

Studienarbeit

**Analyse und Erweiterung eines Petri-Netz-
basierten Konzepts zur Abbildung
wandlungsfähiger Produktionssysteme**

Dominik Schmitt

Abgabedatum: 02.11.2015

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Dipl.-Geoinf. Maik Deininger

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

FG IT in Produktion und Logistik (ITPL)

<http://www.itpl.mb.tu-dortmund.de>

Abstract

Das Erstellen nahezu optimaler Produktionspläne für wandlungsfähige Produktionssysteme ist eine vielschichtige Aufgabe. Die Simulation hat sich in diesem Bereich als eine passende Technologie zur Lösungsfindung etabliert. In dieser Arbeit wird eine Methode zur Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme im Kontext einer Werkstattfertigung mit Parallelfertigung vorgestellt. Dazu werden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt. Die Modelle basieren auf dem Konzept der Timed Hierarchical Object-Related Nets (THORN) und ermöglichen die Analyse und Bewertung des zugrundeliegenden Produktionssystems durch Simulation, so dass sich Rückschlüsse auf das originale System ziehen lassen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	ii
Abbildungsverzeichnis.....	v
Einleitung.....	6
1 Grundlagen.....	7
1.1 Wandlungsfähige Produktionssysteme	9
1.2 Produktionsplanung und –steuerung.....	10
1.3 Modellierung und Simulation	10
1.3.1 Definition System	10
1.3.2 Definition Modellierung	11
1.3.3 Definition Simulation	11
1.4 Anforderungen an die Modellierung wandlungsfähiger Produktionssysteme	12
1.5 Theoretische Grundlagen von THOR-Netzen	13
1.5.1 Objekte.....	13
1.5.2 Stellen	13
1.5.3 Kanten.....	14
1.5.4 Transitionen	15
1.5.5 Schaltregel	16
1.5.6 Hierarchie.....	17
2 Analyse des vorliegenden Konzepts	19
2.1 Annahmen und Vereinfachungen	19
2.2 Aufbaustruktur des Modells.....	21
2.2.1 Arbeitsschritt.....	21
2.2.2 Auftrag.....	21
2.2.3 Material.....	22
2.2.4 Betriebsmittel.....	22
2.2.5 Personal.....	22
2.3 Stellgrößen.....	22

2.4	Ablaufstruktur des Modells	22
2.4.1	Initialisierung	23
2.4.2	Prüfen	23
2.4.3	Beschaffung Material	25
2.4.4	Beschaffung Betriebsmittel	25
2.4.5	Beschaffung Personal	27
2.4.6	Reservieren	27
2.4.7	Bearbeiten	30
2.4.8	Weitergabe	32
3	Überarbeitung des Modells	34
3.1	Aufbaustruktur des Modells	35
3.2	Stellgrößen	36
3.3	Ablaufstruktur des Modells	36
3.3.1	Initialisierung	36
3.3.2	Prüfen	37
3.3.3	Beschaffung Material und Personal	38
3.3.4	Beschaffung Betriebsmittel	38
3.3.5	Bearbeiten	40
3.4	Fazit	40
4	Zusammenfassung und Ausblick	41
5	Literatur	43

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Hauptnetz des Modells zur Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme.....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2: Unternetz "Arbeitsbereich X" des Modells zur Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 3: Vergleich zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit [6]</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 4: Grafische Darstellung der Grundbegriffe zur Systemdefinition</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 5: Darstellung der THOR-Netz-Stellen [19]</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 6: Darstellung der THOR-Netz-Kanten [19]</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 7: Darstellung hierarchischer Netzelemente in THOR-Netzen [19].....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 8: Programmablaufplan des Ereignisses Prüfen</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 9: Programmablaufplan der Aktivität Beschaffung Material.....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 10: Programmablaufplan der Aktivität Beschaffung Betriebsmittel</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 11: Programmablaufplan der Aktivität Beschaffung Personal.....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 12: Programmablaufplan des Ereignisses Reservieren</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 13: Programmablaufplan der Aktivität Bearbeiten</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 14: Programmablaufplan des Ereignisses Weitergabe</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 15: Überarbeiter Programmablaufplan der Aktivität Beschaffung Betriebsmittel</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 16: Hauptnetz des überarbeiteten Modells</i>	<i>41</i>

Einleitung

Eine ökonomische Produktion am Standort Deutschland wird zunehmend zu einer anspruchsvollen Herausforderung. Dies wird nicht zuletzt dadurch bedingt, dass Unternehmen der industriellen Fertigung einem immer turbulenter werdenden Umfeld ausgesetzt sind. Gründe für diese Turbulenzen sind beispielsweise eine Individualisierung der Kundennachfrage, sowie eine zunehmende Globalisierung und Dynamik der Märkte [1–4]. Dies hat eine abnehmende Vorhersagbarkeit zukünftiger Absatzmengen eines Produkts und eine reduzierte Planbarkeit der Produktion zur Folge. Die effiziente Anpassung der Produktion an die sich stetig verändernden (Kunden-)Anforderungen wird somit ein immer entscheidender werdendes Wettbewerbskriterium [5, 6].

Um den damit einhergehenden Herausforderungen zu begegnen, reagieren Unternehmen mit einer Erweiterung des Produktspektrums, einer Verkürzung der Produktlebenszyklen und einer erhöhten Flexibilität der Produktionskette [1, 2, 5]. Folglich müssen immer häufiger neue Produkte in die bereits bestehenden Produktionssysteme integriert werden, was zu einer Steigerung der Planungskomplexität und zu spezifischen Anforderungen an die mittelfristige Fabrikplanung führt. Um der steigenden Komplexität und der erhöhten Frequenz an Planungsaufgaben zu begegnen, werden zunehmend Möglichkeiten für den Einsatz digitaler Werkzeuge – unter dem Begriff der „Digitalen Fabrik“ zusammengefasst – diskutiert, die den Planer bei der Entscheidungsfindung unterstützen sollen [7, 8].

Die vorliegende Arbeit greift die dargestellte Problematik auf, indem ein vorliegender graphischer Ansatz zur Repräsentation eines wandlungsfähigen Produktionssystems (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2) analysiert und um eine detaillierte Modellbeschreibung erweitert wird. Dazu werden die Modellkomponenten Material, Betriebsmittel, Personal und Aufträge mit den notwendigen Parametern betrachtet. Ferner werden die Wirkzusammenhänge des Modells ermittelt und in Form von Ablaufdiagrammen dargestellt.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines simulierbaren Modells, auf Basis von THOR-Netzen, zur Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Das Modell dient der Analyse und Auswertung des zugrundeliegenden realen Produktionssystems durch Simulation.

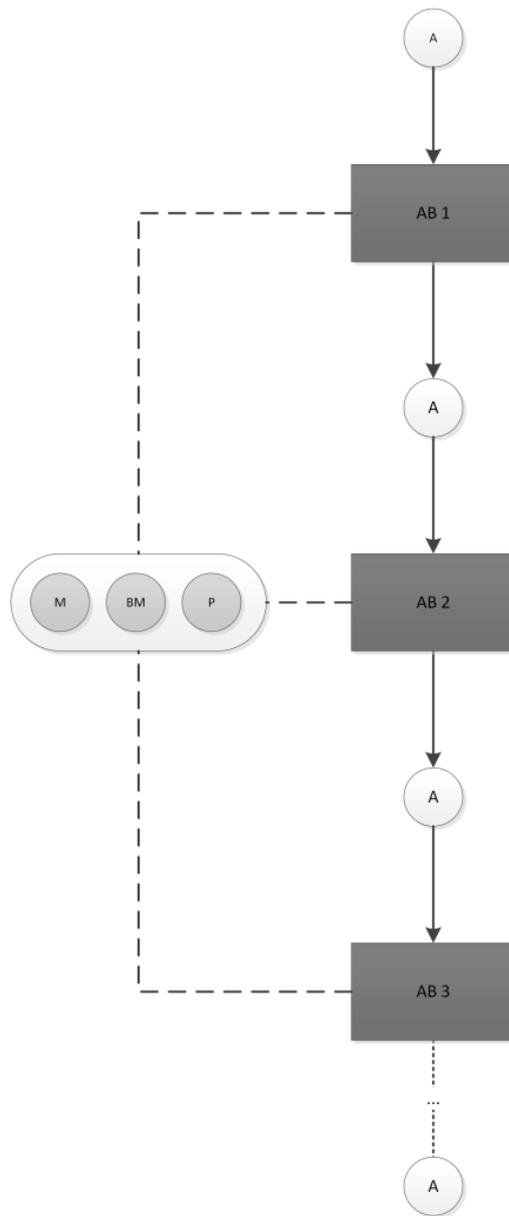


Abbildung 1: Hauptnetz des Modells zur Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme

1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen vorgestellt, die für das Verständnis der schriftlichen Ausarbeitung erforderlich sind. In Unterkapitel 1.1 wird das Prinzip der Wandlungsfähigkeit im Kontext heutiger Produktionssysteme betrachtet. Anschließend erfolgt in Unterkapitel 1.2 eine Beschreibung der Produktionsplanung und –steuerung im Bezug zur Zielsetzung dieser Arbeit. In den folgenden Unterkapiteln wird der Bereich Modellierung und Simulation betrachtet. Zunächst wird in Unterkapitel 1.3 die Modellierung und Simulation im Allgemeinen veranschaulicht. Anschließend wird in Unterkapitel 1.4 die Anforderungen an ein Modell für wandlungsfähige Produktionssysteme dargestellt.

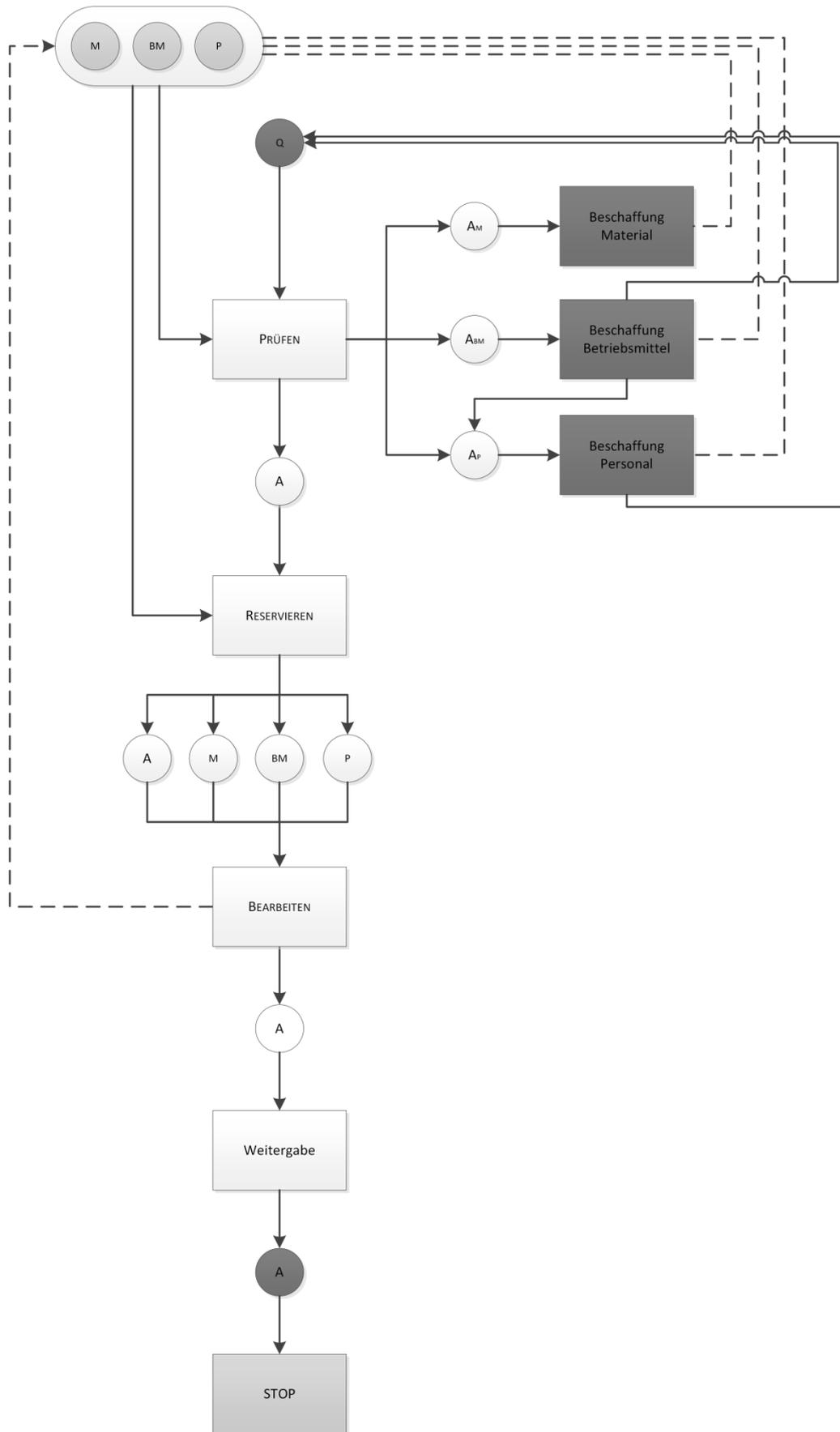


Abbildung 2: Unternetz "Arbeitsbereich X" des Modells zur Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme

Ferner wird im Unterkapitel 1.5 die theoretischen Grundlagen für THOR-Netze betrachtet.

1.1 Wandlungsfähige Produktionssysteme

Ein Produktionssystem ist ein soziotechnisches System, welches durch das Zusammenwirken von Organisation, Methoden, Menschen und technischen Ressourcen charakterisiert wird. In einem Produktionssystem wird Input (bspw. Know-how, Material oder Energie) in wertschöpfenden (Fertigung oder Montage) und assoziierten Prozessen (Transport) zu Output (bspw. Produkte) umgewandelt [5]. Ziel eines Produktionssystems ist die Herstellung von End- oder Zwischenprodukten, in der verlangten Menge, mit der vereinbarten Qualität und zum vereinbarten Zeitpunkt [2].

Um sich den stetig ändernden Marktanforderungen und Turbulenzen anzupassen, reagieren die Unternehmen mit einer Flexibilität der Produktionskette [6]. Die Flexibilität beschreibt eine reaktive Fähigkeit des Produktionssystems, eine Anpassung in einem vordefinierten Bereich durchzuführen, die sich aus der Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen ergibt [9, 10], wie beispielsweise einer kurzfristigen Erhöhung der Produktionskapazitäten.

Um jedoch langfristig und nachhaltig wettbewerbsfähig zu bleiben, bedarf es einer proaktiven Anpassungsfähigkeit der Produktionssysteme – die Wandlungsfähigkeit – mit der sich strukturelle Anpassungen des Produktionssystems schnell und effizient (ohne hohen finanziellen oder zeitlichen Aufwand) auch außerhalb zuvor festgelegter Korridore realisieren lassen [5] (vgl. Abbildung 3).

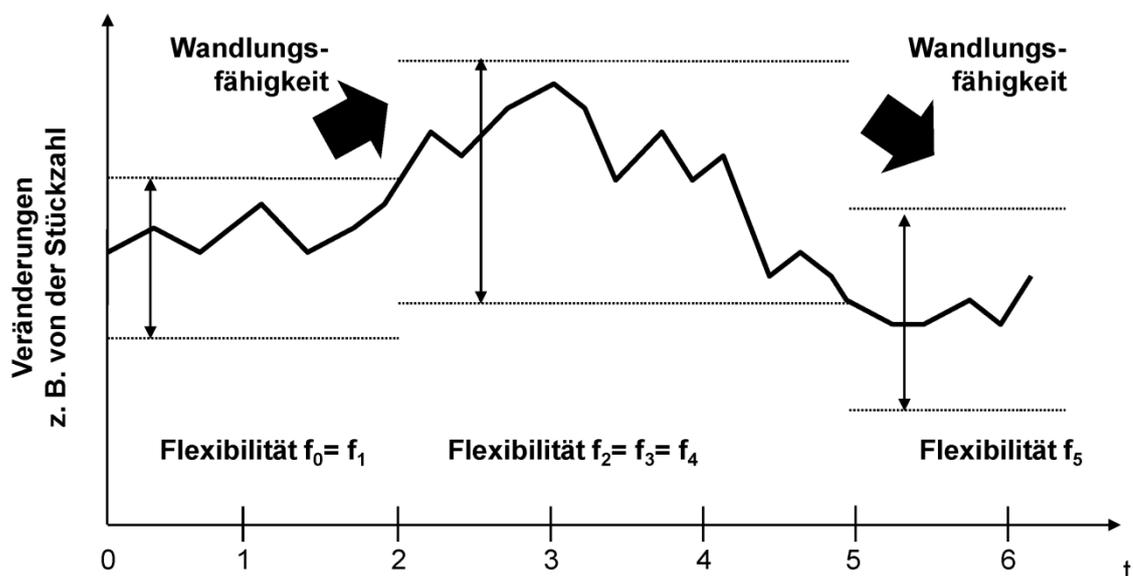


Abbildung 3: Vergleich zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit [6]

1.2 Produktionsplanung und –steuerung

Die Definition der Produktionsplanung und –steuerung (PPS) wurde mit der Zeit, den sich immer wieder ändernden Gegebenheiten neu angepasst, so dass eine Vielzahl von Bedeutungen in der Literatur zu finden ist. Nach heutiger Sicht beinhaltet die Produktionsplanung und -steuerung den kompletten technischen Prozess der Auftragsabwicklung, beginnend mit der Angebotsbearbeitung bis hin zum Versand des Produkts und umfasst somit die betrieblichen Aufgabenbereiche Konstruktion, Vertrieb, Einkauf, Fertigung, Montage und Versand [11].

Betrachtet man den Aufgabenbereich und die Ziele der Produktionsplanung und -steuerung, so sind die Ebenen der strategischen, taktischen und operativen Produktionsplanung zu unterscheiden [12].

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Problemstellung ist der operativen Produktionsplanung zuzuordnen, die den optimalen Einsatz vorhandener Kapazitäten, wie beispielsweise Personal, Produktionsmittel oder Produktionsorganisation, ermittelt. Die zentrale Aufgabe der operativen Produktionsplanung ist das Bestimmen eines wirtschaftlichen Produktionsprogramms zur Leistungserstellung (Produktionsplan). Der Produktionsplan beinhaltet die für die jeweilige Planungsperiode benötigte Art und Menge der Erzeugnisse, sowie deren räumliche und zeitliche Zuordnung. Ziel ist die termingerechte Einordnung vorhandener und prognostizierter Kunden- und Lageraufträge in den Produktionsplan [12].

1.3 Modellierung und Simulation

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Modellierung und Simulation dargestellt. Dazu wird in Abschnitt 1.3.1 die Definition eines Systems vorgestellt, die als Grundlage der Modellierung dient. Anschließend werden in Abschnitt 1.3.2 die Grundlagen der Modellierung aufgezeigt. Darauf folgend wird die Simulation in Abschnitt 1.3.3 beschrieben.

1.3.1 Definition System

Ein System ist eine Menge von Elementen, die über Relationen miteinander verbunden sind [13–15]. Durch seine sogenannte Systemgrenze grenzt sich das System von seiner Umwelt ab. Informationen, Materie oder Energie werden über Systemein- und -ausgangsgrößen mit der Umwelt ausgetauscht. Neben den bereits genannten Elementen, auch Systemelemente genannt, kann ein System aus Subsystemen bestehen

und bestimmt dadurch seine Aufbaustruktur [15]. Eine grafische Darstellung der Strukturelemente eines Systems wird in Abbildung 4 dargestellt.

Über die sogenannte Ablaufstruktur, den Wirkzusammenhängen zwischen den Elementen und Subsystemen, wird das Verhalten des Systems definiert. Der Systemzustand, die Beschreibung des Systems zu einem festen Zeitpunkt, kann sich durch im System ablaufende Prozesse ändern, sogenannte Zustandsänderungen [15].

1.3.2 Definition Modellierung

Die Modellierung bezeichnet den Prozess der Abstraktion eines real existierenden oder geplanten Systems samt seiner Systemstruktur und seinem Verhalten [15]. Ergebnis dieses Prozesses ist das Modell, eine vereinfachte Darstellung des Originals, bei dem ausgewählte Aspekte des abzubildenden Systems wegfallen oder explizit hervorgehoben werden können. Der Verwendungszweck des Modells bestimmt die Abstraktion und somit die zu modellierenden Charakteristiken des Ursprungsystems, so dass regelmäßig nur bestimmte Aspekte des Originals abgebildet werden [16].

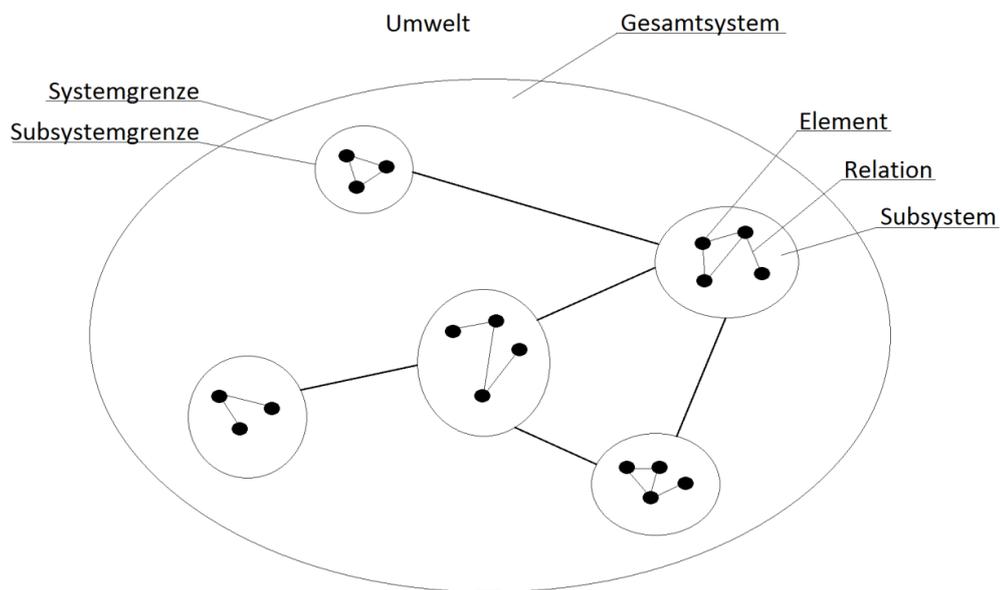


Abbildung 4: Grafische Darstellung der Grundbegriffe zur Systemdefinition

Ziel der Modellierung ist die Erstellung eines Modells zu Untersuchungszwecken oder als Kommunikationsgrundlage. Mit Hilfe des Modells lassen sich Situationen des Originals darstellen, die auf dem Original nicht betrachtet werden können [17].

1.3.3 Definition Simulation

Die Simulation umfasst die Modellierung eines realen Systems durch ein experimentierbares Modell, dessen Ausführung und Analyse, sowie die Auswertung der

Simulationsergebnisse und die anschließende Übertragung der daraus resultierenden Erkenntnisse auf das Ursprungssystem [14].

Die Hauptaufgabe der Simulation im Kontext der Produktion und Logistik besteht in der Planungsunterstützung und bildet ein allgemein anerkanntes Hilfsmittel zur Planung, Realisierung und zum Betrieb technischer Systeme [18].

Die Schwierigkeiten bei der Simulation liegen in der Erstellung eines passenden Modells, im Hinblick auf die zu untersuchende Problemstellung, sowie in einer effizienten Versuchsplanung, um aussagekräftige Resultate zu erhalten [12].

1.4 Anforderungen an die Modellierung wandlungsfähiger Produktionssysteme

In Abhängigkeit der zugrundeliegenden Aufgabenstellung müssen Modellierungstechniken diverse Anforderungen erfüllen. Im Kontext dieser Arbeit - die Entwicklung einer computergestützten graphischen Darstellung eines wandlungsfähigen Produktionssystems zur Analyse des zugrundeliegenden realen Systems - werden spezifischen Anforderungen im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels betrachtet.

Das Modell bedarf einer graphischen Notation, um die Abläufe und Wirkzusammenhänge des Systems nachvollziehbar darzustellen. Ferner ist ein gewisser formaler Grad der Darstellung erforderlich, um die Eindeutigkeit und Korrektheit des Modells zu gewährleisten.

Um das zugrundeliegende Produktionssystem möglichst genau, im Sinne der Aufgabenstellung, abzubilden, ist die Darstellung komplexer Objekte und Wirkzusammenhänge erforderlich.

Um eine gute Übersicht über das Modell zu gewährleisten, ist eine Hierarchisierung des Modells erforderlich, so dass sich komplexe Vorgänge in anschauliche (Unter-)Modelle gliedern lassen.

Da es sich um die Modellierung eines Produktionssystems im Kontext der Ablaufplanung handelt, ist die Abbildung zeitlicher Zusammenhänge, sowie die Abbildung nebenläufiger Prozesse zwingend erforderlich. Erst dadurch lässt sich das zugrundeliegende System ausreichend gut darstellen, so dass anschließend Aussagen über das reale System getroffen werden können.

1.5 Theoretische Grundlagen von THOR-Netzen

Um den Anforderungen an die Modellierung wandlungsfähiger Produktionssysteme gerecht zu werden, wurde als Modellierungstechnik die THOR-Netze (Timed Hierarchical Object-Related Nets) ausgewählt, die in diesem Unterkapitel informell beschrieben werden. Falls nicht anders gekennzeichnet, wurde die Beschreibung der THORNs inhaltlich von Schöf, Wieting und Sonnenschein [19], sowie von Wieting [20] übernommen. Eine formale Definition der THOR-Netze ist in [21] nachzulesen.

THOR-Netze basieren im Wesentlichen auf dem Konzept der Petri-Netze, haben jedoch einige Erweiterungen und Änderungen, die im weiteren Verlauf betrachtet werden.

1.5.1 Objekte

Im Gegensatz zu einfachen Petri-Netzen werden bei THORNs komplexe Objekte anstelle von attributlosen Marken verwendet. Die Objekte werden durch Instanzen von C++-Klassen realisiert, so dass im Allgemeinen von *Objekten* gesprochen wird. Durch die „offene“ Schnittstelle lassen sich vordefinierte (*Bool, Int, Float...*) oder eigene, (mächtige) Objekttypen abbilden, die eine Modellierung komplexer Systeme ermöglicht.

1.5.2 Stellen

Die Stellen eines THOR-Netzes haben die Eigenschaften *Name, Kapazität, Typ* und *Struktur*.

Der Name einer Stelle ist frei wählbar und dient lediglich als Information für den Anwender.

Die Kapazität einer Stelle gibt an, wie viel Objekte sich maximal zu einem Zeitpunkt auf einer Stelle befinden dürfen. Für die Kapazität dürfen nur natürliche Werte oder der unbeschränkte Wert *Omega* (Ω) gewählt werden.

Der Typ einer Stelle bestimmt den Objekttyp für alle Objekte, die sich auf der Stelle befinden dürfen.

Durch die Struktur der Stelle werden die Objekte in eine Reihenfolgebeziehung gesetzt. Es gibt die Strukturen *multiset, stack, queue* und *priority queue*. Für Multiset-Stellen gelten keine besonderen Regeln. Für eine Stack-Stelle gilt das Prinzip *first in last out* (FILO) und für Queue-Stellen gilt *first in first out* (FIFO). Die Reihenfolge der Objekte auf einer Priority Queue-Stelle wird durch eine benutzerdefinierte Prioritätsfunktion

bestimmt. Eine graphische Darstellung der unterschiedlichen Stellen-Strukturen wird in Abbildung 5 dargestellt.

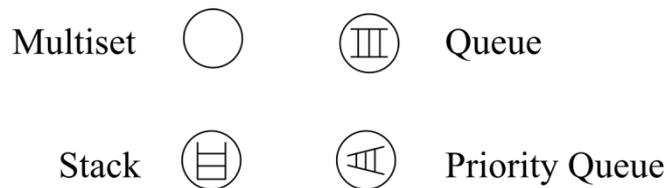


Abbildung 5: Darstellung der THOR-Netz-Stellen [19]

1.5.3 Kanten

Kanten eines THORNs haben die Parameter *Name* und *Kantentyp*. Abhängig vom Kantentyp können die Parameter *Variablenname* und *Gewicht* dazu kommen.

Der Kantename darf beliebig gewählt werden und dient dem Nutzer als Information.

In einem THOR-Netz haben Kanten den Typ *standard*, *enabling*, *inhibitor* oder *consuming*. Kanten, die von einer Transition ausgehend zu einer Stelle führen, haben ausschließlich den Typ *standard*. Der Kantentyp von einer Stelle zu einer Transition kann beliebig gewählt werden und definiert die Aktiviertheit bzw. das Schaltverhalten der inzidenten Transition. Eine graphische Übersicht der unterschiedlichen Kanten-Typen wird in Abbildung 6 abgebildet.

Standard-Kanten werden außerdem mit einem ganzzahligen Gewicht und einem Variablennamen beschriftet. Das Kantengewicht gibt die benötigte Anzahl der Objekte auf der inzidenten Stelle an, um die inzidente Transition zu aktivieren bzw. wie viel Objekte beim Schalten der Transition von der Stelle konsumiert werden. Über den Variablennamen erhält die Transition Zugriff auf die konsumierten Objekte. Variablennamen müssen entsprechend in der Umgebung einer Transition eindeutig sein. Für Kanten ohne Beschriften gilt, dass genau ein Objekt von der inzidenten Stelle abgezogen wird.

Enabling-Kanten (aktivierende Kanten) sind identisch zu Standard-Kanten mit der Ausnahme, dass beim Schalten der Transition keine Objekte von der inzidenten Stelle konsumiert werden.

Inhibitor-Kanten (inhibitorische Kanten) werden nur mit einem Namen beschriftet. Transitionen schalten nur, wenn alle inzidenten Stellen leer sind.

Consuming-Kanten (konsumierende Kanten) werden ebenfalls nur mit einem Namen beschriftet und haben keine Auswirkungen auf die Aktiviertheit der Transition. Eine

schaltende Transition leert alle adjazenten Stellen, die über eine Consuming-Kante verbunden sind.

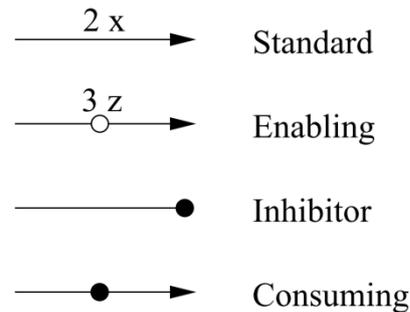


Abbildung 6: Darstellung der THOR-Netz-Kanten [19]

1.5.4 Transitionen

Transitionen haben die Parameter *Name*, *Schaltkapazität*, *Schaltbedingung*, *Schaltaktion*, *Verzögerungszeit* und *Schaltdauer*.

Der Name einer Transition kann beliebig gewählt werden und dient dem Benutzer als Information.

Die Schaltkapazität gibt an, wie oft eine Transition maximal parallel zu sich selbst schalten kann. Die Schaltkapazität wird durch einen ganzzahligen Wert oder als unbeschränkt, durch den Wert Omega (Ω), definiert.

Über die Schaltbedingung können zusätzliche Restriktionen an die Vorbereichsobjekte realisiert werden. Alle Schaltbedingungen müssen erfüllt sein, damit eine Transition schaltet.

Durch die Schaltaktion lassen sich Handlungsanweisungen beim Schalten der Transition definieren. Während der Schaltaktion hat die Transition Zugriff auf eingehende und ausgehende Objekte. So können Berechnungen durchgeführt oder ausgehende Objekte erstellt bzw. modifiziert werden.

Die Verzögerungszeit und die Schaltdauer definieren zusammen das zeitliche Verhalten der Transition. Über die Verzögerungszeit wird die Dauer definiert, über die eine Transition durchgehen aktiviert sein muss, um zu schalten. Die Schaltdauer gibt den Zeitraum zwischen Schaltbeginn und Schaltende an. Die Werte für die Verzögerungszeit und die Schaltdauer können von den konsumierten Objekten des Vorbereichs abhängig sein.

1.5.5 Schaltregel

Ein *Schaltereignis*, gebildet durch eine Transition und eine Menge an Objekte aus dem Vorbereich der Transition, wird verzögert, sobald die Schaltbedingung der Transition durch die beteiligten Objekte erfüllt wird. Das Verzögern eines Schaltereignisses wird weder durch die Kapazitäten der Nachbereichsstellen, noch durch die Schaltkapazität der Transition beschränkt. Die Dauer der Verzögerung eines Schaltereignisses ergibt sich aus der Verzögerungszeit der Transition.

Ein Schaltereignis ist *vollständig verzögert*, falls die Schaltbedingung durchgehend über die Dauer der Verzögerung erfüllt ist.

Ein Schaltereignis ist *aktiviert* und schaltet, falls es vollständig verzögert ist, die Transition über ausreichend Schaltkapazität verfügt und genügend Platz auf den Nachbereichsstellen der Transition vorhanden ist.

Beim Schalten eines Schaltereignisses wird zunächst die Schaltkapazität der Transition reduziert und abhängig vom jeweiligen Kantentyp mit den beteiligten Objekten wie folgt verfahren. Über eine Standard-Kante fließende Objekte werden von der entsprechenden Stelle entfernt. Über eine Inhibitor-Kante werden per Definition keine Objekte übertragen und über Consuming-Kanten verbundene Stellen werden beim Schalten der Transition vollständig geleert. Objekte, deren Stellen über Enabling-Kanten mit der schaltenden Transition verbunden werden, verbleiben auf den entsprechenden Stellen. Während der Transition kann auf alle beteiligten Objekte zugegriffen werden. Ferner wird die Schaltdauer des Ereignisses bestimmt und abhängig vom Kantengewicht ausreichend Platz im Nachbereich der Transition reserviert. Das Schalten eines Schaltereignisses ist ein atomarer, nicht unterbrechbarer Prozess. Nach Schaltbeginn werden, entsprechend der Gewichtung ausgehender Kanten und dem Typ der damit verbundenen Stellen, Objekte erzeugt. Die so erzeugten Objekte können während der Schaltaktion manipuliert werden. Nach Durchführung der Schaltaktion wird die Kapazität der Transition inkrementiert, reservierte Plätze freigegeben und die erstellten Objekte im Nachbereich der Transition abgelegt. Anschließend ist der Schaltvorgang beendet.

Falls zu einem Zeitpunkt mehrere Schaltereignisse aktiviert oder beendet wurden, wird nichtdeterministisch ein Ereignis ausgewählt und entsprechend abgearbeitet, bis kein weiteres Schaltereignis aktiviert oder beendet ist.

1.5.6 Hierarchie

Das Hierarchiekonzept von THOR-Netzen ermöglicht das Erstellen strukturierter und modularisierter Modelle, sowie das Wiederverwenden einzelner Komponenten an unterschiedlichen Stellen des Modells. Die Hierarchie in THORNs ergibt sich durch die Konzepte *Transitionsverfeinerung* und *Unternetzaufruf*. Im weiteren Verlauf werden das Hierarchiekonzept der THORNs, sowie die dazu benötigten Komponenten detailliert erläutert.

Benötigt werden die Netzelemente *Aufruf-Transition*, *Stop-Transition*, *Einbettungsstelle* bzw. *Share-Stelle*, *Übergabestelle* bzw. *I/O-Stelle* und *Hyper-Kante*. Eine graphische Darstellung der Elemente erfolgt in Abbildung 7, wobei Einbettungs- und Übergabestellen keine besondere graphische Darstellung erfordern.

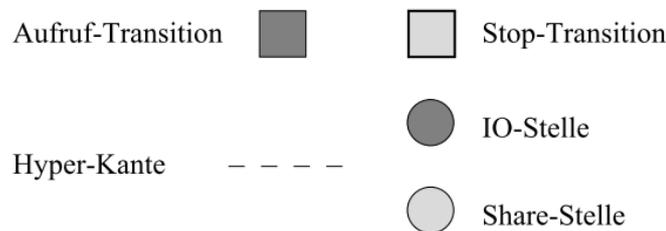


Abbildung 7: Darstellung hierarchischer Netzelemente in THOR-Netzen [19]

Aufruf-Transitionen repräsentieren die Verfeinerung durch Unternetze.

Die zur Aufruf-Transition adjazenten Stellen werden, anhand des Kantentyps unterschieden, über den sie mit der Aufruf-Transition verbunden sind. Stellen die über eine Standard-Kante mit der Aufruf-Transition verbunden sind heißen Übergabestellen. In Abhängigkeit der Richtung der Kanten können Übergabestellen in *Eingabe*-, *Ausgabe*- oder *Ein/Ausgabestellen* unterschieden werden. Einbettungsstellen hingegen sind über eine Hyper-Kante mit der Aufruf-Transition verbunden. Zu beachten ist, dass die Menge der Übergabe- und Einbettungsstellen disjunkt sein muss.

Über Enabling-, Inhibitor- oder Consuming-Kanten verbundene Randstellen bedürfen keiner besonderen Bezeichnung. Objekte werden über diese Kanten nicht an das Unternetz übergeben, sie können lediglich für die Aktiviertheit einer Aufruf-Transition verwendet werden, oder werden durch das Schalten der Transition entfernt.

Übergabe- und Eingabestellen haben im Unternetz jeweils eine korrespondierende Stelle, die mit den englischen Übersetzungen *Input*-, *Output*-, *Input/Output*- und *Share-Stelle* bezeichnet werden.

1.5.6.1 Randstellen und Hyper-Kanten

Ein Austausch von Objekten zwischen dem aufrufenden Netz und dem Unternetz erfolgt bei Schaltbeginn oder Terminierung des Unternetzes über Übergabestellen und deren korrespondierenden I/O-Stellen. I/O-Stellen sind eigenständige Stellen, die immer die Struktur multiset haben und sich im Namen oder der Kapazität von ihrer korrespondierenden Übergabestelle unterscheiden können. Lediglich der Typ der Stelle und somit der Typ der übertragenen Objekte muss identisch sein.

Über Share-Stellen wird eine Referenz auf die korrespondierende Einbettungsstelle des aufrufenden Netzes realisiert. Sie erben von den jeweiligen Einbettungsstellen die Attribute Kapazität, Typ und Struktur und dürfen sich nur im Namen von der korrespondierenden Stelle unterscheiden. Share-Stellen werden als keine eigenständigen Stellen betrachtet. Durch Share-Stellen lässt sich realisieren, dass mehrere (Unter-)Netze mit denselben Objekten arbeiten.

Die Verbindung zwischen einer Einbettungs-Stelle und einer korrespondierenden Share-Stelle wird durch eine Hyper-Kante hergestellt. Hyper-Kanten haben kein Gewicht, keinen Variablennamen, eine beliebige Orientierung und einen Namen. Die Richtung der Kante hat keinen Einfluss auf das Schaltverhalten und kann zur Verdeutlichung eines Datenfluss entsprechend gewählt werden.

1.5.6.2 Aufruf-Transitionen

Bis auf die Schaltaktion verhalten sich Aufruf-Transitionen wie Standard-Transitionen. Dabei wird der Aktionsblock durch den Aufruf des Unternetzes ersetzt. Nach Ablauf der Schaltdauer wird eine Instanz des Unternetzes erstellt und die konsumierten Objekte der Eingabestellen werden auf die korrespondierenden Input-Stellen übertragen. Ferner wird über die Hyper-Kanten eine Referenz zwischen den Einbettungsstellen und den Share-Stellen hergestellt. Anschließend wird eine etwaige initiale Markierung des Unternetzes vorgenommen, die zuvor definiert wurde. Eine Inkrementierung der Schaltkapazität der Aufruf-Transition erfolgt zu diesem Zeitpunkt noch nicht.

Sobald ein Unternetz erstellt und initialisiert wurde, können Transitionen des Netzes nebenläufig zu Transitionen anderer Netze schalten.

1.5.6.3 Stop-Transitionen

Grundsätzlich verhalten sich Stop-Transition ähnlich wie Standard-Transitionen, mit dem Unterschied, dass sie anstelle einer Schaltaktion für die Terminierung des

entsprechenden Unternetzes sorgen. Bei Schaltbeginn der Stop-Transition wird neben dem Dekrementieren der Schaltkapazität, dem Abziehen der Objekte aus dem Vorbereich und dem Bestimmen der Schaltdauer ein Stop-Signal gesetzt. Durch das Stop-Signal wird der Schaltbeginn aller Transitionen des entsprechenden Unternetzes oder etwaiger weiterer Unternetze blockiert. Bereits schaltende Transitionen dürfen während der Verzögerung der Stop-Transition bis zum Ende durchgeführt werden. Nachdem alle noch laufende Transitionen des Netzes und der Unternetze beendet wurden, terminiert das Netz und somit die Aufruf-Transition. Die Objekte der Output-Stellen werden an die korrespondierenden Ausgabestellen des aufrufenden Netzes weitergeleitet und die Schaltkapazität der Aufruf-Transition inkrementiert. Abschließend werden die Instanzen des Unternetzes und aller dadurch aufgerufenen Unternetze entfernt.

2 Analyse des vorliegenden Konzepts

Das Modell bildet alle, im Sinne der Aufgabenstellung, wesentlichen Komponenten (Auftrag, Material, Betriebsmittel und Personal) und Wirkzusammenhänge eines Produktionssystems ab.

Es wird angenommen, dass die Systemlast und der aktuelle Ist-Zustand des Originalsystems bekannt sind. Zu lösen ist ein Flexibles-Job-Shop-Scheduling-Problem, da die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge variieren kann und eine Parallelfertigung nicht aufgeschlossen wird. In Folge dessen sind eine zeitliche Zuordnung der Aufträge zu den zur Verfügung stehenden Betriebsmitteln, sowie eine Zuordnung des Personals und Materials zu den notwendigen Arbeitsschritten zu bestimmen. Zusätzlich wird die Beschaffungen von Material, Betriebsmitteln oder Personal zur Optimierung der Zielgrößen berücksichtigt. Ziel des Systems ist die Bestimmung nahezu optimaler Ablaufplänen für den operativen Betrieb, in Hinblick auf die Produktionsdauer über alle Aufträge.

2.1 Annahmen und Vereinfachungen

Es wird eine Werkstattfertigung, charakterisiert durch eine Vielzahl verschiedener Betriebsmittel, Produktvarianten, Aufträge und Auftraggeber, sowie unterschiedlich qualifizierten Personals betrachtet. Zudem wird sowohl das zur Werkstattebene zugehörige Personal, als auch die Mitarbeiter betrachtet, die für die Neubeschaffung

von Material und Betriebsmitteln, sowie für die Einstellung von neuen, oder die Qualifikation bereits vorhandenen Personals zuständig sind.

Das Personal kann potentiell unterschiedliche Aufgaben durchführen, die durch die Qualifikationen des jeweiligen Mitarbeiters bestimmt werden. Die durchführbaren Fertigungsschritte eines Betriebsmittels werden durch die möglichen Rüstzustände definiert, die das jeweilige Betriebsmittel einnehmen kann. Der aktuelle Rüstzustand eines Betriebsmittels gibt die potentiell durchführbaren Arbeitsschritte der Anlage an. Durch Umrüstung lässt sich der Rüstzustand eines Betriebsmittels ändern. Ein Umrüstvorgang ist gegebenenfalls mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten (Zeit) verbunden, die durch eine Umrüstmatrix angegeben werden. Zusätzlich können für Umrüstvorgänge Personalkosten anfallen. Die Arbeitsschritte eines Auftrags sind der Reihe nach zu bearbeiten und können nicht unterbrochen werden. Eine Reihenfolgebeziehung zwischen Aufträgen liegt nicht vor. Mögliche Transportkosten für den Transport von Material, Halbzeugen oder dem fertigen Produkt werden nicht betrachtet. Zudem wird angenommen, dass zwischen den einzelnen Arbeitsstationen ausreichend große Lager für Material, Halbzeuge oder fertige Produkte vorhanden sind. Ferner wird angenommen, dass die zur Fertigung erforderlichen Informationen und Energien im ausreichenden Maße vorhanden sind, so dass diese im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet werden.

Ferner wird angenommen, dass die Simulation Teil eines simulationsgestützten Optimierungssystems ist, bei dem die Optimierung die Stellgrößen des Modells bestimmt und die anschließende Simulation eine Bewertung dieser Stellgrößen vornimmt.

Außerdem werden Anpassungen an der Notation der THORNs vorgenommen, die vornehmlich der Lesbarkeit des jeweiligen Modells dient. Kanten werden ohne Variablennamen dargestellt, da der Zugriff auf entsprechende Objekte nur konzeptionell betrachtet wird. Ferner werden explizit die Objekte aufgezeigt, die nach Schaltende für den weiteren Simulationslauf relevant sind. Bei allen weiteren Objekten, die zu Schaltbeginn auf Basis der ausgehenden Kanten erzeugt werden und für den weiteren Verlauf der Simulation nicht weiter betrachtet werden, wird ein entsprechender Parameter gesetzt. Für alle Transitionen gilt, dass bei beteiligten Objekten, genau dieser Parameter nicht gesetzt sein darf. Somit ist ausgeschlossen, dass entsprechende Objekte

einen weiteren Einfluss auf die Simulation haben. In Folge dessen werden diese Objekte nicht weiter bei der Beschreibung des Modells berücksichtigt.

2.2 Aufbaustruktur des Modells

Das Modell bildet die im Kontext der Aufgabenstellung wesentlichen Komponenten Material, Betriebsmittel, Personal und Auftrag ab, die im weiteren Verlauf des Unterkapitels detailliert betrachtet werden.

2.2.1 Arbeitsschritt

Das Modellelement Arbeitsschritt lässt sich über eine ID eindeutig identifizieren und einem realen Arbeitsschritt zuordnen. Jedem Arbeitsschritt wird eine zur Bearbeitung des Arbeitsschritts benötigte Qualifikation zugewiesen. Über diese Qualifikation lässt sich der Personalbedarf, sowie das Betriebsmittel bestimmen, die für die Durchführung notwendig sind. Ferner wird etwaig benötigter Materialbedarf zur Durchführung des Arbeitsschritts definiert. Als Ergebnis der Bearbeitung können neue Objekte generiert (bspw. durch Beschaffung) bzw. bereits vorhandene Objekte verändert werden (bspw. durch Qualifizierung oder Fertigung). Entsprechende Informationen werden im Arbeitsschritt hinterlegt. Eine Zuordnung zu einem Arbeitsbereich, in dem die Bearbeitung durchgeführt wird, wird zu Beginn oder während der Durchführung der Simulation im Arbeitsschritt definiert. Die Bearbeitungszeit wird in Form eines Start- und Endzeitpunkts während des Simulationslaufs im Objekt hinterlegt.

2.2.2 Auftrag

Über einen eindeutigen Indikator lässt sich ein Auftrags-Objekt identifizieren und einem realen Auftrag zuordnen. Ferner wird jeder Auftrag durch eine Liste zusammengehöriger Arbeitsschritte charakterisiert. Die im System betrachteten Aufträge lassen sich im Wesentlichen in drei Typen unterscheiden (Fertigungs-, Qualifizierungs- oder Beschaffungsauftrag). Der Auftragsyp wird im Auftrag entsprechend hinterlegt. Über einen Index lässt sich der aktuelle Arbeitsschritt bestimmen. Ein frühestmöglicher Startzeitpunkt t gibt an, ab welchem Zeitpunkt ein Auftrag frühestens bearbeitet werden darf. Ein spätester Fertigstellungszeitpunkt gibt an, bis zu welchem Zeitpunkt die Bearbeitung des Auftrags fertiggestellt sein muss.

2.2.3 Material

Die Komponente Material repräsentiert ein reales Halbzeug, fertiges Produkt oder ein sonstiges, für die Bearbeitung eines Auftrags benötigtes Material. Durch einen eindeutigen Parameter lässt sich ein Material-Objekt dem realen Objekt zuordnen.

2.2.4 Betriebsmittel

Die Komponente Betriebsmittel umfasst alle technischen Arbeitsmittel, die zur Durchführung eines Arbeitsschrittes erforderlich sind. Jedes Betriebsmittel erhält einen eindeutigen Indikator, zur Zuordnung des Betriebsmittels zu einer realen Anlage. Ein Betriebsmittel kann potentiell unterschiedliche Produktionsschritte durchführen, sogenannte Multifunktionsanlagen, die als Qualifikationen der Anlage definiert werden. Jeder Qualifikation wird eine Menge an Rüstzuständen zugeordnet, die die jeweilige Materialausstattung des Betriebsmittels bestimmt, um einen entsprechenden Arbeitsschritt durchzuführen. Der Wechsel zwischen zwei Rüstzuständen ist ggf. mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten, die in einer zweidimensionalen Umrüstmatrix angegeben werden, verbunden. Rüstkosten können beispielsweise Zeit-, Personal- oder Materialbedarfe sein. Ferner besitzt ein Betriebsmittel eine Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen, sowie einen Index, zum Ermitteln des aktuell zu bearbeitenden Auftrags.

2.2.5 Personal

Die Komponente Personal repräsentiert einen realen Mitarbeiter im Produktionssystem. Über eine ID lässt sich ein Personal-Objekt eindeutig einem Mitarbeiter zuordnen. Über die Qualifikationen des Personals lässt sich festlegen, welche Arbeitsschritte (Fertigungs-, Umrüstungs- oder Qualifikationsschritt) ein Mitarbeiter durchführen kann.

2.3 Stellgrößen

Die Stellgrößen sind das Ergebnis vorhergehender Optimierungs-Prozesse. Folgende Stellgrößen fließen als Eingaben in das Simulationsmodell ein:

- Initiale Qualifizierungsvorgänge für Personal werden in Form von Qualifikationsaufträgen A_Q im System initialisiert
- Initiale Beschaffungen von Material, Betriebsmittel und Personal werden in Form von Beschaffungsaufträgen A_B im System initialisiert

2.4 Ablaufstruktur des Modells

Das Hauptnetz des Modells (vgl. Abbildung 1) repräsentiert das abzubildende Produktionssystem und besteht aus einer Verkettung von Unternetzen. Jedes Unternetz

(vgl. Abbildung 2) repräsentiert einen Arbeitsbereich (AB) des Produktionssystems. Die Verkettung der Unternetze erfolgt entsprechend den Verknüpfungen der Arbeitsbereiche des realen Systems. Über Share-Stellen haben die Unternetze Zugriff auf die gemeinsamen Objekte Material, Betriebsmittel und Personal. Aufträge werden in den Unternetzen bearbeitet und anschließend zur weiteren Bearbeitung an das entsprechend nächste Unternetz weitergeleitet, bis zur Fertigstellung des Auftrags. Die Objekte Material, Betriebsmittel, Personal und Auftrag enthalten alle für die Simulation relevanten Informationen (vgl. Unterkapitel 2.2). Die Bearbeitung und Fertigstellung der Aufträge erfolgt gemäß den Bestimmungen aus Kapitel 2.4.

2.4.1 Initialisierung

Während der Initialisierung des Modells werden alle zur Verfügung stehenden Ressourcen in die jeweiligen Share-Stellen abgelegt. Personal-Objekte in die Share-Stelle P, Material-Objekte in die Share-Stelle M und Betriebsmittel-Objekte in die Share-Stelle BM. Ferner erfolgen eine Initialisierung der anfänglichen Beschaffungsauftrags-, Qualifikationsauftrags- und Fertigungsauftrags-Objekte und eine anschließende Ablage in die I/O-Stelle des zuerst zugewiesenen Arbeitsbereichs.

2.4.2 Prüfen

Das Ereignis *Prüfen* prüft den jeweiligen Auftragsstyp und leitet die Aufträgen an die entsprechenden Stellen weiter. Für Fertigungs- oder Qualifikationsaufträge wird untersucht, ob eine Beschaffung von Objekten (Material, Betriebsmittel oder Personal) notwendig ist und diese in Form eines Beschaffungsauftrags realisiert.

Zum Schalten der Transition muss sich ein Auftrags-Objekt A_x im Vorbereich befinden.

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist das Ereignis *Prüfen* (vgl. Abbildung 8), das im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

Zunächst wird der Auftragsstyp geprüft. Handelt es sich um einen Beschaffungsauftrags, so wird dieser an die entsprechende Stelle des Nachbereichs weitergeleitet (Material $\rightarrow A_M$, Betriebsmittel $\rightarrow A_{BM}$ und Personal $\rightarrow A_P$). Falls es sich um einen Fertigungs- oder Qualifikationsauftrag handelt, wird geprüft, ob eine Beschaffung weiterer Objekte (Material, Personal, Betriebsmittel) notwendig ist.

Eine Beschaffung neuer Ressourcen erfolgt, falls zum Durchführen des jeweiligen Auftrags ein oder mehrere Objekte fehlen. Ist die Beschaffung weiterer Material-, Personal- oder Betriebsmittel-Objekte notwendig, wird für jedes zu beschaffende

Objekt ein Beschaffungsauftrags-Objekt erstellt, mit den notwendigen Parametern initialisiert und in der entsprechenden Stelle des Nachbereichs abgelegt (vgl. Ereignis *Prüfen* für Beschaffungsaufträge). Eine Beschaffung neuer Ressourcen zur Laufzeit wird detailliert in Abschnitt 3.3.2 betrachtet.

Ferner wird der Fertigungs-/Qualifikationsauftrag an die Stelle A des Nachbereichs weitergeleitet. Abschließend wird die Transition dokumentiert (Ablauf-Log).

Die Schaltdauer und die Verzögerungszeit der Transition betragen jeweils 0.

Ausgegeben wird der Auftrag A_x und ggf. zusätzliche Beschaffungsaufträge A_M , A_P oder A_{BM} .

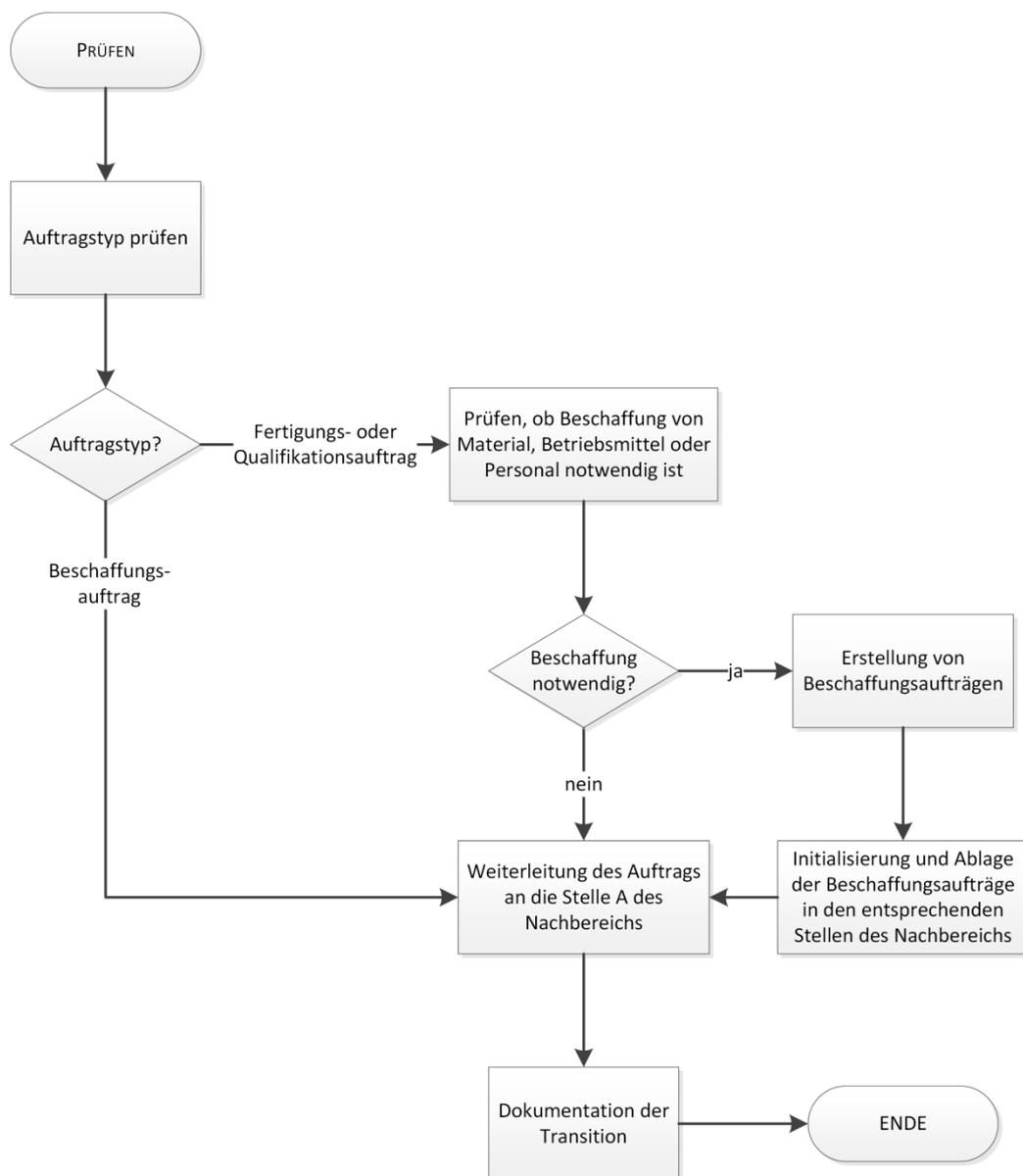


Abbildung 8: Programmablaufplan des Ereignisses *Prüfen*

2.4.3 Beschaffung Material

Die Aktivität *Beschaffung Material* repräsentiert die Beschaffung neuer Material-Objekte.

Zum Schalten der Transition muss sich ein Beschaffungsauftrag A_M im Vorbereich befinden. Falls die Beschaffung mit Personalkosten verbunden ist, so muss ebenfalls ein entsprechendes Personal-Objekt im Vorbereich liegen.

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist die Aktivität *Beschaffung Material* (vgl. Abbildung 9), die im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

Zunächst wird die Beschaffung des Materials durchgeführt. Anschließend wird ein Material-Objekt erstellt, mit den entsprechenden Parametern initialisiert und in die Share-Stelle M abgelegt. Das beteiligte Personal wird nach Durchführung der Beschaffung in die Share-Stelle P abgelegt. Abschließend wird die Transition dokumentiert (Ablauf-Log).

Die Dauer der Aktivität steht in Relation zum Beschaffungsauftrag A_M . Die Verzögerungszeit der Transition beträgt 0.

Ausgegeben wird das beschaffte Material M und ggf. das zur Beschaffung benötigte Personal P .

2.4.4 Beschaffung Betriebsmittel

Die Aktivität *Beschaffung Betriebsmittel* repräsentiert die Beschaffung neuer Betriebsmittel-Objekte.

Zum Schalten der Transition muss sich ein Beschaffungsauftrag A_{BM} im Vorbereich befinden. Falls die Beschaffung mit Personalkosten verbunden ist, so muss ebenfalls ein entsprechendes Personal-Objekt im Vorbereich liegen.

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist die Aktivität *Beschaffung Betriebsmittel* (vgl. Abbildung 10Abbildung 8), die im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

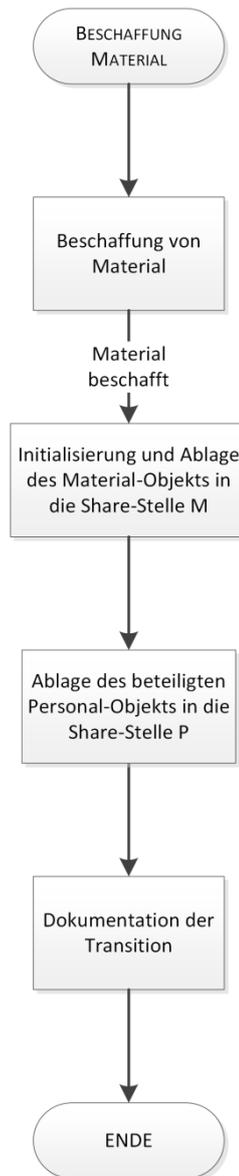


Abbildung 9: Programmablaufplan der Aktivität *Beschaffung Material*

Zunächst wird die Beschaffung des Betriebsmittels durchgeführt. Anschließend wird ein Betriebsmittel-Objekt erstellt, mit den entsprechenden Parametern initialisiert und in die Share-Stelle *BM* abgelegt. Das beteiligte Personal wird nach Durchführung der Beschaffung in die Share-Stelle *P* abgelegt. Für das neu beschaffte Betriebsmittel wird geprüft, ob eine Qualifikation vorhandenen Personals erforderlich ist. Falls dem so ist, werden entsprechende Qualifikationsaufträge A_Q erstellt und in die Stelle *A* des Nachbereichs abgelegt. Anschließend wird geprüft, ob eine Beschaffung neuen Personals für die Benutzung des Betriebsmittels benötigt wird. Ist die Beschaffung von Personal erforderlich, so werden entsprechende Beschaffungsaufträge A_P initialisiert und in die Stelle A_P des Nachbereichs abgelegt. Abschließend wird die Transition dokumentiert (Ablauf-Log).

Die Dauer der Aktivität steht in Relation zum Beschaffungsauftrag A_{BM} . Die Verzögerungszeit der Transition beträgt 0.

Ausgegeben wird das beschaffte Betriebsmittel BM und ggf. das zur Beschaffung benötigte Personal P , sowie etwaige Beschaffungs- oder Qualifikationsaufträge.

2.4.5 Beschaffung Personal

Die Aktivität *Beschaffung Personal* repräsentiert die Beschaffung neuer Personal-Objekte.

Zum Schalten der Transition muss sich ein Beschaffungsauftrag A_P im Vorbereich befinden. Falls die Beschaffung mit Personalkosten verbunden ist, so muss ebenfalls ein entsprechendes Personal-Objekt P' im Vorbereich liegen.

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist die Aktivität *Beschaffung Personal* (vgl. Abbildung 11/Abbildung 8), die im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

Zunächst wird die Beschaffung des Personals durchgeführt. Anschließend wird ein Personal-Objekt erstellt, mit den entsprechenden Parametern initialisiert und in die Share-Stelle P abgelegt. Das beteiligte Personal P' wird nach Durchführung der Beschaffung ebenfalls in die Share-Stelle P abgelegt. Für das neu beschaffte Personal wird geprüft, ob eine Qualifikation erforderlich ist. Falls eine Qualifizierung notwendig ist, werden entsprechende Qualifikationsaufträge A_Q erstellt und in die Stelle A des Nachbereichs abgelegt. Abschließend wird die Transition dokumentiert (Ablauf-Log).

Die Dauer der Aktivität steht in Relation zum Beschaffungsauftrag A_P . Die Verzögerungszeit der Transition beträgt 0.

Ausgegeben wird das beschaffte Personal P und ggf. das zur Beschaffung benötigte Personal P' , sowie etwaige Qualifikationsaufträge.

2.4.6 Reservieren

Das Ereignis *Reservieren* ermittelt durchführbare Arbeitsschritte und dazu benötigte Ressourcen und plant diese ein. Zur Bearbeitung eines Arbeitsschritts benötigte Umrüstvorgänge werden ebenfalls berücksichtigt und entsprechend eingeplant.

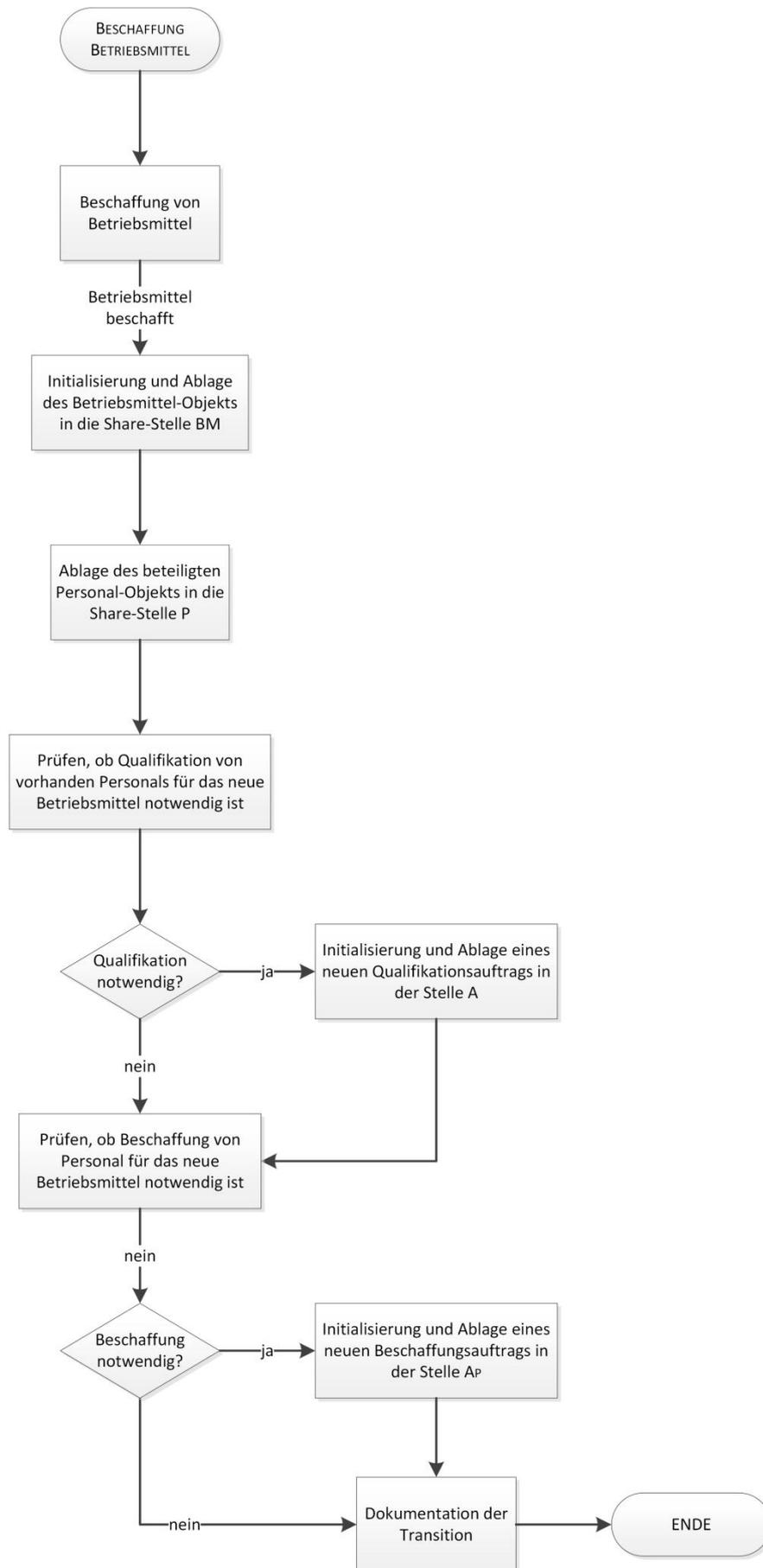


Abbildung 10: Programmablaufplan der Aktivität *Beschaffung Betriebsmittel*

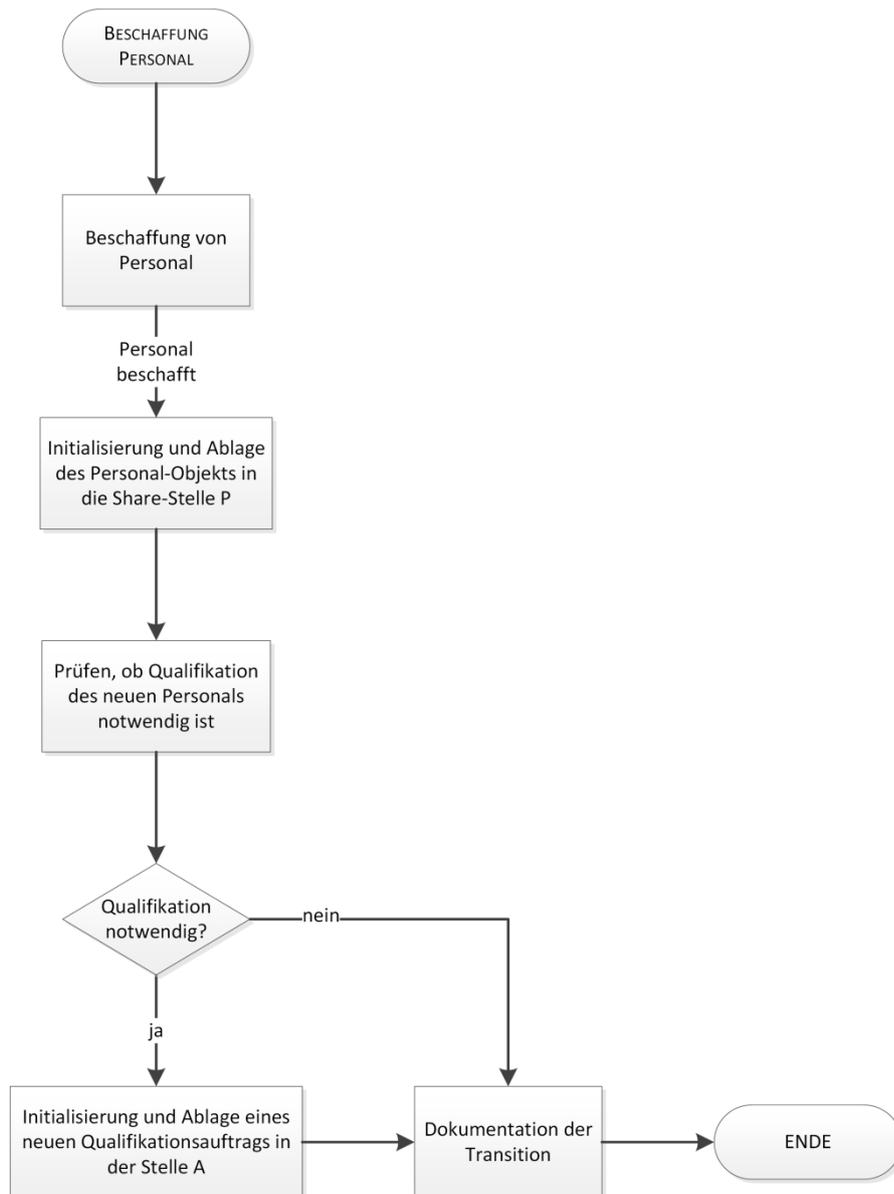


Abbildung 11: Programmablaufplan der Aktivität *Beschaffung Personal*

Zum Schalten der Transition muss sich das Betriebsmittel-Objekt BM , sowie die für den Fertigungs-/Qualifikationsauftrag $A_{F/Q}$ und einer etwaigen Umrüstung A_U benötigten Personal- und Material-Objekte (P und M) im Vorbereich befinden. Die benötigten Objekte ergeben sich aus den Anforderungen des Fertigungs-/Qualifikationsauftrags. Aufträge werden entsprechend einer Priorität bearbeitet. Ferner muss der aktuelle Simulationszeitpunkt größer als der frühestmögliche Freigabezeitpunkt des entsprechenden Auftrags sein. Falls potentiell mehrere Personal- oder Material-Objekte passend sind, werden diese durch eine stochastische Funktion entsprechend ausgewählt. Eignen sich potentiell mehrere Betriebsmittel-Objekte zur Bearbeitung des Auftrags

$A_{F/Q}$, so wird zunächst die Anlage benutzt, die keine Umrüstung bedarf. Andernfalls wird ein Betriebsmittel-Objekt stochastisch bestimmt.

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist das Ereignis *Reservieren* (vgl. Abbildung 12), das im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

Zunächst wird geprüft, ob eine Umrüstung notwendig ist. Dies ist der Fall, wenn sich der aktuelle Rüstzustand des Betriebsmittels vom benötigten Rüstzustand unterscheidet. Ist eine Umrüstung erforderlich, so wird ein neuer Umrüstauftrag initialisiert. Die am Umrüstvorgang beteiligten Objekte werden im aktuellen Arbeitsschritt des Auftrags hinterlegt. Anschließend wird der Umrüstauftrag im Betriebsmittel-Objekt gespeichert. Ist keine Umrüstung erforderlich, werden die beteiligten Objekte des Fertigungs- oder Qualifikationsauftrags mit dem aktuellen Arbeitsschritt des Auftrags verknüpft. Danach wird der Auftrag $A_{F/Q}$ im Betriebsmittel-Objekt hinterlegt und die an der Transition beteiligten Objekte in den jeweiligen Stellen des Nachbereichs abgelegt. Abschließend wird der Ablauf des Ereignisses dokumentiert (Ablauf-Log).

Die Schaltdauer und die Verzögerungszeit der Transition betragen jeweils 0.

Ausgegeben werden alle an der Transition beteiligten Objekte (Personal P , Material M , Betriebsmittel BM und Auftrag $A_{F/Q}$) und ggf. ein Umrüstauftrag A_U .

2.4.7 Bearbeiten

Die Aktivität *Bearbeiten* führt den aktuellen Arbeitsschritt eines Fertigungs-, Umrüst- oder Qualifikationsauftrags durch.

Zum Schalten der Transition muss sich der Fertigungs-, Umrüst- oder Qualifikationsauftrag $A_{F/U/Q}$ und alle an der Durchführung des aktuellen Arbeitsschritts beteiligten Objekte im Vorbereich befinden. Zudem muss der Auftrag $A_{F/U/Q}$ mit dem aktuell zu bearbeitenden Auftrag des Betriebsmittel-Objekts übereinstimmen. Die benötigten Objekte sind im Auftrag hinterlegt (vgl. Abschnitt 2.4.6).

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist die Aktivität *Bearbeiten* (vgl. Abbildung 13), die im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

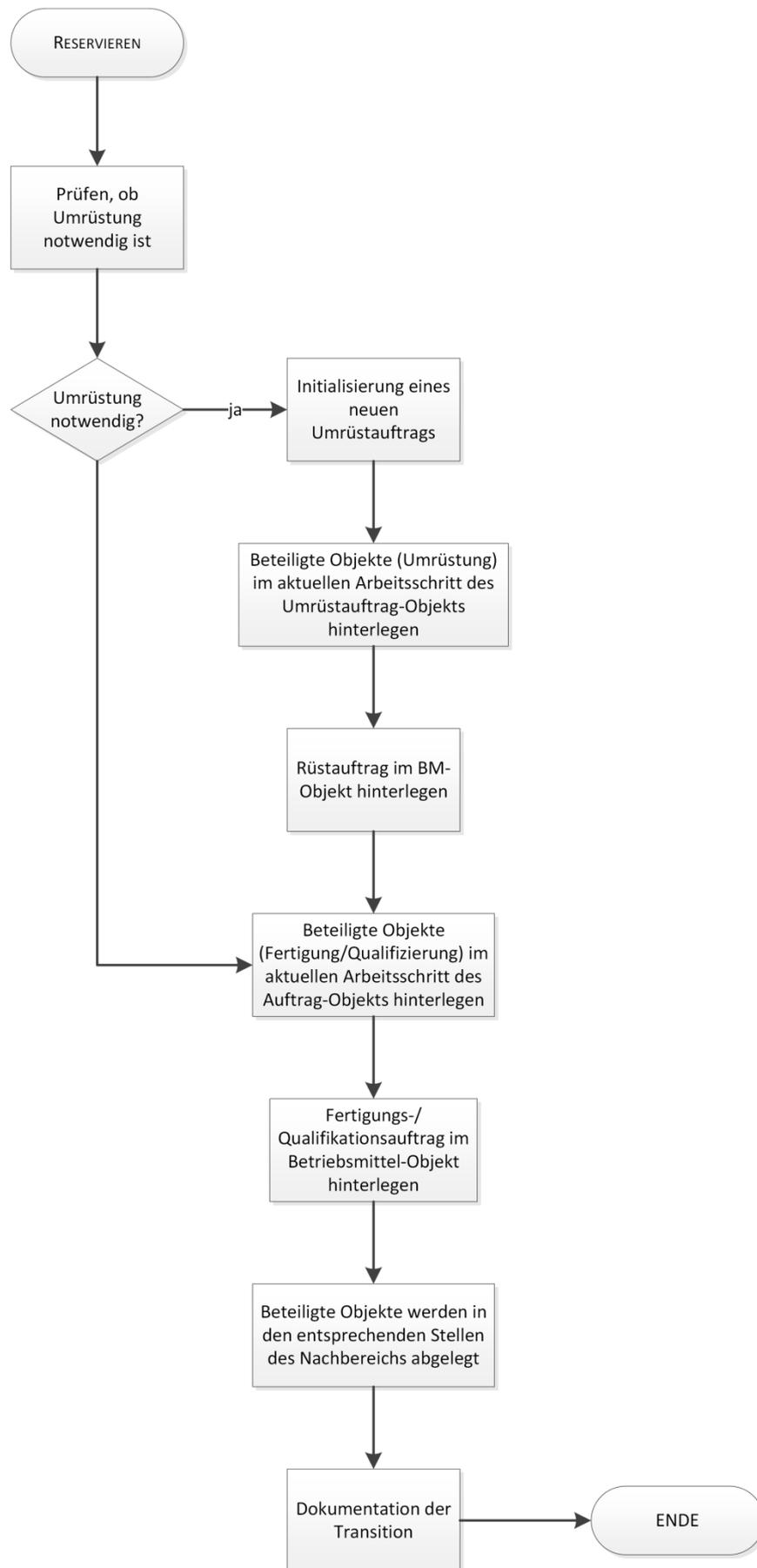


Abbildung 12: Programmablaufplan des Ereignisses Reservieren

Zunächst wird der Auftragsstyp betrachtet. Wird ein Fertigungsschritt durchgeführt, so wird das Halbzeug/Produkt, welches als Resultat des Fertigungsschritts hervorgeht, in Form eines neuen Material-Objekts initialisiert und das alte Material-Objekt entfernt. Bei der Durchführung eines Qualifizierungsauftrags wird ein neues Personal-Objekt initialisiert und das alte Personal-Objekt entfernt. Handelt es sich um einen Umrüstauftrag, so wird der aktuelle Rüstzustand des Betriebsmittels entsprechend angepasst. Anschließend wird für alle Auftragsstypen identisch weiter verfahren. Die Start- und Endzeit der Bearbeitung werden für den jeweiligen Arbeitsschritt im Auftrags-Objekt dokumentiert. Ferner werden der aktuelle Arbeitsschritt des jeweiligen Auftrags, sowie der aktuelle Auftrag des Betriebsmittels um 1 erhöht. Anschließend wird geprüft, ob der Auftrag vollständig bearbeitet wurde. Falls es sich um den letzten Arbeitsschritt eines Auftrags handelt, so wird der Auftrag als *fertiggestellt* markiert. Der Auftrag wird in die entsprechende Stelle A des Nachbereichs und alle weiteren, nicht verbrauchten Objekte in die jeweiligen Share-Stellen abgelegt. Abschließend wird die Transition dokumentiert (Ablauf-Log).

Die Schaltdauer richtet sich nach dem Auftrag $A_{F/U/Q}$ und dem beteiligten Betriebsmittel. Die Verzögerungszeit der Transition beträgt 0.

Ausgegeben werden alle an der Transition beteiligten, nicht konsumierten Objekte (Personal P/P' , Material M/M' , Betriebsmittel BM und Auftrag $A_{F/U/Q}$).

2.4.8 Weitergabe

Die Transition *Weitergabe* repräsentiert den Transfer eines Auftrags zwischen zwei Arbeitsbereichen.

Zum Schalten der Transition muss sich ein Auftrag A_x im Vorbereich befinden.

Die Schaltkapazität beträgt Ω und die Schaltaktion ist das Ereignis *Weitergabe* (vgl. Abbildung 14Abbildung 8), das im weiteren Verlauf detailliert betrachtet wird.

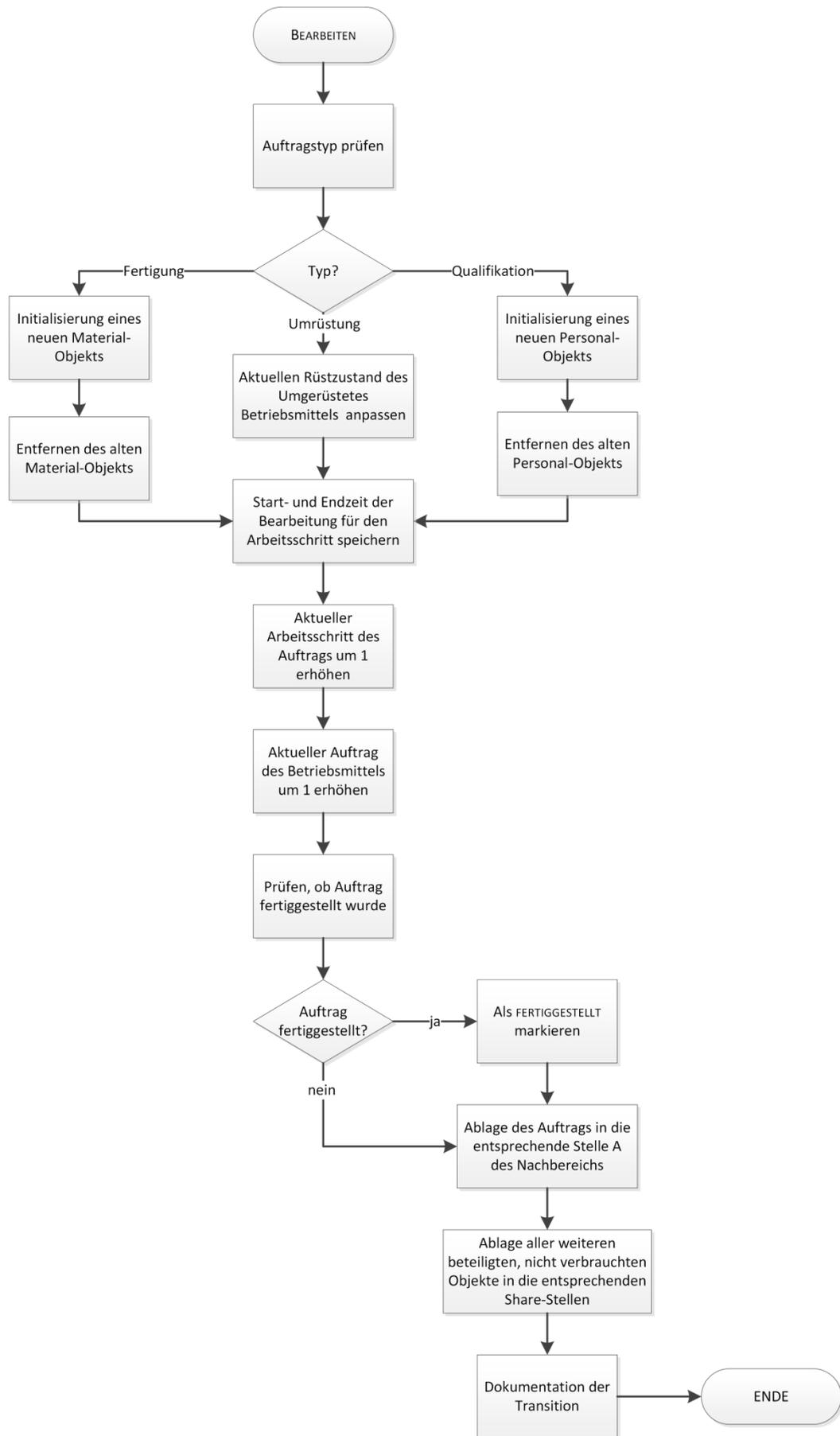


Abbildung 13: Programmablaufplan der Aktivität *Bearbeiten*

Zunächst wird geprüft, ob der Auftrag fertiggestellt wurde. Falls ja, so wird die Transition dokumentiert und der Auftrag für den weiteren Verlauf der Simulation nicht weiter berücksichtigt. Ist eine weitere Bearbeitung des Auftrags notwendig, so wird der Arbeitsbereich ermittelt, in dem die Bearbeitung des nächsten Arbeitsschrittes durchgeführt wird und im Auftrag hinterlegt. Ferner wird der Auftrag in der Stelle A des Nachbereichs abgelegt. Abschließend wird die Transition dokumentiert (Log).

Die Schaltdauer und die Verzögerungszeit der Transition betragen jeweils 0.

Ausgegeben wird der eingegangene Auftrag A_x .

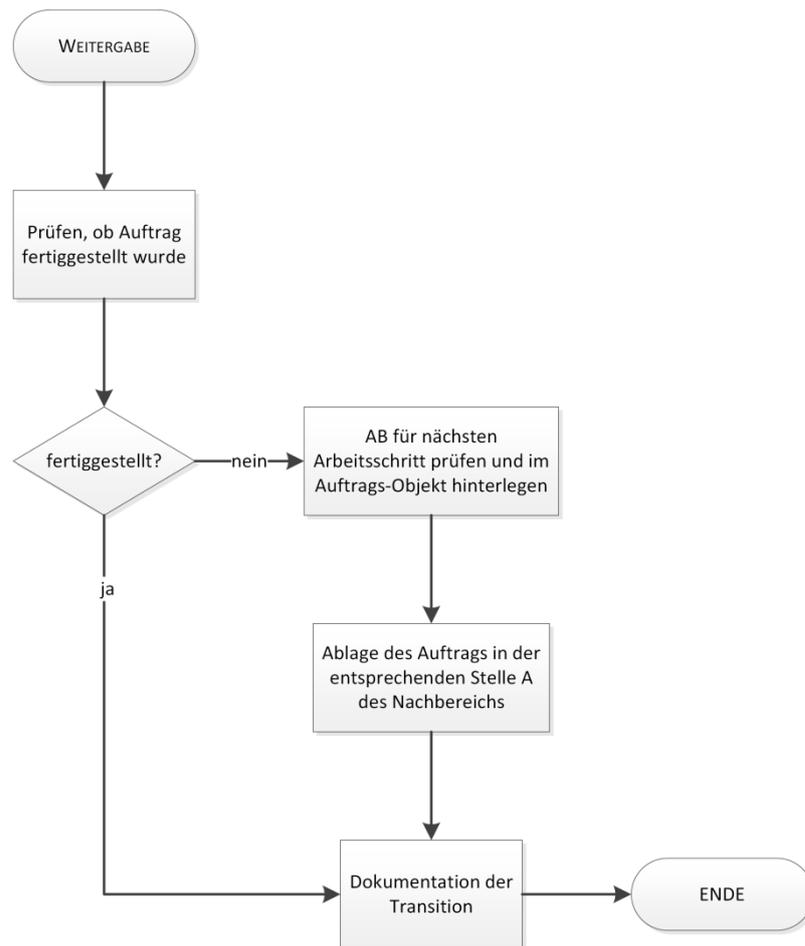


Abbildung 14: Programmablaufplan des Ereignisses *Weitergabe*

3 Überarbeitung des Modells

In diesem Kapitel wird das Modell aus Kapitel 2 bewertet, sowie etwaige Verbesserungen und Änderungen vorgeschlagen. Das Ergebnis des Kapitels ist ein überarbeitetes Modell (vgl. Abbildung 16).

3.1 Aufbaustruktur des Modells

Eine graphische Abbildung von Arbeitsbereichen ist nicht notwendig, da alle benötigten Informationen einer Anlage, insbesondere auch deren Zugehörigkeit zu einem Arbeitsbereich, bei Bedarf im jeweiligen Betriebsmittel-Objekt hinterlegt werden können. Folglich ist es nicht erforderlich, für jeden Arbeitsbereich oder jedes Betriebsmittel ein Unternetz zu erstellen. Die Zuordnung eines Auftrags zu einem Betriebsmittel, sowie eine Limitierung der Verfügbarkeit einer Anlage, auf Grund eines laufenden Bearbeitungsvorgangs, erfolgt direkt durch das Betriebsmittel-Objekt bzw. durch die Transition *Bearbeiten*. Somit lässt sich keine direkte oder indirekte Auswirkung, durch die Strukturierung von Arbeitsbereichen, auf die Simulation feststellen, so dass im weiteren Verlauf auf eine graphische Darstellung der Arbeitsbereiche verzichtet wird.

Durch den Wegfall der Arbeitsbereiche ergibt sich ein neues Hauptnetz. Im Gegensatz zu dem Modell aus Kapitel 2 repräsentiert das neue Hauptnetz einen wiederkehrenden Fertigungsprozess und keine Verkettung physischer Objekte oder einer Menge solcher Objekte. Physische Objekte werden ausschließlich als Modellelemente im System repräsentiert (bspw. ein Objekt *Betriebsmittel*). Dies hat zur Folge, dass die Transition *Weitergabe* (vgl. Abschnitt 2.4.8 - Transport von Aufträgen zwischen Arbeitsbereichen) nicht weiter benötigt wird, da der Bearbeitungsprozess eines Auftrags innerhalb desselben (Haupt-)Netzes durchgeführt wird.

Die Transition *Reservieren* (vgl. Abschnitt 2.4.6) ist nicht erforderlich, da als Stellgröße die Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln, sowie die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge auf einem Betriebsmittel gegeben vorausgesetzt wird (Optimierung). Ebenfalls ist eine Weitergabe der beteiligten Objekte aus den Share-Stellen in den Vorbereich der Transition *Bearbeiten* nicht erforderlich. Somit bringt die Transition *Reservieren* keinen weiteren Mehrertrag für das Simulationsmodell und wird nicht weiter betrachtet.

Dem Betriebsmittel-Objekt wird ein Status hinzugefügt, der das entsprechende Objekt als Dummy-Betriebsmittel kennzeichnen kann. Dummy-Betriebsmittel sind Anlagen, die im Zuge der vorangehenden Optimierung bereits berücksichtigt wurden, aber während der Simulation noch zu beschaffen sind. Diese Objekte werden grundsätzlich so behandelt wie „normale“ Betriebsmittel, mit der Ausnahme, dass Dummy-Betriebsmittel nicht für die Aktivität *Bearbeiten* verwendet werden dürfen. (Dummy-

)Betriebsmittel besitzen eine Bearbeitungsreihenfolge, die angibt, in welcher Reihenfolge zugewiesene Aufträge an der Anlage bearbeitet werde. Über einen Bearbeitungs-Index lässt sich für ein Betriebsmittel prüfen, welcher Auftrag aktuell zu bearbeiten ist. In den Auftrags-Objekte ist ebenfalls die Zuordnung von Arbeitsschritt zu Betriebsmittel hinterlegt, so dass über einen Index der aktuell durchzuführende Arbeitsschritt, sowie das zur Durchführung benötigte Betriebsmittel zu bestimmen ist.

3.2 Stellgrößen

Zu den Stellgrößen aus Unterkapitel 2.3 kommen folgende Punkte hinzu, die durch den Optimierungsprozess bestimmt werden:

- Zuordnung der Arbeitsschritte eines Auftrags zu den Betriebsmitteln (Schedule)
- Permutation der Bearbeitungsreihenfolge auf den Anlagen (Sequenz)
- Etwaige Umrüstvorgänge zwischen der Bearbeitung zweier Arbeitsschritte in Form von Umrüstaufträgen A_{ij}

Durch eine Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln vor Beginn der Simulation steht zum einen der Beschaffungsbedarf bereits zum Zeitpunkt 0 des Simulationslaufs fest, so dass die Bereitstellung neuer Ressourcen schnellstmöglich erfolgen kann. Zum anderen ist die Abfolge der Arbeitsschritte auf einem Betriebsmittel bekannt, so dass beispielsweise ein Umrüstvorgang durchgeführt werden kann, obgleich Ressourcen für den folgenden Fertigungs-/Qualifizierungsauftrag noch nicht zur Verfügung stehen. Ein Warten auf eine entsprechende Freigabe der benötigten Ressourcen oder ein gleichzeitiges Blockieren aller Ressourcen zur Durchführung eines Umrüstvorgangs mit einem anschließenden Fertigungs- oder Qualifizierungsschritts ist nicht erforderlich. Daraus ergibt sich ein effizienteres Ressourcenmanagement und somit potentiell bessere Ablaufpläne im Sinne der Aufgabenstellung.

3.3 Ablaufstruktur des Modells

Das Hauptnetz des überarbeiteten Modells besteht aus dem Ereignis *Prüfen* und den Aktivitäten *Bearbeiten*, *Beschaffung Material*, *Beschaffung Betriebsmittel* und *Beschaffung Personal*. Änderungen im Ablauf der genannten Transitionen werden in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet.

3.3.1 Initialisierung

Zu der Initialisierung aus Abschnitt 2.4.1 werden bei der Initialisierung des überarbeiteten Modells Informationen über die Zuordnung von Aufträgen zu

Betriebsmitteln (Scheduling), sowie eine Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge auf einer Anlage (Sequenz) in den jeweiligen Betriebsmittel-Objekten hinterlegt. Ferner werden zu beschaffende Betriebsmittel als Dummy-Betriebsmittel initialisiert. Etwaige Umrüstvorgänge zwischen der Bearbeitung zweier Arbeitsschritte auf einer Anlage werden in Form von Umrüstaufträgen im Modell hinterlegt. Beschaffungsaufträge werden in die entsprechenden Stellen A_M (Material) A_{BM} (Betriebsmittel) und A_P (Personal) abgelegt.

3.3.2 Prüfen

Das Ereignis *Prüfen* erfolgt wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, mit dem Zusatz, dass ein Umrüstauftrag wie ein Fertigungsauftrag behandelt wird. Außerdem wird auf das Erstellen neuer Beschaffungsaufträgen für Material, Personal oder Betriebsmittel während des Simulationslaufs verzichtet, da dies ansonsten mit diversen Problemen verbunden wäre, auf die im weiteren Verlauf eingegangen wird.

Eine dynamische Beschaffung eines Betriebsmittels zur Laufzeit hätte zur Folge, dass eine Neuverteilung aller durch die neu beschaffte Anlage potentiell bearbeitbaren Arbeitsschritte durchgeführt werden müsste. In Folge dessen wäre zum einen eine neue Zuordnung von Arbeitsschritten zu Betriebsmitteln durchzuführen (Schedule) und zum anderen eine erneute Bestimmung der Bearbeitungsreihenfolge auf allen betroffenen Anlagen (Sequenz). Diese Änderungen müssten sowohl in den betroffenen Auftrags-Objekten, als auch in den beteiligten Betriebsmitteln hinterlegt werden. Ferner wäre es notwendig, durch die Umverteilung der Arbeitsschritte überflüssig gewordene Umrüstaufträge zu entfernen, sowie neue Umrüstaufträge auf Grund der Änderung zu erstellen. Die Ausmaße dieser Änderungen können, je nach zugrundeliegendem Produktionssystem, schnell mehrere tausend Objekte beeinflussen. Dies hätte einen signifikanten Einfluss auf die Performanz der Simulation.

Werden Beschaffungsaufträge auf Basis von Objekten des Vorbereichs erstellt, beispielsweise indem geprüft wird, ob gewisse Objekte zur Durchführung des aktuellen Auftrags fehlen, sind diverse Punkte zu bedenken. Zum einen müssten alle Objekte des Vorbereichs der Transition zugeführt und während der Schaltaktion geprüft werden. Zusätzlich würde die Beschaffung neuer Ressourcen immer auf Basis einer lokalen Informationslage durchgeführt werden, d.h. Objekte die sich zum jeweiligen Zeitpunkt in andere Stellen des Modells befinden, also nicht im Vorbereich der Transition liegen, werden nicht betrachtet.

Ferner ist jede Beschaffung von neuen Ressourcen (Material, Betriebsmittel oder Personal) während der Simulation mit Zeitkosten verbunden. Dies hat zur Folge, dass zwischen der Ermittlung eines Ressourcenbedarfs und der tatsächlichen Freigabe der Ressource eine Dauer $t_{beschaffung}$ liegt, während der sich der Systemzustand ständig verändert. In Folge dessen könnte bspw. ein Beschaffungsauftrag schon nach kurzer Zeit wieder obsolet werden, oder die Beschaffung einer ähnlichen Ressource sich im Nachhinein als besser herausstellen.

Es bietet sich entsprechend an, notwendige Neubeschaffungen von Ressourcen, insbesondere von Betriebsmitteln, im Zuge der vorangehenden Optimierung zu bestimmen. Dies hat zur Folge, dass Informationen des zugrundeliegenden Systems über den kompletten Simulationslaufs vorangegangener Simulationen in die Entscheidungsfindung mit einfließen können, so dass eine fundierte Entscheidung bzgl. der Beschaffung einer Ressource getroffen werden kann. Die Beschaffung von Ressourcen kann anschließend in Form von Beschaffungsaufträgen dem Modell im Zuge der Initialisierung zugeführt werden (vgl. Abschnitt 3.3.1). Ferner kann dem Beschaffungsauftrag ein frühestmöglicher Startzeitpunkt t zugewiesen werden, um die Beschaffung zum passenden Zeitpunkt durchzuführen.

3.3.3 Beschaffung Material und Personal

Eine Zuordnung von Material und/oder Personal zu einem Arbeitsschritt wird dynamisch durch die Aktivität *Bearbeiten* (vgl. Abschnitt 3.3.5) durchgeführt. Somit werden keine für die Durchführung von Arbeitsschritten benötigten Informationen, zum Zeitpunkt der Beschaffung, in den jeweiligen Objekten hinterlegt. Entsprechend werden die Aktivität *Beschaffung Material* (vgl. Abschnitt 2.4.3) und die Aktivität *Beschaffung Personal* (vgl. Abschnitt 2.4.5) unverändert durchgeführt.

3.3.4 Beschaffung Betriebsmittel

Die Beschaffung eines Betriebsmittels wird im Wesentlichen entsprechend dem Ablauf aus Abschnitt 2.4.4 durchgeführt. Die Eingabe wird um ein Dummy-Betriebsmittel-Objekt erweitert. Die Schaltbedingung der Transition wird so angepasst, dass zum Aktivieren der Transition ein entsprechendes Dummy-Betriebsmittel-Objekt im Vorbereich der Transition liegen muss. Ferner wird kein neues Betriebsmittel-Objekt erstellt, sondern das Dummy-Betriebsmittel-Objekt verwendet. Dazu wird der *Dummy-Status* der Anlage auf *false* gesetzt, wodurch das Betriebsmittel-Objekt für die

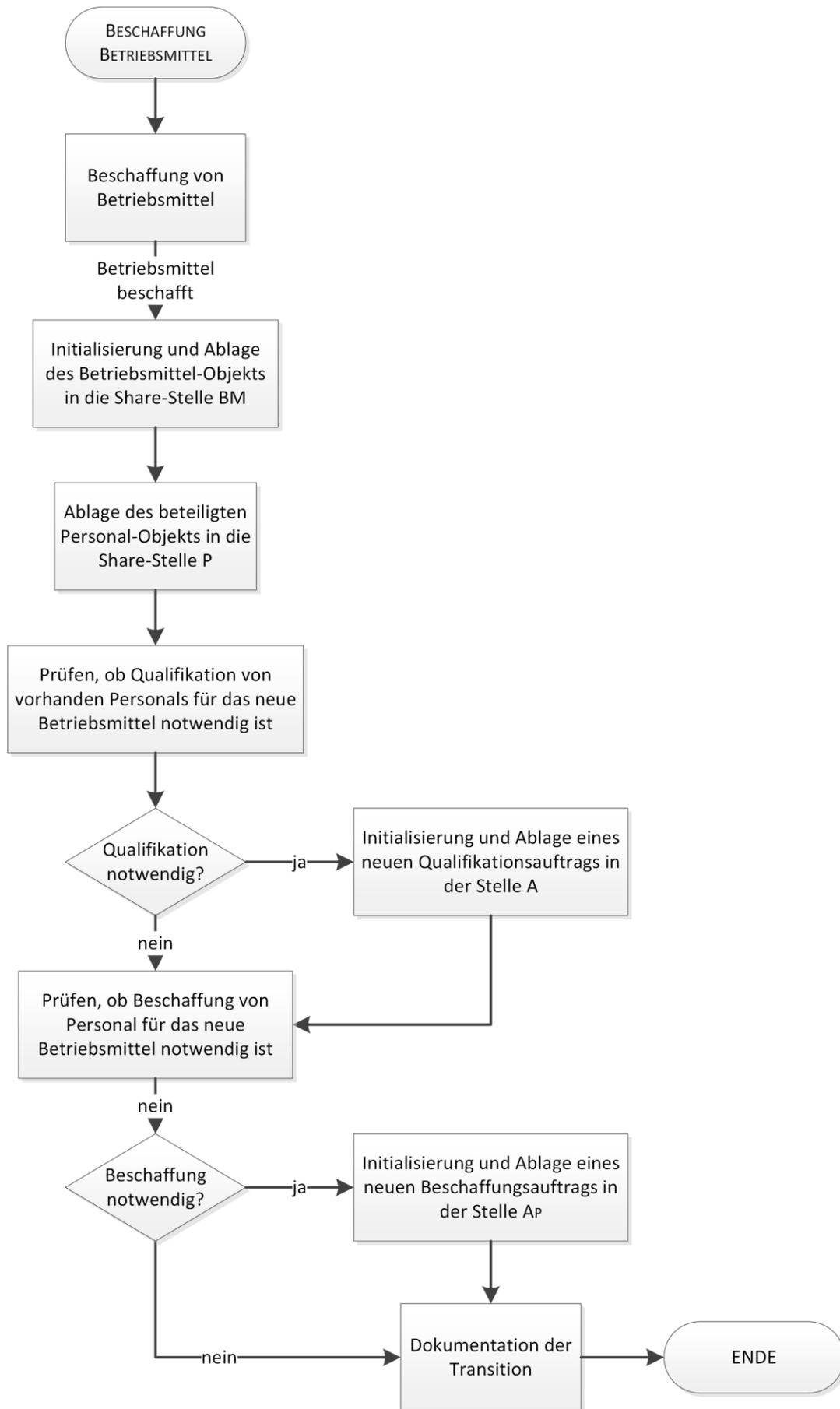


Abbildung 15: Überarbeiter Programmablaufplan der Aktivität *Beschaffung Betriebsmittel*

Durchführung von Arbeitsschritt zugelassen wird. Ein angepasster Ablaufplan der Aktivität *Beschaffung Betriebsmittel* ist in Abbildung 15 dargestellt.

3.3.5 Bearbeiten

Die Aktivität *Bearbeiten* wird grundsätzlich wie in Abschnitt 2.4.7 beschrieben durchgeführt, da in beiden Modellen zu diesem Zeitpunkt sowohl die Zuordnung von Auftrag zu Betriebsmittel, sowie alle benötigten Ressourcen zur Durchführung des aktuellen Arbeitsschritts zur Verfügung stehen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass fertiggestellte Aufträge in die Stelle S und alle anderen Aufträge in die Stelle Q des Nachbereichs abgelegt werden

3.4 Fazit

Auf Basis des Modells aus Kapitel 2 und den aufgezeigten Änderungen aus Kapitel 3 ergibt sich daraus ein neues Modell, das in Abbildung 16 dargestellt wird. Im Wesentlichen sind die graphischen Änderungen auf den Wegfall einer Darstellung von Arbeitsbereichen, sowie den überflüssig gewordenen Transitionen *Reservieren* und *Weitergabe* Zurückzuführen. Daraus ergibt sich, dass das Modell wesentlich kompakter und zugänglicher wird.

Auf funktionaler Ebene wurde die Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln in die Phase der Optimierung verschoben, in der Entscheidungen auf Basis vorangegangener Simulationsläufe getroffen werden können. Ebenso wird die Bestimmung zusätzlicher Ressourcen durch die Optimierung durchgeführt und dem Modell, in Form von Beschaffungsaufträgen, zugeführt. Auf das Erstellen von Beschaffungsaufträgen zur Laufzeit wurde verzichtet, da die zu wesentlichen Problemen führen kann. Dies hat zur Folge, dass Beschaffungen notwendiger Ressourcen zum passenden Zeitpunkt initiiert werden können, so dass sie *just in time* zur Verfügung stehen und nicht erst bei Bedarf eine Beschaffung initiiert wird. Ferner werden Ressourcen effektiver eingesetzt, da nur die Objekte „geblockt“ werden, die tatsächlich für den jeweiligen Arbeitsschritt erforderlich sind.

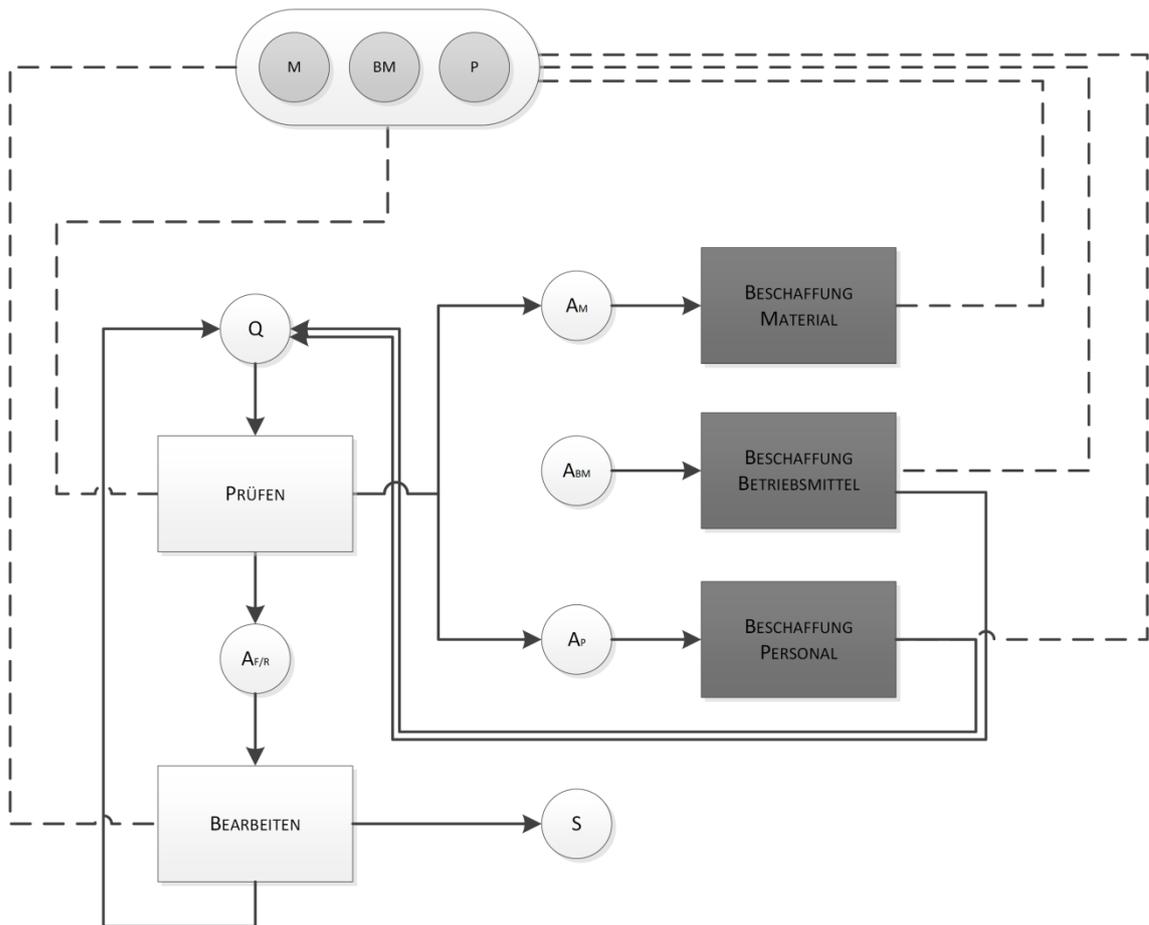


Abbildung 16: Hauptnetz des überarbeiteten Modells

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein simulierbares Modell eines wandlungsfähigen Produktionssystems, basierend auf THOR-Netzen, vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass die Abbildung komplexer Produktionssysteme mit dem vorgestellten Modell möglich ist. Betrachtet wurden sowohl Fertigungsaufträge, samt etwaiger Umrüstungen, sowie Beschaffungen zusätzlicher Ressourcen, bspw. Material, Personal oder Betriebsmittel. Ferner wurden verschiedene Möglichkeiten betrachtet, bei denen eine Beschaffung der Ressourcen dynamisch während der Simulationslaufzeit oder durch eine vorhergehende Optimierung durchgeführt wird. Ebenfalls wurden eine dynamische Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln, sowie eine dynamisch Bestimmung der Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen auf einer Anlage zur Simulationszeit betrachtet und mit einer Bestimmung während der vorhergehenden Optimierung verglichen.

Durch eine Simulation des Modells wird die Bearbeitung der Aufträge in einen zeitlichen Kontext gebracht, der eine Analyse und Bewertung, im Hinblick auf unterschiedliche Zielkriterien ermöglicht. Die so ermittelten Ablaufpläne können anschließend dem Anwender zur Verfügung gestellt werden und eine konkrete Entscheidungsunterstützung für die operative Produktionsplanung und -steuerung darstellen. Anhand der Eignung der ermittelten Ablaufpläne lassen sich Rückschlüsse auf das reale Produktionssystem ziehen und gegebenenfalls Anpassungen durchführen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht beispielsweise in der Identifizierung und Realisierung weiterer Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Objekten. So ist es denkbar, mögliche Transportkosten, sowie Lagekapazitäten zu berücksichtigen. Zudem können Ereignisse zu vordefinierten Zeiten an einzelnen Maschinen eintreten, wie beispielsweise Wartungsaufträge, Experimente oder Fertigungsversuche, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Dies könnte beispielsweise durch eine Anpassung der Prioritätsfunktion der Aktivität *Bearbeiten* erfolgen.

5 Literatur

- 1 *Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg.* Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008
- 2 *Wiendahl H.* Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 2 Tabellen. 7. Aufl. München: Hanser; 2010
- 3 *Fronia P.* Logistische Gesichtspunkte der Wandlungsfähigkeit. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008: 70 – 74
- 4 *Kompa S, Schmidt C, Hering N, Brandenburg U, Christoph Meier.* WInD - Einleitung. In: Schuh G, Altgott M, Hrsg. WInD - Wandlungsfähige Produktionssysteme durch integrierte IT-Strukturen und dezentrale Produktionsplanung und -regelung. Aachen: FIR e.V. an der RWTH Aachen; 2013: 9 – 20
- 5 *Heinen T, Rimpau C, Wörn A.* Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008: 19 – 32
- 6 *Nyhuis P, Fronia P, Pachow-Frauenhofer J et al.* Wandlungsfähige Produktionssysteme. Ergebnisse der BMBF-Vorstudie "Wandlungsfähige Produktionssysteme". wt Werkstattstechnik online 2009; 99: 205 – 210
- 7 *Schenk M, Wirth S, Müller E.* Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014
- 8 *Wenzel S, Bockel B, Deist F.* Die Integration der Produktions- und Logistiksimulation in die Digitale Fabrik - Herausforderungen und Entwicklungstrends. In: Schenk M, Hrsg. Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2009: 317 – 339

- 9 *Gerst D.* Organisatorische und personelle Gesichtspunkte der Wandlungsfähigkeit. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008: 53 – 70
- 10 *Wenzel S, Abel D, Bockel B.* Die Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für den digitalen Logistikplanungsprozess. In: Nyhuis P, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2010: 157 – 174
- 11 *Luczak H, Eversheim W, Schotten M, Hrsg.* Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. Aufl. Berlin: Springer; 1999
- 12 *März L, Krug W, Rose O, Weigert G.* Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2011
- 13 *Gudehus T, Kotzab H.* Comprehensive logistics. 2. Aufl. Berlin: Springer; 2012
- 14 *Verein Deutscher Ingenieure.* Simulation von Logistik-, Materialfluss und Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen. 03. Aufl. (Dezember 2010); Dezember 2010
- 15 *Verein Deutscher Ingenieure.* Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. 01. Aufl. (Dezember 2013); Dezember 2013
- 16 *Kastens U, Kleine Büning H.* Modellierung. Grundlagen und formale Methoden ; [für Bachelor geeignet]. 2. Aufl. München: Hanser; 2008
- 17 *Thommen J, Horn GA.* Modell. Im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/495/modell-v11.html>; Stand: 07.01.2014
- 18 *Rabe M.* Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. Erlangen: SCS European Publ. House; 2001
- 19 *Wieting R, Schöf S, Sonnenschein M.* Abschlußbericht des Projekts DNS (Distributed Net Simulation). Oldenburg; Juni 1997
- 20 *Wieting R.* Handbuch zur THORN Entwicklungsumgebung. Oldenburg: OFFIS (Dezember 1995); Dezember 1995
- 21 *Fleischhack H.* Generische Definition (hierarchischer) (zeitbeschrifteter) (höherer) Petrinetze: AIS, FB Informatik, Univ; 1993