgenden Stellen mit unbeschränkten Markenkapazitäten widersprechen nicht der Finitheit des Netzmodells. Dies ließe sich durch analoge Begründungen wie die zuvor erfolgte aufzeigen. Dadurch würden jedoch keine neuartigen Einsichten vermittelt. Daher wird im folgenden auf solche Begründungen verzichtet.

98) Die Stelle s_8 des Auftragsnetzes entspricht der Stelle s_1 aus den Stelle/Transition-Netzen der Abb. 192 u. 193. Ebenso korrespondieren die beiden Stellen s_9 und s_{10} des Auftragsnetzes mit den Stellen s_2 bzw. s_3 aus den vorgeannten Stelle/Transition-Netzen.

99) Die Stelle s_{19} des Auftragsnetzes entspricht der Stelle s_7 aus den Stelle/Transition-Netzen der Abb. 192 u. 193. Ebenso korrespondieren die Stellen s_{31} , s_{34} und s_{42} des Auftragsnetzes mit den Stellen s_4 , s_5 bzw. s_9 aus den vorgeannten Stelle/Transition-Netzen.

100) Die Stelle s_{20} des Auftragsnetzes entspricht der Stelle s_8 aus den Stelle/Transition-Netzen der Abb. 192 u. 193. Ebenso korrespondieren die beiden Stellen s_{32} und s_{43} des Auftragsnetzes mit den Stellen s_6 bzw. s_{10} aus den vorgeannten Stelle/Transition-Netzen.

101) Diese Stelle dient als ein Reservoir, in dem Informationen über die Zeit-, Kapitalbindungs- und Kostengrößen aller abgewickelten Produktionsaufträge gesammelt werden. Diese auftragsbeschreibenden Attributausprägungen stehen für weitere Auswertungen bereit. Sie können dort von anderen Informationsverarbeitungssystemen, die außerhalb des Modellierungsbereichs der Fallstudie liegen, zur Kenntnis genommen werden. Beispielsweise lassen sie sich für die Auftragsabrechnung nutzen. Damit das Netzmodul auf jede endliche Anzahl abzuwickelnder Produktionsaufträge angewendet werden kann, besitzt die Stelle "Abgewickelte_aufträge" eine unbeschränkte Markenkapazität. Dennoch wird die Finitheit des Netzmoduls dadurch nicht beeinträchtigt.

102) Die drei nachfolgenden Ausgangskanten der Transition t_2 besitzen *variable* Kantengewichte $W_{2,5}$, $W_{2,6}$ und $W_{2,7}$. Die Gewichtsvariabilität wird durch die Variable "Losgröße" verursacht. Dieselbe Variable ist in der Kopie " m_a " der Auftragsmarke enthalten, die über die Informationskante der Transition t_2 zur Kenntnis genommen wird. Daher ist der konstante Wert der Variablen "Losgröße" bei jedem Schalten dieser Transition wohldefiniert. Den Konstantensymbolen "wiederholungsanzahl_AGi/unär" mit $i \in \{1,2,3\}$ wurde bereits zu Beginn der Netzlegende je ein konkreter Wert zugewiesen. Um die Anzahl der Einheiten einer Vorproduktart zu ermitteln, die für die Herstellung einer Endprodukteinheit benötigt werden, müssen die Wiederholungsanzahlen aller Arbeitsgänge, die Einheiten der Vorproduktart als Bearbeitungsobjekte benötigen, mit den Anzahlen der jeweils erforderlichen Vorprodukteinheiten je Arbeitsgangausführung multipliziert werden. Die letztgenannten Anzahlen erforderlicher Vorprodukteinheiten je Arbeitsgangausführung lassen sich aus dem GOZINTO-Graphen der Abb. 177 unmittelbar entnehmen. Die resultierenden Produkte sind für alle Arbeitsgänge, die Einheiten der Vorproduktart als Bearbeitungsobjekte benötigen, zu addieren. Die Multiplikation dieser Summe mit der Losgröße des Produktionsauftrags ergibt schließlich, wie viele Einheiten des jeweils betrachteten Vorproduktart für die Auftragsabwicklung insgesamt reserviert werden müssen. In der Fallstudie folgt aus den voranstehenden Festlegungen für die drei Vorproduktarten VP_4 , VP_5 und VP_6 :

$$\begin{aligned} W_{2,5} &= ((3 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG2/unär}) + (4 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG3/unär})) \cdot \text{Losgröße} \\ &= ((3 \cdot 1) + (4 \cdot 1)) \cdot 2 = (3 + 4) \cdot 2 = 7 \cdot 2 = 14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{2,6} &= (2 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG1/unär}) \cdot \text{Losgröße} \\ &= (2 \cdot 3) \cdot 2 = 6 \cdot 2 = 12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{2,7} &= (1 \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG1/unär}) \cdot \text{Losgröße} \\ &= (1 \cdot 3) \cdot 2 = 3 \cdot 2 = 6 \end{aligned}$$

Die drei Konstanten "14", "12" und "6" können sowohl aus dem eingangs präsentierten GOZINTO-Graphen als auch aus dem Stelle/Transition-Netz abgeleitet werden, das in Abb. 191 vorgestellt wurde (vgl. auch die zugehörige Anmerkung). Im letzten Fall lassen sich die Konstanten als Anzahlen von Kopien der Basismarke ablesen, die unter der

erwünschten Deadlockmarkierung auf den Stellen s_1 , s_2 bzw. s_3 liegen. Voraussetzung ist, daß unter der Ausgangsmarkierung des Stelle/Transition-Netzes genau zwei Kopien der Basismarke existieren, die sich beide auf der Stelle s_1 befinden.

103) Durch die Anweisung "Auftragsname := auftrag_name" wird die Variable "Auftragsname" mit der Konstanten "PA_1" gebunden, die dem Konstantensymbol "auftrag_name" eingangs zugewiesen worden war. Dadurch wird der hier modellierte Produktionsauftrag eindeutig identifiziert. Die Kopie "m_g" der Informationsmarke "werkstückeinlastung" übermittelt diesen Auftragsnamen "PA_1" durch ihr Attribut "werkstückzugehörigkeit" an das zentrale Werkstücklager. Die dort reservierte Einheit der Vorproduktart VP_4 ist dann für den Produktionsauftrag "PA_1" reserviert. Die reservierte Vorprodukteinheit stellt dann ein Werkstück dar, das keinem anderen Produktionsauftrag mehr zugeordnet werden kann. Dies gilt zwar strenggenommen nur so lange, wie die Zuordnung zum Produktionsauftrag "PA_1" aufrechterhalten wird. Aber das Auflösen solcher Zuordnungen von Werkstücken zu Produktionsaufträgen wird in der Fallstudie nicht behandelt. Es käme z.B. in Betracht für Werkstücke, die wegen einer abgebrochenen Arbeitsgangausführung in das zentrale Werkstücklager zurücktransportiert werden.

Die Werkstückreservierung für einen Produktionsauftrag spielt hier aus modellierungstechnischer Sicht eine große Rolle. Sie verhindert Konfusionen, die daraus resultieren könnten, daß mehrere Produktionsaufträge auf dasselbe Werkstück zugreifen. Zwar wird in der Fallstudie nur ein exemplarischer Produktionsauftrag behandelt. Doch sie wird von vornherein so ausgelegt, daß sich ihre Netzkonstrukte auf beliebig viele Produktionsaufträge anwenden lassen. Um diese Forderung zu erfüllen reicht es allerdings nicht aus, die Vorprodukteinheiten im zentralen Werkstücklager zu reservieren, sobald sie für die Abwicklung eines Produktionsauftrags erforderlich werden. Vielmehr müssen auch alle Zwischen- und Endprodukte, die während der Auftragsabwicklung hergestellt werden, dem jeweils betroffenen Produktionsauftrag eindeutig zugeordnet werden. Andernfalls wäre es möglich, daß jene Zwischen- oder Endprodukte von anderen Produktionsaufträgen als Bearbeitungsobjekte in Beschlag genommen werden. Um diesen unerwünschten Effekt zu verhindern, werden auch alle Werkstücke, die aus einer Arbeitsgangausführung hervorgehen, demjenigen Produktionsauftrag zugeordnet, zu dem der jeweils ausgeführte Arbeitsgang zugehört. Dies leistete bereits die Konstruktion des Netzmoduls für eine Bearbeitungsstation. Es wurde so ausgelegt, daß die neu erzeugten Werkstücke notwendig zum selben Produktionsauftrag gehören wie alle Werkstücke, die in eine Arbeitsgangausführung eingegangen sind. Dafür sorgte jeweils das Attribut "werkstückzugehörigkeit" der (auftragsunspezifischen) Werkstückmarke. Seine Ausprägungen werden im Netzmodul einer Bearbeitungsstation niemals verändert, um die Invarianz der Werkstückzuordnung zu Produktionsaufträgen sicherzustellen.

104) Durch das Schalten der Transition t_9 werden sofort alle Werkstücke, die für eine Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" als Bearbeitungsobjekte erforderlich sind, für andere Arbeitsgänge gesperrt. Dies geschieht, indem entsprechend viele Kopien der Informationsmarke "werkstückeinlastung" von den beiden Stellen s_9 und s_{10} abgezogen werden. Sie fließen fortan als Kopien der auftragspezifischen Werkstückmarke durch diejenigen Teilnetze, welche die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" modellieren. Das Sperren der reservierten Werkstücke ist zwar für den Arbeitsgang "AG_1" nicht unbedingt erforderlich. Denn er stellt den einzigen Arbeitsgang dar, der Werkstücke der beiden Vorproduktarten VP_5 und VP_6 benötigt (vgl. den GOZINTO-Graphen). Aber bei anderen Arbeitsgängen müssen diese einfachen Verhältnisse nicht mehr vorliegen. Bereits die Arbeitsgänge "AG_2" und "AG_3" konkurrieren um Einheiten derselben Vorproduktart VP_4 . Daher könnte es zu fehlerhaften Prozeßkoordinierungen kommen, wenn es möglich wäre, daß sich die Teilnetze der Arbeitsgangausführungen auf dieselben Werkstücke erstrecken. Um diesen Defekt von vornherein auszuschließen, sperrt jeweils diejenige Transition, die einen Bearbeitungsauftrag für eine Arbeitsgangausführung anstößt, die erforderlichen Werkstücke für alle anderen Arbeitsgänge. Dies geschieht hier schon für den Arbeitsgang "AG_1", um eine generell verwendbare Teilnetzkonstruktion einzuführen.

Der Bearbeitungsauftrag für die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" könnte unmittelbar an die Bearbeitungsstation "BS_3" gesandt werden, weil keine Möglichkeit besteht, den Arbeitsgang "AG_1" auf alternativen Bearbeitungsstationen auszuführen. Aus dieser Perspektive brauchte die Erteilung des Bearbeitungsauftrags nicht an das Netzmodul für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen übertragen zu werden. Dennoch wird hier dieser "Umweg" aus zwei Gründen eingeschlagen. Erstens besitzen auf diese Weise alle Teilnetze, die jeweils eine Arbeitsgangausführung modellieren, hinsichtlich der Erteilung von Bearbeitungsaufträgen dieselbe Struktur. Zweitens können mehrere Arbeitsgangausführungen um die knappe Bearbeitungskapazität der Bearbeitungsstation "BS_3" konkurrieren. Das vorgenannte Zuordnungsmodul löst diesen Ressourcenkonflikt durch die Auswahl von genau einem Arbeitsgang auf.

Auch bei der Abwicklung des hier betrachteten Produktionsauftrags kann ein solcher Zugriffskonflikt auftreten. Zwar wird auf der Bearbeitungsstation "BS_3" nur der eine Arbeitsgang "AG_1" ausgeführt. Aber seine Ausführung muß insgesamt sechsmal wiederholt werden, um die erwünschten zwei Endprodukteinheiten herzustellen. Dies geht aus dem GOZINTO-Graphen und der vorgegebenen Losgröße von zwei Endprodukteinheiten hervor. Es folgt ebenso aus dem Sachverhalt, daß einerseits auf der Stelle "Vorprodukt_VP5_reserviert" insgesamt 12 Markenkopien für Einheiten der Vorproduktart VP_5 zur Abwicklung des Produktionsauftrags abgelegt werden, während andererseits für jede Arbeitsgangausführung von derselben Stelle durch das Schalten der Transition t_9 je 2 Markenkopien abgezogen werden. Der Quotient aus 12 abgelegten und jeweils 2 abgezogenen Markenkopien ergibt wiederum 6 Ausführungen des Arbeitsgangs "AG_2". Diese mehrfachen Ausführungen desselben Arbeitsgangs auf derselben Bear-

beitsstation "BS_3" konkurrieren ebenso um die knappe Bearbeitungskapazität dieser Station, wie es für die Ausführungen unterschiedlicher Arbeitsgänge der Fall wäre. Denn wäre die Bearbeitungskapazität aller Bearbeitungsstationen nicht auf je eine Arbeitsgangausführung beschränkt worden, könnte derselbe Arbeitsgang "AG_1" auf derselben Bearbeitungsstation "BS_3" mit *unterschiedlichen* Bearbeitungsobjekten (Werkstücken) zur selben Zeit mehrfach - also nebenläufig - ausgeführt werden.

105) Diese Restriktionsformel ist für den hier betrachteten Arbeitsgang "AG_1" abundant, da sie stets erfüllt ist. Denn die Anzahl der Werkstücke, die von den beiden Vorproduktarten VP_5 und VP_6 für die Ausführungen dieses Arbeitsgangs reserviert wurden, reicht gerade aus, um den Arbeitsgang "AG_1" genau sechsmal auszuführen. Eingang erfolgte die Wertzuweisung "wiederholungsanzahl_AG1/unär=3". Darüber hinaus wird das Attribut "losgröße" der einen Auftragsmarkenkopie unter der Ausgangsmarkierung des Auftragsnetzes mit der Ausprägung "2" initialisiert. Diese Attributausprägung wird im Verlauf der Auftragsabwicklung niemals verändert. Daher gilt hier für die Wiederholungsanzahl des Arbeitsgangs "AG_1":

$$\text{Wiederholungsanzahl} = \text{Losgröße} \cdot \text{wiederholungsanzahl_AG1/unär} = 3 \cdot 2 = 6$$

Infolgedessen kann die o.a. Restriktionsformel niemals verletzt sein. Dennoch wird sie hier angeführt, um das Netzmodul eines Produktionsauftrags von vornherein so auszulegen, daß es sich auf beliebige Produktionsaufträge anwenden läßt. Denn die Restriktionsformel wird spätestens dann erforderlich, wenn mindestens eine Werkstückart existiert, deren Werkstücke als Bearbeitungsobjekte in *mehrere* verschiedene Arbeitsgänge eingehen. Andernfalls wäre nicht ausgeschlossen, daß ein Arbeitsgang öfter ausgeführt wird, als es seine Wiederholungsanzahl für die Auftragsabwicklung angibt. Dadurch würde er Werkstücke verbrauchen, die für die Ausführung eines anderen Arbeitsgangs bestimmt waren. Wenn diese zu viel verbrauchten Werkstücke nicht zusätzlich bereitgestellt werden können, läßt sich der betroffene andere Arbeitsgang nicht in der erforderlichen Anzahl ausführen. In diesem Fall könnte der Produktionsauftrag nicht vollständig abgewickelt werden. Diese fehlerhafte Koordinierung droht auch für den hier modellierten Produktionsauftrag, weil sowohl sein Arbeitsgang "AG_2" als auch sein Arbeitsgang "AG_3" auf Bearbeitungsobjekte derselben Vorproduktart VP_4 benötigen. Die möglichen Koordinierungsdefekte werden aber durch die o.a. Restriktionsformel von vornherein verhindert.

106) Die Restriktionsformel "for_9.1" wird hier nur der Deutlichkeit halber aufgeführt. Sie ist keineswegs erforderlich. Denn die Konstruktion des vorangehenden ersten Teilnetzes stellt sicher, daß auf die Stellen s_9 und s_{10} nur solche Kopien der Informationsmarke "werkstückeinlastung" abgelegt werden, welche die vorgenannte Restriktionsformel erfüllen. Daher erweist sich diese Formel als redundant. Diese Redundanz läßt sich aber z.B. nutzen, um die Korrektheit von Netzmodell und Auftragsabwicklung zu testen: Falls eine Netzmarkierung existiert, unter der sich auf der Stelle s_9 oder s_{10} mindestens eine Markenkopie befindet, und wenn zugleich die Restriktionsformel "for_9.1" verletzt ist, dann muß ein Fehler vorliegen. Er kann sowohl auf einer inkorrekten Netzspezifikation beruhen als auch auf einem Defekt der Auftragsabwicklung. Solche Abwicklungsdefekte drohen z.B., wenn Arbeitsgangausführungen erfolglos abgebrochen wurden. Um solche Testmöglichkeiten in breitem Umfang anzubieten, werden bei der Modellierung der Fallstudie des öfteren redundante Konstrukte verwendet. Der Verf. verzichtet darauf, dies an jeder Stelle ausdrücklich hervorzuheben.

107) Durch die beiden Prädikate "str_int(Namensstring,Namenszähler)" und concat("WS_",Namensstring,Neuer_name)" wird der neue Name desjenigen Werkstücks aufgebaut, das als Output aus der Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" hervorgeht. Dabei wird beachtet, daß die Werkstücknamen identifizierenden Charakter besitzen. Deshalb darf kein Werkstückname mehr als einmal vergeben werden. Dies läßt sich hier durch eine einfache Konstruktion erreichen, weil nur ein Produktionsauftrag abgewickelt wird. Ausgangspunkt ist der Umstand, daß die Namen "WS_1" bis WS_35" bereits für die 35 Werkstücke im zentralen Werkstücklager des Produktionssystems vergeben sind. Der nächste freie Werkstückname ist daher "WS_36". Der Namenszähler wird bei der ersten Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" wegen Wiederholungsanzahl_neu = 1 auf den Wert $35 + 1 = 36$ gesetzt. Mit Hilfe des zweistelligen Prädikats "str_int" wird der ganzzahlige Wert des Namenszählers in einen Ziffernausdruck der Sorte "string" verwandelt und der Variablen "Namensstring" zugewiesen. Das Prädikat "str_int" stellt ein Standardprädikat der hier zugrundegelegten Programmiersprache Turbo_PROLOG dar; vgl. z.B. KINNEBROCK (1988), S. 134. Dieser Wert der Variablen "Namensstring" wird mit dem Präfix "WS_" zum neuen Werkstücknamen "WS_36" verknüpft. Die Verknüpfung leistet das bereits eingeführte dreistellige Prädikat "concat". Es gehört ebenfalls zu den Standardprädikaten der Programmiersprache Turbo_PROLOG. Der Arbeitsgang "AG_1" ist insgesamt sechsmal auszuführen. Daher werden durch das sechsfache Inkrementieren der Variablen "Wiederholungsanzahl_neu" insgesamt die Werkstücknamen "WS_36" bis "WS_41" erzeugt. Der nächste Werkzeugname, der für eine andere Arbeitsgangausführung freisteht, lautet daher "WS_42". Dieses Wissen wird in den Schaltvorschriften für die Transitionen "bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG2*" und "bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG2" genutzt, wenn die Werkstücknamen des nächsten Arbeitsgangs "AG_2" ermittelt werden. Die hier skizzierte Konstruktion wird auf alle nachfolgenden Arbeitsgänge analog übertragen, ohne dies nochmals zu erläutern. Falls mehrere Produktionsaufträge abgewickelt werden oder die wiederholte Abwicklung desselben Produktionsauftrags zugelassen wird, ist zusätzlich dafür zu sorgen, daß die Werkstücknamen aus unterschiedlichen Auftragsabwicklungen niemals übereinstimmen.

Dafür sind kompliziertere Konstruktionen erforderlich. Beispielsweise lassen sich die Werkstücknamen um ein In- oder Suffix erweitern, daß die jeweils betroffene Auftragsabwicklung eindeutig identifiziert.

108) Für die Berechnung der Schlupfzeiten von Arbeitsgängen wurde vereinbart, vom spätest zulässigen Fertigstellungstermin des zugehörigen Produktionsauftrags zunächst den jeweils aktuellen Koordinierungszeitpunkt und danach die minimal mögliche Restarbeitszeit für alle noch nicht vollständig ausgeführten Arbeitsgänge abzuziehen. Es wurde vorausgesetzt, daß alle Arbeitsgangausführungen, die noch nicht begonnen wurden und sich von der betrachteten Arbeitsgangausführung unterscheiden, jeweils in ihren spätest zulässigen Zeitpunkten gestartet werden. Falls dabei Ausführungsalternativen offenstehen, werden sie so festgelegt, daß die Summe aller Ausführungsdauern minimal ist. Aus diesen Festlegungen ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Restarbeitszeiten für die drei Arbeitsgänge des betrachteten Produktionsauftrags. Ihre Ermittlung entspricht grundsätzlich derjenigen Vorgehensweise, die bei der retrograden Arbeitsgangterminierung üblich ist, um die (minimalen) Vorlaufzeiten von Arbeitsgangausführungen zu bestimmen. Vgl. zu solchen retrograden Vorlaufzeitermittlungen GUNN (1982), S. 94; ADAM, D. (1988e), S. 92ff.; FISCHER, K. (1988), S. 154ff.; FISCHER, K. (1990), S. 93ff.

In der hier betrachteten Fallstudie existieren nur für einen Arbeitsgang alternative Ausführungsoptionen. Es handelt sich um den Arbeitsgang "AG_2", der entweder auf der Bearbeitungsstation "BS_2" mit 12 Minuten oder auf der Bearbeitungsstation "BS_1" mit 18 Minuten Vorgabezeit ausgeführt werden kann. Da nur die minimale Restarbeitszeit interessiert, wird der Schlupfzeitermittlung für die Ausführungen des Arbeitsgangs "AG_3" die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_2" auf der Bearbeitungsstation "BS_1" zugrundegelegt. Die Ausführungsdauer ist auf dieser Bearbeitungsstation zwar größer als auf der Alternativstation "BS_2". Dennoch wird eine geringere Restarbeitszeit ermöglicht, weil sich in diesem Fall die Arbeitsgänge "AG_2" und "AG_3" nebenläufig ausführen lassen. Dies ist aus dem Ablaufdiagramm, das in Abb. 194 gezeigt wird, unmittelbar ersichtlich. Die alternativen Ausführungsoptionen des Arbeitsgangs "AG_2" sind durch die Zusätze "Option_1/BS_1" und "Option_1/BS_2" für die erste und durch die Zusätze "Option_2/BS_1" und "Option_2/BS_2" für die zweite Arbeitsgangausführung gekennzeichnet. Alle anderen Schlupfzeiten können aus diesem Ablaufdiagramm ebenso entnommen werden. Beispielsweise ergibt sich die o.a. Formel "Restzeit := 33 + 25 · (6 - Wiederholungsanzahl_alt)" für die Restbearbeitungszeit einer Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" aus der Überlegung, daß 33 Minuten für die Herstellung der zweiten - und letzten - Einheit des Endprodukts EP₁ erforderlich sind. Um die zwei gewünschten Endprodukteinheiten herzustellen, sind insgesamt 6 Ausführungen des Arbeitsgangs "AG_1" erforderlich, die jeweils 25 Minuten benötigen. Sie müssen zeitlich nacheinander erfolgen, weil dieser Arbeitsgang ausschließlich auf der Bearbeitungsstation "BS_3" erfolgen kann und weil sich auf jeder Bearbeitungsstation in jedem Zeitpunkt höchstens ein Arbeitsgang ausführen läßt.

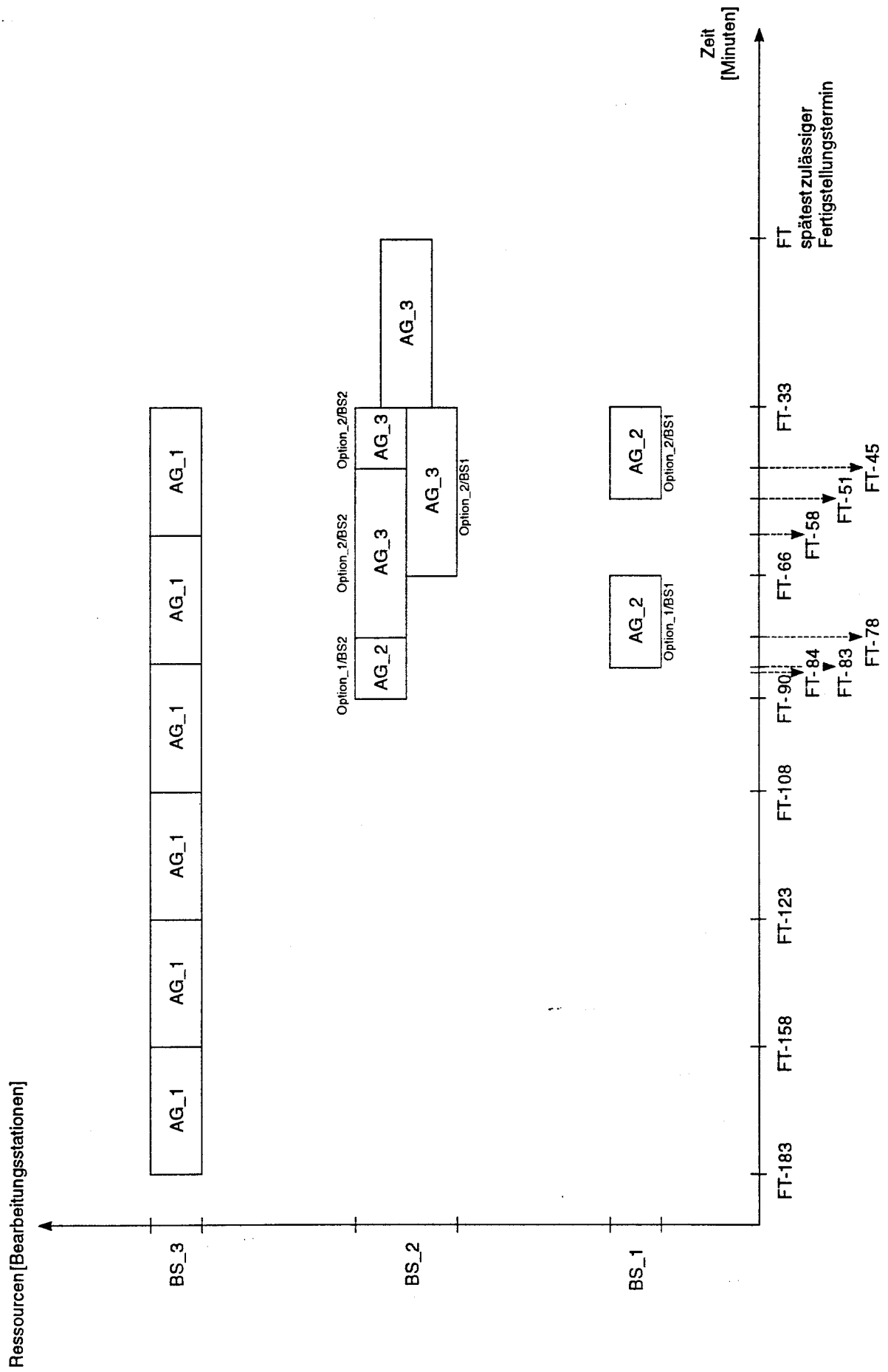


Abb. 194: Ablaufdiagramm für die Arbeitsgangausführungen eines Produktionsauftrags

109) Ein Bearbeitungsauftrag kann zu einem Produktionsauftrag gehören, für den kein (spätest zulässiger) Fertigstellungstermin vorgegeben ist. Dem Attribut "arbeitsgang_schlupfzeit" der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" wird dann die Ausprägung "schlupfzeit_ag_ka()" zugeordnet.

110) Durch das Schalten der Transition t_9 werden unmittelbar die Lageraufträge für drei auszulagernde Vorprodukte erteilt. Darüber hinaus werden mittelbar Transportaufträge für die drei auszulagernden Vorprodukte eingeleitet. Diese Transportaufträge werden im Transportnetz selbständig generiert, sobald jeweils eines der drei Werkstücke im Ausgangspuffer des Werkstücklagers bereitgestellt worden ist.

111) Der Arbeitsgang "AG_1" kann auf der Bearbeitungsstation "BS_3" erst dann ausgeführt werden, wenn sich auf der Stelle "Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG_1" 3 Kopien der auftragspezifischen Werkstückmarke befinden. Denn für die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_1" sind drei Werkstücke als Bearbeitungsobjekte erforderlich. Um diese Dreifachmarkierung der Stelle "Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG_1" zu erreichen, muß die Transition t_{12} dreimal nacheinander geschaltet haben, sobald im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation "BS_3" eines der erforderlichen Werkstücke entladen worden ist. Eine Kopie der Informationsmarke "werkstücktransport" auf der Schnittstelle "Werkstück_entladen" informiert jeweils darüber. Da sich am Übergabepunkt der Bearbeitungsstation immer nur höchstens ein Transportmittel befinden kann, müssen die Werkstücke dort nacheinander entladen werden. Deshalb ist es in der Fallstudie nicht erforderlich, die Transition t_{12} in drei Transitionen mit identischen Transaktionsvorschriften aufzuspalten, die nebenläufig zu schalten vermögen. Dies empfiehlt sich erst dann, wenn die Fallstudie so erweitert wird, daß am Übergabepunkt drei Transportmittel zugleich anwesend sein können.

Die Transition t_{12} sorgt dafür, daß auf ihrer Ausgangsstelle "Bearbeitungsobjekte_sammeln_AG_1" nur solche auftragspezifischen Werkstücke gesammelt werden, die speziell für die jeweils betrachtete Arbeitsgangausführung aus dem zentralen Werkstücklager herantransportiert wurden. Sofern nicht genau diese Werkstücke in den Eingangspuffer der Bearbeitungsstation "BS_3" abgelegt werden, wird die nachfolgende Transition t_{13} auch nicht aktiviert. Daher vermag die Transition t_{12} nicht die Option zu verwirklichen, die in einer früheren Anmerkung angedeutet wurde: Dort wurde eingeräumt, einen Arbeitsgang auch mit solchen Werkstücken auszuführen, die zwar nicht für die betrachtete Arbeitsgangausführung vorgesehen waren, sich aber dennoch dafür als Bearbeitungsobjekte eignen. Diese Ausweichoption läßt sich jedoch durch eine zweite Transition t_{12}^* abdecken. Sie ist analog zur Transition t_{12} konstruiert, besitzt jedoch anstatt der Stelle $s_{TP,1}$ die Stelle $s_{TE,B3}$ als Eingangsstelle. Von ihr wird beim Schalten der Transition t_{12}^* eine Kopie "m_{ws}" der auftragsunspezifischen Werkstückmarke abgezogen. Die Restriktionsformeln "Lagerauftragsstatus = erledigt", "Transportstatus = entladen", "Auftragsname_wst = auftrag_name" und "Werkstückname_wst = Werkstückname_wsl" aus der Schaltvorschrift der Transition t_{12} werden durch die neue Restriktionsformel "Werkstückklasse_ws = Werkstückklasse_wsl" ersetzt. Daraus folgt, daß die Transition t_{12}^* auch dann aktiviert ist, wenn sich im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation "BS_3" ein geeignetes Werkstück befindet. Es gehört wegen der hinzugefügten Restriktionsformel zur selben Werkstückklasse wie dasjenige Werkstück, das vom zentralen Werkstücklager angefordert wurde, aber (noch) nicht eingetroffen ist. Es wird darauf verzichtet, die modifizierte Transition t_{12}^* in die oben präsentierte Netzgraphik und -legende einzubinden. Denn das - ohnehin schon recht umfangreiche - Auftragsnetz soll nicht noch größer ausfallen. Es würde aber keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bereiten, die voranstehend skizzierte Erweiterung vorzunehmen. Sie ließe sich in entsprechender Weise auch für die später modellierten Arbeitsgänge "AG_2" und "AG_3" vornehmen. Dann wären die Transitionen t_{19} , t_{22} und t_{28} analog zu modifizieren.

112) Die Transition t_{13} des Auftragsnetzes entspricht der Transition t_3 aus dem Stelle/Transition-Netz, das in Abb. 180 präsentiert wurde. Ebenso korrespondieren die später eingeführten Transitionen t_{20} , t_{23} und t_{29} des Auftragsnetzes mit Transitionen t_1 , t_2 bzw. t_7 aus dem vorgenannten Stelle/Transition-Netz.

113) Die Transition t_{14} des Auftragsnetzes entspricht der Transition t_6 aus dem Stelle/Transition-Netz, das in Abb. 180 präsentiert wurde. Ebenso korrespondieren die später eingeführten Transitionen t_{21} , t_{24} und t_{30} des Auftragsnetzes mit Transitionen t_4 , t_5 bzw. t_8 aus dem vorgenannten Stelle/Transition-Netz.

114) Die Restriktionsformel "for_15.1" ist hinsichtlich der Werkstückklassentests wiederum redundant. Gleiches gilt für die analoge Formel "for_16.1" der Transition t_{16} .

115) Werkstück- und Bearbeitungsstatus liegen für das vierte Werkstück der Zwischenproduktart ZP_3 bereits fest. Dafür haben frühere Wertzuweisungen während der Ausführung von Arbeitsgang "AG_1" bereits gesorgt. Die beiden Statusangaben werden hier aber der Deutlichkeit halber in redundanter Weise nochmals ausgewiesen.

116) Die Notation der beiden Kopien "m_{14,1}" und "m_{14,2}" wird bewußt durch die Notation "m_{14,a}" und "m_{14,b}" ersetzt. Dadurch soll dem Mißverständnis vorgebeugt werden, daß zwischen den beiden erstgenannten und den beiden letztgenannten Markenkopien eine Reihenfolgebeziehung bestände. Vielmehr kann die Markenkopie "m_{14,1}" in das Schalten der Transition t_{16} sowohl als Kopie "m_{14,a}" als auch als Kopie "m_{14,b}" eingehen. (Gleiches gilt für die Markenkopie "m_{14,2}".) Aus formalen Gründen wäre diese Klarstellung allerdings nicht erforderlich, weil die Variablen von Netzmodellen nur für die lokale Umgebung einer Transition definiert sind. Daher braucht z.B. die Marken-

kopie " $m_{14,1}$ ", die durch das Schalten der Transition t_{15} auf der Stelle $s_{PZ,1}$ abgelegt wird, keineswegs mit der Markenkopie " $m_{14,1}$ " übereinzustimmen, die seitens der Transition t_{16} von der Stelle $s_{PZ,1}$ oder $s_{PZ,2}$ abgezogen wird. Die hier vorgelegte Konstruktion erstreckt sich zunächst nur auf zwei Bearbeitungsstationen, die für die Ausführung des Arbeitsgangs "AG_2" alternativ zur Verfügung stehen. Sie ist aber so ausgelegt, daß sie sich auf beliebig - aber endlich - viele Alternativstationen anwenden läßt. Für den allgemeinen Fall von K alternativen Bearbeitungsstationen für die Ausführung desselben Arbeitsgangs gilt mit $K \in \mathcal{N}_+$ und $K \geq 2$: Das Gewicht der Eingangskante, die von der Stelle $s_{PZ,2}$ aus die Transition t_{16} erreicht, bezieht sich immer auf genau eine Kopie " $m_{14,b}$ " der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag". Diese eine Markenkopie " $m_{14,b}$ " übermittelt die Information, daß der Bearbeitungsauftrag für genau eine Bearbeitungsstation bestätigt worden ist. Das Gewicht der anderen Eingangskante, die von der Stelle $s_{PZ,1}$ aus zur Transition t_{16} führt, baut sich dagegen mit $k \in \{1, \dots, K-1\}$ aus $K-1$ Kopien " $m_{14,ak}$ " der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" auf. (Für den Fall $K=2$, der in der Fallstudie vorliegt, kann die Markenkopie " $m_{14,a/1}$ " vereinfacht als " $m_{14,a}$ " notiert werden.) Die Markenkopien " $m_{14,ak}$ " vertreten die Bearbeitungsaufträge, die an alle $K-1$ alternativen Bearbeitungsstationen erteilt, aber noch nicht bestätigt worden sind. Die Transition t_{16} schaltet wegen ihrer Obligatkanten *sofort*, wenn ihr eine Bearbeitungsstation zugeordnet worden ist. Dabei werden im selben Schaltakt die Markenkopien " $m_{14,ak}$ " für Bearbeitungsaufträge, die an Alternativstationen erteilt wurden, von der Stelle $s_{PZ,2}$ abgezogen. Auf diese Weise wird verhindert, daß der Arbeitsgang, der zu dem bestätigten Bearbeitungsauftrag gehört, einer alternativen Bearbeitungsstation ein weiteres Mal zugeordnet wird. Schließlich besitzt die Transition t_{16} bei K alternativen Bearbeitungsstationen genau K Ausgangsstellen, mit denen die Transition über disjunktiv verknüpfte Ausgangskanten verknüpft ist.

117) Die Transition t_{25} besitzt eine komplexe Verknüpfungslogik. Zwar sind ihre drei Ausgangskanten wie bei allen Transitionen aus dem Kernkonzept Synthetischer Netze konjunktiv verknüpft. Die gleiche konjunktive Verknüpfung gilt jedoch nicht für alle ihre Einflußkanten. Statt dessen sind die beiden Informationskanten, die auf die beiden Informationsstellen $s_{TAB,1}$ und $s_{TAB,2}$ zugreifen, miteinander in disjunktiver Weise verknüpft. Mit allen übrigen Einflußkanten der Transition t_{25} ist das Informationskantenpaar wieder konjunktiv verknüpft. Wie sich diese komplexe Verknüpfungslogik auf die rein konjunktive Ein- und Ausgangslogik von Transitionen aus dem Kernkonzept Synthetischer Netze zurückführen läßt, wurde bereits in einem Beispiel skizziert. Das Beispiel wurde lediglich in zweifacher Hinsicht vereinfacht: Einerseits wurden alle Einflußkanten als Eingangskanten behandelt. Zweitens wurden nur zwei konjunktiv verknüpfte Eingangskanten berücksichtigt, während die Transition t_{25} hier insgesamt acht konjunktiv verknüpfte Eingangskanten besitzt. Diese beiden Vereinfachungen beeinträchtigten jedoch nicht das Prinzip der früher präsentierten Netzkonstruktionen. Sie dienten lediglich der Beschränkung des Konstruktionsvolumens.

118) Durch das Schalten der Transition t_9 werden unmittelbar die Lageraufträge für drei auszulagernde Vorprodukte erteilt. Darüber hinaus werden mittelbar Transportaufträge für die drei auszulagernden Vorprodukte eingeleitet. Diese Transportaufträge werden im Transportnetz selbständig generiert, sobald jeweils eines der drei Werkstücke im Ausgangspuffer des Werkstücklagers bereitgestellt worden ist.

119) Endprodukteinheiten können in der Fallstudie ausschließlich durch Ausführungen des Arbeitsgangs "AG_3" hergestellt werden. Daher könnte der Wiederholungszähler des dritten Arbeitsgangs die Funktion des Endproduktzählers übernehmen. Entsprechend ließen sich die Stelle "Endproduktzähler" und ihre adjazenten Kanten ersatzlos streichen. Auf diese "Optimierung" des Netzmoduls wird jedoch bewußt verzichtet. Denn es soll ebenso für solche Produktionsaufträge gelten, bei denen Einheiten der erwünschten Endproduktart durch verschiedene Arbeitsgänge hervorgebracht werden können. In diesem Fall wäre ein selbständiger Endproduktzähler unbedingt erforderlich.

120) Falls sich eine Kopie der Auftragsmarke auf der Stelle "Auslastungsentscheidung" befindet, sind sowohl die Transition "auslastung_ohne_werkstückabzug" als auch die Transition "auslastung_mit_werkstückabzug" aktiviert. Die beiden Transitionen konkurrieren kann um die eine Markenkopie. Wie dieser Schaltkonflikt aufgelöst wird, hängt von der Entscheidung des Koordinierungsträgers über den Werkstückverbleib ab. Um diesen Dispositionsspielraum offenzuhalten, erfolgt im Netzmodul des Produktionsauftrags bewußt keine Konfliktauflösung.

121) In der Fallstudie gehen nur aus den Ausführungen des Arbeitsgangs "AG_3" fertiggearbeitete Werkstücke hervor. Daher reicht hier die eine Transition "subaufträge_anstoßen" aus. Im allgemeinen Fall muß jedoch beachtet werden, daß mehrere Arbeitsgänge für das Hervorbringen fertiggearbeiteter Werkstücke in Betracht kommen. Dies läßt sich auf zwei alternative Weisen berücksichtigen. Entweder wird an der einen Transition "subaufträge_anstoßen" festgehalten. Aber sie wird jeder Stelle, der das Prädikatssymbol "Arbeitsgang_ausgeführt_AGi" mit $i \in \{1, 2, 3\}$ zugeordnet ist, über eine Eingangskante verknüpft, falls die Arbeitsgangausführung ein fertiggearbeitetes Werkstück hervorzubringen vermag. Die Eingangskanten der Transition "subaufträge_anstoßen" werden untereinander disjunktiv verknüpft. Daher ist die Transition "subaufträge_anstoßen" aktiviert, sobald sich im Ausgangspuffer irgendeiner Bearbeitungsstation ein fertiggearbeitetes Werkstück aufhält. Oder die Transition "subaufträge_anstoßen" wird in so viele Subtransitionen "subaufträge_anstoßen_k" mit $k \in \{1, \dots, K\}$ aufgespalten, wie der modellierte Produktionsauftrag unterschiedliche Arbeitsgänge besitzt, aus denen fertiggearbeitete Werkstücke hervorgerufen werden können. (In der Fallstudie gilt $K=1$.) Jede dieser Subtransitionen ist genau dann aktiviert, wenn nach der Ausführung ihres Arbeitsgangs ein fertiggearbeitetes Werkstück vorliegt. Beide vorgenannten Konstruktionen verhalten

sich äquivalent. Es spielt daher keine Rolle, ob entweder eine (Makro-)Transition mit K disjunktiv verknüpften Eingangskanten oder aber K Subtransitionen mit jeweils genau einer Eingangskante benutzt werden.

122) Dem Attribut "Übergabestationsname" der Informationsmarke "werkstücktransport" könnte zwar in der hier modellierten Fallstudie durch die Formel "for_32" unmittelbar die Ausprägung "BS_2" zugewiesen werden. Darauf wird aber verzichtet. Statt dessen wird abermals ausgenutzt, daß die auftragsspezifische Werkstückmarke die Information über den Stationsnamen als aktuelle Ausprägung ihres Attributs "werkstückort" umfaßt. Daher kann die Information über den aktuellen Aufenthaltsort des fertigbearbeiteten Werkstücks von der Werkstück- an die Informationsmarke direkt weitergegeben werden. Diese Konstruktion erweist sich vorteilhaft für Anwendungen des Auftragsnetzes auf Produktionsaufträge mit anderen Ablaufstrukturen. Denn sie läßt sich auch dann anwenden, wenn zwischen alternativen Bearbeitungsstationen für das Hervorbringen eines fertigbearbeiteten Werkstücks ausgewählt werden kann. In diesem Fall informiert das Attribut "werkstückort" durch seine aktuelle Ausprägung darüber, im Ausgangspuffer welcher Bearbeitungsstation das fertigbearbeitete Werkstück bereitsteht.

123) Die Kosten der Auftragsabwicklung werden hier jeweils mit dem Startwert "Null" initialisiert. Sie könnten aber auch mit beliebigen anderen positiven Startwerten versehen werden, um fixe Beiträge zu den Abwicklungskosten zu berücksichtigen. Aus diesem Grunde wurde oben kein nullstelliges Operationssymbol "kosten_pa_ka()" eingeführt.

124) Solche Arbeitsgänge können bereits im Arbeitsplan des abzuwickelnden Produktionsauftrags enthalten sein. Die Arbeitsgänge, die zum Aufspannen von Werkstücken der Vorproduktart VP_i dienen (mit $i \in \{4,5,6\}$), werden als Spannarbeitsgänge "AG_Si" notiert. In analoger Weise werden die Arbeitsgänge für das Abspannen von Werkstücken der Endproduktart EP_j (mit $j \in \{1\}$) als Spannarbeitsgänge "AG_Sj" bezeichnet.

125) Die Ergänzung der vier Spannarbeitsgänge vermittelt jedoch keine grundsätzlich neuartigen Erkenntnisse. Daher wird darauf verzichtet, hier das modifizierte Auftragsnetz zu präsentieren.

7.3 Integration der Systemkomponenten

Die Integration der Netzmodule, die einzelne Komponenten des hier modellierten Produktionssystems repräsentieren, erfolgt grundsätzlich mit der Hilfe von Schnittstellen. Dabei handelt es sich um Stellen, die in mehreren Netzmodulen gemeinsam enthalten sind. Diese Schnittstellen wurden schon bei der Konstruktion der jeweils betroffenen Netzmodule eingeführt¹⁾. Über eine Schnittstelle können einerseits Markenkopien von einem Netzmodul in ein anderes Netzmodul hinübertreten. Dazu gehören sowohl Markenkopien, die real existierende Objekte repräsentieren²⁾, als auch die Kopien der verschiedenen Informationsmarken. Insbesondere die Kopien der Informationsmarken dienen dazu, die Schaltprozesse in den einzelnen Netzmodulen aufeinander abzustimmen³⁾. Andererseits lassen sich über eine Schnittstelle ebenso die aktuellen Attributausprägungen einer Markenkopie zur Kenntnis nehmen, die sich in einem anderen Netzmodul befindet und auch dort verbleibt⁴⁾. Beiden vorgenannten Fällen gemeinsam ist, daß das Schaltverhalten von Netzmodulen durch Markenkopien koordiniert wird, die sich - vorübergehend oder dauerhaft - an den gemeinsamen Schnittstellen der Module befinden. Es erfolgt also eine Modulintegration durch Verhaltenskoordinierung⁵⁾.

Die detaillierte Ausgestaltung dieser Verhaltenskoordinierung geschah bereits bei der Konstruktion der betroffenen Netzmodule. Sie wird daher hier nicht nochmals vorgetragen. Allerdings wurden bislang zwei Koordinierungsaspekte offengelassen. Erstens handelt es sich um die globale Synchronisation aller Netzmodule durch eine zentrale Systemuhr. Sie konstituiert für die Ausführung zeitverbrauchender Operationen in den einzelnen Netzmodulen einen einheitlichen Zeitmaßstab⁶⁾. Zweitens ist die lokale⁷⁾ Synchronisation zwischen freien Bearbeitungsstationen und auszuführenden Arbeitsgängen betroffen. Sie wird hier durch ein spezielles Zuordnungsmodul geleistet⁸⁾.

Das Zuordnungsmodul führt Bearbeitungsofferten und Bearbeitungsaufträge miteinander zusammen. Die Bearbeitungsaufträge werden bei der Abwicklung von Produktionsaufträgen erzeugt, um jeweils einen auftragszugehörigen Arbeitsgang ausführen zu lassen. Die Bearbeitungsofferten werden dagegen von Bearbeitungsstationen abgegeben, solange sie betriebsbereit und frei sind. Die Informationen über Bearbeitungsofferten und -aufträge liegen an den Schnittstellen $s_{BZ,2}$ und $s_{PZ,1}$ des Zuordnungsmoduls in der Gestalt von Kopien der Informationsmarken "bearbeitungsofferte" bzw. "bearbeitungsauftrag" vor. Durch jedes Schalten der Transition "zuordnung" wird im Zuordnungsmodul genau eine Bearbeitungsofferte mit genau einem Bearbeitungsauftrag kombiniert⁹⁾. Dabei wird der Arbeitsgang, auf den sich der Bearbeitungsauftrag erstreckt, einer Bearbeitungsstation zugewiesen, die eine Bearbeitungsofferte unterbreitet hat. Im wesentlichen¹⁰⁾ wird dabei überprüft, ob sich Bearbeitungsauftrag und Bearbeitungsofferte auf dieselbe Bearbeitungsstation erstrecken¹¹⁾. Informationen über die erfolgreiche Zuordnung zwischen Arbeitsgang und Bearbeitungsstation werden an den Schnittstellen $s_{BZ,1}$ und $s_{PZ,2}$ des Zuordnungsmoduls bereitgestellt. Dort unterrichten sie die beiden Netzmodule des betroffenen Produktionsauftrags und der zugeordneten Bearbeitungsstation¹²⁾. Abb. 195 auf der nächsten Seite zeigt die Netzgraphik des Zuordnungsmoduls. Auf der übernächsten Seite schließt sich die zugehörige Netzlegende an.

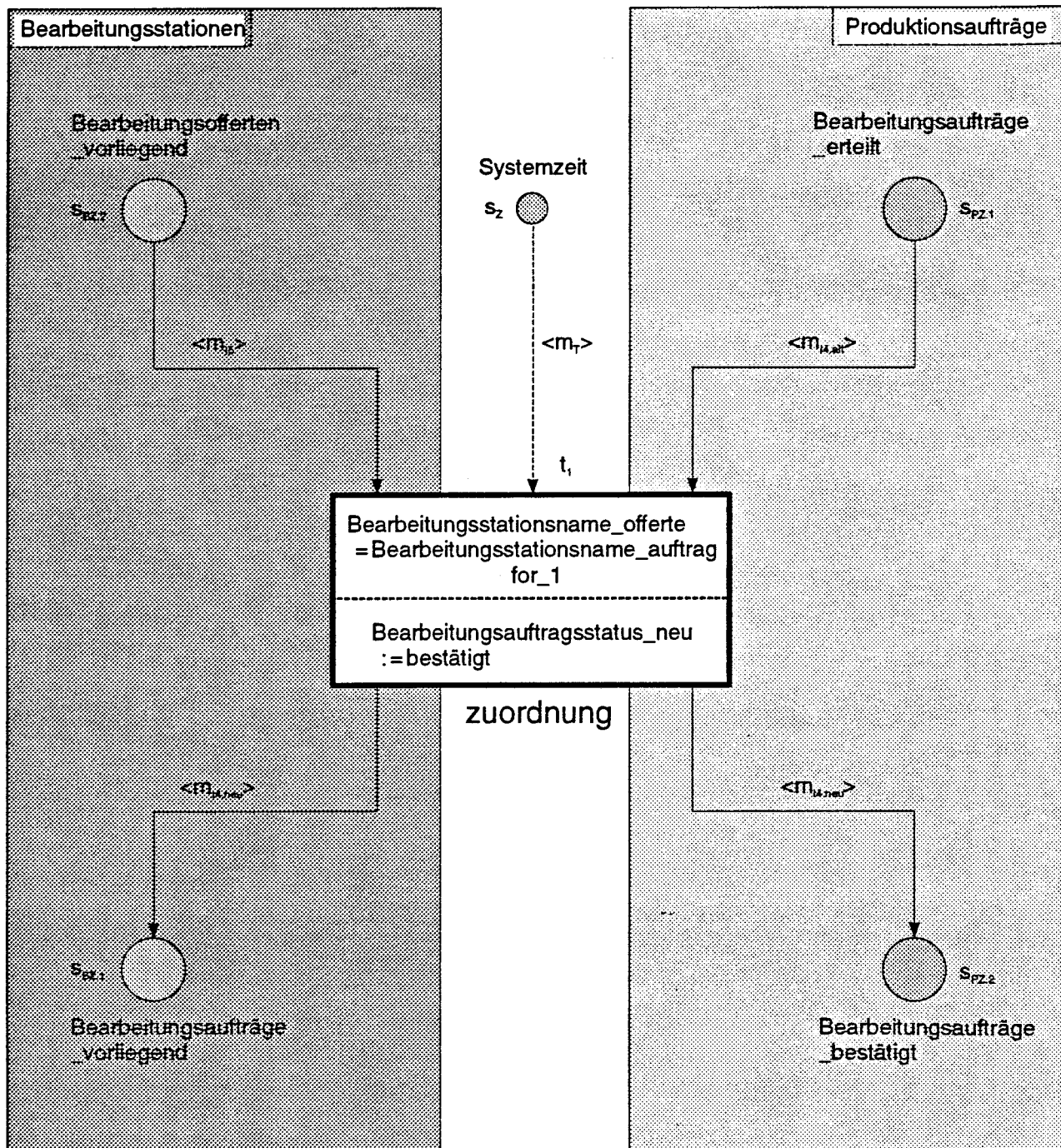


Abb. 195: Netzgraphik für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

bearbeitungskostensatz = 7.75

sicherheitszuschlag= 0.20

zeitpunkt:	INTEGER	
zeitdauer:	INTEGER	
kosten:	REAL	
arbeitsgangname:	STRING	
auftragsname:	STRING	
werkstückname:	STRING	
werkstückklasse:	STRING	
priorität:	INTEGER	
auftragswert:	REAL	
pufferplatz:	INTEGER	
bearbeitungsstationsname:	STRING	
"BS_1","BS_2",		
"BS_3","BS_4":		→ OB _{bearbeitungsstationsname}
belegungsstatus:SYMBOL		
belegt,frei,nil:		→ OB _{belegungsstatus}
bearbeitungsauftragsstatus:	SYMBOL	
erteilt,bestätigt,begonnen,		
erledigt,abgebrochen:		→ OB _{bearbeitungsauftragsstatus}
rüszustand:	SYMBOL	
gerüstet_0,gerüstet_1,		
gerüstet_2,gerüstet_3:		→ OB _{rüszustand}
automatisierungsgrad:	SYMBOL	
vollautomatisch,bemannt:		→ OB _{automatisierungsgrad}
zuordnungseignung:	SYMBOL	
geeignet,ungeeignet:		→ OB _{zuordnungseignung}
werkstückklasse:	STRING	
"WSK_1","WSK_2","WSK_3",		
"WSK_4","WSK_5","WSK_6","WSK_7:		→ OB _{werkstückklasse}
werkstückklassenliste =	werkstückklasse*	

$\langle m_{IS} \rangle \approx \text{bearbeitungsofferte} = \text{Informationsmarke_bo}(\text{bearbeitungsstationsname}$
 $\text{pufferplatz bearbeitungskostensatz}$
 $\text{verfügbarkeitsdauer letzter_zeitpunkt})$
 $\langle m_T \rangle \approx \text{syszeit} = \text{Zeitmarke_sys}(\text{zeitpunkt})$

Stellen/Prädikatssymbole:

$s_{BZ.1}$: $\text{Bearbeitungsaufträge_vorliegend}(\text{bearbeitungsauftrag})$
 $\text{markenkapazität}_{BZ.1} = \omega$
 $s_{BZ.2}$: $\text{Bearbeitungsofferten_vorliegend}(\text{bearbeitungsofferte})$
 $\text{markenkapazität}_{BZ.2} = \omega$
 $s_{PZ.1}$: $\text{Bearbeitungsaufträge_erteilt}(\text{bearbeitungsauftrag})$
 $\text{markenkapazität}_{PZ.1} = \omega$
 $s_{PZ.2}$: $\text{Bearbeitungsaufträge_bestätigt}(\text{bearbeitungsauftrag})$
 $\text{markenkapazität}_{PZ.2} = \omega$
 s_Z : $\text{Systemzeit}(\text{syszeit})$
 $\text{markenkapazität}_Z = 1$

Transitionen/Transaktionen:

t_1 : zuordnung
 $\langle m_{IS} \rangle \approx \text{bearbeitungsofferten_vorliegend}(\text{informationsmarke_bo}(\text{Bearbeitungs-}$
 $\text{stationsname_offerte, Pufferplatz, bearbeitungskostensatz,}$
 $\text{verfügbarkeit}(\text{Vfbdauer}), \text{letzte_ermittlung}(\text{Emtzeitpunkt}))$
 $\langle m_{I4,alt} \rangle \approx \text{bearbeitungsaufträge_erteilt}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungs-}$
 $\text{stationsname_auftrag, arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname,}$
 $\text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname}), \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand}),$
 $\text{ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{werkzeuge_ag}(\text{Werkzeugklassenliste}),$
 $\text{input}(\text{Werkstückklassenliste}), \text{output}(\text{Werkstückname_ag,}$
 $\text{Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad,}$
 $\text{durchlaufzeit_age}(\text{Durchlauf_ag}), \text{herstellung_age}(\text{Hstkosten_ag}),$
 $\text{Arbeitsgang_schlupfzeit, Priorität, Auftragswert}),$
 $\text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}), \text{Bearbeitungsauftragsstatus_alt}))$
 $\langle m_T \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$
 $\text{Bearbeitungsstationsname_offerte} = \text{Bearbeitungsstationsname_auftrag}$
 $\text{for_1} := \dots$
 $\#(\text{Werkstückklassenliste}) \leq \text{Pufferplatz}$
 $\wedge \text{Vfbdauer} - (\text{Time} - \text{Emtzeitpunkt}) \geq (1 + \text{sicherheitszuschlag}) \cdot \text{Agadauer}$

$\wedge ((\text{integer}(K) \wedge K \geq 1 \wedge \dots$
 $(K-1) \cdot 1440 + 840 \leq \text{Time} < (K-1) \cdot 1440 + 1440)$
 $\rightarrow \text{Automatisierungsgrad} = \text{vollautomatisch}$ 14)
 $\wedge \text{Bearbeitungsauftragsstatus_alt} = \text{erteilt}$
 $\text{Bearbeitungsauftragsstatus_neu} := \text{bestätigt}$

$\langle m_{I4.\text{neu}} \rangle = \text{bearbeitungsaufträge_vorliegend}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungs-}$
 $\text{stationsname_ba}, \text{arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname},$
 $\text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname}), \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand}),$
 $\text{ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{werkzeuge_ag}(\text{Werkzeugklassenliste}),$
 $\text{input}(\text{Werkstückklassenliste}), \text{output}(\text{Werkstückname_ag},$
 $\text{Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad}, \text{durchlaufzeit_age}(\text{Durchlauf_ag}),$
 $\text{herstellung_age}(\text{Hstkosten_ag}), \text{Arbeitsgang_schlupfzeit}, \text{Priorität},$
 $\text{Auftragswert}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}),$
 $\text{Bearbeitungsauftragsstatus_neu})$

$\langle m_{I4.\text{neu}} \rangle = \text{bearbeitungsaufträge_bestätigt}(\text{informationsmarke_ba}(\text{Bearbeitungs-}$
 $\text{stationsname_ba}, \text{arbeitsgang}(\text{Arbeitsgangname},$
 $\text{zuordnung_agpa}(\text{Auftragsname}), \text{sollrüstung}(\text{Sollrüstzustand}),$
 $\text{ausführung_ag}(\text{Agadauer}), \text{werkzeuge_ag}(\text{Werkzeugklassenliste}),$
 $\text{input}(\text{Werkstückklassenliste}), \text{output}(\text{Werkstückname_ag},$
 $\text{Werkstückklasse_ag}), \text{Automatisierungsgrad}, \text{durchlaufzeit_age}(\text{Durchlauf_ag}),$
 $\text{herstellung_age}(\text{Hstkosten_ag}), \text{Arbeitsgang_schlupfzeit}, \text{Priorität},$
 $\text{Auftragswert}), \text{auftragserteilung}(\text{Ertzeitpunkt}),$
 $\text{Bearbeitungsauftragsstatus_neu})$

Fakten: ---

Die Transition "zuordnung" des Zuordnungsmoduls wird des öfteren durch unterschiedliche Kombinationen aus je einer Kopie der Informationsmarke "bearbeitungsofferte" und der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" aktiviert sein. Es liegt dann ein Abundanzkonflikt vor: Die Transition kann in genau einem von *mehreren* zulässigen Modi geschaltet werden¹⁵⁾. Wie dieser Abundanzkonflikt aufzulösen ist, wird im Zuordnungsmodul *nicht* spezifiziert. Statt dessen läßt es sich durch ein weites Spektrum von Vorschriften überlagern, die der wechselseitigen Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen dienen. In Betracht kommen alle Zuordnungsvorschriften, die nur diejenigen Informationen benötigen, die von den Attributen der beiden Informationsmarken angeboten werden. Um eine größere Vorschriftenauswahl zuzulassen, wurde bei der Modellierung des Auftragsnetzes darauf Wert gelegt, in die Attributstruktur der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" auch solche Informationen aufzunehmen, die im Rahmen der Fallstudie nicht erforderlich waren.

Wenn sich der Koordinierungsträger für eine bestimmte Zuordnungsvorschrift entschieden hat, kann sie im Zuordnungsmodul auf mindestens¹⁶⁾ zwei Weisen berücksichtigt werden. Entweder wird sie in die Schaltvorschrift der Transition "zuordnung" aufgenommen. Die Netzgraphik des Zuordnungsmoduls bleibt dann unverändert. Oder aber die Transition "zuordnung" wird nachträglich als eine Makrotransition interpretiert. Im zweiten Fall wird die ausgewählte

Zuordnungsvorschrift herangezogen, um die Makrotransition durch ein verfeinertes Subnetz zu ersetzen. Dabei läßt sich auf die Verfeinerungstechnik zurückgreifen, die früher skizziert wurde, um Produktionsregelnetze in äquivalente Regelnetze zu transformieren. Es muß lediglich vorausgesetzt werden, daß sich die Vorschrift für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen als eine Produktionsregelmenge ausdrücken läßt. Diese Prämisse ist für produktionswirtschaftlich interessante Zuordnungsvorschriften im allgemeinen erfüllt. Das gilt insbesondere auch für die häufig verwendeten Prioritätsregeln. Sie stellen entweder einfache Produktionsregeln oder aber Komplexe aus hierarchisch verschachtelten Produktionsregeln dar.

Es liegt außerhalb des Anspruchs der hier vorgelegten Fallstudie, die Überlagerungen des Zuordnungsmoduls durch verschiedene Vorschriften für die Zuordnung von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen näher auszuführen¹⁷⁾. Statt dessen wird - als pars pro toto - nur eine Zuordnungsregel mittlerer Komplexität betrachtet. Es handelt sich um eine vierfach geschichtete Prioritätsregel¹⁸⁾. Sie schreibt vor:

- Von allen Bearbeitungsaufträgen, deren Arbeitsgänge um die betriebsbereiten und freien Bearbeitungsstationen konkurrieren, werden diejenigen mit den höchsten¹⁹⁾ Prioritäten ausgewählt.
- Falls mehrere Bearbeitungsaufträge mit höchsten Prioritäten verbleiben, werden Aufträge bevorzugt, deren Arbeitsgänge minimale Schlupfzeiten aufweisen²⁰⁾.
- Wenn mehrere Bearbeitungsaufträge vorliegen, denen dieselbe höchste Priorität und dieselbe minimale Schlupfzeit zukommen, werden diejenigen Aufträge präferiert, die zeitlich am frühesten erteilt worden sind²¹⁾.
- Sofern sich mehrere Bearbeitungsaufträge mit höchster Priorität, minimaler Schlupfzeit und frühestem Erteilungszeitpunkt zuordnen lassen, wird derjenige Bearbeitungsauftrag ausgewählt, dessen Arbeitsgang sich auf der Bearbeitungsstation mit dem geringsten Bearbeitungskostensatz ausführen läßt. Kommen hierfür mehrere Bearbeitungsaufträge in Betracht, so erfolgt eine willkürliche Auswahl durch den Koordinierungsträger²²⁾.

Diese hierarchisch zusammengesetzte Prioritätsregel läßt sich ohne größere Schwierigkeiten in das Modul für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen aufnehmen. Zu diesem Zweck reicht es aus, die Schaltvoraussetzung der Formel "for_1" aus der Transition "zuordnung" um zusätzliche Vorschriften für die Einhaltung der Prioritätsregel zu erweitern²³⁾. Dies entspricht der ersten der beiden oben angeführten Weisen, Zuordnungsvorschriften in das Zuordnungsmodul des Netzmodells zu integrieren. Allerdings muß der Sonderfall beachtet werden, daß alle Bearbeitungsaufträge mit derselben höchsten Priorität keinen spätest zulässigen Fertigstellungstermin besitzen. Dann sind für sie auch keine Schlupfzeiten definiert. Aus diesem Grund wird zwischen zwei Transitionen "zuordnung_mit_schlupf" und "zuordnung_ohne_schlupf" unterschieden²⁴⁾. Da Bearbeitungsaufträge ohne definierte Schlupfzeiten keine besondere Dringlichkeit besitzen, werden sie nur dann in die Zuordnung einbezogen, wenn kein Bearbeitungsauftrag mit höchster Priorität vorliegt, der eine wohldefinierte Schlupfzeit besitzt. Diese Unterordnung der zweiten unter die erste Transition wird durch entsprechende Schaltprioritäten realisiert. Die Deklarationen der beiden Transitionen in der Netzlegende²⁵⁾ lauten daher:

t_{1.1}: zuordnung_mit_schlupf

```
<m15> = bearbeitungsofferten_vorliegend(informationsmarke_bo(Bearbeitungs-
stationsname_offerte,Pufferplatz,bearbeitungskostensatz,
verfügbarkeit(Vfbdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt)))
```

```
<m14.alt> = bearbeitungsaufträge_erteilt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname_auftrag,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand),
```

```

ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

```

Bearbeitungsstationsname_offerte = Bearbeitungsstationsname_auftrag

for_1.1 : \Leftrightarrow ...

#(Werkstückklassenliste) \leq Pufferplatz

\wedge Vfbdauer-(Time-Emtzeitpunkt) \geq (1 + sicherheitszuschlag) • Agadauer

\wedge ((integer(K) \wedge K \geq 1 \wedge ...

(K-1) • 1440 + 840 \leq Time < (K-1) • 1440 + 1440)

\rightarrow Automatisierungsgrad = vollautomatisch)

\wedge Bearbeitungsauftragsstatus_alt = erteilt

\wedge Priorität = min {Prioritäten: ...

```

fakt(1, bearbeitungsaufträge_erteilt(informations-
marke_ba(Bearbeitungsstationsname_offerte,
arbeitsgang(.,.,.,.,.,.,.,.,.,.,Automatisierungsgrad,
Prioritäten,.,),auftragserteilung(.,bestätigt)))}

```

\wedge Schlupfzeit = min {Schlupfzeiten: ...

```

fakt(1, bearbeitungsaufträge_erteilt(informations-
marke_ba(Bearbeitungsstationsname_offerte,
arbeitsgang(.,.,.,.,.,.,.,.,.,.,Automatisierungsgrad,Priorität,
schlupf_ag(Schlupfzeiten),.,),auftragserteilung(.,bestätigt)))}

```

\wedge Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: ...

```

fakt(1, bearbeitungsaufträge_erteilt(informations-
marke_ba(Bearbeitungsstationsname_offerte,
arbeitsgang(.,.,.,.,.,.,.,.,.,.,Automatisierungsgrad,Priorität,
schlupf_ag(Schlupfzeit),.,),auftragserteilung(Ertzeitpunkte),
bestätigt)))}

```

schaltpriorität(sp_1.1)

Bearbeitungsauftragsstatus_neu := bestätigt

```

<mI4.neu> = bearbeitungsaufträge_vorliegend(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname_ba,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),
herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,
Auftragswert),auftragserteilung(Ertzeitpunkt),

```

```

    Bearbeitungsauftragsstatus_neu))
<mI4,neu> ≈ bearbeitungsaufträge_bestätigt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname_ba,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),
herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,
Auftragswert),auftragserteilung(Ertzeitpunkt),
Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

```

t_{1,2}: zuordnung_ohne_schlupf

```

<mI5> ≈ bearbeitungsofferten_vorliegend(informationsmarke_bo(Bearbeitungs-
stationsname_offerte,Pufferplatz,bearbeitungskostensatz,
verfügbarkeit(Vfbdauer),letzte_ermittlung(Emtzeitpunkt)))
<mI4,alt> ≈ bearbeitungsaufträge_erteilt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname_auftrag,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,
durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),herstellung_age(Hstkosten_ag),
Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,Auftragswert),
auftragserteilung(Ertzeitpunkt),Bearbeitungsauftragsstatus_alt))

```

Bearbeitungsstationsname_offerte = Bearbeitungsstationsname_auftrag

for_{1,2} : \Leftrightarrow ...

- #(Werkstückklassenliste) \leq Pufferplatz
- \wedge Vfbdauer-(Time-Emtzeitpunkt) \geq (1 + sicherheitszuschlag) • Agadauer
- \wedge ((integer(K) \wedge K \geq 1 \wedge ...
 - (K-1) • 1440 + 840 \leq Time < (K-1) • 1440 + 1440)
 - \rightarrow Automatisierungsgrad = vollautomatisch)
- \wedge Bearbeitungsauftragsstatus_alt = erteilt
- \wedge Priorität = min {Prioritäten: ...
 - fakt(1, bearbeitungsaufträge_erteilt(informations-
 marke_ba(Bearbeitungsstationsname_offerte,
 arbeitsgang(_____,_____,_____,_____,_____,_____,Automatisierungsgrad,
 Prioritäten,_____),auftragserteilung(_____),bestätigt))}
- \wedge Ertzeitpunkt = min {Ertzeitpunkte: ...
 - fakt(1, bearbeitungsaufträge_erteilt(informations-
 marke_ba(Bearbeitungsstationsname_offerte,

```

        arbeitsgang(_____,Automatisierungsgrad,Priorität,
        schlupf_ag_ka(_____),auftragserteilung(Ertzeitpunkte),bestätigt)))}
schaltpriorität(sp_1.2)
Bearbeitungsauftragsstatus_neu := bestätigt

<mI4.neu> ≈ bearbeitungsaufträge_vorliegend(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname_ba,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),
herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,
Auftragswert),auftragserteilung(Ertzeitpunkt),
Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

<mI4.neu> ≈ bearbeitungsaufträge_bestätigt(informationsmarke_ba(Bearbeitungs-
stationsname_ba,arbeitsgang(Arbeitsgangname,
zuordnung_agpa(Auftragsname),sollrüstung(Sollrüstzustand),
ausführung_ag(Agadauer),werkzeuge_ag(Werkzeugklassenliste),
input(Werkstückklassenliste),output(Werkstückname_ag,
Werkstückklasse_ag),Automatisierungsgrad,durchlaufzeit_age(Durchlauf_ag),
herstellung_age(Hstkosten_ag),Arbeitsgang_schlupfzeit,Priorität,
Auftragswert),auftragserteilung(Ertzeitpunkt),
Bearbeitungsauftragsstatus_neu))

```

Schaltprioritäten: sp_1.1 > sp_1.2

Im folgenden wird die globale Synchronisation der Netzmodule durch eine gemeinsame zentrale Systemuhr präzisiert. Der Fallstudie liegt eine einfach strukturierte Systemuhr zugrunde²⁶⁾. Sie läßt nur das diskrete Voranschreiten einer ganzzahligen Systemzeit zu²⁷⁾. Als Zeiteinheit wurde die Minute gewählt. Den aktuellen Stand der Systemzeit repräsentiert eine Kopie der Zeitmarke durch die Ausprägung ihres Attributs "zeitpunkt". Unter jeder Netzmarkierung befindet sich genau eine Kopie der Zeitmarke auf der Schnittstelle s_z , die mit dem Prädikatssymbol "Systemzeit" beschriftet ist. Diese Schnittstelle verknüpft alle Netzmodule, die zeitverbrauchende Transitionen enthalten, mit der zentralen Systemuhr²⁸⁾. Dadurch werden die Schaltakte der zeitverbrauchenden Transitionen synchronisiert. Die Schaltsynchronisation erfolgt auf indirekte Weise, weil die betroffenen Transitionen nicht unmittelbar miteinander in Kontakt stehen. Vielmehr werden sie dadurch mittelbar gekoppelt, daß sie gemeinsam auf dieselbe Kopie der Zeitmarke zugreifen, die sich unter der aktuellen Netzmarkierung auf der Schnittstelle s_z befindet.

Der Anfang und das Ende des Koordinierungszeitraums, innerhalb dessen sich zeitverbrauchende Transitionen der übrigen Netzmodule aktivieren und schalten lassen, werden durch die Attribute von zwei Hilfsmarken festgelegt²⁹⁾. Es hängt von der jeweils gewählten Ausgangsmarkierung des Netzmoduls für die Systemuhr ab, welche Ausprägungen diese beiden Attribute besitzen³⁰⁾. Für die Fallstudie wurde ein Koordinierungszeitraum von zwei Kalenderwochen - umgerechnet auf die Zeiteinheit von Minuten - ausgewählt³¹⁾. Darüber hinaus enthält das Netz-

modul eine Integritätsbedingung³²⁾. Sie grenzt alle Ausgangsmarkierungen aus, die zeitlich inkonsistent sind, weil sie das Koordinierungsende dem Koordinierungsbeginn vorangehen lassen. Das Verbot solcher unzulässigen Ausgangsmarkierungen wird mit der Hilfe einer faktischen Transition modelliert, die niemals aktiviert sein darf. Abb. 196 auf der nächsten Seite präsentiert die Netzgraphik für das Netzmodul der Systemuhr. Danach folgt die zugehörige Netzlegende³³⁾. Den Ausklang bildet die modifizierte Netzgraphik der Abb. 197. Sie gibt wiederum das Netzmodul der Systemuhr wieder. Diesmal wird die Integritätsbedingung für zeitlich konsistente Ausgangsmarkierungen aber nicht durch eine faktische Transition modelliert. Ihren Platz nimmt eine obligatorische Transition ein, die im Falle einer Integritätsverletzung schalten muß. Sie erzeugt dadurch eine Fehlermeldung, die auf der Stelle "Inkonsistenter_koordinierungszeitraum" abgelegt wird. Diese Modellierungsvariante ist weniger streng, weil sie inkonsistente Ausgangsmarkierungen nicht zu verhindern vermag. Dafür gestattet sie aber, den Benutzer des Netzmodells über den Eintritt einer Integritätsverletzung automatisch zu informieren.

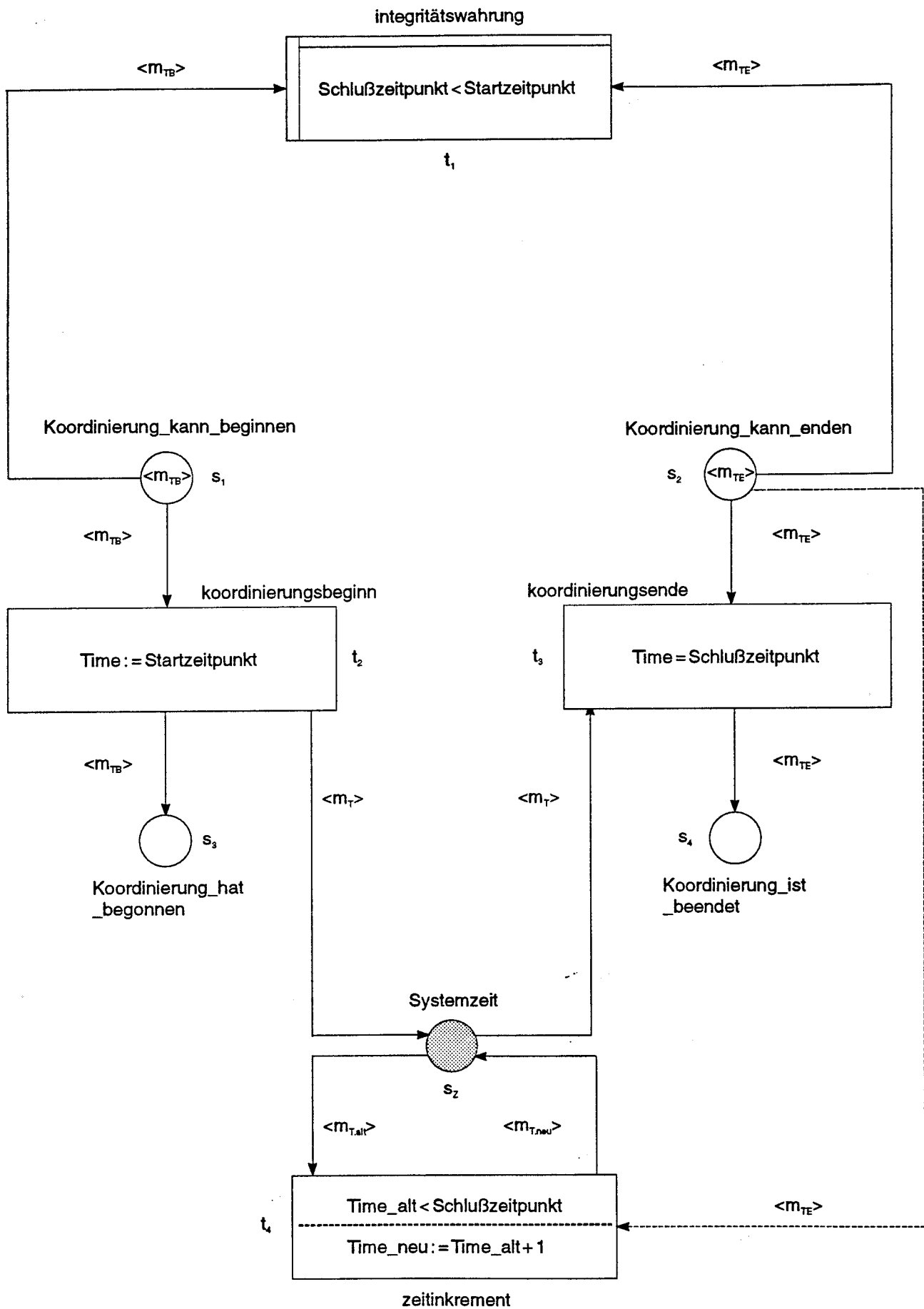


Abb. 196: Netzgraphik der Systemuhr mit Ganzzahlzeit-Anzeige und faktischer Transition

Netzlegende:Marken/Operationssymbole:

zeitpunkt: INTEGER
 <m_T> ≈ syszeit = Zeitmarke_sys(zeitpunkt)
 <m_{TB}> ≈ sysbeginn = Zeitmarke_beg(zeitpunkt)
 <m_{TE}> ≈ sysende = Zeitmarke_end(zeitpunkt)

Stellen/Prädikatssymbole:

s_Z: Systemzeit(syszeit)
 markenkapazität_Z = 1
 s₁: Koordination_kann_beginnen(sysbeginn)
 markenkapazität₁ = 1
 s₂: Koordination_kann_enden(sysende)
 markenkapazität₂ = 1
 s₃: Koordination_hat_begonnen(sysbeginn)
 markenkapazität₃ = 1
 s₄: Koordination_ist_beendet(sysende)
 markenkapazität₄ = 1

Transitionen/Transaktionen:

t₁: integritätswahrung
 <m_{TB}> ≈ koordinierung_kann_beginnen(zeitmarke_beg(Startzeitpunkt))
 Schlußzeitpunkt < Startzeitpunkt
 <m_{TE}> ≈ koordinierung_kann_enden(zeitmarke_beg(Schlußzeitpunkt))
 t₂: koordinierungsbeginn
 <m_{TB}> ≈ koordinierung_kann_beginnen(zeitmarke_beg(Startzeitpunkt))
 Time := Startzeitpunkt
 <m_{TB}> ≈ koordinierung_hat_begonnen(zeitmarke_beg(Startzeitpunkt))
 <m_T> ≈ systemzeit(zeitmarke_sys(Time))
 t₃: koordinierungsende

Time = Schlußzeitpunkt

$\langle m_{TE} \rangle \approx \text{koordinierung_ist_beendet}(\text{zeitmarke_beg}(\text{Schlußzeitpunkt}))$

t_4 : zeitinkrement

$\langle m_{T.alt} \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time_alt}))$

$\langle m_{TE} \rangle \approx \text{koordinierung_kann_enden}(\text{zeitmarke_beg}(\text{Schlußzeitpunkt}))$

Time_alt < Schlußzeitpunkt

Time_neu := Time_alt + 1

$\langle m_{T.neu} \rangle \approx \text{systemzeit}(\text{zeitmarke_sys}(\text{Time}))$

Fakten:

$\langle m_{TB} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{koordinierung_kann_beginnen}(\text{zeitmarke_beg}(0)))$

$\langle m_{TE} \rangle \approx \text{fakt}_0(1, \text{koordinierung_kann_enden}(\text{zeitmarke_end}(20160)))$

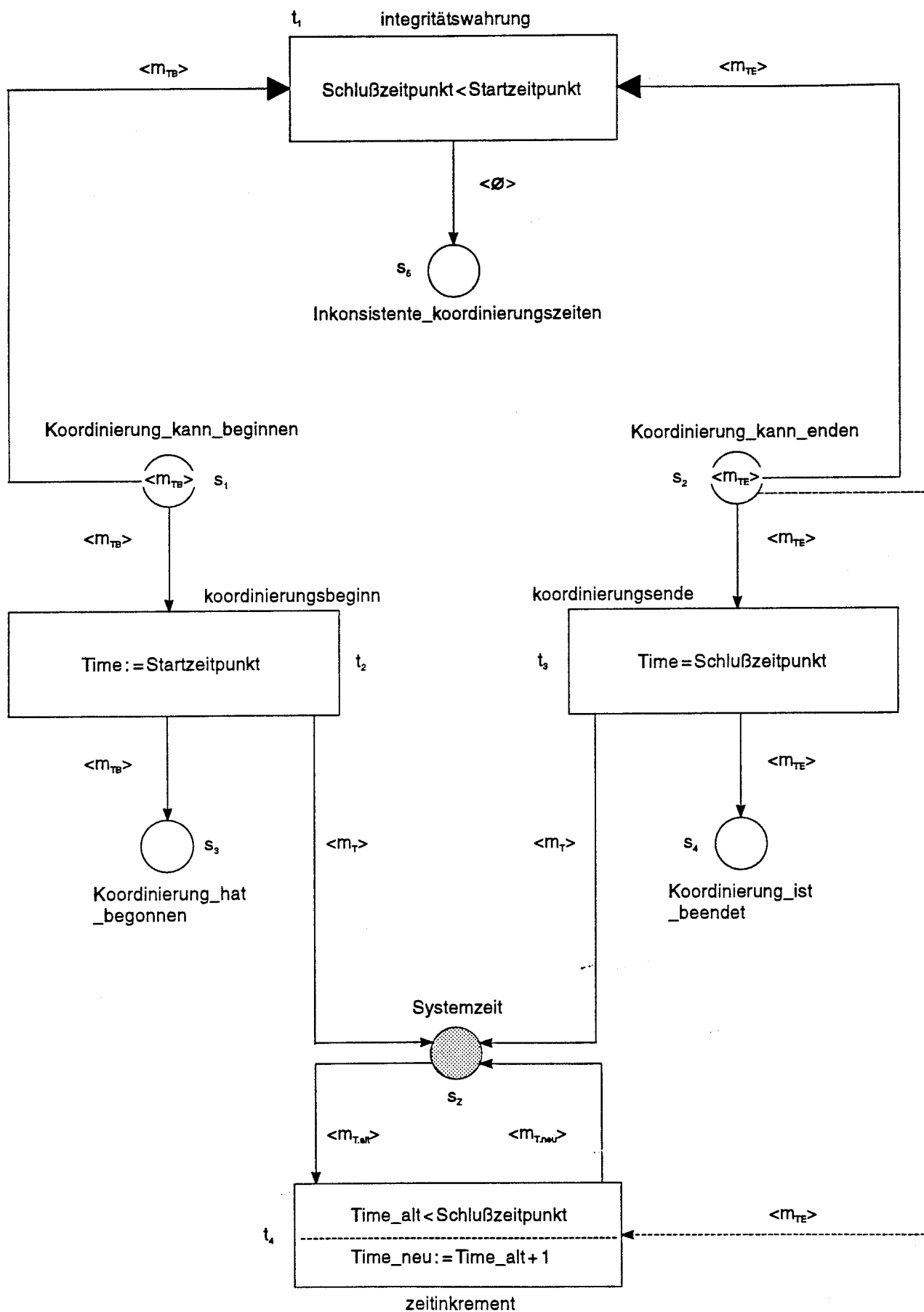


Abb. 197: Netzgraphik der Systemuhr mit Ganzzahlzeit-Anzeige und obligatorischer Transition

Mit der Konstruktion eines Netzes für die Repräsentation der Systemuhr ist die Fallstudie abgeschlossen. Anzahl und Umfang ihrer Netzmodule lassen es nicht zu, das Netzmodell des betrachteten einfachen Flexiblen Fertigungssystems in einer zusammenhängenden Netzgraphik darzustellen. Statt dessen wird abschließend ein Überblick über die "Komplexität" des Gesamtnetzes gewährt. Es handelt sich aus zwei Gründen nur um eine grobe Annäherung an die Netzkomplexität:

- ❑ Die Komplexität wird hier nur durch die Knotenanzahl der Netzgraphik gemessen. Sie ist die Summe aller Stellen und Transitionen, die für das Netzmodell des Flexiblen Fertigungssystems definiert sind. Diese Vorgehensweise ist zwar in der Netzliteratur durchaus üblich. Aber sie abstrahiert sowohl vom statischen Aspekt der Verknüpfungskomplexität³⁵⁾ als auch vom dynamischen Aspekt der Schaltkomplexität³⁶⁾ eines Netzes³⁷⁾.
- ❑ Es wurden in den voranstehenden Kapiteln unterschiedliche Verfeinerungs- und Erweiterungsvarianten für die Netzmodule vorgestellt. Strenggenommen müßte daher die Netzkomplexität hinsichtlich aller möglichen Variantenkombinationen ausdifferenziert werden. Dies geschieht hier jedoch nicht. Vielmehr wird nur die Knotenanzahl des Gesamtnetzes nur für eine Kombinationsmöglichkeit ermittelt. Sie zeichnet sich dadurch aus, daß sie die Verfeinerungs- und Erweiterungsoptionen vollständig ausschöpft³⁸⁾.

Darüber hinaus läßt sich streiten, wie oft ein stellenartiger Netzknoten gezählt werden soll, der als Schnittstelle im Gesamtnetz mehrfach enthalten ist. Davon ist insbesondere die Stelle "Systemzeit" betroffen. Es wird hier vereinbart, in jeder Netzgraphik jede Stelle, die dort mindestens einmal vorkommt, genau einmal zu zählen. Mehrere Vorkommnisse derselben Stelle werden also genau dann nur einmal gezählt, wenn sie in derselben Netzgraphik enthalten sind. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die Netzmodule, die zuvor konstruiert und durch Netzgraphiken veranschaulicht wurden:

- ❑ Netzmodul für die Repräsentation des Transportsystems: 1182 Stellen und 1062 Transitionen³⁹⁾.
- ❑ Netzmodul für die Repräsentation von Arbeitskräften: 12 Stellen und 18 Transitionen⁴⁰⁾.
- ❑ Netzmodul für die Repräsentation einer Bearbeitungsstation i.e.S.: 107 Stellen und 60 Transitionen⁴¹⁾. Netzmodul für die Repräsentation einer Spannstation als Bearbeitungsstation i.w.S.: 8 Stellen und 4 Transitionen⁴²⁾. Da sich die Fallstudie insgesamt auf drei Bearbeitungsstationen i.e.S. und eine Bearbeitungsstation i.w.S. erstreckt, umfaßt sie insgesamt 329 Stellen und 184 Transitionen für die Repräsentation aller vier Bearbeitungsstationen.
- ❑ Netzmodul für die Repräsentation des Zentrallagers: 8 Stellen und 5 Transitionen⁴³⁾. Netzmodul für die Repräsentation des Werkzeugmagazins: 5 Stellen und 2 Transitionen⁴⁴⁾. Für die Repräsentation der zwei Lagerstationen der Fallstudie sind also insgesamt 13 Stellen und 7 Transitionen erforderlich.
- ❑ Netzmodul für die Repräsentation eines Produktionsauftrags: 129 Stellen und 41 Transitionen⁴⁵⁾.
- ❑ Netzmodul für die Repräsentation der Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen: 5 Stellen und 1 Transition⁴⁶⁾.
- ❑ Netzmodul für die Repräsentation der Systemuhr: 6 Stellen und 4 Transitionen⁴⁷⁾.

Aus diesen modulspezifischen Stellen- und Transitionenanzahlen ergibt sich für das Gesamtnetz: Es umfaßt 1676 Stellen und 1317 Transitionen, also insgesamt 2993 Knoten. Diese Knotenanzahl des Netzmodells steht in einem bemerkenswerten Kontrast mit den 3 Bearbeitungsstationen i.e.S. und dem 1 Produktionsauftrag, auf die sich das modellierte Flexible Fertigungssystem erstreckt.

Die Stellen-, Transitionen- und Knotenanzahlen lassen sich unter vereinfachenden Annahmen extrapolieren: Betrachtet wird das Gesamtnetz, das ein Flexibles Fertigungssystem mit "B" Bearbeitungsstationen und "L" Lagerstationen für die Abwicklung von "P" Produktionsaufträgen modelliert. Dabei wird nur die Anzahl der Bearbeitungsstationen im engeren Sinn als variabel betrachtet. Dagegen wird vorausgesetzt, daß jedes der hier erfaßten Flexiblen Fertigungssysteme genau eine Bearbeitungsstation i.w.S. - die Spannstation - besitzt. Für die Lagerstationen werden durchschnittliche Stellen- und Transitionenanzahlen angesetzt, die aus den größeren Anzahlen des Netzmoduls für ein Werkstücklager und den kleineren Anzahlen des Netzmoduls für ein Werkzeuglager abgeleitet sind⁴⁸⁾. Die Stellen- und Transitionenanzahlen des Netzmoduls, welches das Transportsystem repräsentiert, werden in simplifizierender Weise auf eine "durchschnittliche" Stellen- und Transitionenanzahl je Bearbeitungs- oder Lagerstation umgerechnet⁴⁹⁾. Schließlich wird unterstellt, daß das Netzmodul für den einen Produktionsauftrag, der in der Fallstudie behandelt wurde, repräsentativ für alle abzuwickelnden Produktionsaufträge ist⁵⁰⁾. Unter diesen rigiden Voraussetzungen gilt für Stellen- und Transitionenanzahlen des Gesamtnetzes⁵¹⁾:

$$\begin{aligned}
 & \text{stellenanzahl}(B,L,P) \\
 &= (B+L) \cdot ss_{tp} + ss_{ak} + B \cdot ss_{bs} + ss_{ss} + L \cdot ss_{ls} + P \cdot ss_{pa} + ss_{zu} + ss_{su} \\
 &= B \cdot (ss_{tp} + ss_{bs}) + L \cdot (ss_{tp} + ss_{ls}) + P \cdot ss_{pa} + (ss_{ak} + ss_{ss} + ss_{zu} + ss_{su}) \\
 &= B \cdot (197 + 107) + L \cdot (197 + 7) + P \cdot 129 + (12 + 8 + 5 + 6) \\
 &= 306 \cdot B + 204 \cdot L + 129 \cdot P + 31
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{transitionenanzahl}(B,L,P) \\
 &= (B+L) \cdot tt_{tp} + tt_{ak} + B \cdot tt_{bs} + tt_{ss} + L \cdot tt_{ls} + P \cdot tt_{pa} + tt_{zu} + tt_{su} \\
 &= B \cdot (tt_{tp} + tt_{bs}) + L \cdot (tt_{tp} + tt_{ls}) + P \cdot tt_{pa} + (tt_{ak} + tt_{ss} + tt_{zu} + tt_{su}) \\
 &= B \cdot (177 + 60) + L \cdot (177 + 4) + P \cdot 41 + (18 + 4 + 1 + 4) \\
 &= 237 \cdot B + 181 \cdot L + 41 \cdot P + 27
 \end{aligned}$$

Dabei bedeuten:

- $ss_{tp} = 197$: durchschnittliche Stellenanzahl je Bearbeitungs- oder Lagerstation im Netzmodul für das Transportsystem
- $ss_{ak} = 12$: Stellenanzahl im Netzmodul für die Arbeitskräfte
- $ss_{bs} = 107$: Stellenanzahl je Bearbeitungsstation aus dem Netzmodul für Bearbeitungsstationen i.e.S.
- $ss_{ss} = 8$: Stellenanzahl je Bearbeitungsstation aus dem Netzmodul für die Spannstation
- $ss_{ls} = 7$: durchschnittliche Stellenanzahl je Lagerstation aus den beiden Netzmodulen für Lagerstationen
- $ss_{pa} = 129$: durchschnittliche Stellenanzahl je Produktionsauftrag aus dem Netzmodul für einen Produktionsauftrag
- $ss_{zu} = 5$: Stellenanzahl im Netzmodul für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen
- $ss_{su} = 6$: Stellenanzahl im Netzmodul für die Systemuhr
- $tt_{tp} = 177$: durchschnittliche Transitionenanzahl je Bearbeitungs- oder Lagerstation im Netzmodul für das Transportsystem
- $tt_{ak} = 18$: Transitionenanzahl im Netzmodul für die Arbeitskräfte

$tt_{bs} = 60$:	Transitionenanzahl je Bearbeitungsstation aus dem Netzmodul für Bearbeitungsstationen i.e.S.
$tt_{ss} = 4$:	Stellenanzahl je Bearbeitungsstation aus dem Netzmodul für die Spannstation
$tt_{ls} = 4$:	durchschnittliche Transitionenanzahl je Lagerstation aus den beiden Netzmodulen für Lagerstationen
$tt_{pa} = 41$:	durchschnittliche Transitionenanzahl je Produktionsauftrag aus dem Netzmodul für einen Produktionsauftrag
$tt_{zu} = 1$:	Transitionenanzahl im Netzmodul für die Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen
$tt_{su} = 4$:	Transitionenanzahl im Netzmodul für die Systemuhr

Durch Zusammenfassen der Stellen- und Transitionenanzahlen kann die "Komplexität" eines Gesamtnetzes, das ein Flexibles Fertigungssystem mit "B" Bearbeitungsstationen und "L" Lagerstationen für die Abwicklung von "P" Produktionsaufträgen modelliert, in einer groben Annäherung durch die Anzahl seiner stellen- oder transitionsartigen Knoten ausgedrückt werden. Für diese Knotenanzahl gilt:

$$\begin{aligned}
 & \text{knotenanzahl}(B,L,P) \\
 &= \text{stellenanzahl}(B,L,P) + \text{transitionenanzahl}(B,L,P) \\
 &= (306 \cdot B + 204 \cdot L + 129 \cdot P + 31) + (237 \cdot B + 181 \cdot L + 41 \cdot P + 27) \\
 &= 543 \cdot B + 385 \cdot L + 170 \cdot P + 58
 \end{aligned}$$

Daraus folgt beispielsweise für ein Flexibles Fertigungssystem mit 12 Bearbeitungsstationen, 3 Lagerstationen und 20 abzuwickelnden Produktionsaufträgen die stattliche Anzahl von insgesamt 11129 Netzknoten.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Schnittstellen lassen sich in den Netzmodulen daran erkennen, daß die Stellenindizes jeweils durch einen Großbuchstaben eingeleitet werden. Alle anderen modulinternen Stellen, die keine Schnittstellenfunktion besitzen, erhalten dagegen numerische Indizes. Darüber hinaus werden alle Schnittstellen in den Netzgraphiken grau schraffiert dargestellt. Diese visuelle Hervorhebung teilen sie aber mit modulinternen Stellen, die dazu dienen, die Teilnetze eines umfangreicheren Netzmoduls miteinander zu verknüpfen. Jene modulinternen Stellen können - bei Wechsel der Betrachtungsperspektive - ebenso als "Schnittstellen" aufgefaßt werden. Sie verknüpfen dann aber nicht mehr unterschiedliche Netzmodule, sondern nur noch die verschiedenen Teilnetze desselben Netzmoduls. Hier interessieren jedoch ausschließlich diejenigen Schnittstellen, die einzelne Netzmodule zu einem Gesamtmodell integrieren.

2) Dies gilt in der Fallstudie vor allem für die Kopien der (auftragsunspecifischen) Werkstückmarke. Sie können durch alle Netzmodule fließen, die das Transportsystem, eine der Bearbeitungsstationen oder aber das zentrale Werkzeuglager modellieren. Aber auch die Kopien der Werkzeugmarke lassen sich zwischen den Netzmodulen der Bearbeitungsstationen, des Transportsystems und des zentralen Werkzeuglagers austauschen.

3) Das wurde schon bei den jeweils betroffenen Netzmodulen ausgeführt. Vgl. beispielsweise die Ausführungen, die sich mit den Informationsmarken der Sorte "bearbeitungsauftrag" bzw. "lagerauftrag" befaßten. Die Kopien der Informationsmarken dienen allgemein dazu, in der Gestalt ihrer aktuellen Attributausprägungen koordinierungsrelevante Informationen zwischen den Netzmodulen auszutauschen. Diese Informationen geben Auskunft über Entscheidungsmöglichkeiten und -resultate, die innerhalb eines Netzmoduls offen- bzw. feststehen, aber für die umgebenden anderen Netzmodule von Interesse sein können. Durch Absenden, Lesen und Empfangen von Kopien der Informationsmarken wird der Informationsaustausch zwischen den Netzmodulen realisiert. Indem sich die Markenkopien zwischen dem Innern der Netzmodule und den Schnittstellen an den Moduloberflächen bewegen, konstituieren sie einen Kommunikationsfluß zwischen den Netzmodulen. Die Kopien der Informationsmarken entsprechen den Nachrichten, die in Multiagentensystemen zur wechselseitigen Koordinierung teilautonomer Agenten ausgetauscht werden. Aus dieser Perspektive trägt die Fallstudie zur Konkretisierung von Multiagentensystemen bei. Dabei lassen sich jedes Netzmodul, das einen Produktionsauftrag repräsentiert, und jedes Netzmodul, das eine Bearbeitungsstation vertritt, als ein selbständiger Agent auffassen. Vgl. dazu die Anmerkungen zu Auftrags- und Maschinenagenten. Auf diese agentenorientierte Betrachtungsweise wird in Kürze bei der Zuordnung von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen zurückgekommen.

4) Das trifft z.B. auf Kopien der Werkstückmarke zu, auf die im Auftragsnetz die Transition "bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG2" zugreift, ohne sie aus dem Netzmodul der Bearbeitungsstation "BS_3" abzu ziehen.

5) Eine solche Verhaltenskoordinierung wird oftmals auch als Synchronisierung der Modulaktivitäten thematisiert. Daher lassen sich die Schnittstellen ebenso als Synchronisationsstellen bezeichnen. In dieser Arbeit werden die Begriffe der Schnitt- und der Synchronisationsstelle synonym verwendet.

6) Dort wurden die Möglichkeiten und Schwierigkeiten, die Anschauungsform "Zeit" im Rahmen des Petrinetz-Konzepts zu erfassen, ausführlicher diskutiert.

7) Das Attribut "lokal" spielt darauf an, daß die Synchronisationswirkung eines koordinierenden Schaltakts im Zuordnungsmodul auf genau einen Arbeitsgang und genau eine Bearbeitungsstation begrenzt bleibt.

8) Das Zuordnungsmodul läßt sich als das Modell einer Koordinierungsinstanz auffassen. Bei dieser Koordinierungsinstanz kann es sich z.B. um einen Leitstand handeln. Ebenso ist es möglich, das Zuordnungsmodul als die Realisierung eines Koordinierungskonzepts für Systeme aus nebenläufig operierenden Agenten zu begreifen. Es leistet dann die wechselseitige Abstimmung zwischen Agenten, die entweder für den Betrieb einer Bearbeitungsstation verantwortlich sind (Maschinenagenten) oder aber die Abwicklung eines Produktionsauftrags übernommen haben (Auftragsagenten). Vgl. dazu die Ausführungen zu Multi-Agenten-Systemen.

Allerdings wird die Perspektive der Agentenkoordinierung hier nur angedeutet. Denn das Zuordnungsmodul erhält keine konkrete Vorschrift für die Zuordnung zwischen Bearbeitungsstationen und auftragszugehörigen Arbeitsgängen. Folglich gibt es auch keine Auskunft darüber, wie Maschinen- und Auftragsagenten miteinander koordiniert werden könnten. Vielmehr wird es so konstruiert, daß es für eine breite Palette unterschiedlicher Zuordnungsvorschriften offenbleibt. Erst wenn eine solche Zuordnungskonvention ausgewählt und in die Schaltvorschrift der modulzugehörigen Transition "zuordnung" eingebettet wird, liegt eine konkrete Koordinierung von Maschinen- und Auftragsagenten vor.

Das Zuordnungsmodul erfüllt hier eine ähnliche Aufgabe wie der "scheduler" bei BARR,R. (1989), S. 28ff. Dort werden im Rahmen eines nebenläufigen Auktionsmechanismus einzelne Ressourcen (items) zu Personen zugeordnet. Die Personen lassen sich hier als Auftragsagenten auffassen, die darum wetteifern, für die Arbeitsgänge ihrer Aufträge entsprechende Bearbeitungsstationen als Ausführungsressourcen zugeordnet zu bekommen.

9) Diese Kombination stellt aus informationstechnischem Blickwinkel ein simples "matching" von Markenkopien mit "passenden" Attributausprägungen dar. Die Attributausprägungen einer Kopie der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" und einer Kopie der Informationsmarke "bearbeitungsofferte" können nur dann zueinander passen, wenn folgende zwei notwendigen Voraussetzungen erfüllt sind:

- Der Arbeitsgang des Bearbeitungsauftrags gehört zur nicht-leeren Folgearbeitsgangmenge eines Werkstücks, das sich im Ausgangspuffer einer Bearbeitungs- oder Lagerstation befindet.
- Der Arbeitsgang kann auf der Bearbeitungsstation grundsätzlich ausgeführt werden.

Es handelt sich hierbei aber nicht um hinreichende Voraussetzungen. Denn sie berücksichtigen nur die *grundsätzliche* Ausführungsmöglichkeit des Arbeitsgangs auf der Bearbeitungsstation. Dagegen bleibt außer acht, ob sich an der Bearbeitungsstation auch die erforderlichen Arbeitskräfte und Werkzeuge befinden. Daher muß entweder als Prämisse unterstellt werden, alle Bearbeitungsstationen seien von vornherein so umfassend mit Werkzeugen und Arbeitskräften ausgestattet, daß sich an ihnen alle zugeordneten Arbeitsgänge tatsächlich ausführen lassen. Oder es wird in Kauf genommen, einen Arbeitsgang zunächst einer Bearbeitungsstation zuzuordnen und dann nachträglich festzustellen, daß an der Bearbeitungsstation Werkzeuge oder Arbeitskräfte fehlen, die für die Arbeitsgangausführung erforderlich sind. In dieser Fallstudie wird der zweite Weg beschritten. Aus diesem Grunde wurden die Bearbeitungsstationen so modelliert, daß benötigte - aber aktuell nicht vorhandene - Arbeitskräfte und Werkzeuge nachträglich angefordert werden können.

10) Ein weiterer Zuordnungstest untersucht, ob die Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation für die Arbeitsgangausführung voraussichtlich ausreichen wird. Ebenso wird geprüft, ob sich der Automatisierungsgrad der Arbeitsgangausführung mit dem der Bearbeitungsstation verträgt.

11) Der simple Test, ob die Bearbeitungsstationen von Bearbeitungsauftrag und -offerte übereinstimmen, kann verfeinert werden. Zu diesem Zweck müßte das gemeinsame Attribut "bearbeitungsstationsname" in den beiden Informationsmarken "bearbeitungsauftrag" und "bearbeitungsofferte" ersetzt werden: In der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" nimmt seine Stelle das Attribut "verrichtungsart" ein. Seine Ausprägung identifiziert die Art derjenigen Verrichtung, die dem auszuführenden Arbeitsgang zugrundeliegt. In der Informationsmarke "bearbeitungsofferte" wird das Attribut "bearbeitungsstationsname" dagegen durch das Attribut "verrichtungsartenliste" abgelöst. Die Ausprägung des neuen Markenattributs listet alle Verrichtungsarten auf, die sich mit derjenigen Bearbeitungsstation, von der die Informationsmarke "bearbeitungsofferte" abgesandt worden ist, verwirklichen lassen. Dann kann überprüft werden, ob die Verrichtungsart, die vom Bearbeitungsauftrag angefordert wird, in der Verrichtungsartenliste der Bearbeitungsofferte enthalten ist. Auf diese Weise wird der einfache Übereinstimmungstest, der sich auf die Namen von zwei Bearbeitungsstationen bezog, durch einen subtileren Inklusionstest für Verrichtungsarten abgelöst. Diese Verfeinerung besitzt den Vorzug, daß die Spezifizierung der Produktionsaufträge unabhängig von den Bearbeitungsstationen erfolgen kann, die im modellierten Produktionssystem zur Verfügung stehen. Falls die Ausstattung des Produktionssystems mit Bearbeitungsstationen verändert wird, brauchen die Auftragspezifikationen zu meist nicht überarbeitet zu werden. Denn die Festlegungen der Verrichtungsarten ihrer Arbeitsgänge verhalten sich im allgemeinen invariant gegenüber Variationen des Betriebsmittelbestands. Dies wurde schon in einer früheren Anmerkung angesprochen. Dort wurde auch dargelegt, daß solche Bestandsvariationen für die Thematik dieser Arbeit - die *kurzfristige* Koordinierung von Produktionsprozessen - keine Rolle spielt. Daher wird die zuvor skizzierte Verfeinerungsoption in der Fallstudie nicht weiter ausgeführt.

12) In den Netzmodulen für Produktionsaufträge bzw. Bearbeitungsstationen gehen von diesen Schnittstellen Obligatanten aus. Sie sorgen dafür, daß die Informationen über die erfolgreiche Zuordnung in den Netzmodulen unverzüglich weiterverarbeitet wird, sobald die Informationen an den Schnittstellen des Zuordnungsmoduls bereitstehen.

13) Hierdurch wird überprüft, ob die Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation, die eine Bearbeitungsofferte ausgesprochen hat, ausreicht, um den Arbeitsgang des betrachteten Bearbeitungsauftrags auf ihr auszuführen. Dabei wird der Sicherheitszuschlag berücksichtigt, der bereits an früherer Stelle eingeführt wurde. Die Überprüfung der Verfügbarkeitsdauer erübrigt keineswegs den analogen Test durch die Transition "versuchsbeginn" im Netzmodul der Bearbeitungsstation. Denn es kann nicht ausgeschlossen werden, daß zwischen der Zuordnung eines Arbeitsgangs zu einer Bearbeitungsstation und der Einlastung des Arbeitsgangs an der zugeordneten Bearbeitungsstation Zeit verstreicht. Daher muß die Verfügbarkeitsdauer der Bearbeitungsstation bei der Arbeitsgangeinlastung erneut überprüft werden.

14) Diese Restriktionsformel stellt sicher, daß während einer Nachtschicht der Arbeitsgang eines Bearbeitungsauftrags nur dann einer Bearbeitungsstation zugeordnet wird, wenn sich der Arbeitsgang auf der Bearbeitungsstation vollautomatisch ausführen läßt. Andernfalls wäre es nicht ausgeschlossen, daß ein Arbeitsgang einer Bearbeitungsstation zugeordnet wird, obwohl seine Ausführung die Bedienung der Bearbeitungsstation erfordert. Dann würde erst beim Versuch, den Arbeitsgang an der Bearbeitungsstation einzulasten, festgestellt, daß dies nicht möglich ist. Mit der Arbeitsgangausführung müßte dann bis zur nächsten Frühschicht gewartet werden. Im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation ist jedoch bereits Speicherplatz für die Werkstücke des zugeordneten Arbeitsgangs reserviert worden. Daher kann es unter ungünstigen Umständen dazu kommen, daß die Bearbeitungsstation bis zur nächsten

Frühlicht durch die Reservierung ihres Eingangspuffers an der Ausführung anderer Arbeitsgänge gehindert wird, die sich auf derselben Bearbeitungsstation vollautomatisch ausführen ließen. Solche widrigen Umstände liegen z.B. dann vor, wenn der Eingangspuffer der Bearbeitungsstation nur für die Werkstücke des einen zugeordneten Arbeitsgangs ausreicht. Sie treten ebenfalls ein, wenn der Bearbeitungsstation während der Nachtschicht mehrere Arbeitsgänge zugeordnet wurden, die jeweils nur bemannt ausgeführt werden können und in ihrer Gesamtheit den Eingangspuffer der Bearbeitungsstation so weit in Anspruch nehmen, daß für die Werkstücke anderer zuordenbarer Arbeitsgänge kein Speicherplatz mehr frei ist.

15) Die Schaltmodi lassen sich ebenso als alternative Schaltfarben der Transition "zuordnung" auffassen. Vgl. dazu die Erläuterungen von Schaltmodi und -farben für Synthetische Netze.

16) Eine erhebliche abweichende Modellierung von Zuordnungsvorschriften wird hier nur angedeutet. Sie greift auf das Konzept der "Synchronieabstände" zurück. Es stellt eine Besonderheit dar, die nur im Rahmen von Petrinetzen Beachtung findet. Ihr Grundgedanke - die Garantie einer "fairen" Prozeßkoordinierung - spielt aber für alle komplexen Systeme mit nebenläufig ausführbaren Teilprozessen eine erhebliche Rolle. Es wird davon ausgegangen, daß bei allen Zuordnungen von Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen keine der zuordnungsgeeigneten Stationen auf lange Sicht immer wieder von der Arbeitsgangzuordnung ausgenommen werden soll. Dadurch wird bezweckt, die mittlere Auslastung aller Bearbeitungsstationen in dem Ausmaß aneinander anzugleichen, wie sie überhaupt in der Lage sind, Bearbeitungsanfragen für die Übernahme von Arbeitsgängen auszusprechen. Eine solche tendenzielle Annäherung der Stationsauslastungen über längere Zeiträume hinweg wird als "faire" Prozeßkoordinierung bezeichnet. Sie entspricht dem produktionswirtschaftlichen Ziel einer gleichmäßigen Kapazitätsauslastung. Dies gilt allerdings nur, sofern dieses Ziel nicht auf Auslastungen derselben Bearbeitungsstation zu unterschiedlichen Zeitpunkten, sondern auf Auslastungen von verschiedenen Bearbeitungsstationen im selben Koordinierungszeitraum bezogen wird. Eine derart faire Prozeßkoordinierung läßt sich mit der Hilfe von Synchronisationsstellen verwirklichen, auf denen sich eine endliche und wohlbestimmte Anzahl von Markenkopien befindet. Mit ihrer Hilfe lassen sich die Zuordnungen von Arbeitsgängen zu Bearbeitungsstationen so steuern, daß keine Bearbeitungsstation öfter gegenüber anderen Stationen vorgezogen wird, als auf den Synchronisationsstellen Markenkopien vorhanden sind. Durch die Festlegung der Anzahl jener Markenkopien kann der Bereich begrenzt werden, innerhalb dessen die Zuordnungsanzahlen der einzelnen Bearbeitungsstationen voneinander abweichen dürfen. Die maximal zulässige Differenz der Zuordnungsanzahlen ist der "Synchronieabstand", der durch die Netzkonstruktion garantiert wird. Auf eine nähere Ausgestaltung einer solchen "fairen" Zuordnungsweise wird hier verzichtet.

17) Auf die gleiche Weise lassen sich unterschiedlichste Prioritätsregeln berücksichtigen. Falls sie Informationen benötigen, die noch nicht in den Attributstrukturen der beiden Informationsmarken "bearbeitungsauftrag" und "bearbeitungsanfrage" enthalten sind, müssen entsprechende Erweiterungen dieser Attributstrukturen erfolgen. Darauf wird hier aber nicht weiter eingegangen.

Darüber hinaus kann das Zuordnungsmodul auch die Grundlage eines Expertensystems bilden, das Wissen über die Eignung von Prioritätsregeln erschließt. Seine Funktionsweise wird an dieser Stelle kurz skizziert, um künftige Erweiterungsmöglichkeiten der hier präsentierten Fallstudie anzudeuten. Ausgangspunkt ist eine Vervielfachung des oben eingeführten Zuordnungsmoduls. Für jede Prioritätsregel aus dem Anwendungsbereich des Expertensystems wird ein regelspezifisches Zuordnungsmodul konstruiert. Alle Module sind mit den Schnittstellen $S_{BZ,1}$, $S_{BZ,2}$, $S_{PZ,1}$ und $S_{PZ,2}$ genau so verknüpft, wie es oben für das eine Zuordnungsmodul demonstriert wurde. Die regelspezifischen Zuordnungsmodule konkurrieren nun miteinander darum, Arbeitsgänge und Bearbeitungsstationen zusammenzuführen.

In einer Akquisitionsphase läßt sich die Abwicklung unterschiedlicher Auftragspakete im modellierten Produktionssystem simulieren. Damit wird der Gedanke der simulativen Testumgebung wiederaufgegriffen, der bereits an früherer Stelle vorgetragen wurde. Bei der Simulation wird die Abwicklung jedes Auftragspakets mit verschiedenen Einsatzstrategien für die Zuordnungsmodule wiederholt. Die Festlegung dieser Einsatzstrategien eröffnet die wesentlichen Gestaltungsspielräume des hier skizzierten Expertensystems. Im einfachsten Fall werden situationsunabhängige Strategien formuliert, die jeweils darin bestehen, stets dasselbe regelspezifische Zuordnungsmodul einzusetzen. Die Strategie fällt dann mit der modulzugehörigen Prioritätsregel zusammen. Anspruchsvollere Strategieformulierungen können dagegen Produktionssituationen klassifizieren und jeder Situationsklasse eine spezifische Prioritätsregel zuweisen. Die Definition der Situationsklassen stützt sich auf die Komponenten des bereits vorliegenden Netzmodells. Beispielsweise lassen sich Produktionssituationen, in denen Bearbeitungsstationen als gestört ausgewiesen sind, zu einer Situationsklasse zusammengefaßt werden. Oder es wird die Produktionssituation nach dem Grad der Systemauslastung klassifiziert. Zu diesem Zweck können im Netzmodul der Spannstation die Anzahlen der insgesamt verfügbaren und der aktuell mit Werkstücken bespannten Paletten verglichen werden. Der Ausdrucksreichtum des Produktionsmodells der Fallstudie ist bereits so groß, daß sich eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Klassifizierung von Produktionssituationen eröffnet. Es wird darauf verzichtet, in diesem Ausblick darauf näher einzugehen.

Anhand der Simulationsergebnisse werden die Einsatzstrategien bewertet. Dadurch lassen sich Erkenntnisse gewinnen, in welchen Situationen welche regelspezifischen Zuordnungsmodule die relativ vorteilhaftesten Koordinierungsergebnisse hervorzubringen vermögen. Schließlich können diese Einsichten in der Gestalt von Metaregeln zu-

sammengefaßt werden. Sie drücken situationsabhängige Empfehlungen für diejenigen Prioritätsregeln aus, die in die Schaltvorschriften der jeweils vorteilhaftesten Zuordnungsmodule eingeflossen sind. Es bereitet keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, die Metaregeln in der Gestalt von Produktionsregeln zu formulieren. Daher können die Metaregeln als Transitionen erfaßt werden, deren Schaltvorschriften die Regelinhalte wiedergeben. Auf diese Weise werden sowohl die Prioritätsregeln für die Koordinierung von Produktionsprozessen als auch die Metaregeln für die Auswahl von prozeßkoordinierenden Prioritätsregeln innerhalb eines gemeinsamen Netzmodells repräsentiert.

18) Zunächst erfolgt auf den ersten drei Ebenen eine "auftragsorientierte" Zuordnung: Es wird der bevorzugte Auftrag ermittelt. Erst auf der letzten - vierten - Ebene schließt sich die "kapazitätsorientierte" Zuordnung einer präferierten Bearbeitungsstation an. Vgl. zur Differenzierung zwischen "auftrags-" und "kapazitätsorientierten" Maschinenbelegungsplanungen ALDINGER (1985a), S. 71.

19) Die Abwicklungsprioritäten der Produktionsaufträge, zu denen die auszuführenden Arbeitsgänge gehören, wurden so festgelegt, daß die Prioritätswerte um so niedriger ausfallen, je höher die Prioritäten sind. Daher entspricht die Auswahl von Bearbeitungsaufträgen mit höchsten Abwicklungsaufträgen einer Minimierung der Prioritätswerte.

20) Ein Bearbeitungsauftrag kann zu einem Produktionsauftrag gehören, für den kein (spätest zulässiger) Fertigstellungstermin vorgegeben ist. Das Attribut "arbeitsgang_schlupfzeit" der Informationsmarke "bearbeitungsauftrag" besitzt dann die Ausprägung "schlupfzeit_ag_ka()". Solche Bearbeitungsaufträge werden auf der zweiten Selektionsebene der Prioritätsregel hintenangestellt, weil sie nicht dringlich sind. Sie kommen nur dann zum Zuge, falls alle Bearbeitungsaufträge mit höchsten Abwicklungsprioritäten, die auf der ersten Selektionsebene ausgewählt wurden, keinen Fertigstellungstermin besitzen.

21) Es kann sich dabei um mehrere Bearbeitungsaufträge handeln. Dieser Fall tritt z.B. ein, wenn ein Arbeitsgang, der zu einem Bearbeitungsauftrag mit höchster Priorität und minimaler Schlupfzeit gehört, auf mehreren Bearbeitungsstationen ausgeführt werden kann. Dann wurden die Bearbeitungsaufträge für alle in Betracht kommenden Bearbeitungsstationen im selben Zeitpunkt erteilt (vgl. dazu die Transition "bearbeitungsauftrag_anstoßen_AG2" für den Arbeitsgang "AG_2"). Wenn kein anderer Bearbeitungsauftrag mit höchster Priorität und minimaler Schlupfzeit zu einem früheren Zeitpunkt erteilt wurde, liegt der oben erwähnte Fall vor.

22) Die hier verwendete Prioritätsregel garantiert daher keine Eindeutigkeit der Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen. Der willkürlichen Selektion durch den Koordinierungsträger entspricht die Möglichkeit, von den alternativen Schaltmodi der Transition $t_{1,1}$ oder $t_{1,2}$ die nach Berücksichtigung der drei oben aufgeführten Prioritätsebenen verblieben sind, einen beliebigen auszuwählen.

23) Die Kantengewichte der Transition "zuordnung" bleiben unverändert erhalten. Sie werden daher nachfolgend nur kurz angedeutet.

24) Die beiden Transitionen lassen sich als eine Verfeinerung der Transition "zuordnung" auffassen. Insofern wird auch der zweite der beiden eingangs erwähnten Integrationsmodi für Zuordnungsvorschriften berücksichtigt.

25) Die zugehörige Netzgraphik unterscheidet sich von der in Abb. 195 nur unwesentlich: Die Transition "zuordnung" wird verdoppelt. Die Duplikate erhalten die Namen "zuordnung_mit_schlupf" und "zuordnung_ohne_schlupf". Es wird daher darauf verzichtet, die modifizierte Netzgraphik zu präsentieren.

26) Eine anspruchsvollere Systemuhr wurde in einem früheren Kapitel konstruiert.

27) Netzkonstrukte für ganzzahlige Systemuhren finden sich auch bei OBERWEIS (1990a), S. 107 (insbesondere Abb. V.19a), S. 109 (dort allerdings mit einer eigenwilligen Interpretation) u. 112ff.

28) Es kann daher auch von einer temporalen Schnittstelle für alle Netzmodule gesprochen werden. Von der Schnittstelle s_z dürfen beliebig viele, aber identische Vorkommnisse existieren: Jeder zeitverbrauchenden Transition läßt sich ein Vorkommnis dieser Stelle zuordnen. Da es sich um identische Vorkommnisse derselben Stelle s_z handelt, muß auf allen Stellenvorkommnissen stets dieselbe Kopie der Zeitmarke "syszeit" liegen. In einem Gesamtnetz werden alle Vorkommnisse der Stelle s_z miteinander identifiziert. Sie fallen dann zu genau einer temporalen Schnittstelle zusammen.

29) Nach dem Verstreichen dieses Zeitraums wird die Kopie der Zeitmarke von der Schnittstelle s_z abgezogen. Dann ist es unmöglich, eine zeitverbrauchende Transition aus einem beliebigen Modul des Netzmodells zu aktivieren.

30) Falls der Koordinierungszeitraum in der Zukunft offen bleiben soll, wird die Stelle "Koordinierung_kann_enden" unter der Ausgangsmarkierung durch keine Markenkopie belegt. Die Transition "zeitinkrement" kann dann beliebig lange geschaltet werden.

31) Vgl. dazu den Schichtplan für zwei Kalenderwochen und das zugehörige, minutenbezogene Zeitraster, die in einer früheren Anmerkung eingeführt wurden.

32) Nach dem Muster dieser Integritätsbedingung kann die Fallstudie um beliebige andere Integritätsbedingungen erweitert werden. Der Verf. hat darauf verzichtet, diesen Aspekt zu vertiefen.

33) Die zugehörige Netzlegende wird hier nicht mehr angeführt. Sie unterscheidet sich von der Netzlegende für die erste Modulvariante der Systemuhr nur geringfügig.

34) Die Transition "koordinierungsende" wurde bewußt nicht als eine obligatorische Transition konstruiert. Daher kann die Kopie der Zeitmarke beim Erreichen des Schlußzeitpunkts zunächst noch auf der Stelle "Systemzeit" verbleiben. Dies ermöglicht, daß am Ende des Koordinierungsintervalls in allen anderen Netzmodulen noch alle aktivierten Transitionen geschaltet werden können. Wenn dies geschehen ist, kann nur noch die Transition "koordinierungsende" schalten. Sobald ihr Schalttakt erfolgt, wird die Kopie der Zeitmarke von der Stelle "Systemzeit" abgezogen.

35) Unter der Verknüpfungskomplexität kann einerseits das Ausmaß verstanden werden, in dem die - fest vorgegebenen - Stellen und Transitionen eines Netzes durch Kanten miteinander verknüpft sind (Konnektivität). Andererseits läßt sie sich ebenso auf die Varietät der Verknüpfungslogik von Transitionen beziehen, die an früherer Stelle eingeführt wurde.

36) Die Schaltkomplexität eines Netzes kann ebenso auf zwei Weisen ausgelegt werden: Entweder wird sie auf ein Komplexitätsmaß für den Erreichbarkeitsgraphen des Netzes zurückgeführt. Im einfachsten Fall handelt es sich um die Knotenanzahl des Erreichbarkeitsgraphen. Oder es wird auf die unterschiedlichen Erweiterungen der Schaltregel von Synthetischen Netzen Bezug genommen. Dann müßten die Schaltregelbereicherungen hinsichtlich ihres Komplexitätsgrads eingestuft werden.

37) Darüber hinaus wird auch von der Möglichkeit abgesehen, die Markierungskomplexität eines Netzes zu beurteilen. Beispielsweise könnte ein Maß für die Varietät der Markenkopien definiert werden, die in einem Netz zulässig sind.

38) Dabei folgt die Knotenzählweise der früher entfalteten vertikalen und horizontalen Modellierungsstrategie: Zunächst werden die nicht erweiterten Grobnetze der einzelnen Netzmodule betrachtet. Ihre Knoten gehen bereits in die Knotenanzahl des Gesamtnetzes ein. Danach werden die unterschiedlichen Netzverfeinerungen und -erweiterungen hinzugezogen. Die Knoten der resultierenden Netze erhöhen die Knotenanzahl des Gesamtnetzes. Unter dem Gesamtnetz und seiner Knotenanzahl wird hier also nicht dasjenige "flache" Netz verstanden, das erst am Ende aller Netzverfeinerungen und -erweiterungen vorliegt. Vielmehr erstrecken sich das Gesamtnetz und seine Knotenanzahl auf einen "tiefen", hierarchisch strukturierten Netzverbund: Er beginnt auf der obersten Hierarchieebene mit den nicht erweiterten Grobnetzen. Zugleich umfaßt er alle Teilnetze, die auf den verschiedenen Hierarchieebenen des Gesamtnetzes als Verfeinerungen und Erweiterungen eingeflossen sind.

Die voranstehenden Erläuterungen unterliegen allerdings zwei Einschränkungen. Einerseits stimmen ein "Grob"netz und sein "verfeinertes" Netz überein, falls ein Netzmodul nicht verfeinert wird. Dies trifft z.B. auf das Netzmodul für die Repräsentation von Arbeitskräften zu. Andererseits entfällt die Unterscheidung zwischen einem nicht erweiterten Netz und seinen Erweiterungen, wenn ein Netzmodul nicht erweitert wird. Das gilt beispielsweise für die beiden Netzmodule, die Lagerstationen repräsentieren. Wegen dieser beiden Einschränkungen besitzt der hierarchisch strukturierte Netzverbund des Gesamtnetzes eine heterogene Verfeinerungs- und Erweiterungsstruktur: Das Ausmaß der Netzverfeinerungen und -erweiterungen kann von Netzmodul zu Netzmodul variieren.

39) Diese beiden Angaben setzen sich zusammen aus:

- 24 Stellen und 60 Transitionen in den beiden Netzgraphiken der Abb. 156 und 157;
- 10 Stellen und 8 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 158, und zwar für jede Transition von den voranstehend angeführten 60 Transitionen;
- 7 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 159, und zwar für jeden der insgesamt 6 Übergabepunkte an den 4 Bearbeitungs- und 2 Lagerstationen;
- 86 Stellen und 84 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 160, und zwar für jeden der insgesamt 6 Übergabepunkte an den 4 Bearbeitungs- und 2 Lagerstationen (in einer früheren Anmerkung wurde dargelegt, daß insgesamt 84 Anforderungsstellen und 84 Anforderungstransitionen eingeführt werden müssen, von denen in der Abb. 160 nur 4 Stellen bzw. 4 Transitionen exemplarisch dargestellt sind).

Insgesamt sind also $24 + (10 \cdot 60) + (7 \cdot 6) + (86 \cdot 6) = 1182$ Stellen und $60 + (8 \cdot 60) + (3 \cdot 6) + (84 \cdot 6) = 1062$ Transitionen erforderlich.

40) Diese beiden Angaben können unmittelbar aus der Netzgraphik der Abb. 163 entnommen werden.

41) Diese beiden Angaben setzen sich zusammen aus:

- 4 Stellen und 2 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 164;
- 7 Stellen und 8 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 166;
- 13 Stellen und 7 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 167;
- 14 Stellen und 14 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 168;
- 15 Stellen und 7 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 169;

- 13 Stellen und 4 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 170;
- 21 Stellen und 8 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 171;
- 15 Stellen und 6 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 172;
- 5 Stellen und 4 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 173.

42) Vgl. die Netzgraphik der Abb. 174.

43) Vgl. die Netzgraphik der Abb. 175.

44) Vgl. die Netzgraphik der Abb. 176.

45) Diese beiden Angaben setzen sich zusammen aus:

- 15 Stellen und 8 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 181;
- 15 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 182;
- 10 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 183;
- 18 Stellen und 4 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 184;
- 10 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 185;
- 10 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 186;
- 19 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 187;
- 10 Stellen und 3 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 188;
- 8 Stellen und 5 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 189;
- 14 Stellen und 6 Transitionen in der Netzgraphik der Abb. 190.

46) Vgl. die Netzgraphik der Abb. 195.

47) Diese beiden Angaben beziehen sich auf die Netzgraphik der Abb. 197, in der die zentrale Systemuhr mit Hilfe einer obligatorischen Transition modelliert wurde.

48) Die Stellenanzahlen betragen 8 und 5 für das Zentrallager bzw. das Werkzeugmagazin. Die Transitionenanzahlen belaufen sich auf 5 und 2 für das Zentrallager bzw. das Werkzeugmagazin. Die arithmetischen Mittel 6,5 für die Stellenanzahl und 3,5 für die Transitionenanzahl wurden auf die "durchschnittlichen" Anzahlen 7 bzw. 4 jeweils aufgerundet. Für diese Rundung spricht, daß "halbe" Stellen oder Transitionen für Netze nicht definiert sind. Die Aufrundung wurde ausgeführt, weil in einem Flexiblen Fertigungssystem eher mehr Lagerstationen für Werkstücke als Lagerstationen für Werkzeuge zu erwarten sind. Dabei wird unterstellt, daß die beiden Netzmodule für das Zentrallager und für das Werkzeugmagazin repräsentativ sind für die Modellierung von beliebigen - zentralen oder auch dezentralen - Lagerstationen für Werkstücke bzw. Werkzeuge.

49) Zu beachten ist, daß der Umfang des Netzmoduls für die Repräsentation des Transportsystems einerseits von Art und Anzahl der Bearbeitungs- und Lagerstationen abhängt. Andererseits wird es auch davon beeinflusst, wie diese Stationen durch Transportstrecken miteinander verknüpft sind. Um diese Abhängigkeiten korrekt zu erfassen, müßten die Stellen- und Transitionenanzahlen des Netzmoduls in komplizierter Weise auf die einzelnen Stationsarten und die Art ihrer Verknüpfung verteilt werden. Davon wird hier abgesehen, weil nur eine grobe Abschätzung des Gesamtnetzumfangs beabsichtigt ist. Daher wird der Einfachheit halber nur eine "durchschnittliche" Stellen- und Transitionenanzahl je Station erfaßt, indem die insgesamt 1182 Stellen und 1062 Transitionen des Transportsystemmoduls durch die Anzahl seiner insgesamt 6 Bearbeitungs- und Lagerstationen dividiert werden.

50) Dies ist eine "heroische" Prämisse, weil im Regelfall jeder Produktionsauftrag aus anderen Arbeitsgängen zusammengesetzt ist und auch die Ablaufstrukturen unterschiedlicher Aufträge verschieden ausfallen. Ohne die Repräsentativitätsprämisse wäre aber die oben erfolgende Extrapolation unmöglich. Denn es müßte dann für jeden Produktionsauftrag ein auftragsspezifisches Netzmodul konstruiert werden. Darauf ließen sich zwar die gleichen Konstruktionsideen anwenden wie für das eine Auftragsmodul der Fallstudie. Aber die auftragsspezifischen Netzmodule würden im allgemeinen unterschiedliche Stellen- und Transitionenanzahlen aufweisen.

51) Die Anzahlen der Arbeitskräfte und der Transportmittel wirken sich auf die Stellen- und Transitionenanzahlen des Gesamtnetzes nicht aus, weil jede Arbeitskraft und jedes Transportmittel durch die arbeitskraft- bzw. transportmittelspezifische Kopie einer Marke repräsentiert wird.

Literaturverzeichnis zu Band 7

Vorbemerkungen:

- ❑ Jedes Werk wird durch die Angabe eines Referenztitels (1. Zeile) und durch seine bibliographischen Angaben (folgende Zeilen) aufgeführt. In den Quellenangaben dieser Arbeit wird immer auf den Referenztitel Bezug genommen.
- ❑ Die Referenztitel bestehen nur aus den Autorennachnamen und den Erscheinungsjahren, solange hierdurch eine eindeutige Identifizierung der jeweils zugehörigen Werke möglich ist. Andernfalls dienen zusätzliche - abgekürzte - Autorenvornamen oder alphabetische Zusätze zu den Erscheinungsjahren der eindeutigen Identifizierung.
- ❑ Um eine einheitliche Quellenangabe in allen Bänden des Projekts PEMOPS zu gewährleisten, bezieht sich die eindeutige Identifizierung durch Autorenvornamen und alphabetische Zusätze zu den Erscheinungsjahren auf den Gesamtkorpus aller verarbeiteten Quellen. Daher kann es dazu kommen, daß innerhalb eines Bandes Lücken klaffen. Sie resultieren daraus, daß die scheinbar fehlenden Quellen im Gesamtkorpus zwar enthalten sind, aber im jeweils betroffenen Band nicht verwendet wurden.
- ❑ Die Titel fremdsprachlicher Werke werden grundsätzlich in der Notation des Originals wiedergegeben. Allerdings gelten drei Ausnahmen:
 - Titel, die sich nicht mit dem deutschsprachigen Alphabet ausdrücken lassen, werden in ihrer lautsprachlichen Umschreibung durch das deutschsprachige Alphabet wiedergegeben. Dies gilt insbesondere für Werke mit chinesischen oder kyrillischen Schriftzeichen.
 - Falls die Titel im Original durchgängig mit Großbuchstaben dargestellt werden, erfolgt hier eine Notation in der jeweils sprachspezifischen Groß-/Kleinschreibung von Titeln. Dies trifft vor allem auf anglophone Werke zu, in deren Titeln die jeweils sinnbestimmenden Worte durch Großbuchstaben eingeleitet werden.
 - Accents und andere diakritische Zeichenbestandteile, die nicht im deutschsprachigen Alphabet enthalten sind, werden grundsätzlich ausgelassen.
- ❑ In das Literaturverzeichnis wurden alle Quellen aufgenommen, auf die in den Anmerkungen zum laufenden Text verwiesen wurde.
- ❑ Weitere Publikationen, die sich auf die Thematik des Petrinetz-Konzepts beziehen, aber in den vorgenannten Quellen nicht angesprochen wurden, finden sich im Band 10 des Projekts PEMOPS zur Petrinetz-Literatur.
- ❑ Die Literaturlauswertung wurde 1992 abgeschlossen (vgl. das Vorwort in Band 1).

Abel, D. (1986a)

Abel, D.; Rake, H.: Simulation von Komplexen Steuerungssystemen mit Petri-Netzen; in: Geril, P.; Vansteenkiste, G.C.; Kerckhoffs, E.J.H. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd European Simulation Congress, 1986 in Antwerpen, Ghent 1986, S. 57-62.

Adam, D. (1988e)

Adam, D.: Retrograde Terminierung: Ein Verfahren zur Fertigungssteuerung bei diskontinuierlichem Materialfluß oder vernetzter Fertigung; in: Adam, D. (Schriftleitung): Fertigungssteuerung II - Systeme zur Fertigungssteuerung, Schriften zur Unternehmensführung 39, Wiesbaden 1988, S. 89-106.

Adam, D. (1990a)

Adam, D.: Produktionsdurchführungsplanung; in: Jacob, H. (Hrsg.): Industriebetriebslehre - Handbuch für Studium und Prüfung, 4. Aufl., Wiesbaden 1990, S. 673-918.

Aldinger (1985a)

Aldinger, L.: Leitstandunterstützte kurzfristige Fertigungssteuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985.

Arning (1987)

Arning, A.: Die wirtschaftliche Bewertung der Zentrenfertigung - Dargestellt am Beispiel einer Fertigungsinsel, Wiesbaden 1987.

Barr, R. (1989)

Barr, R.S.; Christiansen, M.G.: A Parallel Auction Algorithm: A Case Study in the Use of Parallel Object-Oriented Programming; in: Sharda, R.; Golden, B.L.; Wasil, E.; Balci, O.; Stewart, W. (Hrsg.): Impacts of Recent Computer Advances on Operations Research, New York - Amsterdam - London 1989, S. 23-32.

Baudin (1990)

Baudin, M.: Manufacturing Systems Analysis with Application to Production Scheduling, Englewood Cliffs 1990.

Bötzow (1988a)

Bötzow, H.: Die Fertigungsinsel als Konzept zur Einführung flexibler Automation in mittelständischen Industriebetrieben der Einzel- und Kleinserienfertigung, Dissertation, Universität Köln 1987, Düsseldorf 1988.

Bormann (1978)

Bormann, D.: Störungen von Fertigungsprozessen und die Abwehr von Störungen bei Ausfällen von Arbeitskräften durch Vorhaltung von Reservepersonal, Berlin 1978.

Bradbury (1990)

Bradbury, A.; Woodward, R.: Turbo Prolog-Begleitbuch (Version 2.0), Hamburg - New York - St. Louis ... 1990.

Bühner (1986c)

Bühner, R.: Personalentwicklung für neue Technologien in der Produktion, Stuttgart 1986.

Bühner (1987)

Bühner, R.: Strategisches Personalmanagement für neue Produktionstechnologien; in: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis, 39. Jg. (1987), S. 249-265.

Clocksinn (1990)

Clocksinn, W.F.; Mellish, C.S.: Programmieren in Prolog, (Übersetzung der 3. Aufl. 1987), Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Cordes (1988)

Cordes, R.; Kruse, R.; Langendörfer, H.; Rust, H.: Prolog - Eine methodische Einführung, Braunschweig - Wiesbaden 1988.

Dey (1984)

Dey, H.J.; Möller, B.: Fertigungszelle, Fertigungsinsel, Fertigungssystem - Konzepte einer Flexiblen Fertigung; in: Werkstatt und Betrieb, 117. Jg. (1984), S. 457-465.

Dittrich, G. (1989b)

Dittrich, G.; Evertz-Jägers, B.: Der Kanal-Instanz-Netz Editor KINED - Ein Tool zur Unterstützung einer methodischen Systemmodellierung mit Hilfe von hierarchisch dargestellten Kanal-Instanz-Netzen, Forschungsbericht Nr. 308, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund, Dortmund o.J. (1989).

Döttling (1981)

Döttling, W.: Flexible Fertigungssysteme - Steuerung und Überwachung des Fertigungsablaufs, Berlin - Heidelberg - New York 1981.

Endell (1987)

Endell, B.: Analyse der wechselseitigen Beziehungen zwischen flexiblen Arbeitszeitregelungen und moderner Produktion - Eine flexibilitätstheoretische Betrachtung -, Dissertation 1986, Universität Köln, Düsseldorf 1987.

Eversheim (1981)

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Bd. 4: Fertigung und Montage, Düsseldorf 1981.

Eversheim (1989g)

Eversheim, W.; Rozenfeld, H.; Schneewind, J.: Integrierte Arbeitsplanerstellung flexibel gestalten - Automatismus nach Maß; in: Industrie-Anzeiger, 111. Jg. (1989), Nr. 85, S. 26-29.

Fehling (1990a)

Fehling, R.: Hierarchische Petrinetze - Idee und grundlegende Struktur, Forschungsbericht Nr. 344, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1990.

Fischer, K. (1988)

Fischer, K.: Fallstudie: Einsatzmöglichkeiten der Retrograden Terminierung in einem Maschinenbau-Unternehmen; in: Adam, D. (Schriftleitung): Fertigungssteuerung II - Systeme zur Fertigungssteuerung, Schriften zur Unternehmensführung 39, Wiesbaden 1988, S. 149-159.

Fischer, K. (1990)

Fischer, K.: Retrograde Terminierung - Werkstattsteuerung bei komplexen Fertigungsstrukturen, Dissertation, Universität Münster 1989, Wiesbaden 1990.

Förderkreis Betriebswirtschaft Stuttgart (1988)

Förderkreis Betriebswirtschaft an der Universität Stuttgart e.V.: Budgetierung von Ergebniseffekten logistischer Maßnahmen in der Fertigung - Ergebnisse eines Pilotversuchs; in: Die Betriebswirtschaft, 48. Jg. (1988), S. 347-357.

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik (1982)

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI); Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB); Institut für Werkzeugmaschinen- und Fertigungstechnik (IWF): Der Einsatz flexibler Fertigungssysteme - Technische, einführungsorganisatorische, wirtschaftliche und arbeitsplatzbezogene Aspekte, Forschungsbericht KfK-PFT 41, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1982.

Freedman (1988b)

Freedman, P.; Malowany, A.: SAGE: A Decision Support System for the Sequencing of Operations within a Robotic Workcell; in: Decision Support Systems, Vol. 4 (1988), S. 329-343.

Fricke, W. (1991)

Fricke, W.; Wollenberg, R.: Ermittlung von Zeiten; in: Geitner, U.W. (Hrsg.): CIM Handbuch, 2. Aufl., Braunschweig 1991, S. 294-306.

Gelenbe (1982)

Gelenbe, E.: Stationary Properties of Timed Vector Addition Systems; in: Dempster, M.A.H.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G. (Hrsg.): Deterministic and Stochastic Scheduling, Proceedings of the NATO Advanced Study and Research Institute on Theoretical Approaches to Scheduling Problems, 6.-17.07.1981 in Durham, Dordrecht - Boston - London 1982, S. 223-232.

Genrich (1988b)

Genrich, H.J.: Equivalence Transformations of PrT-Nets; in: o.V.: Application and Theory of Petri Nets - 9th European Workshop, 22.-24.06.1988 in Venedig, o.O. 1988, Vol. I, S. 229-248.

Groß,M. (1991b)

Groß,M.; Koerth,D.; Lehmann,F.: Störungen erfassen und durch Kennzahlen bewerten; in: Industrie-Anzeiger, 113. Jg. (1991), Nr. 59/60, S. 22-24.

Gunn (1982)

Gunn,T.G.: Konstruktion und Fertigung; in: Spektrum der Wissenschaft, o.Jg. (1982), Heft 11, S. 76-98.

Hartley (1984)

Hartley,J.: FMS at work, Kempston/Bedford - Amsterdam - New York 1984.

Hebbeler (1991)

Hebbeler,M.B.; Klaas,K.-J.: Rechnergestützte Generierung von Arbeitsplänen; in Geitner,U.W. (Hrsg.): CIM Handbuch, 2. Aufl., Braunschweig 1991, S. 272-293.

Helberg (1987)

Helberg,P.: PPS als CIM-Baustein - Gestaltung der Produktionsplanung und -steuerung für die computerintegrierte Produktion, Berlin 1987.

Hillion (1988a)

Hillion,H.P.: Timed Petri Nets and Application to Multi-Stage Production Systems; in: o.V.: Application and Theory of Petri Nets - 9th European Workshop, 22.-24.06.1988 in Venedig, o.O. 1988, Vol. I, S. 164-182.

Hintz (1987)

Hintz,G.-W.: Ein wissensbasiertes System zur Produktionsplanung und -steuerung für flexible Fertigungssysteme, Dissertation, Universität Aachen, Düsseldorf 1987.

Hoff,A. (1991)

Hoff,A.: Flexible Arbeitszeitgestaltung im Schichtbetrieb; in: Bullinger,H.-J. (Hrsg.): Produktionsforum'91: Produktionsmanagement - Vorgehensweisen und Praxisbeispiele zum Chancenmanagement in den 90er Jahren, 10. IAO-Arbeitstagung, 19.-20.02.1991 in Stuttgart, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 409-424.

IDS (1990)

IDS Prof. Scheer - Gesellschaft für integrierte Datenverarbeitungssysteme mbH (Hrsg.): Dezentrale Fertigungssteuerung: Der Intelligente Leitstand FI-2, Saarbrücken o.J. (1990).

Igel (1986b)

Igel,B.; Jungfermann,M.: Rechnergestützte graphische Spezifikation mit Kanal/Instanz-Netzen, Forschungsbericht Nr. 223, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1986.

Igel (1989a)

Igel,B.: Applikative Beschreibungsmethoden in verteilten Prozeßsteuerungen; in: Henn,R.; Stieger,K. (Hrsg.): PEARL 89 - Workshop über Realzeitsysteme, 10. Fachtagung des PEARL-Vereins e.V., 07.-08.12.1989 in Boppard, Proceedings, Informatik-Fachberichte 231, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 172-195.

Jahn (1988)

Jahn,S.; Fischer,U.; Renner,E.: Facharbeitsplätze als Konstruktionselemente neuer PPS-Systeme; in: Mertens,P.; Wiendahl,H.-P.; Wildemann,H. (Hrsg.): CIM-Komponenten zur Planung und Steuerung - Expertensysteme in der Produktion, München 1988, S. 443-468.

Junghanns (1971)

Junghanns,W.: Planung neuer Fertigungssysteme für die Einzel- und Serienfertigung, Dissertation Aachen, Aachen 1971.

Junghanns (1976)

Junghanns,W.: Planung und wirtschaftlicher Einsatz numerisch gesteuerter Fertigungskonzepte - Grundlagen, Düsseldorf 1976.

Kaiser,K. (1991)

Kaiser,K.: Kosten- und Leistungsrechnung bei automatisierter Produktion, Dissertation, Universität Bochum 1990, Wiesbaden 1991.

Kern,W. (1990a)

Kern,W.: Industrielle Produktionswirtschaft, 4. Aufl., Stuttgart 1990.

Kinnebrock (1988)

Kinnebrock, W.: Turbo Prolog, München - Wien 1988.

Kleiner, F. (1991)

Kleiner, F.: Kostenrechnung bei flexibler Automatisierung, Dissertation, Universität Stuttgart, München 1991.

Knolmayer (1990b)

Knolmayer, G.; Lemke, F.: Auswirkungen von Losgrößenreduktionen auf die Erreichung produktionswirtschaftlicher Ziele; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 60. Jg. (1990), S. 423-442.

Knoop (1986)

Knoop, J.: Online-Kostenrechnung für die CIM-Planung - Prozeßorientierte Kostenrechnung zur Ablaufplanung flexibler Fertigungssysteme, Berlin 1986.

Kochan, D. (1986)

Kochan, D. (Hrsg. u. Autor); Merchant, o.Vn.; Kozar, o.Vn.; Schaller, J.; Hutchinson, G.K.; Olling, o.Vn.; Semenkov, o.Vn.; Klimov, W.; Spur, G.; Krause, F.L.; Pistorius, E.; Crestin, J.P. (Koautorenen): CAM Developments in Computer-Integrated Manufacturing, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1986.

König, H. (1976)

König, H.: Entwurf und Strukturtheorie von Steuerungen für Fertigungseinrichtungen, Berlin - Heidelberg - New York 1976.

Kotschenreuther (1991)

Kotschenreuther, W.: Unterstützung der Störungsbewältigung in der Produktion durch Verteilte Wissensbasierte Systeme, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg 1991.

Krause, F. (1989b)

Krause, F.-L.; Major, F.; Altmann, C.: Technological Planning of Alternative Processes for Flexible Manufacturing Systems; in: Kochan, D.; Olling, G. (Hrsg.): Software for Manufacturing, Proceedings of the Seventh International IFIP/IFAC Conference on Software for Computer Integrated Manufacturing, PROLAMAT'88, 14.-17.06.1988 in Dresden, Amsterdam - New York - Oxford ... 1989, S. 547-556.

Küpper, We. (1984)

Küpper, We.: Zinssätze für Kalkulationen bei Geldwertänderungen - Die Bemessung kalkulatorischer Zinssätze bei Preiskalkulationen aufgrund von Selbstkosten unter Berücksichtigung von Geldwertänderungen, Dissertation, Universität Köln, Thun - Frankfurt 1984.

Lee, S. (1988)

Lee, S.; Shin, Y.G.: Automatic Construction of Assembly Partial-Order Graphs; in: o.V.: 1988 International Conference on Computer Integrated Manufacturing, 23.-25.05.1988 in Troy, Washington 1988, S. 383-392.

Lewis, W. (1987)

Lewis, W.; Barash, M.M.; Solberg, J.J.: Computer Integrated Manufacturing System Control: A Data Flow Approach; in: Journal of Manufacturing Systems, Vol. 6 (1987), S. 177-191.

Lipp (1991)

Lipp, H.-P.: Einsatz von zeitbewerteten Fuzzy-Petri-Netzen in Expertensystemen zur operativen Führung komplexer Produktionssysteme; in: Hommel, G. (Hrsg.): Prozeßrechnungssysteme'91 - Automatisierungs- und Leitsysteme in den neunziger Jahren, 25.-27.02.1991 in Berlin, Proceedings, Informatik-Fachberichte 269, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 103-112.

Lockemann (1975)

Lockemann, P.C.: Information Systems: A Survey by Examples; in: Mühlbacher, J. (Hrsg.): GI - 5. Jahrestagung, 8.-10.10.1975 in Dortmund, Lecture Notes in Computer Science 34, Berlin - Heidelberg - New York 1975, S. 3-34.

Lonchamp (1984)

Lonchamp, J.; Dufourd, J.-F.; Crehange, M.: Abstraction Tools for the Logical Specification of an Information System for a Flexible Workshop; in: Doumeings, G.; Carter, W.A. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems - Production Management Systems in the Eighties, Proceedings of the IFIP WG 5.7 Working Conference on Advances in Production Management Systems - APMS'82", 24.-27.08.1982 in Bordeaux, Amsterdam - New York - Oxford 1984, S. 419-427.

Mertens (1988a)

Mertens,P.: Industrielle Datenverarbeitung, Band 1: Administrations- und Dispositionsebene, 7. Aufl., Wiesbaden 1988.

Mertens (1989c)

Mertens,P.; Hildebrand,R.J.N.; Kotschenreuther,W.: Verteiltes wissensbasiertes Problemlösen im Fertigungsbereich; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 59. Jg. (1989), S. 839-854.

Mertens (1989d)

Mertens,P.; Hildebrand,R.J.N.; Kotschenreuther,W.: Verteiltes wissensbasiertes Problemlösen im Fertigungsbereich, Manuskript, Informatik-Forschungsgruppe VIII, Universität Erlangen-Nürnberg, o.O. (Erlangen) o.J. (1989).

Müller,A. (1987)

Müller,A.: Produktionsplanung und Pufferbildung bei Werkstattfertigung, Dissertation unter dem Titel "Der Pufferbedarf im Rahmen der kurzfristigen Produktionsplanung bei Werkstattfertigung", Technische Hochschule Aachen 1986, Wiesbaden 1987.

Müller,U. (1988b)

Müller,U.; Horbach,J.: Rüstzeiten senken durch gezielte Planung - Maßnahmen in der Arbeitsplanung und -steuerung; in: Arbeitsvorbereitung, 25. Jg. (1988), S. 147-150.

Naundorf (1991)

Naundorf,W.; Zeidler,W.: Kostenrechnung für die flexibel automatisierte Fertigung - Neue Anforderungen verlangen neue Ansätze; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 133 (1991), Nr. 5, S. 65-70.

Nieß (1980)

Nieß,P.S.: Kapazitätsabgleich bei flexiblen Fertigungssystemen, Berlin - Heidelberg - New York 1980.

Oberquelle (1980)

Oberquelle,H.: Nets as a Tool in Teaching and in Terminology Work; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 481-506.

Oberweis (1990a)

Oberweis,A.: Zeitstrukturen für Informationssysteme, Dissertation, Universität Mannheim, Mannheim 1990.

o.V. (1984e)

o.V.: Ergebnisse - Forschungsbereich: Verteilte Systeme und Prozesse; in: Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn: Jahresbericht 1983, Sankt Augustin 1984, S. 115-116.

o.V. (1988l)

o.V.: CIM-Konzept für die flexible Fertigung - Kunststoffmaschinenbau Just-in-time; in: VDI nachrichten, 42. Jg. (1988), Nr. 35, S. 23.

Ow (1988c)

Ow,P.S.; Smith,S.F.; Howie,R.: A Cooperative Scheduling System; in: Oliff,M.D. (Hrsg.): Expert Systems and Intelligent Manufacturing, Proceedings of the Second International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 03.-05.05. 1988 in Charleston, New York - Amsterdam - London 1988, S. 43-56.

Pagnoni (1990)

Pagnoni,A.: Project Engineering - Computer-Oriented Planning and Operational Decision Making, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Rausch (1984)

Rausch,J.: Zu welchen zeitwirtschaftlichen Konsequenzen führen veränderte Technologien in der Fertigung? - Benötigen wir z.B. noch personenbezogene Vorgabezeiten?; in: Knebel,H.; Zander, E. (Hrsg.): Neue Entwicklungen bei Arbeit, Entgelt und Führung, Freiburg 1984, S. 58-64.

REFA (1985c)

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 3, 4. Aufl., München 1985.

REFA (1987)

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation - Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme, München 1987.

Reisig (1983a)

Reisig,W.: System Design Using Petri Nets; in: o.V.: Papers presented at the 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse, o.O. 1983, S. 309-321. (Auch erschienen in: Hommel,G.; Krönig,D. (Hrsg.): Requirements Engineering, Arbeitstagung der GI, 12.-14.10.1983 in Friedrichshafen, Informatik-Fachberichte 74, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 29-41.)

Ropohl (1971)

Ropohl,G.: Flexible Fertigungssysteme - Zur Automatisierung der Serienfertigung, Dissertation unter dem Titel "Die Flexibilität von Fertigungssystemen für die Automatisierung der Serienfertigung. Produktionswirtschaftliche Grundlagen für eine technologische-konstruktive Konzeption", Universität Stuttgart 1970, Mainz 1971.

Ropohl (1979)

Ropohl,G.: Baukastensysteme; in: Kern,W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart 1979, Sp. 293-302.

Scheer (1988a)

Scheer,A.-W.: Wirtschaftsinformatik - Informationssysteme im Industriebetrieb, 2. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1988.

Seliger (1983)

Seliger,G.: Wirtschaftliche Planung automatisierter Fertigungssysteme, München - Wien 1983.

Spur (1980)

Spur,G.; Albrecht,R.; Armbruster,N.; Badur,K.; Göhren,H.; Junike,W.; Kruska,J.; Mattle,H.-P.; Popken,W.; Prehn,W.; Rall,K.; Rittinghausen,H.; Seliger,G.; Sinnig,H.; Viehweger,B.: Realisierung eines modularen, flexiblen Fertigungssystem mit automatischer Informationsverarbeitung, Forschungsbericht KfK-PDV 195, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1980.

Spur (1988d)

Spur,G.; Specht,D.; Göbler,T.: Konzept einer wissensbasierten Arbeitsumgebung für die Konstruktion; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 83. Jg. (1988), S. 502-506.

Stepan (1988)

Stepan,A.; Fischer,E.O.: Betriebswirtschaftliche Optimierung - Einführung in die quantitative Betriebswirtschaftslehre, München - Wien 1988.

Stute (1978a)

Stute,G.; Storr,A.; Döttling,W.; Schwager,J.; Wörn,H.: Prozeßüberwachung in flexiblen Fertigungssystemen, Forschungsbericht KfK-PDV 148, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart, o.O. (Stuttgart) 1978.

Symons (1980a)

Symons,F.J.W.: The Description and the Definition of Queuing Systems by Numerical Petri Nets; in: Australian Telecommunication Research, Vol. 13 (1980), No. 2, S. 20-31.

Trivedi (1984)

Trivedi,K.; Dugan,J.B.; Geist,R.; Smotherman,M.: Hybrid Reliability Modeling of Fault-Tolerant Computer Systems; in: Computer and Electrical Engineering, Vol. 11 (1984), No. 2/3, S. 87-108.

von Martial (1991a)

von Martial,F.; Victor,F.: Interaktive Planung von Bürovorgängen; in: Lutze,R.; Kohl,A. (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme im Büro - Ergebnisse aus dem WISDOM-Verbundprojekt, München - Wien 1991, S. 313-324.

Weck (1982)

Weck,M.: Werkzeugmaschinen, Bd. 3: Automatisierung und Steuerungstechnik, 2. Aufl., Düsseldorf 1982.

Weck (1991d)

Weck,M.; Lange,N.: COSMOS 2000, die modulare, offene Steuerungsarchitektur für flexible Fertigungssysteme; in: Pritschow,G.; Spur,G.; Weck,M. (Hrsg.): Leit- und Steuerungstechniken in flexiblen Produktionsanlagen, München - Wien 1991, S. 3-31.

Weck (1991e)

Weck,M.; Lopez,M.: Konfigurierbare Bedienoberflächen im Fertigungsbereich; in: Pritschow, G.; Spur,G.; Weck,M. (Hrsg.): Leit- und Steuerungstechniken in flexiblen Produktionsanlagen, München - Wien 1991, S. 115-130.

Wildemann (1984a)

Wildemann,H.: Materialflußorientierte Logistik; in: Baumgarten,H.; Schwarting,C. (Hrsg.): Bestandssenkung in Produktions- und Zulieferunternehmen, Bremen 1984, S. 16-53.

Wildemann (1987a)

Wildemann,H.: Investitionsplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung für flexible Fertigungssysteme (FFS), Stuttgart 1987.

Wildemann (1988c)

Wildemann,H.: Methodenintegration in Modularprogrammen zur Realisierung von CIM und JIT; in: Mertens,P.; Wiendahl,H.-P.; Wildemann,H. (Hrsg.): CIM-Komponenten zur Planung und Steuerung - Expertensysteme in der Produktion, München 1988, S. 39-96.

Winter,Ro. (1991)

Winter,Ro.: Mehrstufige Produktionsplanung in Abstraktionshierarchien auf der Basis relationaler Informationsstrukturen, Dissertation, Universität Frankfurt 1989, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991.

**Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft
der Universität Leipzig**

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 1: ZELEWSKI, STEPHAN: Das Konzept technologischer Theorietransformationen - eine Analyse aus produktionswirtschaftlicher Perspektive, Leipzig 1994.
- Nr. 2: SIEDENTOPF, JUKKA: Anwendung und Beurteilung heuristischer Verbesserungsverfahren für die Maschinenbelegungsplanung - Ein exemplarischer Vergleich zwischen Neuronalen Netzen, Simulated Annealing und genetischen Algorithmen, Leipzig 1994.
- Nr. 3: ZELEWSKI, STEPHAN: Unternehmenskrisen und Konzepte zu ihrer Bewältigung, Leipzig 1994.
- Nr. 4: SIEDENTOPF, JUKKA: Ein effizienter Scheduling-Algorithmus auf Basis des Threshold Accepting, Leipzig 1995.
- Nr. 5: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 1: Exposition, Leipzig 1995.
- Nr. 6: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 2: Bezugsrahmen, Leipzig 1995.
- Nr. 7: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 3: Einführung in Stelle/Transition-Netze, Leipzig 1995.
- Nr. 8: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 4: Verfeinerungen von Stelle/Transition-Netzen, Leipzig 1995.
- Nr. 9: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 5: Einführung in Synthetische Netze, Teilband 5.1: Darstellung des Kernkonzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 10: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 5: Einführung in Synthetische Netze, Teilband 5.2: Auswertungsmöglichkeiten, Leipzig 1995.
- Nr. 11: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 6: Erweiterungen von Synthetischen Netzen, Leipzig 1995.
- Nr. 12: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 7: Fallstudie, Leipzig 1995.
- Nr. 13: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 8: Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 14: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 9: Beurteilung des Petrinetz-Konzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 15: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 10: Petrinetz-Literatur, Leipzig 1995.

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 16: SIEDENTOPF, JUKKA: An Efficient Scheduling Algorithm Based upon Threshold Accepting, Leipzig 1995.
- Nr. 17: SIEDENTOPF, JUKKA: The Threshold Waving Algorithm for Job Shop Scheduling, Leipzig 1995.
- Nr. 18: ZELEWSKI, STEPHAN: Diskussionspapier zum Text "Zur wirtschaftlichen und sozialen Lage in Deutschland" einer evangelisch-katholischen Arbeitsgruppe, Leipzig 1995.
- Nr. 19: SCHIMMEL, KATRIN; ZELEWSKI, STEPHAN: Untersuchung alternativer Auktionsformen hinsichtlich ihrer Eignung zur Koordination verteilter Agenten auf Elektronischen Märkten, Leipzig 1996.
- Nr. 20: SIEDENTOPF, JUKKA: Feinterminierung unter restriktiven Laufzeitanforderungen - Ein exemplarischer Vergleich lokaler Suchverfahren (Teil I), Leipzig 1996.
- Nr. 21: ZELEWSKI, STEPHAN: Strukturalistische Rekonstruktion von ökologisch induzierten Entwicklungen der produktionswirtschaftlichen Theoriebildung, Leipzig 1996.
- Nr. 22: RÖBLER, HENRIK; SCHIMMEL, KATRIN: Zur Animation und Simulation hierarchischer Petrinetze., Leipzig 1996.
- Nr. 23: RÖBLER, HENRIK; WURCH, MAIK: Implementierung des Modells eines Flexiblen Fertigungssystems, Teilbände 1-3, Leipzig 1996.
- Nr. 24: SCHIMMEL, KATRIN: Abstimmung der Implementierungssoftware INCOME/STAR. Bericht zu Phase 1 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1996/ 2. Auflage 1997.
- Nr. 25: WURCH, MAIK: Modellierung eines Flexiblen Fertigungssystems sowie von Produktionsaufträgen. Bericht zu den Phasen 2 und 3 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1996.
- Nr. 26: SCHIMMEL, KATRIN: Der Einsatz elektronischer Märkte zur Koordination in Flexiblen Fertigungssystemen, Leipzig 1996.
- Nr. 27: TÖPFER, ANDREAS: Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Windkraftanlagen im Raum Halle/Leipzig - Ergebniszusammenfassung, Leipzig 1996.
- Nr. 28: WURCH, MAIK: Implementierung von Vickrey-Auktionen mit Hilfe von Petrinetzen, Leipzig 1996.
- Nr. 29: WURCH, MAIK: Coordinating Electronic Markets by Auctions, Leipzig 1996.
- Nr. 30: SCHIMMEL, KATRIN; WURCH, MAIK: Simulation eines Koordinations-Moduls in einem Flexiblen Fertigungssystem, Leipzig 1996.
- Nr. 31: RÖBLER, HENRIK: XPNC - Auswahltool für parallele Schaltentscheidungen bei der Simulation von Petrinetzen, Leipzig 1997.
- Nr. 32: ZELEWSKI, STEPHAN: Handelsinformationssysteme - erweiterte Fassung einer Rezension, Leipzig 1997.

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 33: ZELEWSKI, STEPHAN: Erfahrungen mit Höheren Petrinetzen bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen. Bericht zu Phase 7 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 34: ZELEWSKI, STEPHAN: Optimierung in Petrinetz-Modellen - eine Analyse aus betriebswirtschaftlicher Sicht, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 35: WURCH, MAIK: Simulation von Koordinations-Modulen unter Berücksichtigung strategischen Agentenverhaltens, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 36: SCHIMMEL, KATRIN: Komponente für Erreichbarkeitsanalysen. Bericht zu Phase 6 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1997.
- Nr. 37: WURCH, MAIK: Modellierung der Prozeßkoordinierung. Bericht zu Phase 4 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 38: BODE, JÜRGEN; FUNG, RICHARD Y.K.: Integrating Cost Considerations in Quality Function Deployment, Leipzig 1997.

**Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft
der Universität Leipzig**

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 1: ZELEWSKI, STEPHAN: Das Konzept technologischer Theorietransformationen - eine Analyse aus produktionswirtschaftlicher Perspektive, Leipzig 1994.
- Nr. 2: SIEDENTOPF, JUKKA: Anwendung und Beurteilung heuristischer Verbesserungsverfahren für die Maschinenbelegungsplanung - Ein exemplarischer Vergleich zwischen Neuronalen Netzen, Simulated Annealing und genetischen Algorithmen, Leipzig 1994.
- Nr. 3: ZELEWSKI, STEPHAN: Unternehmenskrisen und Konzepte zu ihrer Bewältigung, Leipzig 1994.
- Nr. 4: SIEDENTOPF, JUKKA: Ein effizienter Scheduling-Algorithmus auf Basis des Threshold Accepting, Leipzig 1995.
- Nr. 5: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 1: Exposition, Leipzig 1995.
- Nr. 6: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 2: Bezugsrahmen, Leipzig 1995.
- Nr. 7: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 3: Einführung in Stelle/Transition-Netze, Leipzig 1995.
- Nr. 8: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 4: Verfeinerungen von Stelle/Transition-Netzen, Leipzig 1995.
- Nr. 9: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 5: Einführung in Synthetische Netze, Teilband 5.1: Darstellung des Kernkonzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 10: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 5: Einführung in Synthetische Netze, Teilband 5.2: Auswertungsmöglichkeiten, Leipzig 1995.
- Nr. 11: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 6: Erweiterungen von Synthetischen Netzen, Leipzig 1995.
- Nr. 12: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 7: Fallstudie, Leipzig 1995.
- Nr. 13: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 8: Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 14: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 9: Beurteilung des Petrinetz-Konzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 15: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 10: Petrinetz-Literatur, Leipzig 1995.

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 16: SIEDENTOPF, JUKKA: An Efficient Scheduling Algorithm Based upon Threshold Accepting, Leipzig 1995.
- Nr. 17: SIEDENTOPF, JUKKA: The Threshold Waving Algorithm for Job Shop Scheduling, Leipzig 1995.
- Nr. 18: ZELEWSKI, STEPHAN: Diskussionspapier zum Text "Zur wirtschaftlichen und sozialen Lage in Deutschland" einer evangelisch-katholischen Arbeitsgruppe, Leipzig 1995.