

Fachgebiet
IT in Produktion und Logistik
Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Technische Universität Dortmund

BACHELORARBEIT

Konzeptentwicklung für veränderliche Modelle zur Abbildung von Produktionssystemen bei dynamischer Auftragslage

bearbeitet von: Johanna Christine Kopp

Studiengang: Maschinenbau

Matrikel-Nr.: 126827

Ausgegeben am: 21.06.2013

Eingereicht am: 13.09.2013

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Betreuer: Dipl.-Geoinf. Maik Deininger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Planung von Produktionssystemen.....	3
2.1.1 Grundlagen und Vorgehensweise.....	3
2.1.2 Eingrenzung des Planungsfalls.....	5
2.1.3 Bedarfs- und Kapazitätsplanung.....	7
2.2 Wandlungsfähigkeit	9
2.2.1 Ausgangslage und Definition	9
2.2.2 Abgrenzung der Wandlungsfähigkeit.....	11
2.2.3 Anforderungen an wandlungsfähige Systeme	13
2.2.4 Modellierung der Wandlungsfähigkeit.....	16
2.3 Modellierung	19
2.3.1 Allgemeines und Anforderungen	19
2.3.2 Einteilung der Modellierungstechniken	21
2.3.3 Objektorientierte Modellierungsmethoden.....	22
3 Auswahl einer Modellierungstechnik	24
3.1 Anforderung an die Modellierungstechnik	24
3.2 Vorauswahl passender Modellierungstechniken	26
3.2.1 Vergleich von Modellierungstechniken	26
3.2.2 Unified Modeling Language.....	28
3.2.3 Integrierte Unternehmensmodellierung.....	30
3.2.4 Petrinetze	31
3.2.5 Technik- und layoutorientierte Bausteine	33
3.3 Auswahl einer Modellierungstechnik.....	35
4 Entwicklung des Modells	37
4.1 Systemabgrenzung	37
4.1.1 Ausgangslage.....	37
4.1.2 Eingrenzung des Betrachtungsraums	37
4.1.3 Problemstellung des Modells	38

4.2	Betrachtete Komponenten der Fabrik	39
4.2.1	Aufbau des Modells.....	39
4.2.2	Material.....	39
4.2.3	Personal	40
4.2.4	Betriebsmittel	40
4.2.5	Fabrikmodule.....	41
5	Elemente des Modells	43
5.1	Einleitung	43
5.2	Marken	44
5.2.1	Generelles zu den Marken im Modell	44
5.2.2	Objektklasse Material	45
5.2.3	Objektklasse Personal.....	45
5.2.4	Objektklasse Betriebsmittel	47
5.2.5	Objektklasse Fabrikmodul.....	49
5.3	Stellen.....	51
5.4	Transitionen.....	52
5.5	Kanten	53
6	Umsetzung des Modells	54
6.1	Aufbau des Modells	54
6.2	Hauptnetz des Modells	55
6.2.1	Allgemeines Vorgehen	55
6.2.2	Schaltvorgänge der Transition Rüsten.....	57
6.2.3	Schaltvorgänge der Transition Produktion.....	58
6.2.4	Schaltvorgänge der Transition Fertigstellung	60
6.3	Teilnetze des Modells.....	61
6.3.1	Einleitung zu den Teilnetzen	61
6.3.2	Teilnetz Material	62
6.3.3	Teilnetz Personal	64
6.3.4	Teilnetz Betriebsmittel	66
6.4	Verknüpfung der einzelnen Netze.....	68
7	Zusammenfassung	69
8	Literaturverzeichnis	71
9	Anhang.....	76
	THORNs - Timed Hierarchical Object-Related Nets	76

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	Beziehungsweise
DNS	Distributed Nets Simulation
et al.	et alii (lat. „und andere“)
GAM	Generisches Aktivitätsmodell
IUM	Integrierte Unternehmensmodellierung
THORNs	Timed Hierarchical Object-Related Nets
u.a.	und andere
UML	Unified Modeling Language
VDE	VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
vs.	versus

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Planungsphasen nach (Berkholz 2008, S. 71)	4
Abbildung 2-2 Planungsfall nach (Beller 2010, S. 84).....	6
Abbildung 2-3 Flexibilität vs. Wandlungsfähigkeit nach (Nyhuis et al. 2009, S. 207)..	11
Abbildung 2-4 Veränderungstypen nach (Wiendahl 2002, S. 126).....	12
Abbildung 2-5 Wandlungsbefähiger nach (Hernández Morales 2003, S. 54).....	14
Abbildung 2-6 Wandlungsprofil nach (Denkena und Drabow 2005, S. 89)	15
Abbildung 2-7 Fabrikmodul nach (Nofen et al. 2005b, S. 21)	16
Abbildung 2-8 Regelkreis nach (Cisek et al. 2002, S. 442).....	17
Abbildung 2-9 Prozessorientiertes Vorgehensmodell nach (Kuhn et al. 2010, S. 217) .	18
Abbildung 2-10 Klasse und Objekte mit Attributen (Rumbaugh et al. 1994, S. 29).....	22
Abbildung 3-1 Aktivitätsdiagramme nach (Rupp und Queins 2012, S. 266 f.)	29
Abbildung 3-2 Generisches Aktivitätsmodell nach (Süssenguth 1992, S. 77).....	30
Abbildung 3-3 Schaltverhalten einer Transition nach (Gadatsch 2012, S. 23)	31
Abbildung 3-4 Einfache Grundnetze nach (Partsch 2010, S. 146).....	32
Abbildung 5-1 Stellentypen	51
Abbildung 5-2 Darstellung einer Transition	52
Abbildung 6-1 Ausschnitt aus dem Hauptnetz	55
Abbildung 6-2 Hauptnetz.....	56
Abbildung 6-3 Ausschnitt der Transition Rüsten mit zugehörigen Stellen	57
Abbildung 6-4 Ausschnitt der Transition Produktion mit zugehörigen Stellen	59
Abbildung 6-5 Ausschnitt der Transition Fertigstellung mit zugehörigen Stellen	60
Abbildung 6-6 Hauptnetz mit Schnittstellen	61
Abbildung 6-7 Teilnetz Material	62
Abbildung 6-8 Teilnetz Personal	64
Abbildung 6-9 Teilnetz Betriebsmittel	66
Abbildung 9-1 Kantentypen in THORNs nach (Schöf 1997, S. 48)	78
Abbildung 9-2 Beispiel eines THORNs nach (Schöf 1997, S. 51).....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Anforderungen an die Modellierungstechnik	25
Tabelle 3-2 Beschreibungsmittel und ihre Eigenschaften nach (VDI-Richtlinie 4465). 26	
Tabelle 3-3 Ausgewählte Modellierungstechniken mit detaillierten Eigenschaften nach (VDI-Richtlinie 4465).....	27
Tabelle 3-4 Diagrammtypen der UML 2 nach (Rupp und Queins 2012, S. 7).....	28
Tabelle 3-5 Merkmale von Petrinetz-Varianten nach (Gadatsch 2012, S. 75).....	33
Tabelle 5-1 Attribute der Objektklasse Material	45
Tabelle 5-2 Attribute der Objektklasse Personal	46
Tabelle 5-3 Attribute der Objektklasse Betriebsmittel	48
Tabelle 5-4 Attribute der Objektklasse Fabrikmodul	50

1 Einleitung

Eine Fabrik ist kein statisches System, das einmal geplant werden kann und dann ohne Veränderungen fortwährend funktioniert. Stattdessen führen kurze Produktlebenszyklen oder schwankende Absätze dazu, dass sich das Produktionssystem ständig wandeln muss. Diese Veränderungen im Unternehmensumfeld sind nicht immer prognostizierbar, sodass eine Produktion benötigt wird, die sich auch an nicht vorhersehbare Bedingungen schnell anpassen kann.

Kann ein Unternehmen diese ständige Entwicklung leisten, so wird es als wandlungsfähig bezeichnet. Ist eine solche Wandlungsfähigkeit erreicht, bedeutet dies dennoch nicht, dass jeder Auftrag angenommen werden kann. Durch die individuellen Randbedingungen, die durch den jeweiligen Auftrag entstehen, kann nur für jeden Einzelfall geprüft werden, ob dieser erfüllbar ist. Dazu muss untersucht werden, ob die bestehende Fabrik so umgebaut werden kann, dass der Auftrag erfüllt werden kann, oder ob es Veränderungen an ihr bedarf.

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptentwicklung eines veränderlichen Modells, das in der Lage ist, ein Produktionssystem bei dynamischer Auftragslage abzubilden. Das Modell soll dazu beitragen, fundiert entscheiden zu können, ob die Fabrik den Anforderungen, die durch neue Aufträge entstehen, gerecht werden kann. Dazu soll die Einbindung des Auftrags in die bestehende Fabrik, mit den dafür benötigten Veränderungen, dargestellt werden können.

Zu Beginn der Arbeit werden im zweiten Kapitel der Stand der Technik für die Themen Planung von Produktionssystemen, Wandlungsfähigkeit und Modellierung dargestellt, um die für die Entwicklung des Modells notwendigen Kenntnisse zu erlangen und die Anforderungen an das Modell zu erarbeiten. Im ersten Schritt werden hierfür die nötigen Aspekte der Planung von Produktionssystemen aufgearbeitet. Dazu gehören, neben der generellen Vorgehensweise bei der Planung, die für den späteren Konzeptentwurf relevanten Grundlagen der Kapazitäts- und Bedarfsabschätzung. Darauf aufbauend werden die Grundlagen der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen dargestellt, um die Anforderungen, die eine Fabrik zum Wandel befähigen, abzubilden. Im Anschluss erfolgt die Vorstellung bereits bestehender Modelle zu wandlungsfähigen Produktionssystemen. Um die Basis für die Entwicklung des Modells zu schaffen, wird ein kurzer Überblick über die Modellierung, die Anforderungen an eine Modellierungstechnik und die unterschiedlichen Modellierungskonzepte gegeben.

Im dritten Kapitel, der Auswahl einer Modellierungstechnik, werden, aufbauend auf dem Stand der Technik und der Aufgabenstellung, Anforderungen für das entstehende Modell entwickelt. Mithilfe dieser Anforderungen werden passende Modellierungstechniken ausgewählt, vorgestellt und auf deren Eignung bewertet.

Als Resultat der Bewertung wird eine Modellierungstechnik bestimmt, mit der dann ein Modellierungskonzept entwickelt wird.

Das vierte Kapitel dient dazu, die wesentlichen Aspekte, die mit dem Modell abgedeckt werden sollen, aufzuarbeiten und abzugrenzen. Dazu erfolgen die Abbildung der Ausgangslage, die Formulierung der Problemstellung sowie die Abgrenzung des zu betrachteten Systems mit den einzelnen Komponenten.

Im fünften Kapitel erfolgt die Übertragung auf die ausgewählte Modellierungstechnik. Die Komponenten, die mit dem Modell betrachtet werden sollen, werden auf die Elemente der ausgewählten Modellierungstechnik übertragen und die verwendeten Elemente der Technik in Hinsicht auf das Modell erläutert.

Im sechsten Kapitel, der Umsetzung des Modells, erfolgt die Illustration des entwickelten Konzepts zur Darstellung der Wandlungsfähigkeit in Modellen von Produktionssystemen. Dazu wird die Modellierungstechnik mit den entwickelten Elementen an exemplarischen Abläufen angewandt und erläutert.

2 Stand der Technik

2.1 Planung von Produktionssystemen

2.1.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Die Produktion ist ein Wertschöpfungsprozess, bei dem die Wertschöpfung durch die Umwandlung von einfachen oder komplexen Inputgütern in wertgesteigerte Outputgüter erfolgt (Günther und Tempelmeier 2005, S. 2). Die Wertschöpfungskette aus Prozesssicht geht dabei nach Schenk und Wirth (Schenk und Wirth 2004, S. 14 ff.) vom Kunden über den Produktionsprozess zum Produktionssystem bis hin zum Fabrikssystem, wobei die Begriffe im Folgenden erläutert werden.

Ein Produktionsprozess bezeichnet alle Vorgänge zur Herstellung von Sach- und Dienstleistungen in Einheit von Personal, Technik und Organisation. Der Prozess umfasst Produktentwicklung, Beschaffung, Arbeitsplanung, Fertigung, Montage, Qualitätswesen und Service.

Das Produktionssystem dient der systemtechnischen Umsetzung des Produktionsprozesses. Dabei schließt es die Produktionsvorbereitung und die Fertigungssysteme (Teilefertigungs- und Montagesysteme) mit Organisation, Personal und der unternehmerischen Kultur ein. Zum Produktionssystem gehören aus organisatorischer Sicht auch Prinzipien und Instrumente zur Gestaltung der Geschäftsprozesse für die Produkterstellung, wie beispielsweise das Toyota Produktionsprinzip.

Das Fabrikssystem ist weitreichender als das Produktionssystem und umfasst zusätzlich noch das Gebäudesystem mit den bautechnischen Anlagen (Schenk und Wirth 2004, S. 14 ff.). In dieser Arbeit werden Fabrikssystem und Produktionssystem synonym verwendet, da die Abgrenzung für die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Betrachtungen nicht relevant ist.

Die Fabrikplanung ist laut VDI- Richtlinie (VDI-Richtlinie 5200, S. 3) definiert als:

„Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion.“

Die Planung kann verschiedene Anlässe haben und unterschiedliche Planungsfälle umfassen. Bei der Fabrikplanung werden neben den bautechnischen Aspekten wie der Standortbestimmung und der Gebäudewahl und -anordnung, auch die Produktionsprozesse (Fertigungs- und Montageprozesse), die Logistikprozesse (Transport und Lagerprozesse) und die erforderlichen Nebenprozesse (Betriebsmittelbau, Instandhaltung u.a.) gestaltet (Grundig 2013, S. 11).

Insgesamt gliedert sich die Fabrikplanung in die beiden Planungskategorien Neuplanung und Umplanung. Eine Neuplanung erfolgt seltener als eine Umplanung und hat einen größeren Planungsumfang, da nicht auf vorhandene Planungsgrößen zurückgegriffen werden kann. Die Komplexität der beiden Planungsfälle ist jedoch ungefähr gleich groß, da die Umstellung oder Auslegung von Produktionsanlagen meist größere Anforderungen an die Planer stellt als eine Neuplanung. Bei der Umplanung wird zwischen drei Fällen unterschieden. Ein Fall ist die Erweiterung, bei der beispielsweise Gebäude, Einrichtungen oder Anlagen hinzugefügt werden. Eine Umstellung der Fabrik, der zweite Fall, wird durch Rationalisierungsmaßnahmen oder Fertigungsumstellungen ausgeführt. Als letztes ist die Einschränkung der Fabrik zu nennen, sie bewirkt zum Beispiel Stilllegungen von Fabrikteilen oder die Auflösung und Demontage von Fabrikssystemen (REFA 1985, S. 149).

Zur Vorgehensweise bei der Planung von Produktionssystemen existiert eine Reihe von Modellen. Allerdings existiert keine allgemeingültige Planungssystematik, weswegen Bergholz für einen Vergleich eine Reihe von unterschiedlichen Phasenmodellen gegenübergestellt hat (Bergholz 2005, S. 68). Für diese Gegenüberstellung definierte er fünf generelle Phasen, die in **Abbildung 2-1** dargestellt sind. Anhand der in dieses Phasenschema eingeordneten Modelle ist erkennbar, dass die Phasen, abhängig von der jeweiligen Theorie, deutlich voneinander abweichen.



Abbildung 2-1 Planungsphasen nach (Bergholz 2008, S. 71)

Ähnlich zu diesen fünf Phasen sind die Planungsphasen von Grundig (Grundig 2013, S. 50 f.), weswegen sie hier skizziert werden. Die Phase Vorbereitung wird aufgeteilt in die Phasen Zielplanung, in der die generellen Ziel- und Aufgabenstellungen erarbeitet werden und die Vorplanung, in der die Planungsgrundlagen beispielsweise durch die Analyse der Ist- und Zielzustände erarbeitet werden. In der Phase Grobplanung wird einerseits eine Idealplanung durchgeführt, die die Funktionsbestimmung, Dimensionierung und Strukturierung der Fabrik beinhaltet und andererseits erfolgt eine Realplanung, d.h. die Anpassung der Idealplanung an das reale Umfeld. In der anschließenden Feinplanung erfolgen Ergänzungen und Detaillierungen, aufbauend auf der Grobplanung, um das Projekt zur Ausführung zu bringen. In der Phase Ausführungsplanung werden alle Maßnahmen, die zur Realisierung der Fabrik erforderlich sind, geplant und veranlasst. Die letzte Phase, die Ausführung, dient zur Führung und Überwachung des Realisierungsablaufs.

Insgesamt erfolgt die stufenweise Planung vom Groben zum Feinen und vom Idealen zum Realen. Anschließend an die ersten Konzepte in der Zielplanung wird in den fol-

genden Phasen immer detaillierter geplant. Die nachfolgenden Phasen können dabei bereits beginnen, wenn die vorherigen Phasen noch nicht abgeschlossen sind. Außerdem sind Rückgriffe in bereits abgeschlossene Planungsphasen möglich, falls Korrekturen am aktuellen Bearbeitungsstand vorgenommen werden sollen (Bracht et al. 2009, S. 28).

2.1.2 Eingrenzung des Planungsfalls

Zur Klassifizierung einer Fabrikplanungsaufgabe kann der Betrachtungsraum der Fabrikplanung eingegrenzt werden. Nach Schenk und Wirth (Schenk und Wirth 2004, S. 105 f) lässt sich solch ein Betrachtungsraum über die drei Aspekte Planungsphase, -objekt und -instrumentarien eingrenzen.

Mit dem ersten Aspekt werden die zu planenden Objekte und deren Eingliederung in die Unternehmensstruktur betrachtet. Die Planungsobjekte werden nach ihren Struktureinheiten, also nach fünf Ebenen der Fabrik (Arbeitsplatzstruktur-, Bereichsstruktur-, Gebäudestruktur-, General- und Standortstruktur- sowie Unternehmensnetzstrukturebene), charakterisiert. Der zweite Aspekt beschreibt die einzelnen Phasen, die im Lebenszyklus einer Fabrik durchlaufen werden. Die Phasen der Planung gehen von der Entwicklung der Fabrik über den Aufbau, den Anlauf, den Betrieb, bis hin zum Abbau. Den dritten Teil bilden die Instrumente, die in den unterschiedlichen Phasen und für die unterschiedlichen Planungsobjekte benötigt werden. Aus einer Vielzahl an Planungsinstrumenten werden diejenigen ausgewählt, die schnell und in geforderter Qualität zum Erfolg der Planung führen.

Aufbauend auf diesem Betrachtungsraum definiert Beller (Beller 2010, S. 22 f.) sein Modell zur Einordnung eines Planungsobjekts, welches in **Abbildung 2-2** dargestellt ist. Dabei werden ebenfalls drei Aspekte zur Beschreibung eines Planungsfalls benutzt, von denen die Aspekte Lebenszyklusphase und Planungsebene von Schenk und Wirth übernommen, jedoch deutlich verändert wurden. Als dritten Aspekt zur Beschreibung des Planungsfalls wird der Planungsanstoß anstelle der Planungsinstrumentarien betrachtet.

Die Planungsebenen werden auf die drei Ebenen, Standort-, System- und Netzebene reduziert, wobei eine Planungsaufgabe prinzipiell in jeder Ebene definiert werden kann. Die Systemebene ist die unterste Ebene und kann einzelne Montagearbeitsplätze genau wie Verkettungen mehrerer Betriebsmittel bezeichnen. Die Standortebene beschreibt die Summe der Systemebenen an einem Standort und die Netzwerkebene fasst mindestens die Planung von zwei dieser Standortebenen zusammen (Beller 2010, S. 83).

Die Phasen der Planung orientieren sich an den wichtigsten und häufigsten Fragestellungen in der Fabrikplanung und sind somit die Neuplanung, die Realisierungsplanung, die Betriebsanpassungsplanung, die Verlagerungsplanung und die Stilllegungsplanung. Da die Phasen den Lebenszyklus der Fabrik wiedergeben, müssen für jede Planungs-

phase die Daten und Dokumente der vorherigen Planungsphase vorliegen, sodass eine Durchgängigkeit der Planung gewährleistet wird (Beller 2010, S. 82).

Der Planungsanstoß gibt den Auslöser für die Planung an und kann durch drei Klassen beschrieben werden: Systemlastveränderung, Leistungsänderung und Kostendruck. Systemlastveränderung beschreibt die Anpassungen, die beispielsweise aus neuen Produkten, neue Mengen oder neuen Sortimenten generiert werden, wohingegen die Klasse Leistungsänderung beispielsweise Servicegrade aller Art, veränderte Durchlaufzeiten oder eine veränderte Termintreue zusammenfasst. Der Kostendruck kann durch Anpassungen der Produktivität, Bestand oder Kapazitätsauslastungen resultieren (Beller 2010, S. 83).

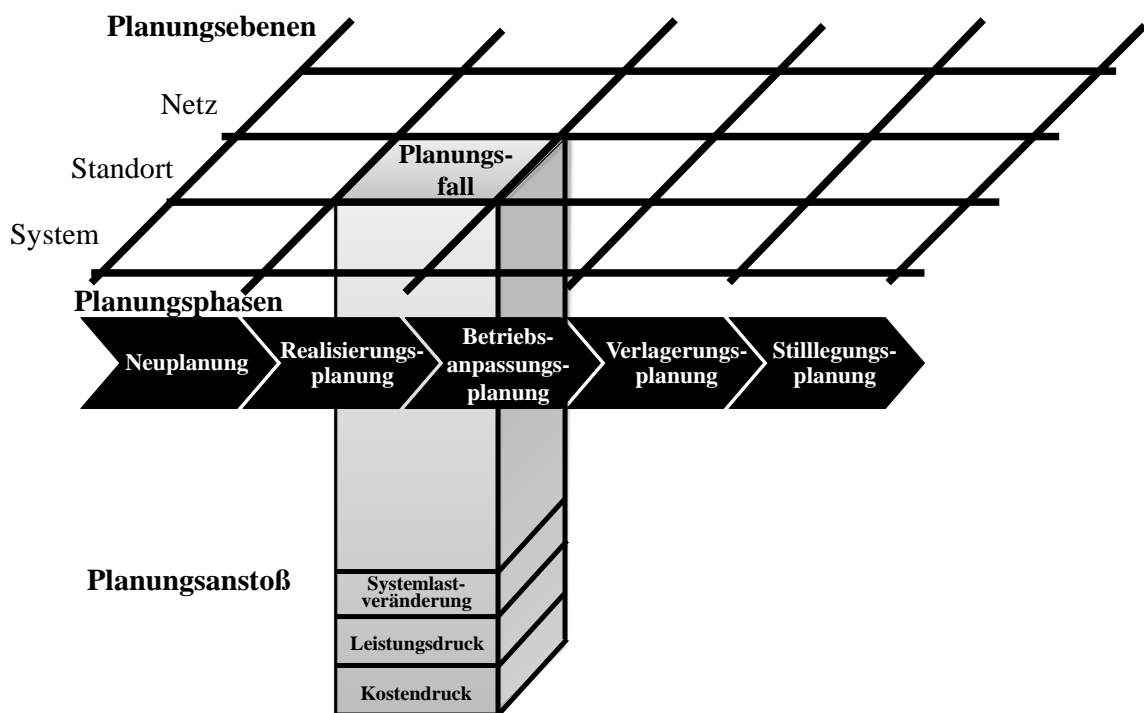


Abbildung 2-2 Planungsfall nach (Beller 2010, S. 84)

Mit Planungsebene, Planungsphase und Planungsanstoß wird ein Planungsfall beschrieben, er dient dazu, Planungsabläufe vergleichbar und selbstständig zu machen. Der Planungsfall muss für eine Planungsaufgabe eindeutig spezifiziert werden, dazu muss er genau benannt bzw. eingegrenzt werden.

2.1.3 Bedarfs- und Kapazitätsplanung

Die Bedarfsplanung und die Kapazitätsplanung unterscheiden sich durch den Zeitpunkt und das Vorwissen, das zur Planung der Ressourcen vorliegt.

In der Bedarfsplanung wird der benötigte Bedarf an Material oder Handelswaren für einen bestimmten Planungszeitraum ermittelt (Jung 2006, S. 367). Im Rahmen der Vorplanung werden Grobabschätzungen zu speziellen Bedarfsgrößen, zum Beispiel für Betriebsmittel-, Personal- und Flächenbedarfe, vorgenommen (Grundig 2013, S. 77).

Die Kapazitätsplanung hingegen befindet sich in der Phase der Grobplanung. Auf Grundlage des Produktionsprogrammes werden die Größenordnungen bzw. Bedarfe der Teilsysteme der Fabrik gebildet, die zu deren Realisierung erforderlich sind. Diese Teilsysteme sind Betriebsmittel, Personal, Flächen und Medien (Grundig 2013, S. 88). Nach Schuh und Roesgen (Schuh und Roesgen 2006, S. 43) gehören dazu alle Ressourcen, die in den betrieblichen Produktionsprozess einfließen, diese beinhalten neben den Betriebsmitteln und dem Personal unter anderem auch das Material.

Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte zur Planung der Betriebsmittel, des Personals, der Fläche und des Materials beschrieben.

Betriebsmittel bezeichnen technische Arbeitsmittel, darunter fallen Ausrüstungen, Anlagen, Vorrichtungen, Messmittel oder Werkzeuge. Sie werden qualitativ und quantitativ festgelegt, also das technologische Verfahren und die Menge der Betriebsmittel bestimmt. Dabei werden die Bedarfsgrößen, also die Soll-Werte, den Verfügbarkeitsgrößen (den Ist-Werten) gegenüber gestellt. Im Falle einer Umgestaltung einer bestehenden Fabrik stehen zur Anpassung der Betriebsmittel an die Veränderungen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, je nachdem wie groß der Zeitrahmen der Anpassung ist. Bei einer mittel- oder langfristigen Anpassung kann der Zukauf oder Verkauf von Betriebsmitteln eine Möglichkeit der Anpassung sein. Eine kurzfristige Lösung hingegen wäre eine Anpassung der Schichtmodelle (Grundig 2013, S. 89 ff.).

Bei der Dimensionierung des Personals wird zwischen dem qualitativen und dem quantitativen Personalbedarf unterschieden. Der qualitative Aspekt beschreibt die Art und Qualifikation der Mitarbeiter, dazu wird ein arbeitsplatzbezogenes Anforderungsprofil erstellt, welches dem Fähigkeitsprofil potentieller Mitarbeiter gegenübergestellt werden kann. Mit dem quantitativen Personalbedarf wird die Anzahl an Mitarbeitern und auch deren Einsatzdauer beschrieben. Zur Bestimmung der Mitarbeiterzahl dient der Brutto-Personalbedarf, welcher den Gesamtbedarf für das betrachtete System angibt. Der Netto-Personalbedarf berechnet sich aus der Differenz des Brutto-Personalbedarfs mit dem bereits vorhandenen Personalbestand zum Zeitpunkt der Anpassung. Dieser Personalbestand muss gegebenenfalls hochgerechnet werden, da Veränderungen durch beispielsweise Pensionierungen, Entlassungen oder Rückkehr von Mitarbeitern erfolgen können.

Insgesamt müssen bei den Personalbedarfsauslegungen gesetzgeberische und tarifvertragliche Festlegungen beachtet werden (Grundig 2013, S. 94 ff.).

Zur Bestimmung des Flächenbedarfs wird eine Flächengliederung zugrunde gelegt, die die Gesamtfläche in funktionsbezogene Teilflächen aufteilt (Grundig 2013, S. 100). Die Flächenbedarfsermittlung kann mithilfe einiger speziell entwickelter Methoden durchgeführt werden, deren Beschreibung an dieser Stelle jedoch zu umfangreich wäre.

Für die Planung des Materials muss zwischen den unterschiedlichen Materialbedarfsarten unterschieden werden. Eine Unterteilung nach Ursprung und Erzeugnisebene ergibt den Primär-, den Sekundär-, und den Tertiärbedarf. Der Primärbedarf ist der Bedarf an verkaufsfähigen Erzeugnissen, also der Marktbedarf, wohingegen der Sekundärbedarf den Bedarf an Rohstoffen, Teilen und Gruppen zur Fertigung des Primärbedarfs aufschlüsselt. Als drittes ist der Tertiärbedarf zu nennen, welcher die Nachfrage nach Hilfs- und Betriebsstoffen angibt. Neben dieser Unterteilung kann der Bedarf auch abhängig von der Berücksichtigung des Lagerbestandes angegeben werden. Der Bruttobedarf gibt den jeweiligen Bedarf in einer Periode an, wohingegen der Nettobedarf diesen abzüglich der bereits verfügbaren Lagerbestände angibt (Fortmann und Kallweit 2007, S. 72). Für den jeweiligen Bedarf wird die Beschaffungsart bestimmt, welche festlegt, ob das Material in Eigenfertigung produziert wird oder durch Fremdbezug beschafft wird. Dadurch, dass der Trend in den Unternehmen zu einer geringeren Fertigungstiefe geht, erhält die Fremdbezugsplanung und -steuerung eine immer größere Rolle (Schuh und Roessgen 2006, S. 56).

2.2 Wandlungsfähigkeit

2.2.1 Ausgangslage und Definition

Globalisierung, Dynamik und Turbulenz von Märkten, Produkten und Technologien führen zu veränderten Anforderungen an bestehende Fabrik- bzw. Produktionssysteme (Grundig 2013, S. 33). Die Planbarkeit nimmt ab durch rasche und unvorhersehbare Änderungen der Finanz-, Beschaffungs- und Absatzmärkte, durch Veränderungen der Nachfrage, Auftreten neuer Konkurrenten und Technologien, Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen, Forderungen und Interessen von Verbrauchern, gesellschaftlichen Gruppen und der Öffentlichkeit, aber auch gewandelten Einstellungen und Bedürfnissen der Mitarbeiter (Biedermann 2010, S. 23). Einerseits herrschen unternehmensexterne, andererseits auch unternehmensinterne Faktoren als Wandlungstreiber. Zu den externen Faktoren gehören unter anderem ein Wandel der Kundenstruktur und der Produkte oder auch Stückzahl- und Sortimentsverschiebungen, wohingegen interne Faktoren im Unternehmen beispielsweise Störungen oder Engpässe im Produktionsablauf sein können (Grundig 2013, S. 33).

Um trotz der wachsenden Turbulenz des Produktionsumfelds erfolgreich agieren zu können, wird eine immer schnellere, kontinuierliche Anpassung der Produktionsstrukturen gefordert (Cisek et al. 2002, S. 441). Diese Anforderungen führen zu dem Wunsch nach einem wandlungsfähigen Produktionssystem, das sich wie folgt beschreiben lässt:

Laut Westkämper (Westkämper 2009, S. 11) wird ein Unternehmen als wandlungsfähig bezeichnet, wenn veränderte Bedingungen und Situationen der Auftragslage mithilfe von Anpassungen der Strukturen der Organisation und der Ressourcen abgefangen werden können. Wandlungsfähige Produktionssysteme sollen nicht nur hochflexibel und kurzfristig auf diese Turbulenzen reagieren, sondern stattdessen eine systematische Strategie aufzeigen, die nachhaltig und langfristig Bedeutung hat (Berkholz 2008, S. 13). Wandlungsfähigkeit wird nach Nofen (Nofen et al. 2005a, S. 13) als Vermögen der Fabrik beschrieben, sich ausgehend von internen und externen Faktoren auf allen Ebenen mit geringem Aufwand an Veränderungen anpassen zu können.

Neben diesen Beschreibungen von Wandlungsfähigkeit existiert eine Reihe weiterer Interpretationen, jedoch existiert keine generelle Definition der Wandlungsfähigkeit, weswegen Heger (Heger 2006, S. 57 f.) aus den vielfältigen Beschreibungen folgende fünf allgemeingültige Aussagen, die die wesentlichen Aspekte der Wandlungsfähigkeit wiedergeben, zusammengefasst hat:

1. Wandlungsfähigkeit ist umfassender als Flexibilität und erlaubt Veränderungen auch außerhalb eines vorgehaltenen Flexibilitätskorridors
2. Wandlungsfähigkeit ermöglicht reaktive Anpassung und proaktive Entwicklungen

3. Kreativität und Innovationsfähigkeit sowie das Wissen der Mitarbeiter sind wesentliche Bestandteile der Wandlungsfähigkeit
4. Wandlungsfähigkeit umfasst alle Objekte einer Fabrik
5. Wandlungsfähigkeit erfordert effiziente und effektive Wandlungsprozesse

Aus diesen Kernaussagen entwickelte er ferner folgende wertfreie Definition, die die Bewertung eines Systems auf dessen Wandlungsfähigkeit ermöglicht:

„Wandlungsfähigkeit beschreibt das Vermögen, Wandlungsprozesse an den Objekten einer Fabrik durchführen zu können, um die Fabrik - je nach Anlass - reaktiv an Veränderungen des Umfeldes anzupassen oder proaktiv zu entwickeln.“ (Heger 2006, S. 58)

Wenn mit dieser Wandlungsfähigkeit eine kontinuierliche Anpassung der Unternehmensstruktur erreicht wird, werden erhebliche Effizienzverbesserungen erzielt (Westkämper 2009, S. 14). Gerade in deutschen Unternehmen, welche in den meisten Wirtschaftssektoren Nachteile in den Rahmenbedingungen wie verfügbaren Ressourcen und Kosten der Arbeit haben, ist die permanente Innovations- und Wandlungsfähigkeit von Strukturen, Organisation und Technik Voraussetzung zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit (Westkämper 2009, S. 8 f.). Wandlungsfähige Produktionssysteme besitzen dabei für den Standort Deutschland zwei Vorteile. Einerseits sichern sie Arbeitsplätze dadurch, dass sie die Produktion im eigenen Land erhalten, andererseits ergibt sich durch das neue Produktfeld Wandlungsfähigkeit eine Stärkung der Lieferanten, die produktionstechnische Ausrüstung für dieses Produktfeld vertreiben (Nyhuis et al. 2009, S. 205).

Eine maximale Wandlungsfähigkeit sollte jedoch nicht angestrebt werden, da sie meist unnötig ist und hohe Kosten verursacht. Ziel ist eine optimale Balance zwischen maximaler und idealer Wandlungsfähigkeit zu finden (Berkholz 2008, S. 15). Die Herausforderung ist dabei, ein Produktionssystem zu schaffen, das sich im Gleichgewicht zwischen struktureller Wandlungsfähigkeit und flexiblen und stabilen Prozessen befindet. Die anfallenden Kosten müssen dabei dem potenziellen Nutzen der Investitionen in die Wandlungsfähigkeit gegenübergestellt werden (Franke et al. 2010, S. 63).

2.2.2 Abgrenzung der Wandlungsfähigkeit

Für das Verständnis von Wandlungsfähigkeit muss zwischen den Begriffen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität differenziert werden. Die Flexibilität der Produktion ist der am häufigsten diskutierte Begriff der Veränderungsfähigkeit (Wiendahl 2002, S. 123) und für die Wandlungsfähigkeit relevant, da diese die Erfordernisse der Flexibilität einschließt und somit inhaltlich über sie hinausgeht (Grundig 2013, S. 33).

Flexibilität wird als Möglichkeit der Veränderung innerhalb vorher eingeplanter Korridore bezeichnet. Sie beschreibt damit die Veränderungen, die im Vorfeld der Planung bereits berücksichtigt werden konnten (Cisek et al. 2002, S. 441). Flexibilität beschreibt eine vordefinierte Fähigkeit der Produktionssysteme, sich an veränderte Produktionsbedingungen anpassen zu können, ohne dass substantielle Veränderungen erforderlich sind (Grundig 2013, S. 33). Die Befähiger der Veränderung sind in diesem Fall vordefinierte Regelmechanismen und Freiheitsgrade, die eine neue Vernetzung bestehender Elemente erlauben (Hernández Morales und Wiendahl 2005, S. 206).

Wandlungsfähigkeit hingegen wird als Potenzial verstanden, auch jenseits vorgehaltener Korridore Veränderungen durchzuführen (Heinen et al. 2008, S. 24). Sie beschreibt die über die Flexibilität hinausgehende Fähigkeit, Anpassungen aufgrund geplanter und ungeplanter externer oder interner Einflüsse zu sichern (Grundig 2013, S. 33). Wandlungsfähigkeit ermöglicht somit Reaktionen auf Entwicklungen, die nicht vorhersehbar waren (Berkholz 2008, S. 14).

Die Unterschiede zwischen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität werden in **Abbildung 2-3** anhand eines Stückzahlverlaufs deutlich. Eine begrenzte Spannweite der Stückzahl-schwankungen ist mithilfe der Flexibilität abfangbar, ab einem gewissen Punkt sind die Schwankungen dann jedoch so groß, dass die Wandlungsfähigkeit greifen muss, da die Flexibilität des Systems die Veränderungen nicht mehr auffangen kann.

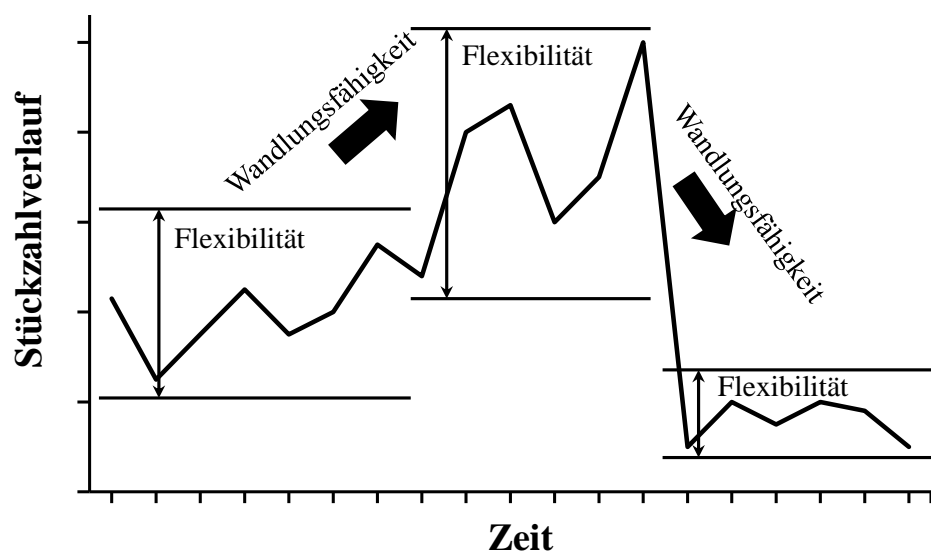


Abbildung 2-3 Flexibilität vs. Wandlungsfähigkeit nach (Nyhuis et al. 2009, S. 207)

Prinzipiell kann, mithilfe hoher Flexibilität, auf alle Veränderungen reagiert werden, sodass keine wandlungsfähige Lösung notwendig ist (Heinen et al. 2008, S. 24). Dies ist jedoch wirtschaftlich gesehen unvorteilhaft, da alle Eventualitäten in der Produktion mit Hilfe umfangreicher Flexibilitätsstrategien abgefangen werden müssten. Die optimale Wandlungsfähigkeit setzt sich aus Reaktionsfähigkeit und Flexibilität zusammen. Reaktionsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit, die Produktion schnell an die nicht vorhergesehenen Anforderungen anpassen zu können (Cisek et al. 2002, S. 441).

Neben den bereits dargestellten Veränderungsformen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit unterscheidet Wiendahl (Wiendahl 2002, S. 126 f.) drei weitere Veränderungstypen: Umrüstbarkeit, Rekonfigurierbarkeit und Agilität. Mithilfe dieser fünf Veränderungstypen wird ermöglicht, die Veränderungen auf den verschiedenen Ebenen einer Fabrik darzustellen. Die Einteilung erfolgt dabei in die Ebenen der Marktleistung, die von einfachen Fertigungs- beziehungsweise Fügeoperationen bis zum gesamten Produktportfolio reicht. Der Ebene der Marktleistung wird die Ebene der Produktionsleistung gegenübergestellt, welche von einem einzelnen Arbeitsplatz bis hin zur Sicht eines gesamten Standorts reicht. In die zwei Ebenen ordnen sich die fünf Veränderungstypen, wie in **Abbildung 2-4** dargestellt, ein. Die hierarchisch höher liegenden Veränderungsformen implizieren dabei die unter ihnen liegenden, sodass die Agilität alle Veränderungen, die im Unternehmen ausgeführt werden können, beschreibt.

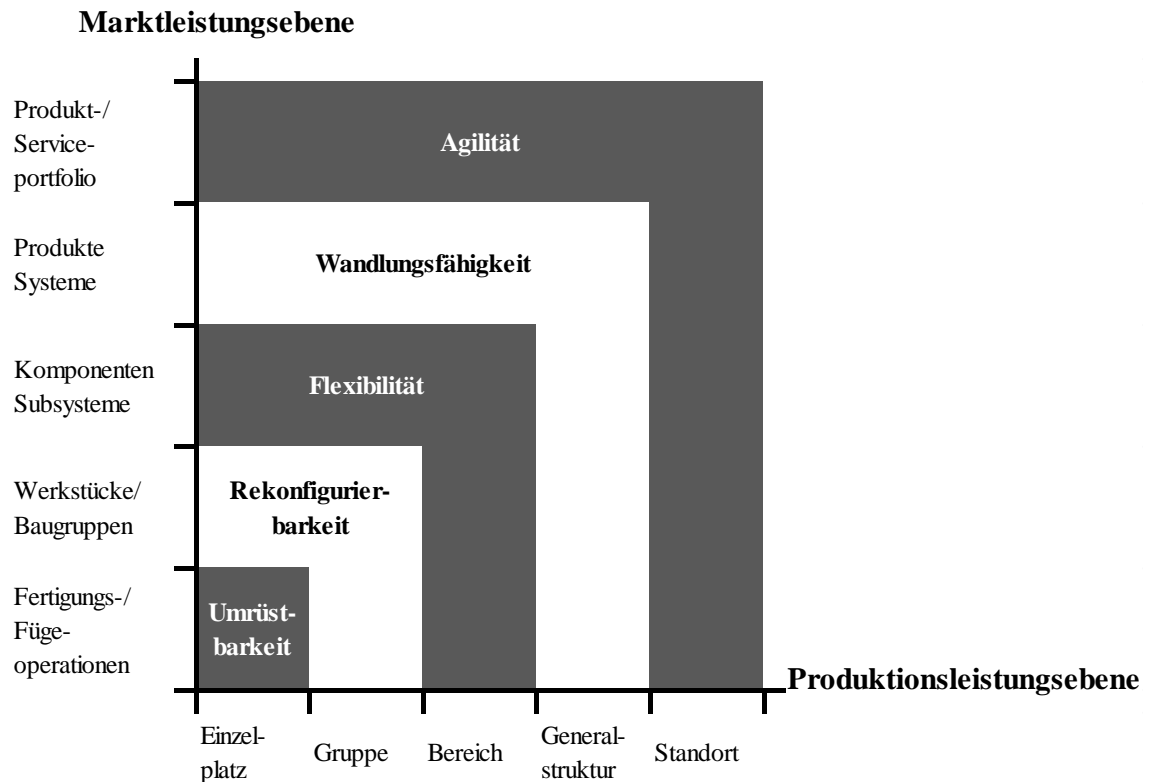


Abbildung 2-4 Veränderungstypen nach (Wiendahl 2002, S. 126)

Die Wandlungsfähigkeit befindet sich auf der Ebene der Generalstruktur der Fabrik, welche mehrere Produktbereiche zur Herstellung von marktfähigen Produkten zusammenfasst. Wandlungsfähigkeit kennzeichnet nach dieser Beschreibung die taktische Fähigkeit einer Fabrikstruktur, sich auf eine andere Produktfamilie umzustellen und bzw. oder die Produktionskapazität zu verändern. Sie setzt flexible, rekonfigurierbare und umrüstbare Systeme aus den tiefer liegenden Ebenen, wie in **Abbildung 2-4** erkennbar, voraus (Wiendahl 2002, S. 126 f.).

2.2.3 Anforderungen an wandlungsfähige Systeme

Zur Erreichung von Wandlungsfähigkeit sind einige Voraussetzungen durch das System zu erfüllen. Es werden flexible, rekonfigurierbare und umrüstbare Systeme wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, vorausgesetzt. Das System sollte zudem vernetzungsfähig, reaktionsschnell und mobil sein (Schenk und Wirth 2004, S. 333). Im Fabrikplanungsprozess muss proaktiv die Wandlungsfähigkeit in das System implementiert werden, um sie während der gesamten Lebensdauer der Fabrik gewährleisten zu können (Grundig 2013, S. 33).

Dies sagt jedoch nichts über die genaue Beschaffenheit des Systems aus oder wodurch die Wandlungsfähigkeit bewertet werden kann. Konkreter ist die Beschreibung von Berkholz (Berkholz 2008, S. 14 f.). Er bezeichnet eine Fabrik als wandlungsfähig, wenn sie in allen Aspekten modular angelegt ist, sodass ihre Bereiche sich neu kombinieren, erweitern und zurückbauen lassen. Eine solche Modifikation sollte ebenfalls bei den eingesetzten Betriebsmitteln gegeben sein, sodass unerwartete Veränderungen durch kleine Modifikationen der entsprechenden Funktionseinheiten ausgeglichen werden können.

Um die Eigenschaften, die ein System zum Wandel befähigen, zu beschreiben, wurde der Begriff Wandlungsbefähiger eingeführt. Insgesamt wurden in der Literatur eine Vielzahl von Wandlungsbefähigern identifiziert (Heinen et al. 2008, S. 26), von denen hier die sechs von Hernandez (Hernández Morales 2003, S. 54 ff.) vorgestellten erläutert werden.

Wandlungsbefähiger charakterisieren das Potenzial der Wandlungsfähigkeit, sie sind abrufbare Eigenschaften der zu wandelnden Objekte, die erst im Bedarfsfall aktiv werden. Sie beinhalten die drei wandlungsfördernden Systemeigenschaften Dynamik, Komplexität und Vernetztheit, durch die ein Wandlungsprozess hauptsächlich getragen wird. Dynamik kennzeichnet das zeitliche Verhalten des Systems und wird von dessen Struktur bestimmt. Komplexität ist die Fähigkeit, zahlreiche unterschiedliche Systemzustände in einem angemessenen Zeitrahmen anzunehmen. Vernetztheit wird durch Verknüpfungen, die das System je nach Anforderungen wachsen bzw. schrumpfen lassen oder stabil halten, erzeugt (Hernández Morales 2003, S. 52).

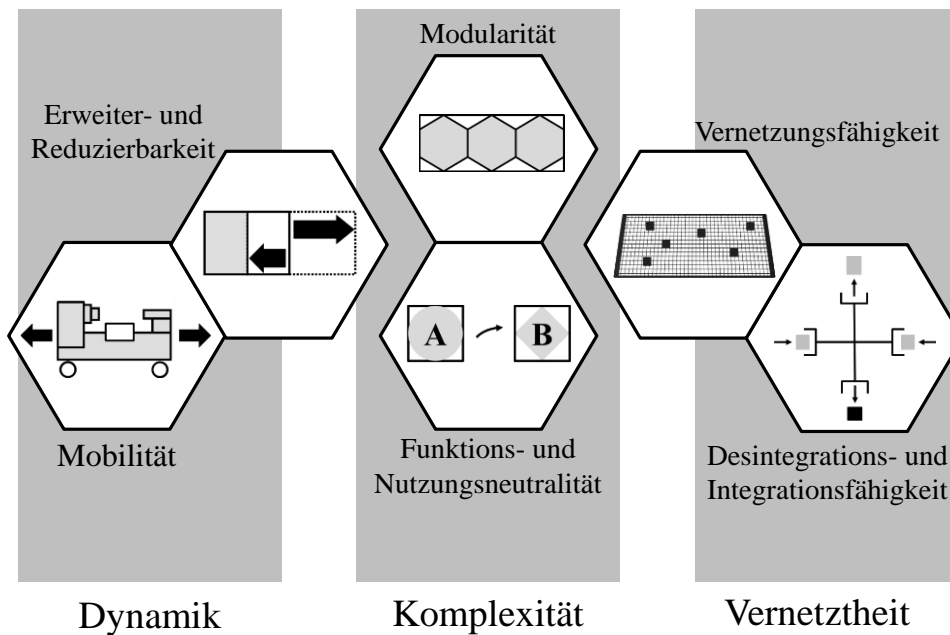


Abbildung 2-5 Wandlungsbefähiger nach (Hernández Morales 2003, S. 54)

In diese drei Systemeigenschaften lassen sich die sechs Wandlungsbefähiger, wie in **Abbildung 2-5** erkennbar, integrieren.

Aus der Systemeigenschaft Dynamik leitet sich die Mobilität ab, welche örtliche, uneingeschränkte Beweglichkeit von Objekten gewährleistet. Die Erweiter- und Reduzierbarkeit gehören ebenfalls zur Dynamik, beschreiben aber im Gegensatz zur Mobilität die Freiheitsgrade der Objekte bezüglich Ausdehnung, Wachstum und Schrumpfung. Die Modularität, welche auch als der bedeutendste Wandlungsbefähiger (Nofen et al. 2005b, S. 26) bezeichnet wird, gehört zur Komplexität und beschreibt standardisierte, vorgeprüfte Einheiten oder Elemente. Module sind autonom agierende Einheiten, die durch eine einfache Austauschbarkeit sowie hohe Kompatibilität untereinander charakterisiert sind. Funktions- und Nutzungsneutralität ist ebenfalls ein Befähiger der Komplexität und kennzeichnet die Eigenschaft von Objekten, für vielfältige Aufgaben, Anforderungen, Zwecke oder Funktionen dimensioniert und gestaltet worden zu sein. Vernetzungsfähigkeit ermöglicht die Vernetzung von Objekten der Fabrik, vor allem der Versorgungseinrichtungen, sodass verschiedenartige Zustände und Beziehungen in der Fabrik erzielt werden können. Sie gehört, genau wie die Desintegrations- und Integrationsfähigkeit, zur Systemeigenschaft Vernetztheit. Die Desintegrations- und Integrationsfähigkeit hilft dabei, über einheitliche Schnittstellen eine optimale Ein- bzw. Ausgliederung der Objekte zu schaffen. Diese sechs Eigenschaften befähigen ein Objekt zum Wandel (Hernández Morales 2003, S. 55 f.).

Mithilfe der Wandlungsbefähiger lässt sich außerdem eine Bewertung der Wandlungsfähigkeit durchführen. Mit einer von Denkena und Drabow (Denkena und Drabow 2005, S. 84 ff.) entwickelten Methode lassen sich beispielsweise die Betriebsmittel bewerten. Dazu werden mit Hilfe einer Bewertungstabelle die vorher gewichteten Wand-

lungsbefähiger für die jeweiligen Betriebsmittel bewertet und deren Ergebnisse dann in einem Wandlungsprofil, wie in **Abbildung 2-6** dargestellt, abgebildet. Diese Methode ermöglicht eine objektive und ganzheitliche Bewertung der Wandlungsfähigkeit und zeigt Verbesserungspotenziale auf.

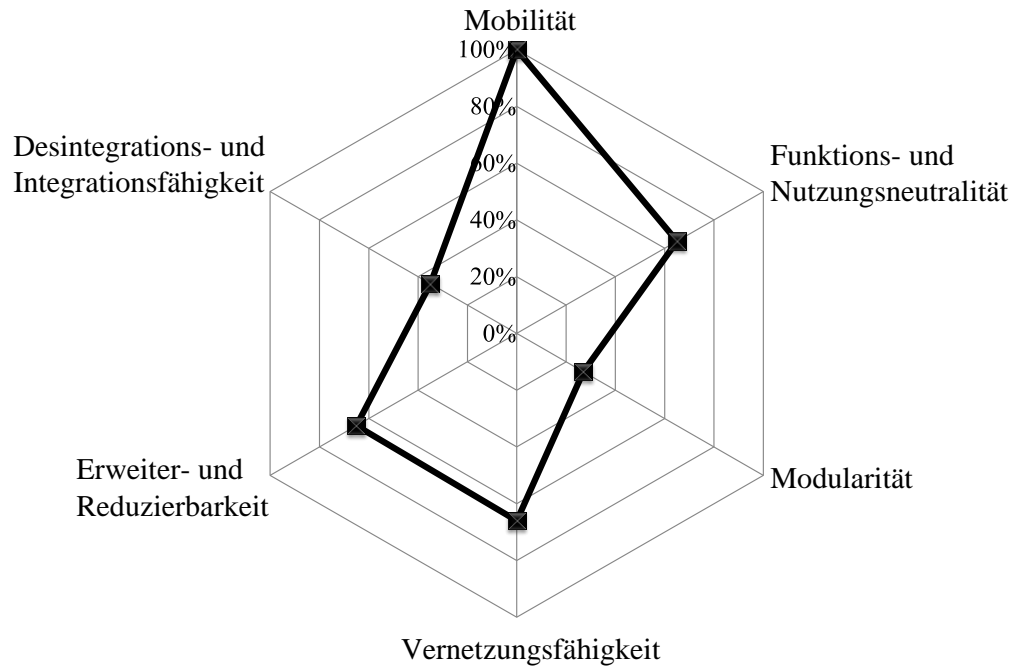


Abbildung 2-6 Wandlungsprofil nach (Denkena und Drabow 2005, S. 89)

2.2.4 Modellierung der Wandlungsfähigkeit

Zur Darstellung der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems wurden bereits einige Modelle entwickelt, die jeweils unterschiedliche Aspekte hervorheben. Im Folgenden werden drei dieser Ansätze näher betrachtet.

Im Ansatz von Nofen (Nofen et al. 2005b, S. 17 ff.) wird ein Modell zur Darstellung modularer wandlungsfähiger Fabriken dargestellt. Die Fabrik wird, angefangen bei einem Fabrikelement, welches eine physische und nicht physische Einheit einer Fabrik beschreibt, in einzelne Bestandteile (Ebenen, Elemente und Module) gegliedert. Die Fabrikelemente werden in die drei Gestaltungsbereiche Betriebsmittel (B), Organisation (O) und Raum- und Gebäudetechnik (R) unterteilt. Eine Fertigungseinrichtung wäre beispielweise ein Fabrikelement, das in den Gestaltungsbereich der Betriebsmittel gehört. Ein Qualitätssicherungskonzept hingegen würde in den Bereich Organisation fallen und eine technische Anlage wäre ein Element der Raum- und Gebäudetechnik. Ein wichtiger Aspekt bei diesem Ansatz ist, dass ein Mitarbeiter nicht als Fabrikelement betrachtet werden kann, da er nicht als gestaltbare Einheit gilt.

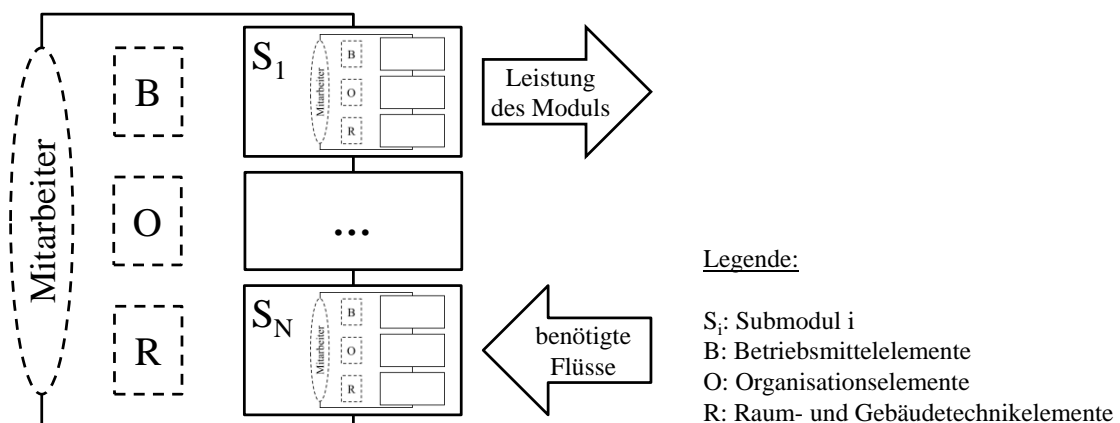


Abbildung 2-7 Fabrikmodul nach (Nofen et al. 2005b, S. 21)

Die Fabrikelemente werden zu Fabrikmodulen, wie in **Abbildung 2-7** dargestellt, zusammengefasst. Diese Module stellen einen technisch, organisatorisch sowie räumlich abgegrenzten Bereich der Fabrik dar und sind einer speziellen Ebene der Fabrikstruktur (siehe auch **2.1.2**) zugeordnet. Sie haben eine definierte Aufgabe zu erfüllen, die in Form einer Leistung abgegeben und durch Mitarbeiter betrieben werden. Zur Erfüllung dieser Aufgabe werden sie über definierte Schnittstellen mit den notwendigen Flüssen (Informations-, Kommunikations-, Material-, Energie-, Medien-, Werte- oder Kraftfluss) versorgt. Ein Fabrikmodul enthält Elemente der drei Gestaltungsbereiche und außerdem Submodule, welche eine Hierarchisierung der Fabrik in die einzelnen Ebenen der Fabrikstruktur ermöglichen. Um eine wie hier dargestellte modulare Fabrik nachhaltig wandlungsfähig zu gestalten, müssen die Fabrikmodule den Anforderungen der Wandlungsfähigkeit (siehe auch **2.2.3**) genügen (Nofen et al. 2005b, S. 25 f.). Das ent-

stehende Modell ermöglicht, Fabriken wandlungsfähig zu gestalten und zu betreiben (Nofen et al. 2003, S. 238).

Cisek (Cisek et al. 2002) hingegen benutzt einen systemtechnischen Ansatz zur Abbildung der Produktion. Hierzu wird die Produktion mit einem Regelkreis, wie in **Abbildung 2-8**, dargestellt. Die über Rezeptoren (Produkt/Produktvarianten, Kosten, Zeit, Stückzahl und Qualität) gefilterten Unternehmenseinflüsse werden in Form einer Führungsgröße an die Produktion weitergegeben. Dabei werden nur die Einflüsse aufgenommen, die nicht mit der Flexibilität (siehe 2.2.2) aufgefangen werden können. Die Zielvorgaben, die durch die Einflüsse vorgegeben werden, werden über eine Messgröße weitergegeben. Der Abgleich zwischen Führungs- und Messgröße ergibt dann die Regelabweichung, die von der Produktionssystemplanung interpretiert wird und gegebenenfalls zu Anpassungen des Produktionsplans mithilfe einer Stellgröße führt.

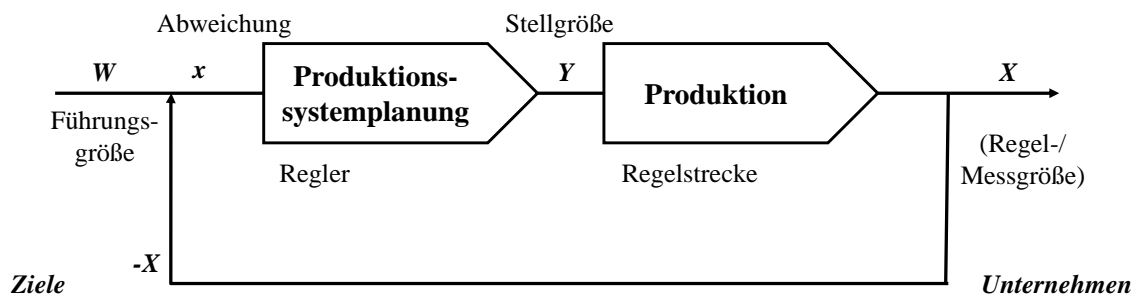


Abbildung 2-8 Regelkreis nach (Cisek et al. 2002, S. 442)

Somit ist die Produktionssystemplanung der Regler des Systems. Als Stellgrößen werden die Maßnahmen, die zur Veränderung des Systems führen, bezeichnet. Das zu regelnde Objekt ist das Produktionssystem, das sich in drei Ebenen gliedert (Ressourcen-, Prozess- und Organisationsebene). Die eigentliche Anpassung des Systems auf die veränderten Zielvorgaben lässt sich mit vordefinierten Strukturmaßnahmen umsetzen. Die Prozesse können integriert, parallelisiert, verlagert, eliminiert/addiert, substituiert, in der Reihenfolge verändert oder zentralisiert/dezentralisiert werden. Außerdem können neue Prozesse hinzukommen oder Prozesse kooperieren.

Um ein wirtschaftlich sinnvolles Maß der Betrachtung zu erhalten, erfolgt eine Fokussierung auf die Prozesse, die für die Rekonfiguration des Produktionssystems wesentlich sind. Aus den benötigten Strukturmaßnahmen und dem betrachteten Prozess ergeben sich dann die Anforderungen an die zugehörigen Ressourcen. Diese Anforderungen geben die Mindestanforderung für Ressourcen wieder, die das Produktionssystem zum Wandel befähigen. Zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit spielen die Ressourcen eine entscheidende Rolle, da sie physische Bestandteile des Produktionssystems sind. Das Modell von Cisek ermöglicht, mit geringem Aufwand bei der Auslegung der Ressourcen die entscheidenden Strukturmaßnahmen in der Produktion umzusetzen.

Eine weitere Sicht betrachtet das prozessorientierte Vorgehensmodell zur Planung wandlungsfähiger Produktions- und Logistiksysteme (Kuhn et al. 2010). Abhängig von der aktuellen Planungsaufgabe wird der Planungsfall hinsichtlich Planungsebene, Planungsphase und Planungsanstoß (vgl. Abschnitt 2.1.2) eingeordnet. Nachdem der Planungsfall eingegrenzt wurde, werden systematisch sechs Planungsschritte durchlaufen, die mit gezieltem Rückgriff auf bereits vorhandene Lösungsbausteine eine gezielte Beschleunigung des Planungsprozesses erreichen. Diese Planungsschritte leiten sich aus den vier Potenzialklassen (Ressourcen, Prozesse, Strukturen und Lenkung) des Dortmunder Prozesskettenmodells (Kuhn 1995) ab und ermöglichen eine Vereinfachung von komplexen Strukturen sowie eine vielseitige Einsetzbarkeit und Wiederverwendbarkeit des Modells. Die sechs Schritte sind in **Abbildung 2-9**, mit den jeweils in den einzelnen Schritten enthaltenen Teilaspekten und der Zuordnung zu den vier Potenzialklassen des Prozesskettenmodells dargestellt.

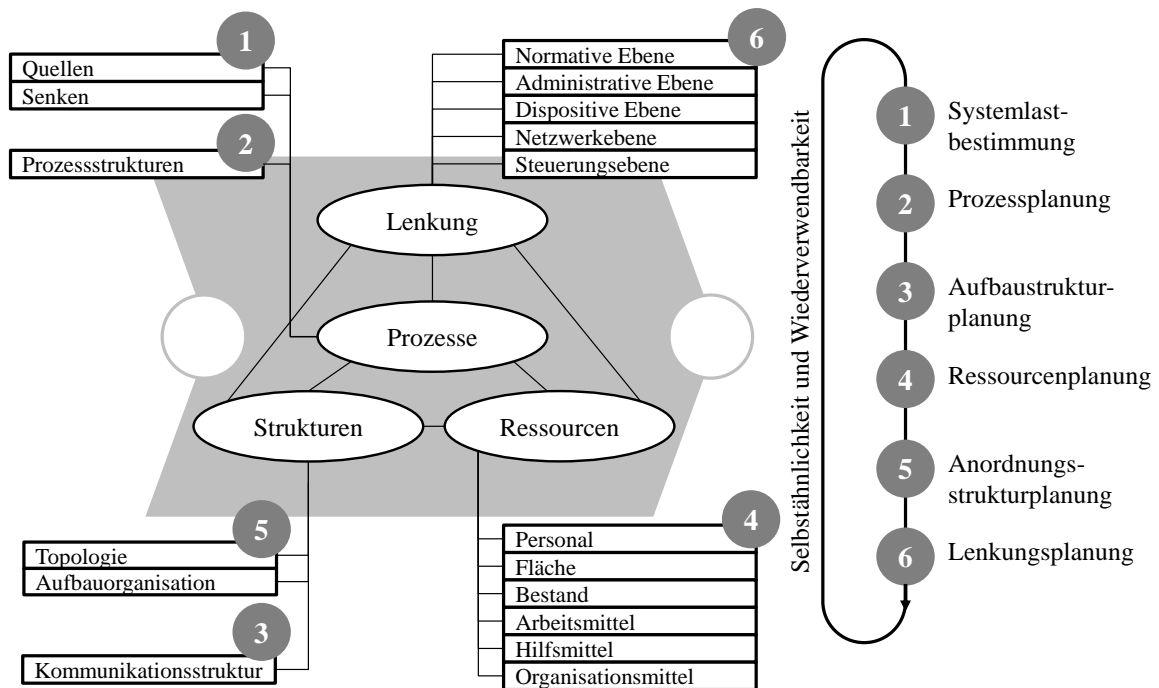


Abbildung 2-9 Prozessorientiertes Vorgehensmodell nach (Kuhn et al. 2010, S. 217)

Der Ruf nach wandlungsfähigen Produktionssystemen führt trotz der Fortschritte in der Fabrikplanung zu einem hohen Zeitaufwand in der Planung. Dieser Zeitaufwand liegt unter anderem daran, dass überwiegend sequenziell und unregelmäßig geplant wird, aber auch keine Wiederverwendung der Planungsergebnisse erfolgt. Mithilfe des prozessorientierten Planungsvorgehens für Produktions- und Logistiksysteme wird eine permanente Planungsbereitschaft erzielt, die unabhängig von der Planungsaufgabe in vorgegebener Reihenfolge durchlaufen werden kann (Kuhn et al. 2010).

2.3 Modellierung

2.3.1 Allgemeines und Anforderungen

Modellierung bezeichnet den Prozess, bei dem ein Ausschnitt der Realität in ein Modell überführt wird. Die entstehenden Modelle bilden nicht die Realität ab, sondern stellen das Original vereinfacht dar. Durch diese Vereinfachung wird die Betrachtung komplexer Systeme möglich (Schenk und Wirth 2004, S. 177 f.). Durch Abstraktion und Idealisierung helfen Modelle, die realen Eigenschaften, Beziehungen und Zusammenhänge fassbar und praktisch nutzbar zu machen, um Erkenntnisse aus der Wirklichkeit zu gewinnen (Kühn 2006, S. 28). Dabei wird durch den Verwendungszweck festgelegt, welche Eigenschaften modelliert werden und welche Arten von Modellen zu deren Beschreibung nutzbar sind (Kastens und Kleine Büning 2005, S. 16 f.).

Abhängig von der Verwendung können sie je nach ihrer inhaltlichen Ausrichtung in Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle unterteilt werden. Beschreibungsmodelle sind die erste Art, sie bilden reale Objekte deskriptiv nach. Erklärungsmodelle gehen weiter als eine reine Beschreibung, sie bieten als Anwendung von Theorien die Möglichkeit, mehr oder weniger typische Tatbestände zu interpretieren, ziehen also Schlussfolgerungen aus dem Dargestellten. In Entscheidungsmodelle gehen die Zielvorstellungen der Anwender ein und beispielsweise mathematische oder heuristische Verfahren können angewandt werden, um die besten Lösungen zu erreichen (Thommen und Horn 2013). Diese drei Ausrichtungen können um die Problemlösungsmodelle ergänzt werden, welche für schlecht strukturierbare Probleme eine Lösung wiedergeben. In diesen Modellen muss nicht unbedingt die bestmögliche Lösung gefunden werden, sondern ausreichend sind schon möglichst gute Lösungen (Müller 2005, S. 82).

Unabhängig vom Verwendungszweck existieren allgemeine Anforderungen, die eine Modellierungstechnik erfüllen sollte. Um eine anwenderorientierte Modellierung zu gestalten, sollten eine Vielzahl von Faktoren mit einbezogen werden. Das Modell sollte eine einfache Anwendung ermöglichen und dazu verständlich beschrieben sein, damit die Benutzung und Erlernung einfach ist. Eine Ähnlichkeit mit der abzubildenden Wirklichkeit ist erforderlich, gleichzeitig sollte das Modell aber auch für abgewandelte Fälle weiterverwendet werden können und Zusatzerkenntnisse liefern. Gefordert wird außerdem, dass sich der Konkretisierungsgrad und der Beschreibungsumfang je nach Bedarf anpassen lassen. Schließlich sollte, trotz der vielfältigen Anforderungen, der Modellerstellungsaufwand gering bleiben, das heißt der Aufwand, um das Modell zu erstellen sollte den Nutzen nicht überschreiten (Neuhausen 2011, S. 54).

Angelehnt an die Qualitätsfaktoren von Software (Meyer 1990), entwickelte Schwermer (Schwermer 1998) sechs Kriterien (Korrektheit, Effizienz, Schnelligkeit, Neutralität,

Erweiterbarkeit und Benutzerfreundlichkeit), in die die Anforderungen an ein Modell gegliedert werden können. Im Rahmen der Korrektheit wird vom Modell verlangt, dass es realitätsnah, widerspruchsfrei und methodenkonform ist. Die Effizienz erfordert den zweckmäßigen Einsatz der Ressourcen zur Erfüllung der Modellierungsaufgabe. Ziel der Schnelligkeit ist es, eine frühzeitige Nutzung der Modellierungsergebnisse zu gewährleisten und die Neutralität ermöglicht die Nutzbarkeit des Modells auch unter veränderten Bedingungen. Die Benutzerfreundlichkeit soll dem Benutzer ein leicht erlern- und ausführbares Model bieten (Schwermer 1998, S. 24f.).

Bei der Modellierung eines Systems kann entweder Top-Down oder Bottom-Up vorgegangen werden. Bei der Top-Down Methode wird das System immer stärker detailliert, bis die erforderliche Genauigkeit vorhanden ist. Bei der Bottom-Up Methode beginnt die Modellierung bei den Details und endet mit dem komplexen Gesamtsystem. Sinnvoll ist eine Verknüpfung der beiden Vorgehensweisen, sodass große Systeme erst in Teile, die Top-Down aufgeschlüsselt werden, zerlegt werden, welche dann im Anschluss über die Bottom-Up Methode wieder zusammengesetzt werden (Schenk und Wirth 2004, S. 178 f.).

Um eine Struktur für ein detailliertes Modellierungsvorgehen zu erhalten, kann die Modellierung in vier Phasen eingeteilt werden, welche teilweise wiederholend durchlaufen werden (Schwermer 1998, S. 18). In der ersten Phase, der Systemabgrenzung, wird das zu modellierende System identifiziert. In dieser Abgrenzung werden die Aspekte, die in die Modellierung mit einbezogen werden sollen und damit die Detaillierungstiefe des Modells, festgelegt. In der zweiten Phase, der Modellbildung, werden die zu dem Zeitpunkt als richtig und vollständig angenommen Modelle aufgestellt. Die Überprüfung der Richtigkeit und Vollständigkeit dieser erfolgt erst in der Modellauswertung, der dritten Phase. Das Modell wird manuell oder mittels Rechnereinsatz ausgewertet und daraus werden dann Schwachstellen und Verbesserungspotenziale abgeleitet. Diese werden dann in der letzten Phase, der Modellveränderung, genutzt, um aufbauend auf dem alten Modell ein verbessertes oder an eine neue Aufgabe angepasstes Modell zu erstellen (Schwermer 1998, S. 19 f.).

2.3.2 Einteilung der Modellierungstechniken

Um eine Modellierungstechnik für die vorliegende Aufgabenstellung auszuwählen, müssen diese Techniken zuerst nach ihrem Konzept eingegrenzt werden. Ein Modellierungskonzept legt das Regelwerk zur Strukturierung und Modellierung des zu modellierenden Systems mit den Modellbestandteilen und den Wechselwirkungen und Abhängigkeiten unter ihnen fest. Das Konzept hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Struktur des Modells, da es die Methodik und Vorgehensweise des Systementwurfs beeinflusst (Wenzel und Kuhn 2008, S. 80).

Es ist möglich, die Modellierungskonzepte in vorwiegend sprachliche und vorwiegend graphische Beschreibungsmittel zu unterteilen. Die Sprachkonzepte (oder auch Skriptsprachen) sind an eine Programmiersprache angelehnt und können somit leicht in Rechnerprozesse eingebunden werden. Sie ermöglichen eine hohe Präzision der Modellspezifikation, setzen allerdings detaillierte Methodenkenntnisse voraus, was die Umsetzung erschwert. Die graphischen Methoden hingegen sind anschaulicher und setzen keine detaillierten Methodenkenntnisse voraus, da sie Teile der Aussage über Symbole wiedergeben (Gadatsch 2012, S. 63 f.).

Wenzel und Kuhn (Wenzel und Kuhn 2008, S. 80) grenzen die Sprachkonzepte von den generischen und den theoretischen Konzepten ab. Generische Konzepte sind gekennzeichnet durch eine allgemeine wiederverwendbare und anwendungsneutrale Beschreibungsmethodik. Zu ihnen zählen die objektorientierten oder Entity-Relationship-Modelle. Theoretische oder auch mathematische Konzepte beruhen auf mathematischen Modellen und umfassen beispielsweise Petri-Netze, Zustandsautomaten oder Warteschlangennetze. Abgrenzend dazu existieren auch die anwendungsorientierten Modellierungskonzepte, welche sich durch anwendungsnahe Beschreibungsmittel auszeichnen und sich mit den Begrifflichkeiten an dem abzubildenden System orientieren (Wenzel und Kuhn 2008, S. 81).

Eine andere Unterteilung der Modellierungskonzepte ist die zwischen objektorientierten und nicht objektorientierten bzw. strukturierten Konzepten (vgl. Linssen 2002, S. 8ff oder Kappel und Schrefl 1996, S. 56 ff.). Strukturierte Ansätze gehen von der Abbildung des Datenflusses aus, die Datenmodellierung erfolgt dabei getrennt von der Funktionsmodellierung. Objektorientierte Ansätze gehen hingegen von der Abbildung in der Realität vorzufindender Objekte und deren Beziehungen aus (Linssen 2002, S. 8). Objektorientierte Konzepte besitzen einige Vorteile und finden in der Praxis zunehmend Verbreitung (Gadatsch 2012, S. 64).

Neben der groben Einteilung der Modellierungstechniken in ein Modellierungskonzept kann eine Modellklassifizierung erfolgen. Eine Unterscheidung der Modelle kann dabei durch zahlreiche Faktoren, wie beispielsweise die Allgemeingültigkeit, die Detaillierung bzw. Konkretisierung, die Form der Dokumentation, die Visualisierung oder die Kom-

patibilität bzw. Anpassbarkeit erfolgen (Kühling 2000, S. 15). Die Modelle lassen sich dabei im Allgemeinen über gegensätzliche Begriffspaare charakterisieren. Einige Beispiele für solche Kriterien sind nach Wenzel und Kuhn:

(Wenzel und Kuhn 2008, S. 77)

- Experimentierbarkeit: experimentierbar versus nicht experimentierbar,
- Beschreibungsmittel: physisch versus gedanklich versus abstrakt/formal versus symbolisch/graphisch versus textuell,
- Zufallsverhalten: stochastisch versus deterministisch
- Zeitverhalten: statisch versus dynamisch,
- Stabilität: linear versus nicht linear,
- Modellierung des Zeitablaufes: diskret versus kontinuierlich.

2.3.3 Objektorientierte Modellierungsmethoden

Da die Objektorientierte Konzepte zunehmend Verbreitung finden und eine Reihe von Vorteilen besitzen, werden sie hier detaillierter beschrieben. Zu objektorientierten Modellierungsmethoden existiert kein objektorientiertes Paradigma, welches ein geschlossenes Begriffssystem bildet, stattdessen wird abhängig vom jeweiligen Modellierungsansatz ein entsprechender objektorientierter Ansatz definiert (Linssen 2002, S. 31). Die Eckpfeiler des objektorientierten Konzeptes werden durch die Konzepte Objekt, Klasse und Vererbung gebildet (Prasse 1998).

Das grundlegende Konstrukt dieses Ansatzes ist das Objekt, das sowohl eine Datenstruktur, als auch ein Verhalten in sich vereint und durch eine Objektidentität eindeutig von anderen Objekten unterscheidbar ist (Rumbaugh et al. 1994, S. 1).

Die Datenstruktur wird durch Attributwerte und die Beziehung zu anderen Objekten beschrieben. Das Verhalten kann Funktionen, die dem Objekt zugeordnet sind, anwenden und damit auf dessen Attributwerte zugreifen (Balzert 2005, S. 36 f.).

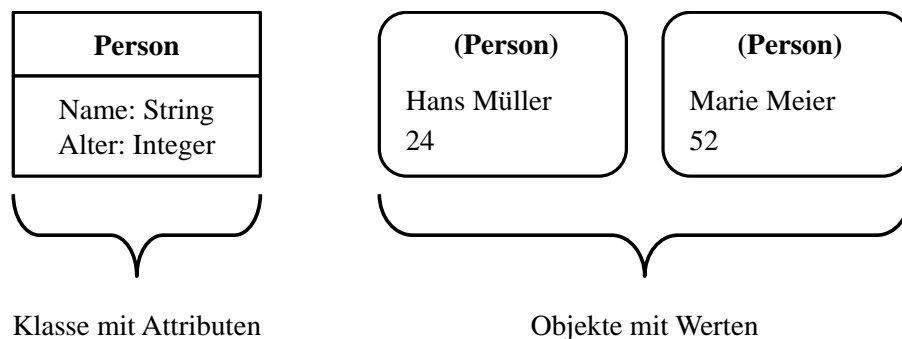


Abbildung 2-10 Klasse und Objekte mit Attributen (Rumbaugh et al. 1994, S. 29)

Das Konzept Klasse fasst für mehrere dieser Objekte deren Verhalten und Attribute zusammen, es beschreibt also eine Kollektion von Objekten mit gleicher Struktur. Die

Unterschiede zwischen Objekten und Klassen werden in **Abbildung 2-10** dargestellt. Eine Klasse gibt die Attribute vor und ein Objekt enthält für jedes der Attribute einen Wert. Eine Funktion wird von einer Klasse festgelegt und greift auf die Attributwerte eines Objektes zu (Balzert 2005, S. 36 f.).

Die Vererbung beschreibt die Beziehung zwischen einer Ober- und einer Unterklasse. Die Oberklasse ist dabei diejenige, die die Attribute vererbt und die Unterklasse kann, aufbauend auf den vollständig übernommenen Attributen der Oberklasse, noch zusätzliche Attribute oder Operationen enthalten (Balzert 2005, S. 52).

Zur Identifizierung der einzelnen Objekte muss kein Attribut verwendet werden, da die meisten objektorientierten Sprachen automatisch Bezeichner generieren, welche den Objekten eine unverwechselbare Identität geben (Rumbaugh et al. 1994, S. 31).

Allgemein sind in Bezug auf Offenheit, Wartbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Flexibilität und Integrationsfähigkeit bei fachgerechter Anwendung mithilfe des objektorientierten Ansatzes bessere Softwaresysteme möglich (Linssen 2002, S. 9). Außerdem trennen objektorientierte Modellierungsmethoden nicht die Daten- und Funktionsmodellierung, das heißt in allen Phasen der Systementwicklung können die gleichen Modelle und Diagramme verwendet werden (Linssen 2002, S. 8).

Die Objektklassen können in den meisten Modellierungsmethoden frei gewählt und definiert werden (Schwermer 1998, S. 45). Durch diese Möglichkeit der Definition von geeigneten Klassen und Vererbungsregeln ermöglichen sie die Offenheit und Erweiterbarkeit eines Modells um spezifische Anwendungssichten (Jochem 2001, S. 63).

3 Auswahl einer Modellierungstechnik

3.1 Anforderung an die Modellierungstechnik

Mithilfe einer passenden Modellierungstechnik soll ein Konzept für ein veränderliches Modell zur Abbildung von Produktionssystemen bei dynamischer Auftragslage entstehen. Das Modell soll die Abläufe, die zur Einplanung eines Auftrags in eine bestehende Fabrik notwendig sind, darstellen. Dabei sollen die einzelnen Schritte übersichtlich wiedergegeben und die für diese Schritte notwendigen Ressourcen, wie beispielsweise benötigtes Personal, aufgeführt werden. Das Modell soll für verschiedene Anwendungsfälle benutzt werden können und somit wiederverwendbar sein.

Um herauszufinden, welche Modellierungstechnik für ein Modell zur Einplanung von Aufträgen in eine bestehende Fabrik geeignet ist, müssen die Anforderungen an die Technik aufgestellt werden. Diese ergänzen die allgemeinen Anforderungen, die an eine Modellierungsaufgabe gestellt werden (vgl. Kapitel 2.3.1) und klassifizieren das Modell (vgl. 2.3.2), sodass die Auswahl einer passenden Modellierungstechnik ermöglicht wird.

Das Modell muss eine graphische Notation enthalten, um die Prozesse und Abläufe übersichtlich zu gestalten und nachvollziehbar zu machen. Es sollte auch ohne umfassende Kenntnisse der gewählten Methode anschaulich und verständlich sein. Trotzdem sollte es eine eindeutige Interpretation ermöglichen und deswegen in einem gewissen Grad formal darstellbar sein, sodass keine Missverständnisse bei der Anwendung entstehen können.

Da in der Planung viele verschiedene Schritte und Phasen zu durchlaufen sind, muss das Modell in einzelne Teile zerlegbar sein, um eine gute Strukturierung zu gewährleisten. Dabei sollten Teilprozesse separat detaillierter beschrieben werden können, das Modell aber gleichzeitig auch als Ganzes zu betrachten sein. Außerdem sollte das Modell nachträglich an einzelnen Stellen erweiterbar sein oder verändert werden können. Vom Modell wird folglich die Möglichkeit zur Hierarchisierung und Komposition bzw. Dekomposition gefordert.

Eine zwingende Voraussetzung für die Modellierungstechnik ist die Möglichkeit der Darstellung von nebenläufigen Prozessen. Da es in der Umplanung der Fabrik keinen Sinn macht, die Planungsschritte sequenziell mit einer vorher festgelegten Reihenfolge zu durchlaufen, müssen parallele Prozesse durch das Modell wiedergegeben werden können (vgl. Abschnitt 2.1.1). Durch die Technik muss außerdem die Möglichkeit bestehen, Entscheidungen abhängig von vorher definierten Bedingungen ausführen zu können.

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist das Zeitverhalten. Das Modell sollte in der Lage sein, die einzelnen Zeiten, die für die jeweiligen Planungsschritte benötigt werden, zu-

sammenzufassen. Daraus lässt sich dann die Gesamtzeitdauer, die für den Auftrag benötigt wird, als Resultat der Modellierung ermitteln.

Das Modell sollte idealerweise die Planung nicht nur beschreiben, sondern auch in der Lage sein, Ergebnisse, zum Beispiel in Form von einer definierten Zeitdauer oder der Anzahl und Menge der Kapazitäten, automatisch zu berechnen. Diese analytische Eigenschaft kann dann in einem späteren Schritt eine softwaretechnische Umsetzung und Auswertung ermöglichen. Für diese softwaretechnische Umsetzung kann neben der Darstellung des statischen Zeitverhaltens eine dynamische Zeitanpassung sinnvoll sein.

Außerdem sollte das Modell die Möglichkeit auf mehrere Sichtweisen bieten. Dabei sollte neben einer Aufschlüsselung der Objekte, die es enthalten soll, auch eine Übersicht über die nötigen Schritte der Planung gegeben werden. Dies kann entweder durch eine Modellierungstechnik erfolgen, die diese Sichtweisen impliziert oder durch das Zusammenfügen mehrerer Modellierungsmethoden zur Erreichung der vollständigen Funktionalität. Die einzelnen Objekte der Kapazitäts- und Bedarfsplanung, wie in Kapitel 2.1.3 dargestellt, sollten unterscheidbar und eindeutig identifizierbar sein. Diese Objekte sollten eigene Eigenschaften, wie beispielsweise die Qualifizierung der Mitarbeiter oder eine Materialnummer, zugewiesen bekommen können. Eine Möglichkeit dies zu gewährleisten wäre mithilfe eines objektorientierten Modellierungskonzeptes.

Die oben genannten Eigenschaften, die in zwingend erforderliche und wünschenswerte Eigenschaften unterteilbar sind, sind in **Tabelle 3-1** zusammengefasst dargestellt. Sie ermöglichen im Folgenden die Auswahl einer passenden Modellierungstechnik.

Tabelle 3-1 Anforderungen an die Modellierungstechnik

Erforderliche Eigenschaften	Wünschenswerte Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> - graphische Notation - nebenläufige Prozesse - Hierarchisierung - Komposition/Dekomposition - statisches Zeitverhalten - semiformale Darstellung 	<ul style="list-style-type: none"> - dynamisches Zeitverhalten - Objektorientierte Modellierung - formale Darstellung - analytische Lösungsmethode

3.2 Vorauswahl passender Modellierungstechniken

3.2.1 Vergleich von Modellierungstechniken

Um die Modellierungstechnik zu identifizieren, die für den vorliegenden Modellierungszweck am besten geeignet ist, wird eine Auflistung bekannter Beschreibungsmittel nach definierten Einordnungskriterien in Anlehnung an einen unveröffentlichten Entwurf der VDI Richtlinie 4465 - Modellbildung (VDI-Richtlinie 4465) verwendet. Diese Einordnungskriterien wurden teilweise den Kriterien der VDI/VDE Richtlinie 3681 (VDI/VDE-Richtlinie 3681) zu Beschreibungsmitteln für die Modellierung von Automatisierungstechnischen Systemen entnommen. Diese Kriterien stimmen nicht mit denen, die im vorherigen Abschnitt festgelegt wurden, vollständig überein, bilden jedoch die Kriterien, die als zwingend vorausgesetzt wurden, vollständig ab. In **Tabelle 3-2** ist diese Auflistung verkürzt auf die Eigenschaften, die für den hier betrachteten Fall relevant sind, dargestellt. Im ersten Schritt werden nur die zwingend geforderten Eigenschaften betrachtet, weswegen die Modellierungsmethoden, die alle sechs geforderten Eigenschaften erfüllen, in **Tabelle 3-2** grau hervorgehoben sind.

Tabelle 3-2 Beschreibungsmittel und ihre Eigenschaften nach (VDI-Richtlinie 4465)

Beschreibungsmittel	graphische Notation	Abb. Von Hierarchie	(De-) Komposition	statisches Zeitverhalten	Nebenläufigkeit	Semiformale Basis
Petrinetze	X	X	X	X	X	X
Technik- und layoutorientierte Bausteine	X	X	X	X	X	X
Prozessorientierte Beschreibungsmittel	X	X	X	X	X	X
Unified Modeling Language	X	X	X	X	X	X
Programmiersprachen		X	X	X	X	X
Automaten / Zustandsdiagramme	X	X	X	X		X
Simulationsprache		X	X	X	X	X
Darstellungsgraphen	X	X		X	X	X
Mathematische Formeln		X	X	X		X
Pseudocode		X	X	X		X
Programmablaufpläne	X		X	X		X
ER-Modelle	X		X	X		X
Vorranggraphen	X		X	X		X
Entscheidungstabellen	X		X	X		X
Struktogramme	X			X		X
Zeichnungen	X		X	X		X
Datenflussdiagramme	X			X		X
Organigramm	X	X		X		X
Causal Loop Diagramm / System Dynamics	X			X		X
Warteschlangentheorie				X		X
Explorative Statistik				X		X
Constraint Programming				X		X
Tabellen und Listen	X			X		X
Diagramme	X			X		X
Natürliche Sprache				X		X

Insgesamt erfüllen nur vier der Modellierungstechniken die Eigenschaften, die als unbedingt erforderlich definiert wurden. Die infrage kommenden Techniken sind Petrinetze, technik- und layoutorientierte Bausteine, prozessorientierte Beschreibungsmittel und die Unified Modeling Language.

Neben den zwingend erforderlichen Eigenschaften müssen die Techniken auch auf ihre weiteren Eigenschaften überprüft werden, um auf die für den hier vorgestellten Anwendungsfall beste Modellierungsmethode zu schließen. Die **Tabelle 3-3** gibt für die vier vorausgewählten Methoden detaillierte Angaben zu den geforderten Eigenschaften, die ebenfalls aus dem Entwurf der VDI Richtlinie 4465 stammen.

Tabelle 3-3 Ausgewählte Modellierungstechniken mit detaillierten Eigenschaften nach (VDI-Richtlinie 4465)

Beschreibungsmittel	Notation	Abb. Von Hierarchie	(De-) Komposition	Zeitverhalten	Nebenläufigkeit	Formale Basis	Lösungsmethode analytisch
Petrinetze	graph.-math.	X	X	dynamisch	X	formal	X
Technik- und layoutorientierte Bausteine	graph.	X	X	dynamisch	X	formal	
Prozessorientierte Beschreibungsmittel	graph.-text.	X	X	statisch	X	semiformal	X
Unified Modeling Language	graph.-text.	X	X	statisch	X	semiformal	

Am besten geeignet scheinen nach dieser Auflistung die Petrinetze, da sie ein dynamisches Zeitverhalten, eine formale Basis und eine analytische Lösungsmethode aufweisen. Die technik- und layoutorientierten Bausteine erfüllen ebenfalls die Forderung nach einem dynamischen Zeitverhalten und einer formalen Darstellungsmethode, haben jedoch kein analytisches Verhalten. Prozessorientierte Beschreibungsmittel haben kein dynamisches Verhalten und sind semiformal in ihrer Darstellung, ermöglichen jedoch eine analytische Lösungsmethode. Die Unified Modeling Language weist weder ein dynamisches Zeitverhalten noch eine analytische Lösungsmethode auf und besitzt nur eine semiformale Darstellungsmethode.

Die oben dargestellte Auflistung gibt jedoch nur einige Eigenschaften der Modellierungstechniken wieder. Um eine Entscheidung zu treffen, sind diese Informationen nicht ausreichend, da sie keine detaillierten Eindrücke von der Modellierungsmethode vermitteln. Die vorliegenden Informationen geben nicht die Stärken und Schwächen, die Funktionsweise oder die Anwendungsgebiete der Modellierungsmethoden wieder. Im Folgenden werden die vier vorausgewählten Methoden infolgedessen näher betrachtet, um im Anschluss eine fundierte Entscheidung zu deren Eignung treffen zu können.

3.2.2 Unified Modeling Language

Die Unified Modeling Language (UML) ist eine Methode zur Modellierung, Dokumentation, Spezifizierung und Visualisierung komplexer Systeme und liefert Notationselemente, insbesondere bei einer objektorientierten Vorgehensweise. Sie ist eine Vereinigung verschiedener Ansätze (von Rumbaugh's OMT über Booch's OOD bis hin zu Jacobson's OOSE oder der OOA&D von Martin und Odell), die 1997 veröffentlicht und standardisiert wurde. Seit 2005 existiert sie in der zweiten Version, der UML 2, welche heute die verbreitetste Notation um Softwaresysteme zu analysieren und zu entwerfen ist (Rupp und Queins 2012, S. 3 ff.).

Dadurch, dass die UML eine Notation und kein Vorgehen spezifiziert, gibt das jeweilige Projekt vor, welche der unterschiedlichen in ihr vorhandenen Elemente und Diagramme gewählt werden. Die UML 2 besteht insgesamt aus 14 verschiedenen Diagrammen, die sich, wie in **Tabelle 3-4** abgebildet, in Struktur- und Verhaltensdiagramme einteilen lassen (Rupp und Queins 2012, S. 7).

Tabelle 3-4 Diagrammtypen der UML 2 nach (Rupp und Queins 2012, S. 7)

Strukturdiagramme	Verhaltensdiagramme	
		Interaktionsdiagramme
Klassendiagramm	Use-Case-Diagramm	Sequenzdiagramm
Paketdiagramm	Aktivitätsdiagramm	Kommunikationsdiagramm
Objektdiagramm	Zustandsautomat	Timingdiagramm
Kompositionsstrukturdiagramm		Interaktionsdiagramm
Komponentendiagramm		
Verteilungsdiagramm		
Profildiagramm		

Die Strukturdiagramme modellieren die Statik eines Systems, beispielsweise in Form eines Klassendiagramms, welches Klassen mit ihren Beziehungen und Abhängigkeiten darstellt (Müller 2005, S. 108). Zu den Verhaltensdiagrammen gehören beispielsweise Use-Case-Diagramme oder Aktivitätsdiagramme. Use-Case-Diagramme (auch Anwendungsfalldiagramme genannt) geben etwa eine Beschreibung von Geschäftsprozessen wieder. Sie geben auf einem hohen Abstraktionsniveau einen guten Überblick über das System und seine Umwelt (Balzert 2009, S. 80). Von den Verhaltensdiagrammen werden wiederum vier zu den Interaktionsdiagrammen gezählt (Rupp und Queins 2012, S. 1 ff.). Interaktionsdiagramme beschreiben Fallbeispiele (Szenarios) in Verbindung mit den Verhaltensdiagrammen und den Interaktionen der Objekte. Im Mittelpunkt stehen dabei die Nachrichten, die während des zeitlichen Ablaufs des Anwendungsfalles zwischen den Objekten ausgetauscht werden.

Für den im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden Verwendungszweck eignen sich die Aktivitätsdiagramme am besten. Aktivitätsdiagramme geben, aufbauend auf den Use-

Case-Diagrammen, die Abläufe der identifizierten Prozesse wieder, dazu werden die Anwendungsfälle in ihre einzelnen Aktivitäten zerlegt und der Fluss der Aktivitäten festgelegt (Müller 2005, S. 102). Sie sind das geeignete Mittel um Abläufe mit komplexem Verlauf unter Berücksichtigung von Nebenläufigkeiten oder alternativen Entscheidungswegen zu modellieren und nachzuvollziehen (Rupp und Queins 2012, S. 263). In **Abbildung 3-1** wird die Notation der Aktivitätsdiagramme für nebenläufige und alternative Abläufe exemplarisch dargestellt.

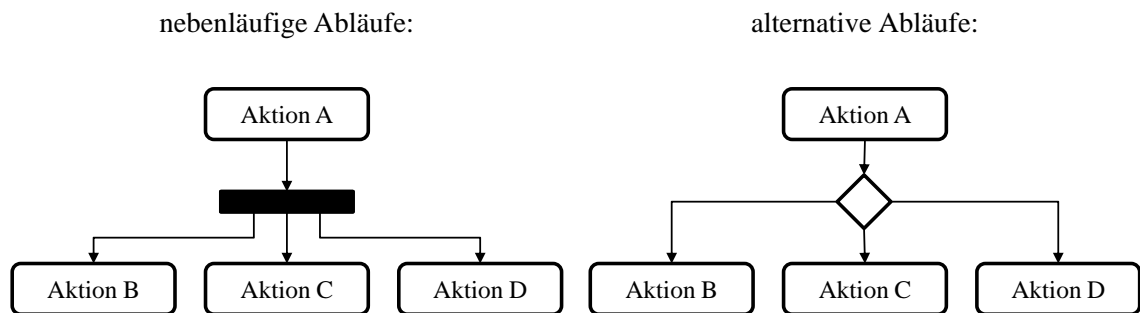


Abbildung 3-1 Aktivitätsdiagramme nach (Rupp und Queins 2012, S. 266 f.)

Die Abbildung von solchen komplexen Abläufen ist dabei durch die Kombination diverser Basiskonzepte möglich. Die Aktivitätsdiagramme benutzen dazu unter Anderem bewährte Mittel aus Datenflussdiagrammen, Petrinetzen, Struktogrammen oder Programmablaufplänen (Rupp und Queins 2012, S. 269).

Die Vorteile der UML sind ihre Universalität und Anwendungsabhängigkeit (Ebrecht und Lemmer 2008, S. 49). Sie sind in ihrer Anwendung weit verbreitet und bieten eine umfassende Darstellung, außerdem können die Diagramme in ihrem Detailgrad erweitert werden. Zusätzlich können neben den 14 vordefinierten Diagrammen mit der UML auch eigene Diagrammtypen definiert werden, bei denen eine eigene Auswahl der in ihnen benutzten Notationselemente getroffen wird (Rupp und Queins 2012, S. 15).

Es ist jedoch keine Zuordnung von Daten zu Aktivitäten möglich und Prozessregeln können nur bedingt abgebildet werden. Außerdem bieten sie nur eine eingeschränkte Benutzerfreundlichkeit (Müller 2005, S. 113).

3.2.3 Integrierte Unternehmensmodellierung

Als ein prozessorientiertes Beschreibungsmittel wird hier die Integrierte Unternehmensmodellierung (IUM) vorgestellt. Sie wurde am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Berlin entwickelt und ermöglicht es, organisationale Prozesse abzubilden, zu beschreiben, zu analysieren und zu gestalten (Mertins und Orth 2009, S. 85).

Die IUM nutzt als Grundlage die Prinzipien der objektorientierten Modellierung und aus der allgemeinen Objektstruktur werden drei generische Objektklassen abgeleitet. Ziel dieser Objektklassen ist die Abbildung der Aspekte des Systems „Produktionsunternehmen“. Die entstehenden drei Klassen sind Produkt, Auftrag und Ressource (Süssenguth 1992, S. 74). Die Objektklasse Produkt symbolisiert alle Materialien, die von einem Unternehmen produziert werden, also in das Endprodukt, das verkauft wird, einfließen. Die Informationen, die durch Planung, Steuerung und Überwachung in den Prozess einfließen, werden durch die Objektklasse Auftrag beschrieben. Die dritte Objektklasse Ressource beschreibt alle weiteren Leistungsträger, die zur Erstellung des Produkts benötigt werden. Dazu gehören neben den Mitarbeitern und Betriebsmitteln auch Dokumente oder Computersysteme (Mertins und Orth 2009, S. 85). Mithilfe des generischen Aktivitätsmodells (GAM) werden die Objekte Aktivitäten zugeordnet, wie in **Abbildung 3-2** dargestellt ist. Das GAM stellt einen direkten wechselseitigen Bezug zwischen Funktionen und Objekten des Unternehmens her (Süssenguth 1992, S. 76).

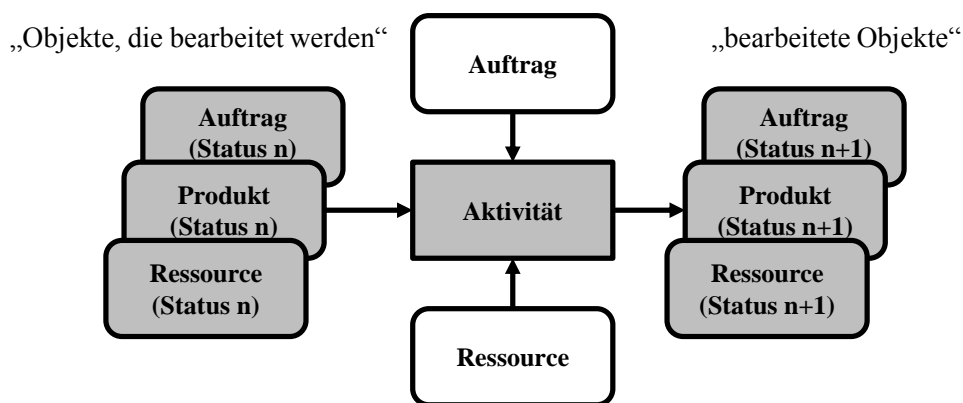


Abbildung 3-2 Generisches Aktivitätsmodell nach (Süssenguth 1992, S. 77)

Die Integrierte Unternehmensmodellierung wird unterteilt in zwei Sichtweisen, die durch die gemeinsamen drei Objektklassen verknüpft sind. In der einen Sichtweise, dem Informationsmodell, erfolgt eine Strukturierung nach Objektklassen und Merkmalsarten (Süssenguth 1992, S. 86), dazu werden die relevanten Objekte eines Unternehmens mit ihren Eigenschaften und Relationen in Form von Objektklassenbäumen abgebildet (Schwermer 1998, S. 40).

Im Funktions- oder Geschäftsprozessmodell hingegen erfolgt eine Strukturierung nach Funktionen und Abläufen. Dieses Modell dient dazu, die Funktionen und Abläufe im

Unternehmen für die Zwecke der Planung und Steuerung darzustellen. Mit einem Funktionsablauf können so ablauforganisatorische Verknüpfungen von Funktionen beschrieben werden. Dazu werden die einzelnen Elemente durch Pfeile verknüpft und deren Ablauf mithilfe unterschiedlicher Verknüpfungselemente, wie beispielweise einer Raute als Symbol für eine alternative Verzweigung, beschrieben (Süssenguth 1992, S. 86 f.).

Die Integrierte Unternehmensmodellierung zeichnet sich durch die wenigen Objektklassen aus, die leicht verständlich und erfassbar sind (Mertins und Orth 2009, S. 85). Die Verständlichkeit und Verwendbarkeit ist durch die Spezialisierung mit den Unternehmensobjekten Produkt, Auftrag und Ressource sowie der Prozessorientierung durch das GAM höher als bei der UML (Jochem 2001, S. 57).

Die Objektklassen können jedoch, anders als in anderen objektorientierten Modellierungsmethoden, nicht frei definiert werden, da die IUM drei Objektklassen als Grundlage vorgibt (Schwermer 1998, S. 45).

3.2.4 Petrinetze

Petrinetze wurden von Carl Adam Petri (Petri 1962) entwickelt, um die Koordination von Nebenläufigkeiten in Systemen beschreiben zu können. Ein Petrinetz ist formal ein bipartiter, gerichteter, endlicher Graph. Die zwei Knotenarten, mit denen ein solches Netz beschrieben wird, unterteilen sich in die Knoten, die passive und die Knoten, die aktive Zustandselemente repräsentieren. Die passiven Elemente sind die Stellen (auch als Bedingungen oder Kanäle bezeichnet) und werden durch einen Kreis dargestellt. Die anderen Knoten sind die Transitionen (auch Ereignisse oder Instanzen genannt), diese stellen aktive Zustandselemente dar und werden mit einem Balken oder einem Rechteck abgebildet (Parsch 2010, S. 144). Die Stellen sind passive Komponente und können Dinge lagern, speichern oder sich in einem Zustand befinden, wohingegen die Transitionen aktiv sind und Dinge erzeugen, verbrauchen, transportieren oder auch verändern können. Die Transitionen und Stellen werden mithilfe von gerichteten Kanten, die mithilfe eines Pfeils dargestellt werden, verbunden. Die Kanten dürfen dabei nur von Transition zu Stelle oder von Stelle zu Transition gehen, nicht aber zwei gleichartige Elemente verbinden (Reisig 2010, S. 22).

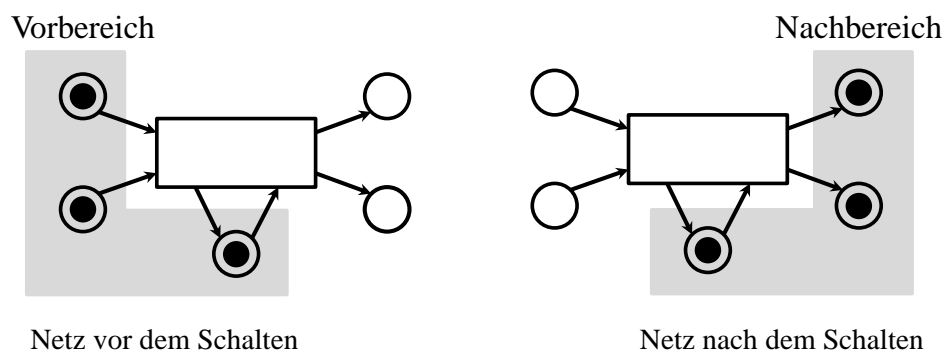


Abbildung 3-3 Schaltverhalten einer Transition nach (Gadatsch 2012, S. 23)

Um das dynamische Netzverhalten zu beschreiben, werden die Stellen mit Marken (durch einen Punkt dargestellt) belegt, die sich in dem Netz aufgrund von Schaltregeln bewegen (Gadatsch 2012, S. 73). Um das Schaltverhalten zu definieren, wird ein Netz, wie in **Abbildung 3-3** erkennbar, in zwei Bereiche unterteilt. Die Anzahl der Stellen, von denen eine Kante zu einer Transition führt, wird als Vorbereich der Transition bezeichnet. Die Menge an Stellen zu denen die Kanten einer Transition hinführen, nennt sich Nachbereich der Transition. Sind alle Stellen im Vorbereich einer Transition mit mindestens einer Marke belegt, so wird diese als aktiviert bezeichnet. Eine aktivierte Transition kann schalten, das heißt die Anzahl der Marken im Vorbereich der Transition vermindert sich auf jeder Transition um eins und gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Marken in jeder Stelle in dem Nachbereich der Transition um eins (Partsch 2010, S. 144 f.). Dieser Vorgang ist in **Abbildung 3-3** an einem exemplarischen Petrinetz dargestellt.

Mit einem Petrinetz können unterschiedliche Abläufe, wie Entscheidungen oder Parallelitäten, dargestellt werden. Vier beispielhafte Grundnetze sind in **Abbildung 3-4** dargestellt.

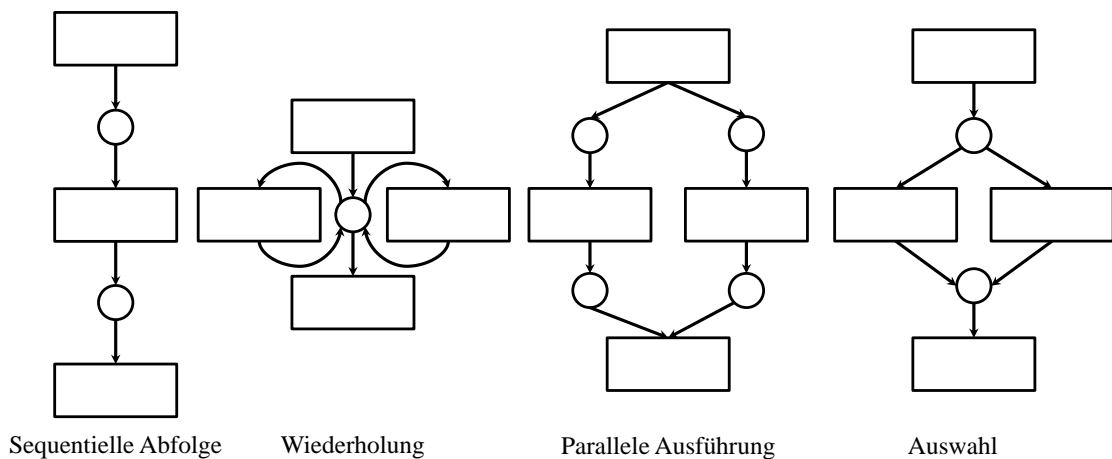


Abbildung 3-4 Einfache Grundnetze nach (Partsch 2010, S. 146)

Die hier beschriebenen Marken und Schaltvorgänge beschreiben einfache Bedingungs-Ereignisnetze, bei denen jede Stelle nur zwei Zustände kennt (entweder sie enthält eine Marke oder sie enthält keine Marke) und die Transitionen immer dann schalten, wenn alle Stellen im Vorbereich eine Marke enthalten (Gadatsch 2012, S. 74). Neben diesen einfach gehaltenen Petrinetzen existieren verschiedene Ausprägungen, welche sich durch die Art der zulässigen Marken, zusätzlichen Bedingungen an den Stellen und Kanten (beispielsweise eine Beschränkung der Anzahl an Marken, die durch eine Kante transportiert werden können) oder Schaltbedingungen an den Transitionen unterscheiden (Partsch 2010, S. 147). Außerdem besteht die Möglichkeit, den Petrinetzen eine Zeit zuzuordnen oder sie zu hierarchisieren. Die gebräuchlichsten Netzarten und ihre Merkmale sind in **Tabelle 3-5** aufgeführt. Sie werden aufgeteilt in einfache und höhere Petrinetze.

Tabelle 3-5 Merkmale von Petrinetz-Varianten nach (Gadatsch 2012, S. 75)

Grundtyp	Name	Stelle	Transition	Kante	Marke
Einfache Petrinetze	Kanal/Instanzen-Netz	Kanal	Instanz	Ungewichtet	Nicht vorhanden
	Bedingung/Ereignisnetz	Bedingung (eine Marke)	Ereignis (eine Marke)	Ungewichtet (Transport einer Marke)	Identischer Informationsgehalt (schwarze Marke)
	Stellen/Transitionennetze	Stellen (kann mehrere Marken enthalten)	Transition (mehrere Marken)	Ganzzahlig gewichtet	Identischer Informationsgehalt (schwarze Marke)
Höhere Petrinetze	Prädikat/ Transitionennetz	Prädikat (kann mehrere Marken enthalten)	Transition (kann mehrere Marken enthalten)	Ganzzahlig gewichtet	Unterschiedlicher Informationsgehalt
	Zeitbewertete Netze	Abhängig vom Netztyp	Abhängig vom Netztyp	Mit dem Zeitverbrauch gewichtet	Abhängig vom Netztyp
	Hierarchische Netze	Abhängig vom Netztyp	Abhängig vom Netztyp	Abhängig vom Netztyp	Abhängig vom Netztyp

Neben diesen Varianten kann ein Petrinetz auch mit objektorientierten Konzepten verknüpft werden, wozu jedoch kein allgemeingültiger Ansatz existiert. Eine Übersicht von unterschiedlichen Ansätzen, die zur Einbindung dieser Konzepte in Petrinetze existieren, wird von Zapf und Heinzl (Zapf und Heinzl 2000) gegeben.

Insgesamt enthalten Petrinetze wenige Elemente, sind visuell gut darstellbar und vielseitig einsetzbar (Müller 2005, S. 112). Sie sind flexibel, das heißt Komponenten, die ganz verschiedenartig sind, können mit ihnen einheitlich formuliert und kombiniert werden (Reisig 2010, S. 17). Die meisten Petrinetzklassen bieten außerdem eine mathematische Fundierung mit eindeutiger Semantik und gleichzeitig eine graphische Modellierung (Moldt 1996, S. 38). Durch die Vielzahl an verschiedenen Varianten existiert jedoch keine einheitliche Notation und von Anwendern wird die Modellierungstechnik zum Teil als zu komplex und schwer verständlich angesehen (Gadatsch 2012, S. 76).

3.2.5 Technik- und layoutorientierte Bausteine

Technik- und layoutorientierte Bausteine sind anwendungsnahe Beschreibungsmittel, die zu den anwendungsorientierten Modellierungstechniken gehören und deren Begrifflichkeit sich an den abzubildenden Systemen orientiert (Wenzel und Kuhn 2008, S. 81). Um solche Bausteine zu entwickeln, stehen mehr oder weniger klar zu umreißen Anwendungsbereiche im Vordergrund, wie beispielweise die Produktion und Logistik oder etwa Teilgebiete aus diesen Bereichen, wie flexible Fertigungssysteme.

Es wird dem Anwender ein Vorrat an Elementen angeboten, der durch vorhergehende Systemanalysen ermittelt wurde und den Anwendungsbereich abdeckt. Insgesamt wird

das Modell aus beweglichen, stationären und übergreifenden Elementen gebildet. Bewegliche Elemente sind beispielsweise Transportmittel oder Werkzeuge, wohingegen stationäre Elemente Arbeitsstationen oder Roboter sein können. Zu den übergreifenden Elementen können Pausen oder Betriebsstrategien gezählt werden (Noche und Wenzel 1991, S. 15).

Solche Modellierungstechniken können unterschiedliche Sichtweisen abbilden. Eine Möglichkeit wäre, mit ihnen ablauforientierte bzw. funktions-/oder prozessorientierte Sichten, wie etwa Fertigen, Montieren oder Prüfen, abzubilden. Wenn allerdings Elemente wie Weichen, Förderstrecken oder Lager dargestellt werden, werden aufbauorientierte, strukturierte bzw. topologieorientierte Sichtweisen mit ihnen abgebildet (Wenzel und Kuhn 2008, S. 81).

Durch den Vorrat an Elementen, der an die Erfahrungswelt des Anwenders angelehnt ist, kann, ohne dass eine abstrakte Abbildungslogik gelernt wird, modelliert werden. Die graphische Darstellung erleichtert die Wiedererkennung und durch die vorweggenommene Systemanalyse wird die Modellierung auf das wesentliche gelenkt. Die technik- und layoutorientierten Bausteine sind ein schnelles und effizientes Analysewerkzeug, mit dem angestrebt wird, soweit wie möglich ohne Programmierung auszukommen (Noche und Wenzel 1991, S. 15).

Es ist jedoch gegebenenfalls nur möglich eine aufbau- oder eine ablauforientierte Sichtweise zu betrachten, wohingegen andere Modellierungstechniken, wie beispielsweise die Petrinetze, beide Sichtweisen ermöglichen (Wenzel und Kuhn 2008, S. 81). Durch den eingeschränkten Abbildungsbereich können Probleme bei der Modellierung von Aspekten, die außerhalb des durch den Vorrat an Elemente vorgegebenen Anwendungsbereichs liegen, entstehen. Im Vorfeld der Modellierung muss der Detaillierungsgrad festgelegt werden und wenn detaillierte oder gröbere Elemente benötigt werden, ist dies nur auf umständliche Weise möglich (Noche und Wenzel 1991, S. 16).

Insgesamt bieten technik- und layoutorientierte Bausteine eine schnelle und anschauliche Modellierung, die jedoch dazu führt, dass die Flexibilität bei der Abbildung und Handhabung verloren geht.

3.3 Auswahl einer Modellierungstechnik

Die Unified Modeling Language bietet eine Menge an Funktionen und Diagrammen, die auf den objektorientierten Konzepten basieren. Die einzelnen Objektklassen eignen sich dazu, die einzelnen Elemente der Bedarf- und Kapazitätsplanung darzustellen und ihnen Merkmale zuzuweisen. Mithilfe eines Aktivitätsdiagramms können die Abläufe der Planung, inklusive Nebenläufigkeiten und Entscheidungen, dargestellt werden. Außerdem kann je nach Bedarf ein eigener Diagrammtyp für diese Aufgabenstellung definiert werden. Nachteilig an dieser Modellierungsmethode ist, dass sie eine lange Zeit für die Einarbeitung und fundierte Kenntnis über viele Diagramme und Funktionen benötigt und daher nicht benutzerfreundlich ist. Außerdem bietet sie nicht die Möglichkeit, ein dynamisches Zeitverhalten einzubinden, welches in einem späteren Schritt sinnvoll sein könnte. Die UML ist nur semiformal definiert und durch die eigene Auslegung der jeweiligen Diagramme nicht eindeutig, sodass Irrtümern entstehen können.

Die Integrierte Unternehmensmodellierung bietet für diesen Anwendungsfall eine gute Aufspaltung der zwei Sichtweisen und eignet sich durch die hohe Verständlichkeit und Verwendbarkeit für die vorgegebene Aufgabenstellung. Mithilfe der Informationssicht können die einzelnen Objektklassen definiert und mit ihren Eigenschaften übersichtlich dargestellt werden. Mit der Funktionssicht können die Abläufe der Planung, mit den jeweiligen Aktionen und den zugehörigen Objekten (Ressourcen), beschrieben werden. Der größte Nachteil der IUM ist die Ausrichtung auf die drei vordefinierten Objektklassen, die für den vorliegenden Fall nicht ausreichend sind. Außerdem bietet sie ebenfalls nur eine semiformale Darstellung und keine Einbindung eines dynamischen Zeitverhaltens.

Petrinetze sind flexibel und können nach Belieben hierarchisiert, erweitert oder verkürzt werden. Außerdem besteht über die vielen verschiedenen Varianten, die alle auf dem gleichen Konzept aufbauen, die Möglichkeit, sie an die jeweilige Aufgabenstellung anzupassen. Mithilfe objektorientierter Marken können die einzelnen Elemente der Bedarfs- und Kapazitätsplanung als Objektklassen definiert und darauffolgend verändert werden. Sie erlauben mithilfe der klaren Regeln eine formale Darstellung und bieten die Möglichkeit, ein dynamisches Zeitverhalten abzubilden.

Die technik- und layoutorientierten Bausteine sind durch die Anwendungsorientierung intuitiv und einfach in der Anwendung. Sie können direkt das Anwendungsfeld wiedergeben und benötigen zum Verständnis wenige Erläuterungen. Die Eignung für diesen Anwendungsfall ist jedoch durch die geringe Flexibilität, die sie bieten, gering. Sie ermöglichen keine objektorientierten Konzepte und durch eine, schon im Vorfeld erfolgte, Festlegung des Vorrats an Elementen, ist eine später folgende Anpassung des Modells, in Form einer Variation des Detaillierungsgrad einzelner Elemente, problematisch.

Die IUM, die UML und die technik- und layoutorientierten Bausteine bieten jeweils Eigenschaften, die sich positiv für eine Modellierung mit ihnen aussprechen. Jedoch erfüllen sie nicht alle gewünschten Eigenschaften und Beschränkungen müssten bei der Modellierung in Kauf genommen werden. Die Petrinetze hingegen erfüllen alle Eigenschaften und sind für diesen Anwendungsfall daher die am besten geeignete Methode. Aus den vielen Varianten und Möglichkeiten einer Einbindung von objektorientierten Konzepten in Petrinetze wird für die folgende Konzeptentwicklung die höhere Petri-netzklasse THORNs (Timed Hierarchical Object-Related Nets) ausgewählt, welche verschiedene bekannte Konzepte integriert und dadurch eine kompakte und effiziente Modellbildung komplexer Systeme erlaubt (Schöf et al. 1997, S. 4).

4 Entwicklung des Modells

4.1 Systemabgrenzung

4.1.1 Ausgangslage

Als Ausgangslage für das Modell wird die bestehende Fabrik als eine optimal wandlungsfähige Fabrik angenommen. Die Objekte der Fabrik sollen sich im Bedarfsfall schnell anpassen können und optimal aufeinander abgestimmt sein. Deswegen soll die Fabrik die Wandlungsbefähiger, wie sie in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt wurden, enthalten, die ermöglichen, dass die Fabrik sich neu kombinieren, erweitern und zurückbauen lässt. An diese bestehende Fabrik wird dann ein neuer Auftrag gerichtet, der eine Anpassung der Fabrik erfordert.

Es soll für das Modell ein konkreter Planungsfall betrachtet werden, welcher sich mit Hilfe der Aspekte Planungsphase, Planungsanstoß und Planungsebene (vgl. Abschnitt 2.1.2) wie folgt definieren lässt: Die Planungsphase, in der sich die Planungsaufgabe befindet, ist die Betriebsanpassungsplanung, da eine bestehende Fabrik angepasst werden soll. Der neue Auftrag verändert die Anforderungen an die Fabrik, somit ist der Planungsanstoß eine Systemlastveränderung. Die Ebene, die mit dem Modell betrachtet werden soll, ist die Systemebene. Das Modell soll also jede Planungsaufgabe, die eine Betriebsanpassung auf Systemebene enthält und durch eine Systemlastveränderung hervorgerufen wurde, abbilden können.

4.1.2 Eingrenzung des Betrachtungsraums

Mit dem Modell sollen speziell die Aspekte der Bedarfs- und Kapazitätsplanung betrachtet werden. Dabei sollen sowohl vorhandene als auch neu zu beschaffenden Kapazitäten, sowie deren Veränderungen und zeitliche Verfügbarkeit betrachtet werden.

Ein Aspekt, der mit dem Modell betrachtet werden soll, sind die Betriebsmittel, die zur Erfüllung des neuen Auftrags nötig sind. Außerdem ist für die Einplanung des Auftrags der notwendige Bedarf an Materialien für die einzelnen Bearbeitungsschritte zu ermitteln. Die Planung der Bedarfe an Hilfs- und Betriebsstoffen, also der Tertiärbedarf, sollen bei der Darstellung des Modells nicht berücksichtigt werden. Stattdessen sollen die Materialien, die für einen jeweiligen Bearbeitungsschritt benötigt werden, betrachtet werden. Das Personal, welches die Betriebsmittel nach der Umplanung betreiben soll, muss genauso wie das Personal, das zur Bereitstellung und Qualifizierung der Betriebsmittel benötigt wird, betrachtet werden.

Insgesamt soll das Modell den Fokus auf die Planung des Personals, des Materials und der Betriebsmittel legen und die anderen Bereiche vernachlässigen. Das heißt, dass beispielsweise die Flächenplanungen, die im Rahmen der Kapazitäts- und Bedarfsplanung

erfolgen, durch das Modell nicht betrachtet werden sollen. Genauso werden die Kosten, die durch die Umplanung entstehen, durch das Modell nicht abgebildet.

4.1.3 Problemstellung des Modells

Mit dem Modell sollen auf Grundlage eines bestehenden Produktionssystems die nötigen Schritte zur Umplanung dargestellt werden. Insgesamt existiert eine Reihe von Möglichkeiten, die für die Veränderungen der Fabrik zur Auswahl stehen. So können beispielweise Veränderungen der Ressourcen durch Auswahl der Strukturmaßnahmen, wie in Abschnitt 2.2.4, betrachtet werden wobei entschieden werden muss welche der Prozesse integriert, parallelisiert, verlagert, eliminiert bzw. addiert, substituiert, in der Reihenfolge verändert oder zentralisiert bzw. dezentralisiert werden. Diese Veränderungen werden jedoch mit dem betrachteten Modell nicht koordiniert, sondern es wird davon ausgegangen, dass bereits eine Koordination der Reihenfolge der Prozesse besteht. Ebenso wird davon ausgegangen, dass die, für die Anpassung an den neuen Auftrag benötigten, Ressourcen bereits im Vorfeld geplant wurden und daher in Art und Menge als bekannt angenommen werden können. Die Problemstellung, die mit dem Modell dargestellt werden soll, wird im Folgenden auf zwei wesentliche Aspekte eingeschränkt.

Einerseits müssen für die einzelnen, im Planungsablauf durchzuführenden, Schritte die passenden Ressourcen zum richtigen Zeitpunkt verfügbar sein. Für den jeweiligen Planungsschritt muss gewährleistet sein, dass das nötige Personal, das Material und die Betriebsmittel verfügbar sind. Ein Beispiel wäre der Schritt des Rüstens, zu dessen Umsetzung neben den passenden Betriebsmitteln auch das geeignete Personal verfügbar sein muss. Das Personal, das für diesen Vorgang geeignet ist, kann aber zu dem Zeitpunkt bereits an anderen Betriebsmitteln beschäftigt sein. Die nachfolgenden Schritte der Fabrikumplanung verzögern sich in diesem Fall, da auf die Verfügbarkeit des Personals gewartet werden muss. Erst wenn alle notwendigen Ressourcen vorhanden sind, kann die Rüstung erfolgen. Insgesamt muss also der zeitliche Aspekt der Ressourcenverfügbarkeit betrachtet werden.

Andererseits soll die Beschaffung und Qualifizierung der notwendigen Ressourcen mit dem Modell abgebildet werden. Neben einer Neubeschaffung von Ressourcen ist auch eine Anpassung bestehender Ressourcen möglich, wenn diese die passenden Voraussetzungen erfüllen. Im Falle der Betrachtung des Personals können beispielweise Umschulungen oder Qualifizierungen der vorhandenen Mitarbeiter an neue Aufgabenfelder erfolgen, sodass eine optimale Nutzung der vorhandenen Ressourcenkapazitäten ermöglicht wird. Sind trotz der Betrachtung der Anpassungsmöglichkeiten nicht die passenden Ressourcen verfügbar, muss eine Neuanschaffung dieser beauftragt werden. Bei passenden Ressourcen kann eine zusätzliche Neuanschaffung außerdem zur schnelleren Umsetzung des Auftrags führen. Der Nutzen einer solchen Neuanschaffung ist jedoch

abhängig davon, ob die dadurch erreichte zeitliche Verbesserung die zusätzlich anfallenden Kosten ausgleicht.

Zusammengefasst gesagt, betrachtet der erste Aspekt die zeitliche Koordination der Ressourcenverfügbarkeit, wohingegen mit dem zweiten Aspekt die Beschaffung der notwendigen Ressourcen betrachtet wird. Um ein vollständiges Modell zu erreichen, müssen beide Aspekte in dem Modell dargestellt und miteinander verknüpft werden.

4.2 Betrachtete Komponenten der Fabrik

4.2.1 Aufbau des Modells

Zur Entwicklung des Modells wird die Fabrik auf die wesentlichen Komponenten reduziert. Die Komponenten geben die, für die gegebene Aufgabenstellung, benötigten Aspekte der Fabrik wieder und werden dann in einem folgenden Schritt auf die Elemente eines Petrinetzes übertragen.

Diese Komponenten sind so definiert, dass sie sich mit einem objektorientierten Petrinetz darstellen lassen. Sie werden hier zur besseren Verständlichkeit indes erst ohne die Umsetzung in diese Modellierungstechnik beschrieben.

Die Fabrik wird dabei in die, aus der Bedarfs- und Kapazitätsplanung bekannten, drei Elemente Material, Personal und Betriebsmittel eingeteilt. Diese drei werden zusätzlich um die Komponente Fabrikmodul ergänzt, welche einen Fertigungsschritt mit den dafür benötigten Kapazitäten abbildet.

4.2.2 Material

Das Element Material beschreibt das Material, welches die Fertigung durchläuft und dem Sekundärbedarf zugeordnet ist. Es beschreibt also alle Materialien, die für einen Fertigungsschritt benötigt werden, mit Ausnahme der Tertiärbedarfe. Die Hilfs- und Betriebsstoffe werden als konstant vorhanden betrachtet und werden daher mit dem Modell nicht wiedergegeben. Bei der Definition des Elements Material wird nicht zwischen Rohstoffen, Teilen oder Gruppen unterschieden, sondern alles, unabhängig von der Beschaffenheit, einheitlich als Material bezeichnet.

Die jeweiligen Materialien werden innerhalb eines Fertigungsschrittes transformiert, das heißt, die Eingangsmaterialien werden zu den Ausgangsmaterialien umgewandelt. Dabei können mehrere Eingangsmaterialien zu einem Ausgangsmaterial kombiniert werden. Dieser Fall tritt ein, wenn mehrere verschiedene Materialien in einem Fertigungsschritt zu dem ausgehenden Material kombiniert werden. Dies führt dazu, dass die Anzahl an eingehenden Materialien nicht gleich der Anzahl ausgehender Materialien ist.

Insgesamt beschreibt das Element Material nicht nur das Material, das gefertigt wurde oder im Lager vorliegt, sondern auch benötigtes Material. Für dieses benötigte Material

wird dann mithilfe des Modells die Beschaffungsart abgebildet. Das Material kann entweder über die eigene Fertigung produziert oder fremdbeschafft werden, falls es nicht in ausreichender Menge im Lager vorhanden ist.

4.2.3 Personal

Das Element Personal beschreibt einen Mitarbeiter mit seinen Eigenschaften und Fähigkeiten. Für das Element wird nur das Personal betrachtet, das in der Umplanung oder in der Produktion arbeitet, das heißt nur die Mitarbeiter, die zur Werkstattebene gehören und Arbeit an den Betriebsmitteln oder dem Material verrichten, werden betrachtet. Die Mitarbeiter, die organisatorische Aspekte wie die Einstellung neuer Mitarbeiter oder die Auswahl einer geeigneten Maschine ausführen, werden im Rahmen dieses Modells vernachlässigt, da sie im Vergleich zu den anderen Mitarbeitern nur kurzfristig benötigt werden und neben diesen Tätigkeiten noch weitere ausführen können. Zudem wird aus der Modellsicht kein Unterschied zwischen den Mitarbeitern, die für die spätere Produktion zuständig sind und denen, die im Umplanungsprozess (zum Beispiel bei der Umrüstung der Maschinen) beteiligt sind, gemacht. Abhängig von deren Verfügbarkeit und deren Eignung können sie an unterschiedlichen Prozessen beteiligt sein und werden nicht pauschal einem Prozess zugeordnet.

Mit dem Element Personal wird nicht nur das Personal, welches schon in der Fabrik existiert, beschrieben, sondern auch das Personal, das für einen Auftrag gebraucht wird und noch nicht in der Fabrik vorhanden ist. Um dieses Personal zu erhalten, kann entweder Personal neu qualifiziert oder auch neu eingestellt werden. Das Modell muss in der Lage sein, diese Prozesse darzustellen und zeitlich einzuordnen.

In der Fabrik vorhandenes Personal kann immer nur temporär eingesetzt werden und wird im Gegensatz zum Material nicht verbraucht. Die in einen Prozess eingehenden Mitarbeiter müssen deswegen immer gleich den ausgehenden Mitarbeitern sein und werden gegebenenfalls durch den Prozess verändert.

4.2.4 Betriebsmittel

Das Element Betriebsmittel bezeichnet die technischen Arbeitsmittel, mit denen ein Fertigungsschritt erfolgt und beschreibt die Betriebsmittel, die benötigt werden, um ein Material von einem Bearbeitungsschritt zum nächsten zu bringen. Jedes dieser Elemente enthält Kennwerte, die Angaben zu der Art der Betriebsmittel machen. Dazu gehören auch Angaben, was mit ihrer Hilfe gefertigt werden kann und wie lange sie dazu brauchen.

Zusätzlich zu diesen Angaben können die Elemente eine Qualifizierung haben, das bedeutet, dass sie auf einen Fertigungsprozess ausgerichtet sind und nur durch vorherige Veränderungen andere Bearbeitungen durchführen können. Zu allen Betriebsmitteln

gehört deshalb neben der aktuellen Qualifizierung auch die Angabe der bestehenden Qualifizierungsmöglichkeiten. Die Betriebsmittel haben also keine fest zugeordnete Funktion, sondern können bei veränderten Anforderungen auch umqualifiziert werden. Außerdem können mit Hilfe eines solchen Elements Angaben über benötigte Betriebsmittel gemacht werden. Diese können dann, falls benötigt, neu angeschafft werden.

Im System vorhandene Betriebsmittel werden nicht verbraucht, sondern temporär genutzt und stehen im Anschluss wieder zur Verfügung. Sie werden mit den Prozessen gegebenenfalls abgewandelt, sodass sich ihr Zustand oder ihre Qualifizierung verändert. Eine solche Veränderung wäre der Rüstungsprozess, bei dem eine Maschine für die Produktion vorbereitet wird und dadurch einen neuen Zustand im System erhält.

4.2.5 Fabrikmodule

Die drei Elemente Betriebsmittel, Personal und Material werden durch das Element Fabrikmodul zusammengefasst. Ein solches Modul orientiert sich dabei an den Fabrikmodulen, die im Abschnitt 2.2.4 vorgestellt wurden. Im Gegensatz zu dem dort vorgestellten Ansatz, bei dem die Mitarbeiter nicht als Elemente eines Moduls definiert werden, werden diese hier jedoch mit einbezogen, da sie im hier vorgestellten Rahmen planbar sind.

Die Module dienen zur Repräsentation der einzelnen Fertigungsschritte mit dem dafür benötigtem Personal, dem benötigten Material und den benötigten Betriebsmitteln. Dabei kann ein Modul, abhängig von dem betrachteten Fertigungsschritt, eine beliebige Anzahl an Betriebsmitteln, Personal und Material beinhalten. Das Modul gibt an, welches Personal für den jeweiligen Fertigungsschritt auf den Betriebsmitteln benötigt wird, welche Materialien in das Modul eingehen und welche Materialien das Ausgangsprodukt des Moduls darstellen.

Die Module sind durch die Eigenschaften der Wandlungsfähigkeit unabhängig voneinander und können daher einzeln betrachtet und geplant werden. Die einzige Verknüpfung die sie haben, ist das ein- und ausgehende Material, das heißt ein Modul kann nur produzieren, wenn es die Materialien aus dem vorhergegangenen Schritt oder über Fremdbeschaffung erhalten hat.

Alle Module zusammen geben die gesamte Fertigung eines Endprodukts. Dabei können die Module in unterschiedlicher Reihenfolge parallel oder seriell ausgeführt werden, um das Endprodukt zu erhalten. Die Anzahl der Module ist nicht beschränkt, sodass die Fabrik beliebig groß sein kann.

Die bestehende Fabrik ist in Form von den Modulen und den zugehörigen Elementen als Ausgangslage vorhanden. Um die neue Auftragslage in dieses bestehende System einzubetten, muss der aus dem Auftrag resultierende Soll-Zustand der Fabrik mit Hilfe der vorgestellten Module angegeben werden. Ein Modul beschreibt also eine Art Ar-

beitszelle und fasst die Informationen über Material, Personal und Betriebsmittel für einen Fertigungsschritt zusammen.

5 Elemente des Modells

5.1 Einleitung

Die Komponenten wurden so definiert, dass sie sich durch Objektklassen eines objektorientierten Petrinetzes darstellen lassen. Als Grundlage dazu wird die Petrinetzklasse THORNs (Timed Hierarchical Object-Related Nets) gewählt, welche bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt wurde. In ihr werden statt attributloser Marken, komplexe Objekte im Sinne einer objektorientierten Programmiersprache verwendet (Schöf et al. 1997, S. 4). Die Markentypen und Netzelemente werden in der Programmiersprache C++ ausgedrückt und bieten dadurch eine komfortable Möglichkeit zur weiteren Spezifizierung von Stellen und Transitionen sowie verschiedenen Kantentypen (Schöf 1997, S. 35)

Die Darstellung des Modells erfolgt mit einigen Abänderungen und Einschränkungen der verwendeten Funktionen. Eine formale Definition des verwendeten Netzes erfolgt dabei nicht, stattdessen werden die Komponenten des Modells ausgearbeitet und auf die Darstellung mit einem solchen Petrinetz übertragen. Die Elemente des Netzes werden außerdem im Rahmen dieser Arbeit nicht, wie bei den THORNs üblich, mit der Sprache C++ angegeben, sondern nur in ihrer Verwendung erläutert, da die Darstellung ansonsten zu umfangreich wäre. Eine detaillierte Erläuterung der THORNs erfolgt im Anhang (Abschnitt 9).

Die vier im vorherigen Kapitel dargestellten Komponenten bilden die Objektklassen für die Marken des Petrinetzes. Sie erhalten unterschiedliche Attribute, die sich im Netz je nach Gegebenheit anpassen können. Entsprechend der Objektklassen existieren vier verschiedene Stellentypen, die in dem Netz verwendet werden. Sie werden ergänzt durch die Transitionen, die zur Abbildungen der Tätigkeiten und Vorgehen bei der Umplanung benutzt werden. Als letztes Element des Petrinetzes sind die Kanten als Verknüpfung der Komponenten des Fabriksystems zu nennen.

Im Folgenden werden die Elemente des benutzten Petrinetzes vorgestellt und deren Verwendung im Modell näher erläutert.

5.2 Marken

5.2.1 Generelles zu den Marken im Modell

Die Marken in dem Modell sollen alle zu einer von vier Objektklassen zugeordnet werden können. Diese vier Objektklassen orientieren sich an den Komponenten, die zur Fabrikplanung betrachtet werden sollen und in Kapitel 4.2 erläutert wurden.

Für die jeweiligen Objektklassen werden die Attribute definiert, die zur Beschreibung der Komponenten dienen. Der besseren Übersicht halber werden die Bezeichner der Attribute im Folgenden durch Unterstreichung gekennzeichnet. In die Objektklassen können auch Funktionen integriert werden, dieses wird jedoch im Rahmen dieses Konzeptentwurfs außer Acht gelassen, da zuerst das generelle Vorgehen mit dem dargestellten Modell deutlich werden soll.

Alle Marken besitzen eine eindeutige Objektidentität, die in den Marken automatisch generiert wird, wie in Abschnitt 2.3.3 bereits angeführt wurde. Außerdem besitzen sie ein Attribut Zeitstempel wie er in den THORNs (Anhang 9) definiert wurde. Dieser Zeitstempel gibt an, wann eine Marke für eine Transition verfügbar ist. Die Dauer, die die Transition zum Schalten benötigt, wird in dem Zeitstempel der Marke vermerkt, sodass sie von der nächsten Transition erst wieder verwendet werden kann, wenn der Zeitstempel keine höhere Zeit als die globale Zeit angibt.

Marken werden nicht dargestellt, weil sie zu komplex sind und nur etwas über den Zustand des Netzes aussagen könnten, wenn sie mit ihren Attributen dargestellt würden. Die Darstellung der Marken mit ihren Attributen in dem jeweiligen Petrinetz ist aus Platzmangel jedoch nicht möglich und würde das ganze Netz komplex und unübersichtlich gestalten. Die Zusammenhänge des Netzes werden deshalb durch ein Netz ohne Marken dargestellt. Um das Schaltverhalten der Netze zu beschreiben, werden die Objektklassen mit ihren Attributen dargestellt und die Vorgänge im Anschluss an die Transitionen detailliert an einem Beispiel illustriert.

5.2.2 Objektklasse Material

Die Objektklasse Material beschreibt alle Materialien, wie sie in Abschnitt 4.2.2 dargestellt wurden. Die Klasse enthält ein Attribut Materialnummer zur Beschreibung der Art des Materials. Mit Hilfe dieser Nummer können genauere Informationen über das Material ermittelt werden, beispielsweise an welchen Betriebsmitteln es bearbeitet werden soll. Jede Marke, die das gleiche Material enthält, bekommt somit die gleiche Materialnummer zugewiesen. Wenn eine Transition Materialien verändert, erfolgt die Ausgabe von Marken mit, dem Endmaterial entsprechend, angepassten Materialnummern. Mit der Materialnummer sind die technischen Daten des Materials verknüpft, sodass man mit ihr alle nötigen Informationen ermitteln kann.

Um Material, das benötigt wird aber noch nicht vorhanden ist, abzubilden, bekommt es das Attribut Status. Dieser kann entweder „vorhanden“ oder „benötigt“ angeben. Abhängig von dem Status können dann die entsprechenden Transitionen durchgeführt werden.

Insgesamt muss die Objektklasse Material die in **Tabelle 5-1** aufgeführten Attribute enthalten:

Tabelle 5-1 Attribute der Objektklasse Material

Objekt	Attribute
Material	Zeitstempel
	Materialnummer
	Status (vorhanden / benötigt)

5.2.3 Objektklasse Personal

Die Objektklasse Personal benötigt eine Identifizierungsnummer, um die Mitarbeiter eindeutig zu erkennen. Diese ist im Fall von bereits vorhandenen Mitarbeitern das Attribut Mitarbeiternummer. Wenn das Personal noch in Planung ist und noch nicht eingestellt wurde, erhält das Attribut zunächst als Wert eine Identifikationsnummer zugewiesen, die dann durch die Personalnummer ersetzt werden kann, wenn ein passender Mitarbeiter eingestellt wurde. Die Mitarbeiternummer repräsentiert die gesamten Daten des Mitarbeiters, wie die persönlichen Angaben zu Name und Alter, damit sie nicht alle einzeln abgespeichert werden müssen.

Zu den benötigten Attributen gehört außerdem die vorhandene Qualifizierung, die beispielsweise angibt, welche Tätigkeiten der Mitarbeiter ausführen und welche Betriebsmittel er bedienen kann. Die Qualifikation kann sich im Laufe der Zeit verändern, wes-

wegen mit dem Attribut benötigte Qualifizierung angegeben wird welche Qualifikation der entsprechende Mitarbeiter erhalten soll.

Um die benötigte Qualifizierung erreichen zu können, wird jeweils angegeben, auf welchen Betriebsmitteln diese Qualifizierung ausgeführt werden kann. Dies geschieht mit dem Attribut Betriebsmittel für Qualifikation, welches die Anzahl, Art und Qualifikation der benötigten Betriebsmittel vorgibt.

Ob ein Mitarbeiter bereits in der Fabrik vorhanden ist oder noch eingestellt werden muss, kann mit dem Attribut Status, ähnlich dem Status des Materials angegeben werden. Ist das Personal nicht vorhanden, gibt der Status an, ob das benötigte Personal neu eingestellt werden soll oder ob es durch Umschulung von bereits vorhandenen Mitarbeitern qualifiziert werden soll. Der Status kann also die möglichen Werte „vorhanden“, „Neueinstellung“ und „Umschulung“ annehmen.

Zur Übersicht sind in **Tabelle 5-2** die Attribute der Objektklasse Personal und deren mögliche Werte aufgeführt.

Tabelle 5-2 Attribute der Objektklasse Personal

Objekt	Attribute		
Personal	Zeitstempel		
	Mitarbeiternummer		
	vorhandene Qualifizierung		
	benötigte Qualifizierung		
	Status (vorhanden / Neueinstellung / Umschulung)		
	Betriebsmittel für Qualifikation		
	Betriebsmittelart	Betriebsmittelqualifikation	Anzahl
...			

5.2.4 Objektklasse Betriebsmittel

Die Objektklasse Betriebsmittel bekommt ebenfalls eine Identifizierung, die bei vorhandenen Betriebsmitteln die Inventarnummer ist. Bei noch anzuschaffenden Betriebsmitteln wird in dieses Attribut, bis eine entsprechende Inventarnummer vorhanden ist, eine Identifikationsnummer eingetragen. Mit ihr können die, in der Fabrik vorhandenen, Betriebsmittel zugeordnet und ihre Eigenschaften ermittelt werden.

Um die Betriebsmittel einer Aufgabe zuzuordnen, müssen diese nach ihrer Art unterschieden werden, dazu enthalten die Marken das Attribut Betriebsmittelart. Mit dieser Art können dann die, für einen Fertigungsschritt benötigten, Betriebsmittel vorgegeben werden.

Die meisten Betriebsmittel haben außerdem unterschiedliche Qualifizierungsmöglichkeiten, mit denen unterschiedliche Bearbeitungen möglich sind. Abhängig von dieser Qualifizierung können unterschiedliche Produkte auf ihnen gefertigt werden. Um diese zu beschreiben, enthalten die Marken einerseits das Attribut vorhandene Qualifizierung, um die aktuelle Qualifikation anzugeben und andererseits das Attribut benötigte Qualifikation, mit dem eine gewünschte Veränderung der Betriebsmittel angegeben wird.

Wenn die passenden Betriebsmittel noch nicht vorhanden sind, werden entsprechende Marken in das Netz gebracht, die den Bedarf der Betriebsmittel darstellen. Um diese Marken von denen, die vorhandene Betriebsmittel erhalten, zu trennen, erhalten sie das Attribut Status. Eine Marke der Objektklasse Betriebsmittel kann den Status „vorhanden“, „Neubeschaffung“ oder „Umqualifizierung“ haben. Folglich kann neben den neu angeschafften Betriebsmitteln auch die Umqualifizierung der bestehenden Betriebsmittel mit dem Modell abgebildet werden.

Um das Personal, welches zum Ausführen von Vorgängen, wie der Qualifizierung der Betriebsmittel oder dem Aufbau von Betriebsmitteln, benötigt ist, zu identifizieren, existieren die Attribute Personal für Aufbau und Personal für Qualifizierung. Sie geben die jeweilige Qualifizierung, die die Mitarbeiter haben analog zu den Qualifizierungen, die in der Objektklasse Personal gegeben sind und ermöglichen die Auswahl der passenden Mitarbeiter.

Ein weiteres Attribut, dass die Marken der Objektklasse Betriebsmittel besitzen, ist der Zustand, welcher angibt, in welcher Lage sich die Betriebsmittel befinden. Das Attribut kann die Werte „gerüstet“, „produziert“, „aufgebaut“ oder „frei“ annehmen, je nachdem welche Transition vorher durchlaufen wurde und abhängig von dem vorherigen Zustand erfolgt mit den Transitionen dann eine Veränderung des Zustands der Marken.

Die **Tabelle 5-3** fasst die vorgestellten Attribute zusammen.

Tabelle 5-3 Attribute der Objektklasse Betriebsmittel

Objekt	Attribute						
Betriebsmittel	Zeitstempel						
	Inventarnummer						
	Betriebsmittelart						
	vorhandene Qualifizierung						
	benötigte Qualifizierung						
	Status (vorhanden / Neubeschaffung / Umqualifizierung)						
	Zustand (gerüstet/ produziert / aufgebaut / frei)						
	Personal für Aufbau <table border="1" data-bbox="475 927 960 1043"> <thead> <tr> <th data-bbox="475 927 836 967">Qualifizierung</th> <th data-bbox="836 927 960 967">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="475 967 836 1003"></td> <td data-bbox="836 967 960 1003"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="475 1003 836 1043"></td> <td data-bbox="836 1003 960 1043"></td> </tr> </tbody> </table>	Qualifizierung	Anzahl				
	Qualifizierung	Anzahl					
	...						
	Personal für Qualifikation <table border="1" data-bbox="475 1115 960 1232"> <thead> <tr> <th data-bbox="475 1115 836 1155">Qualifizierung</th> <th data-bbox="836 1115 960 1155">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="475 1155 836 1191"></td> <td data-bbox="836 1155 960 1191"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="475 1191 836 1232"></td> <td data-bbox="836 1191 960 1232"></td> </tr> </tbody> </table>	Qualifizierung	Anzahl				
	Qualifizierung	Anzahl					
...							

5.2.5 Objektklasse Fabrikmodul

Die Objektklasse Fabrikmodul enthält, genau wie die anderen Objektklassen, ein Attribut, mit dem die Objekte einer Klasse unterschieden werden können. Mithilfe des Attributs Fabrikmodulnummer können die unterschiedlichen Module identifiziert werden. Um das jeweilige Fabrikmodul einem Auftrag zuzuordnen, muss es außerdem ein Attribut Auftragsnummer geben, dass die Module mit dem Auftrag verknüpft.

Ein Status gibt an, wie weit das, mit der jeweiligen Marke betrachtete, Fabrikmodul bereits fertiggestellt ist. So kann es beispielsweise den Status „gerüstet“, „produziert“ oder „neu“ haben.

Mit den Marken der Objektklasse Fabrikmodul werden Vorgaben für die Komponenten des jeweiligen Moduls getroffen. Eine Schwierigkeit dabei ist, dass das Modul keine feste Zahl der unterschiedlichen Komponenten vorgibt. Die Anzahl des Personals, des Materials und der Betriebsmittel, die zu einem Fertigungsschritt benötigt werden, kann unterschiedlich groß sein, weswegen die benötigten Ressourcen für das jeweilige Modul, wie in **Tabelle 5-4** erkennbar ist, mithilfe von Tabellen mit erweiterbarer Zeilenanzahl vermerkt werden.

Eine Marke der Objektklasse Fabrikmodul enthält Angaben über die eingehenden und ausgehenden Materialien. Dazu gibt es das Attribut Eingangsmaterialien, welches die Eingangsmaterialnummern mit der jeweiligen Menge, in der sie gebraucht werden, vermerkt. Genauso gibt es auch das Attribut Ausgangsmaterialien, welches die Ausgangsmaterialnummern mit der Menge, in der sie produziert werden sollen, angibt.

Um anzugeben auf welcher Maschine das Material produziert wird und um die benötigten Betriebsmittel für das Modul zu spezifizieren, gibt es das Attribut Benötigte Betriebsmittel, welches die geforderte Betriebsmittelart und die Betriebsmittelqualifizierung sowie die jeweilige Menge vorgibt. Außerdem müssen für die Objektklasse Attribute vorliegen, die die für die Ausführung des Moduls benötigten Mitarbeiter angeben. Dazu gibt es die Attribute Personal für Produktion und Personal für Rüstung, welche die Personalqualifizierung und Menge des Personals zum Rüsten und für die Produktion vorgeben.

Zur Darstellung des Zeitverhaltens muss eine Marke der Objektklasse Fabrikmodul außerdem die Zeitdauer, die zur Ausführung der Produktion und des Rüstens des Moduls benötigt werden, beinhalten. Mit den Attributen Produktionszeit und Rüstzeit können dann die Transitionen den ausgehenden Marken die entsprechenden Zeitdauern vergeben.

Um feststellen zu können, ob der Auftrag vollständig ist und das Material des letzten Auftrags schon produziert wurde, enthält die Objektklasse außerdem das Attribut letztes Modul. Alle Module, bis auf das Modul, welches das Endmaterial herstellt, enthalten

den Wert „falsch“ und nur das allerletzte Modul enthält den Wert „wahr“. In **Tabelle 5-4** sind alle Attribute, die die Objektklasse Fabrikmodul enthält, dargestellt.

Tabelle 5-4 Attribute der Objektklasse Fabrikmodul

Objekt	Eigenschaften								
Fabrikmodul	Zeitstempel								
	Fabrikmodulnummer								
	Auftragsnummer								
	Status (gerüstet/produziert/neu)								
	Eingangsmaterialien <table border="1" data-bbox="459 795 944 913"> <thead> <tr> <th data-bbox="459 795 821 835">Eingangsmaterialnummer</th> <th data-bbox="821 795 944 835">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="459 835 821 875"></td> <td data-bbox="821 835 944 875"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="459 875 821 913"></td> <td data-bbox="821 875 944 913"></td> </tr> </tbody> </table> ...	Eingangsmaterialnummer	Anzahl						
	Eingangsmaterialnummer	Anzahl							
	Ausgangsmaterialien: <table border="1" data-bbox="459 983 951 1102"> <thead> <tr> <th data-bbox="459 983 826 1023">Ausgangsmaterialnummer</th> <th data-bbox="826 983 951 1023">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="459 1023 826 1064"></td> <td data-bbox="826 1023 951 1064"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="459 1064 826 1102"></td> <td data-bbox="826 1064 951 1102"></td> </tr> </tbody> </table> ...	Ausgangsmaterialnummer	Anzahl						
	Ausgangsmaterialnummer	Anzahl							
	Personal für Rüstung <table border="1" data-bbox="459 1171 944 1290"> <thead> <tr> <th data-bbox="459 1171 821 1211">Qualifizierung</th> <th data-bbox="821 1171 944 1211">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="459 1211 821 1252"></td> <td data-bbox="821 1211 944 1252"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="459 1252 821 1290"></td> <td data-bbox="821 1252 944 1290"></td> </tr> </tbody> </table> ...	Qualifizierung	Anzahl						
	Qualifizierung	Anzahl							
Personal für Produktion <table border="1" data-bbox="459 1359 944 1478"> <thead> <tr> <th data-bbox="459 1359 821 1400">Qualifizierung</th> <th data-bbox="821 1359 944 1400">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="459 1400 821 1440"></td> <td data-bbox="821 1400 944 1440"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="459 1440 821 1478"></td> <td data-bbox="821 1440 944 1478"></td> </tr> </tbody> </table> ...	Qualifizierung	Anzahl							
Qualifizierung	Anzahl								
Benötigte Betriebsmittel <table border="1" data-bbox="459 1547 1353 1666"> <thead> <tr> <th data-bbox="459 1547 718 1588">Betriebsmittelart</th> <th data-bbox="718 1547 1093 1588">Betriebsmittelqualifikation</th> <th data-bbox="1093 1547 1353 1588">Anzahl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="459 1588 718 1628"></td> <td data-bbox="718 1588 1093 1628"></td> <td data-bbox="1093 1588 1353 1628"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="459 1628 718 1666"></td> <td data-bbox="718 1628 1093 1666"></td> <td data-bbox="1093 1628 1353 1666"></td> </tr> </tbody> </table> ...	Betriebsmittelart	Betriebsmittelqualifikation	Anzahl						
Betriebsmittelart	Betriebsmittelqualifikation	Anzahl							
Rüstzeit									
Produktionszeit									
letztes Modul (wahr / falsch)									

5.3 Stellen

Jede Stelle kann nur Marken einer der vier Objektklassen enthalten. Diese Objektklasse wird in den THORNs eigentlich neben der jeweiligen Stelle in eckigen Klammern angegeben, wird aber hier zur Übersichtlichkeit und schnelleren Verständlichkeit durch farbige Markierung, wie in **Abbildung 5-1** erkennbar, hervorgehoben. Das erspart die Angabe der Klasse in dem Modell und verringert so die Anzahl der Beschriftungen im Netz. Das Personal wird blau, die Betriebsmittel gelb, das Material rot und das Fabrikmodul grün dargestellt und jeweils mit dem Anfangsbuchstaben des Namens in der Stelle gekennzeichnet.

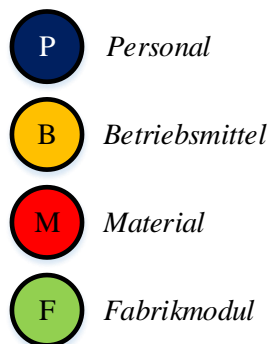


Abbildung 5-1 Stellentypen

Es gibt für das Modell drei Stellen, die eine wichtige Rolle spielen und grundlegend für das Modell sind. Für die drei Objektklassen Personal, Betriebsmittel und Material existieren jeweils Stellen, die eine Art Lager symbolisieren. Diese Lager fassen am Anfang alle Marken der entsprechenden Objektklasse zusammen und geben den Lagerbestand an vorhandenem Material, die insgesamt vorhandenen Mitarbeiter und die in der Fabrik bestehenden Betriebsmittel an. Sie werden dann um die neu hinzugefügten Marken ergänzt und geben immer die frei verfügbaren Ressourcen an.

Neben diesen drei Lagerstellen existieren in dem Netz weitere Stellen der vier Objektklassen. Sie werden an der verwendeten Stelle genauer mit ihrer Funktion erläutert.

5.4 Transitionen

Eine Transition dient dazu, die Veränderungen, die an den Marken ausgeführt werden, darzustellen. Sie kann jeden beliebigen Vorgang, an dem die Marken beteiligt sind, darstellen, beschreibt also die Vorgänge in der Ausführung des Auftrags. Transitionen werden hier durch Rechtecke dargestellt und erhalten einen Namen, mit dem sie eindeutig identifiziert werden. Eine beispielhafte Transition mit einigen Kanten ist in **Abbildung 5-2** dargestellt.

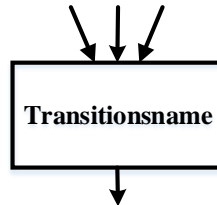


Abbildung 5-2 Darstellung einer Transition

Schaltbedingungen, Schaltaktionen und Schaltdauerfunktionen werden aus dem Ansatz der THORNs übernommen, jedoch gelten ein paar zusätzliche Regeln für das Modell. Die Marken an einer Transition können zu unterschiedlichen Klassen gehören und müssen in der gleichen Menge in die Aktion ein- und ausgehen. Eine Ausnahme bildet dabei die Objektklasse Material, da in eine Transition mehrere Materialien eingehen können, die dann, kombiniert zu einem Endmaterial, wieder ausgegeben werden. Bei den restlichen Objektklassen kann sich die Menge der Marken, die ein- und ausgehen, durch eine Transition jedoch nicht verändern und explizit dieselbe Marke muss wieder ausgegeben werden. Beispielsweise kann ein Mitarbeiter, der an einer Transition beteiligt ist, durch diese nicht aufgebraucht werden. Die gleiche Person die in sie eingeht, muss also wieder in Form einer Marke ausgegeben werden. Dies gilt für die Marken der Klasse Betriebsmittel und der Klasse Fabrikmodul in gleicher Weise und die einzige Ausnahme existiert, wenn das Attribut Status der Marken den Wert „benötigt“ hat. In diesem Fall muss nicht dieselbe Marke, die in eine Transition eingegangen ist, auch wieder ausgegeben werden, da die Marke kein real existierendes Objekt beschreibt, sondern nur einen Vergleichswert angibt.

Die Attribute der Marken werden durch die Transitionen verändert. Dazu führt die Schaltaktion, die die eingehende Marke mit veränderten Attributen wieder ausgibt. Der Vorgang der Qualifizierung eines Mitarbeiters würde beispielsweise eine Veränderung des Attributs vorhandene Qualifizierung der eingehenden Marke hervorrufen. Welche Veränderungen vorgenommen werden, wird abhängig von der Schaltbedingung und der Schaltaktion bestimmt.

Das Zeitverhalten wird mithilfe der Schaltdauer und der globalen Uhr, wie in den THORNs erläutert, angewendet. Eine Transition braucht eine gewisse Zeit, um die jeweilige Aufgabe zu verrichten. Für die Dauer sind die Marken, die von der Transition

entnommen wurden, nicht für andere Transitionen verfügbar, dazu bekommen ausgehende Marken die Dauer in ihrem Zeitstempel zu der aktuellen Zeit addiert. Sie liegen dann zwar in der entsprechenden Stelle des Nachbereichs, können von einer anderen Transition aber erst wieder verwendet werden, wenn die jeweilige Zeitdauer durch die globale Uhr erreicht ist. Diese ist in den THORNs so definiert, dass sie immer dann, wenn keine Transition mehr schalten kann, weiter geschaltet wird. Die Transitionen können also nur durch Marken, deren Zeitstempel entweder gleich oder kleiner als die globale Uhr ist, aktiviert werden.

Transitionen besitzen eine unbegrenzte Schaltkapazität, sodass beliebig oft eine Aktion zur selben Zeit durchgeführt werden kann, das heißt, sie können solange schalten, bis keine Marken mehr vorhanden sind, die die Schaltbedingungen erfüllen. Erst wenn dies der Fall ist, wird die globale Uhr weiter gestellt, sodass auch die Marken, die einen später terminierten Zeitstempel haben, benutzt werden können.

Für Transitionen, die nicht näher aufgeschlüsselt sind und nur angeben, dass noch weitere Transitionen, die auf eine Stelle zugreifen, vorhanden sind, wird die Bezeichnung [...] eingeführt. Eine Transition, die mit [...] bezeichnet ist, kann für mehrere Transitionen stehen und wird für das betrachtete Netz nicht näher ausgeführt. Sie stellt also eine Schnittstelle der Marke zu anderen Netzen dar. Aus der Sicht des betrachteten Netzes ist daher nicht bekannt, wann weitere Transitionen schalten und welche Folgen diese auf die Marken in der Stelle haben. Die mit [...] bezeichneten Transitionen müssen dann in anderen Netzen dargestellt sein, damit auf die Marken in der Stelle geschlossen werden kann.

Schaltbedingungen und Aktionen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht formal dargestellt, sondern nur in ihrer Verwendung erläutert, da die Darstellung ansonsten zu umfangreich wäre.

5.5 Kanten

Die Kanten verbinden die Transitionen mit den Stellen und umgekehrt und ermöglichen das Schalten. Es existieren nur eingehende und ausgehende Kanten und spezielle Kanten werden nicht benutzt. Die Kanten werden für die Benutzung in dem Konzeptmodell so definiert, dass sie keine festen Kantengewichte besitzen, sondern abhängig von der Schaltbedingung der Transition sind. Das heißt, ein und dieselbe Kante kann, abhängig von der jeweiligen Schaltbedingung, unterschiedliche viele Marken transportieren. Dies ist ein Sonderfall, der in den THORNs nicht definiert ist, hier aber unabhängig von der Art und Weise der technischen Umsetzung mit einem Petrinetz, als realisierbar vorausgesetzt wird.

6 Umsetzung des Modells

6.1 Aufbau des Modells

Im Folgenden wird ein Konzept zur Darstellung der Wandlungsfähigkeit in Modellen von Produktionssystemen illustriert. Dabei werden die zwei, in Abschnitt 4.1.3 ausgearbeiteten, Aspekte getrennt voneinander, mit dem in Kapitel 5 vorgestellten Modellierungselementen, dargestellt. Dazu wird einerseits ein Petrinetz erstellt, das den Auftragsdurchlauf in Form der Module bis zur Produktion wiedergibt und dafür die einzelnen Ressourcenverfügbarkeiten zeitlich darstellt. Dies ist das Hauptnetz des entworfenen Modells. Andererseits werden für die Beschaffung und Qualifizierung der drei Ressourcen Personal, Material und Betriebsmittel jeweils Teilnetze erstellt, die die Beschaffung und Qualifizierung der einzelnen Elemente wiedergeben. Im Anschluss an die Darstellung der drei Teilnetze, werden die Möglichkeiten der Verknüpfung der Teilnetze mit dem Hauptnetz und deren Übereinstimmung dargestellt und erläutert. Die Übereinstimmung der Netze miteinander wird dabei durch die jeweilige Verwendung der drei Lagerstellen Lager-Personal, Lager-Material und Lager-Betriebsmittel, wie sie in Abschnitt 5.3 eingeführt wurden, bereits bei deren Einführung deutlich.

Die einzelnen für dieses Modell verwendeten Vorgänge haben nicht den Anspruch vollständig zu sein, sondern dienen dazu, das Vorgehen mit dem Modell und die Möglichkeiten, die es bietet, aufzuzeigen. Das Modell kann für die Verwendung in der Grundstruktur übernommen und dann je nach Bedarf um die wichtigsten Prozesse erweitert und detailliert werden.

Außerdem gelten folgende Vereinfachungen, die zur besseren Verständlichkeit der Netze eingeführt wurden. Die Namen der Transitionen werden in fetter Schrift dargestellt, die Stellen in kursiver Formatierung und die Attribute der Objektklassen werden unterstrichen. Diese Formatierung orientiert sich an der Darstellung der Netze, wie sie bereits in Kapitel 5 erläutert wurde und dient dazu, die einzelnen Elemente des Netzes schnell erkennen und unterscheiden zu können.

Bei der Betrachtung der einzelnen Transitionen werden die entsprechenden Schaltbedingungen und Schaltaktionen betrachtet, der zeitliche Verlauf wird jedoch nicht immer wieder explizit erläutert. Bei allen Transitionen wird davon ausgegangen, dass sie nur schalten, wenn die Marken, die die Schaltbedingungen erfüllen, auch den richtigen Zeitstempel und keine höhere Zeit als die der globalen Uhr besitzen. Außerdem wird angenommen, dass bei allen Marken, die in den Nachbereich der Transition gelegt werden, der Zeitstempel um die Schaltdauer, die in der Transition vorgegeben ist, angepasst wird.

6.2 Hauptnetz des Modells

6.2.1 Allgemeines Vorgehen

Das Hauptnetz, welches die zeitliche Verwaltung der Ressourcen betrachtet, beginnt bei der Stelle *Auftrag* und endet bei der Stelle *Auftrag erfüllt*. Beide sind in einem Ausschnitt des Hauptnetzes, wie in **Abbildung 6-1** ersichtlich, als Stelle des Typs Fabrikmodul gegeben. Der Auftrag liegt in der Stelle *Auftrag* in Form der einzelnen Marken der Objektklasse Fabrikmodul vor, enthält also die Module, aus denen die entstehende Fabrik zusammengesetzt werden soll. Jede Marke dieser Stelle muss durch die Transition **Rüsten** in die Stelle *gerüstete Module* und dann durch die Transition **Produktion** zur Stelle *produzierte Module* gelangen. Wenn alle Marken eines Auftrags in der Stelle *produzierte Module* vorhanden sind, kann die Transition **Fertigstellung** schalten. Die Marke, die in die Stelle *Auftrag erfüllt* gelangt, symbolisiert die vollständige Ausführung und beendet die Betrachtung des Auftrags.

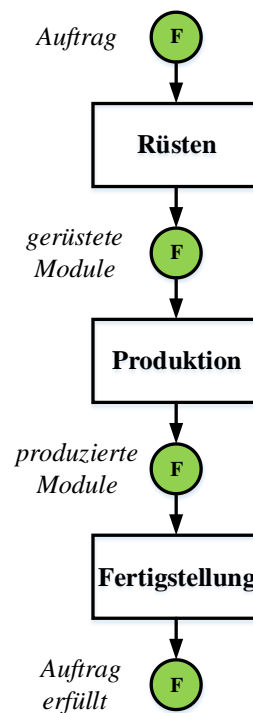


Abbildung 6-1 Ausschnitt aus dem Hauptnetz

Das Petrinetz kann nicht nur von einem einzigen Auftrag durchlaufen werden, sondern prinzipiell können beliebig viele Aufträge gleichzeitig mit ihm betrachtet werden. Die Zeit, die ein Auftrag zur Fertigstellung benötigt, verlängert sich dann jedoch dementsprechend. Die an den Transitionen anliegenden Marken können außerdem unter Berücksichtigung der Schaltbedingungen gleichzeitig schalten, das heißt, das solange zu einem Zeitpunkt geschaltet wird, bis keine Schaltvorgänge mehr möglich sind, da die Schaltbedingung nicht mehr erfüllt werden kann. Erst wenn dies der Fall ist, wird die globale Zeit weitergesetzt und die Transition kann wieder schalten.

Um das vollständige Hauptnetz zu betrachten, müssen die Ressourcen, die zur Ausführung der Transitionen benötigt werden, zum Netz hinzugefügt werden. In **Abbildung 6-2** ist das Netz daher um die drei Lagerstellen der Objektklassen Material, Personal und Betriebsmittel erweitert worden. Damit die Transitionen schalten können, müssen in ihrem Vorbereich die entsprechenden Marken vorhanden sein. Die benötigten Ressourcen werden dabei durch die jeweilige Marke der Objektklasse Fabrikmodul vorgegeben. Die Schaltbedingungen der Transitionen sind also abhängig von den Marken der Fabrikmodule.

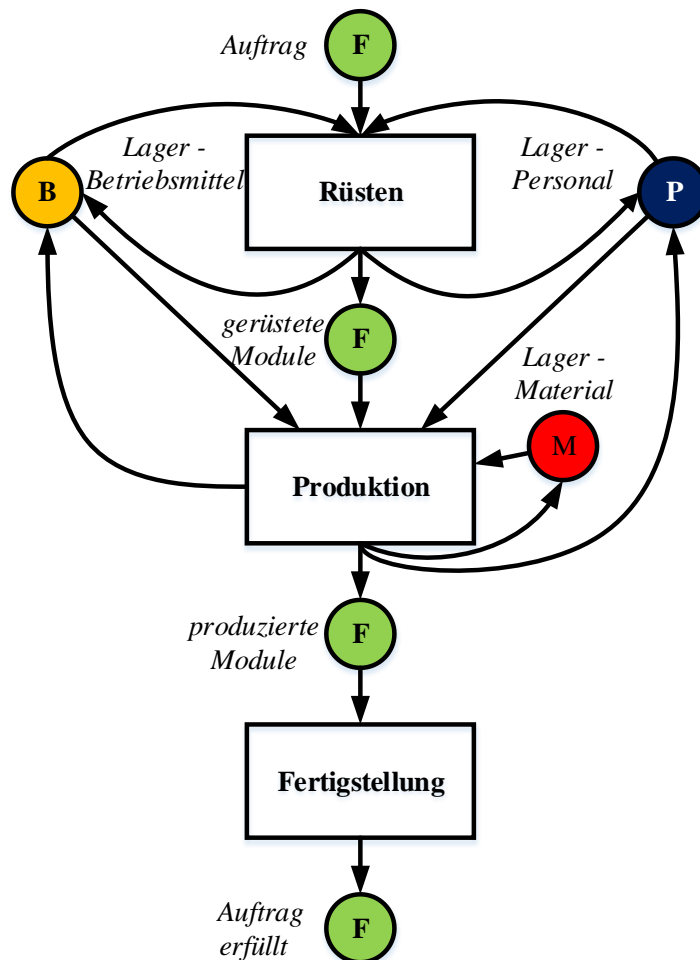


Abbildung 6-2 Hauptnetz

Die detaillierten Schaltvorgänge werden im Folgenden für jede der drei Transitionen des Hauptnetzes dargestellt. Dabei werden jeweils nur die Transitionen und die Stellen, mit denen sie verbunden sind, aus dem gesamten Petrinetz ausgeschnitten und die restlichen Verknüpfungen nicht betrachtet. Die Kanten, die eigentlich die in dem Ausschnitt enthaltenen Stellen mit anderen Transitionen verknüpfen, werden weggelassen, da die Gesamtzusammenhänge aus **Abbildung 6-2** erkennbar sind. Die Teilbetrachtungen sind also formal nicht korrekt, sondern dienen nur zur Erklärung der Schaltvorgänge.

6.2.2 Schaltvorgänge der Transition Rüsten

In der Transition **Rüsten** wird mit den Schaltbedingungen und den Marken der Klasse Fabrikmodul definiert, welche Marken der Objektklassen Personal und Betriebsmittel zum Rüsten des betrachteten Moduls benötigt werden. Dabei werden nicht nur die Menge der Objekte, sondern auch deren Eigenschaften, aus dem in Form des Fabrikmoduls gegebenen Auftrag bestimmt. Erst, wenn die entsprechenden Objekte in den beiden Stellen vorhanden sind, kann die Transition **Rüsten** schalten.

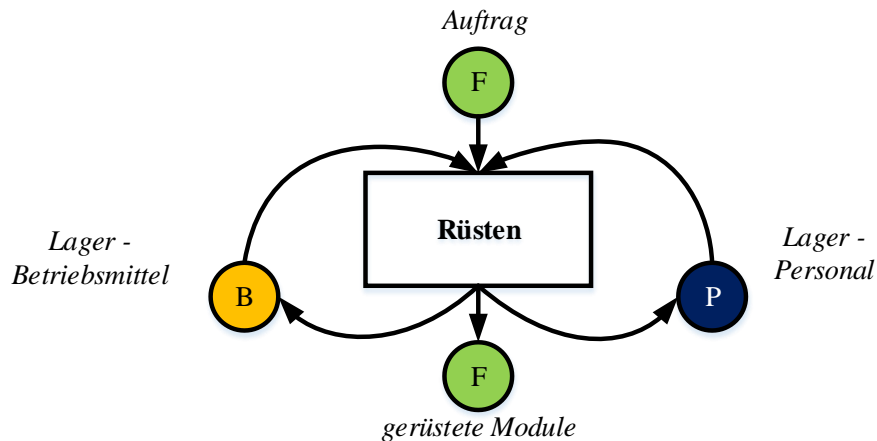


Abbildung 6-3 Ausschnitt der Transition Rüsten mit zugehörigen Stellen

Der Schaltvorgang wird dabei für eine einzelne Marke der Klasse Fabrikmodul, also für die Rüstung eines Moduls, betrachtet, läuft aber für alle Marken, die in der Stelle *Auftrag* liegen, identisch ab. Die Marke hat, wie in Abschnitt 5.2.5, die Attribute Personal für Rüstung und benötigte Betriebsmittel, mit den Angaben zu der Qualifikation des Personals, der Art und Qualifikation der Betriebsmittel des Moduls und der jeweils benötigten Anzahl.

Die Schaltbedingung gibt vor, dass die Transition nur schalten kann, wenn einerseits in der Stelle *Lager-Betriebsmittel* Marken in der Menge und mit der Betriebsmittelart und vorhandenen Qualifizierung, wie sie durch das Attribut benötigte Betriebsmittel der Marke Fabrikmodul vorgegeben sind, vorhanden sind. Außerdem müssen die Marken der Stelle *Lager-Betriebsmittel* den Status „vorhanden“ und den Zustand „frei“ haben.

Die Marken der Stelle *Lager-Personal* müssen den Status „vorhanden“ haben und weitere Bedingungen sind mit dem Attribut Personal für Rüstung in der Marke der Stelle *Auftrag* vorgegeben. Dieses Attribut gibt vor, welche Anzahl an Marken der Objektklasse Personal mit welchem Wert des Attributs vorhandene Qualifizierung zum Schalten notwendig sind.

Neben diesen Bedingungen muss außerdem noch der Zeitstempel aller Marken im Vorbereitungsbereich überprüft werden, denn nur Marken, deren Zeitstempel kleiner oder gleich der

globalen Uhr ist, dürfen betrachtet werden. Wenn alle Bedingungen erfüllt sind und die Transition schaltet, werden die Marken aus den Vorbereichsstellen abgezogen und dann Marken entsprechend der Schaltaktion in den Nachbereich der Transition gegeben.

Entsprechend der in Abschnitt 5.4 erläuterten Regel müssen, bis auf Marken der Klasse Material, immer Marken in der gleichen Menge und mit derselben Identifizierungsnummer wieder aus der Transition ausgegeben werden. Die Schaltaktion führt daher folgendes aus:

Die Marke der Klasse Fabrikmodul erhält den Status „gerüstet“, nachdem sie aus der Stelle *Auftrag* abgezogen wurde und wird in die Stelle *gerüstete Module* gelegt. Außerdem wird der Zeitstempel der Marke um die Rüstzeit, die in der Marke als Attribut vorliegt, angepasst, sodass die Marke für die nächste Transition erst nach Ablauf dieser Zeit verfügbar ist.

Für jede Marke der Klasse Betriebsmittel, die im Vorbereich abgezogen wurde, wird wieder eine Marke mit gleicher Identifizierung, jedoch mit veränderten Attributen, in der Stelle *Lager-Betriebsmittel* hinzugefügt. Dabei werden die Status der Marken in „gerüstet“ geändert und der Zeitstempel wird ebenfalls entsprechend der vorgegebenen Rüstzeit angepasst. Die Marken, die von der Stelle *Lager-Personal* abgezogen wurden, werden nach dem Schalten mit verändertem Zeitstempel wieder in die Stelle zurückgelegt und ansonsten nicht verändert.

6.2.3 Schaltvorgänge der Transition Produktion

Nachdem eine Marke in die Stelle *gerüstete Module* gelegt wurde und die globale Zeit dem Zeitstempel entspricht, kann die Transition **Produktion** ausgeführt werden, sofern die weiteren Schaltbedingungen erfüllt sind. Diese laufen ähnlich zu denen der Transition **Rüsten** ab, weswegen an dieser Stelle nicht noch einmal alle Bedingungen detailliert erläutert werden.

Bei den Marken der Stelle *Lager-Betriebsmittel* muss der Zustand nicht „frei“ sondern „gerüstet“ sein und die vorgegebene Qualifikation und Menge der Marken der Klasse Personal wird durch das Attribut Personal für Produktion vorgegeben. Neben dem Personal und den Betriebsmitteln muss zur Produktion, wie in **Abbildung 6-4** dargestellt, zusätzlich das entsprechende Material vorhanden sein. Dazu ist in der Marke des Fabrikmoduls das Attribut Eingangsmaterialien gegeben, welches die Anzahl und die Materialnummern der benötigten Materialien enthält. In der Stelle *Lager-Material* müssen Marken mit den vorgegebenen Materialnummern in der richtigen Menge vorliegen, damit die Transition schalten kann.

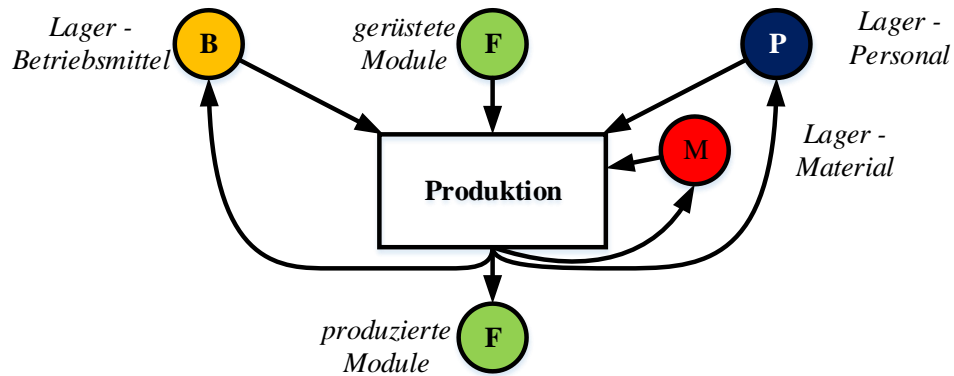


Abbildung 6-4 Ausschnitt der Transition Produktion mit zugehörigen Stellen

Wenn die Bedingungen erfüllt sind, schaltet die Transition und die Schaltaktion wird ausgeführt. Diese führt dazu, dass die Marken der Klassen Betriebsmittel und Personal den jeweiligen Stellen entnommen werden und dann, in veränderter Form, wieder an die Lagerstellen zurückgegeben werden. Dazu erhalten die Marken einen, mithilfe der Produktionszeit (vorgegeben durch die Marke der Stelle gerüstete Module), angepassten Zeitstempel und die Marken der Stelle *Lager-Betriebsmittel* den Zustand „frei“, da sie wieder für ein neues Modul verwendbar sind.

Die Marken der Objektklasse Material werden aus der Stelle *Lager-Material* entnommen und auch nicht wieder in sie zurückgelegt. Das Attribut Ausgangsmaterialien des Fabrikmoduls gibt die Menge und die Materialnummern der Marken, die in die Stelle *Lager-Material* zurückgehen, wieder. Das heißt nichts anderes, als das die Produktion ein neues Material entstehen lässt. Die Schaltaktion bewirkt außerdem, dass die Marke Fabrikmodul in die Stelle *produzierte Module* gelegt wird und vorher den Status „produziert“ bekommt.

6.2.4 Schaltvorgänge der Transition Fertigstellung

Die letzte Transition des Hauptnetzes dient dazu, das Ende eines vollständig ausgeführten Auftrags anzugeben. Mit der Transition **Fertigstellung** wird der Auftrag abgeschlossen, wenn alle Marken eines Auftrags in der Stelle *produzierte Module* mit dem Status „produziert“ vorhanden sind. Die Transition schaltet, wenn das letzte Modul, welches das Endprodukt ausgibt, fertiggestellt wurde. Dazu wird das Attribut letztes Modul der Marken der Stelle *Produzierte Module* überprüft und wenn eine Marke vorhanden ist, bei der der Wert „wahr“ vorhanden ist, kann die Transition schalten. Die Schaltaktion bewirkt, dass aus der Stelle *produzierte Module* die Marken des betrachteten Auftrags entnommen werden und in der Stelle *Auftrag erfüllt* eine Marke mit dem Status „Auftrag erfüllt“ und der entsprechenden Auftragsnummer liegt. Hier gilt wieder eine Ausnahme von der in Abschnitt 5.4 definierten Regel, da nicht die gleiche Zahl an Marken in die Transitionen eingehen wie ausgehen.

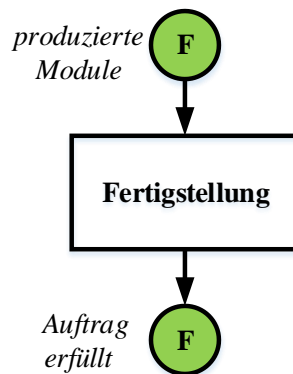


Abbildung 6-5 Ausschnitt der Transition Fertigstellung mit zugehörigen Stellen

6.3 Teilnetze des Modells

6.3.1 Einleitung zu den Teilnetzen

Die Teilnetze behandeln den zweiten Aspekt der betrachteten Problemstellung, die Beschaffung und Qualifizierung der benötigten Ressourcen. Für jede der drei Lagerstellen wird betrachtet, wie die Ressourcen, die nicht durch die bestehende Fabrik verfügbar sind, bereitgestellt werden können. Für jedes der drei Objekte (Personal, Material und Betriebsmittel) wird ein eigenes Netz erstellt, welches diese Vorgänge abbildet. Die Teilnetze enthalten daher die drei Lagerstellen, die auch schon im Hauptnetz verwendet wurden. Bei der Darstellung werden zur Übersichtlichkeit nur die Transitionen und Kanten betrachtet, die mit dem anderen Netz nicht betrachtet werden. Das heißt, dass beispielsweise die Transition Rüsten, die sowohl Marken aus der Stelle *Lager-Betriebsmittel* entnimmt, als auch Marken in sie hineinlegt, in dem Teilnetz Betriebsmittel nicht betrachtet wird. Um diese Vereinfachung in dem Netz darzustellen, werden Transitionen mit der Bezeichnung [...], wie in Abschnitt 5.4 vorgestellt, verwendet. Sie symbolisieren, dass das Netz nicht vollständig ist und weitere Abhängigkeiten bestehen. An den Stellen, an denen eine Transition [...] anliegt, können, ohne Betrachtung der anderen Netze, das Schaltverhalten und die vorliegenden Marken nicht vorausgesagt werden. Da die Darstellung des Hauptnetzes nicht vollständig ist, sondern die Einflüsse der drei Teilnetze in ihm fehlen, muss es wie in **Abbildung 6-6** dargestellt, um die Schnittstellen zu ihnen erweitert werden.

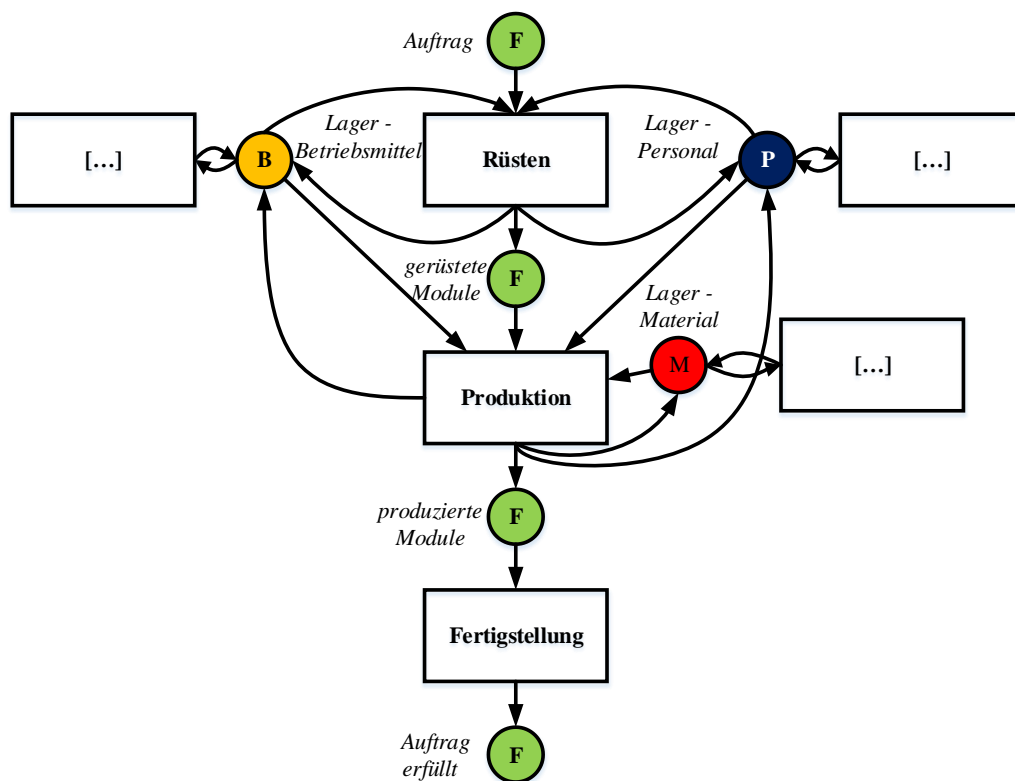


Abbildung 6-6 Hauptnetz mit Schnittstellen

Für die drei Teilnetze werden, im Gegensatz zum Hauptnetz, nicht alle Transitionen einzeln erläutert, sondern am jeweiligen Gesamtnetz wird das Verhalten erklärt. Dabei enthalten alle Transitionen der Netze eine feste Zeitdauer, die im Vorfeld definiert wird und nicht abhängig von den Marken, die am Schalten beteiligt sind, ist. Im Gegensatz zum Hauptnetz, in dem durch die Marke Fabrikmodul die Produktionszeit bzw. die Rüstzeit vorgegeben ist, wird hier also zur Vereinfachung immer die gleiche Dauer angenommen. Dies geschieht, da die hier betrachteten Vorgänge immer ähnlich lang dauern und die Abweichung zwischen diesen im Verhältnis zu den anderen betrachteten Zeiten, zum Beispiel dem Warten auf entsprechende Marken, vernachlässigbar klein ist.

6.3.2 Teilnetz Material

Die für die Materialbereitstellung erforderlichen Prozesse sind mit dem in **Abbildung 6-7** dargestellten Petrinetz beschreibbar. Wenn die entsprechenden Materialien nicht produziert werden sollen, sondern bestellt werden müssen, liegt die Anzahl an benötigten Materialien als Marken mit der entsprechenden Materialnummer und dem Status „benötigt“ in der Stelle *Fremdbeschaffung*.

Die Schaltbedingung in der Transition **Material beschaffen** fordert, dass die Marke der Stelle *Fremdbeschaffung* den Status „benötigt“ hat und eine Marke in der Stelle *Neues Material* mit der gleichen Materialnummer vorhanden sein muss. Wenn die Bedingungen erfüllt sind, bewirkt die Schaltaktion, dass die Marken aus der Stelle *Fremdbeschaffung* und der Stelle *Neues Material* entnommen werden und dann eine Marke mit der vorgegebenen Materialnummer und dem Status „vorhanden“ in die Stelle *Lager-Material* gelegt werden.

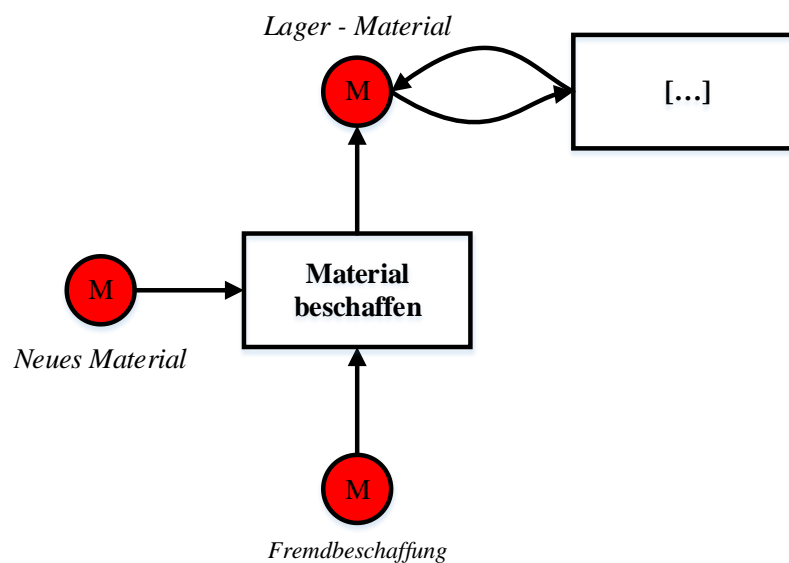


Abbildung 6-7 Teilnetz Material

Wenn das Material geliefert wurde und in der Fabrik vorhanden ist, liegt das Material zur Produktion bereit und deswegen die entsprechenden Marken in der Stelle *Lager-Material*. Sie können dann von den anderen Transitionen benutzt werden, die hier mit der Transition [...] angedeutet werden. Für diese Transitionen wird kein Personal benötigt, da die Mitarbeiter, die an diesen Transitionen beteiligt sind, nicht zu den Mitarbeitern in der Produktion, sondern zu der organisationalen Ebene der Fabrik (siehe Abschnitt 4.2.3) gehören.

Prinzipiell könnte durch den Einsatz des Status (*vorhanden/ benötigt*) die Stelle *Fremdbeschaffung* weggelassen und die Marken stattdessen direkt in die Stelle *Lager-Material* gelegt werden. Dieses erfolgt hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit erst einmal nicht, wäre jedoch ohne weitere Probleme umsetzbar, indem eine Kante von der Stelle *Lager-Material* zur Transition **Material beschaffen** gelegt und die Stelle *Fremdbeschaffung* entfernt würde.

Mit dem Netz wird nur die Fremdbeschaffung des Materials und nicht die Produktion des benötigten Materials betrachtet. Dies liegt daran, dass der Aspekt bereits im Hauptnetz enthalten ist. Wenn ein Material für ein Modul benötigt wird, muss es in den vorhergegangenen Fertigungsschritten betrachtet werden, das heißt, die Produktion des Materials wird mit den Marken der Objektklasse *Fabrikmodul* von Anfang an eingeplant.

6.3.3 Teilnetz Personal

Das Teilnetz für das Personal bildet die Qualifikation und die Neueinstellung von Mitarbeitern ab und ist in **Abbildung 6-8** dargestellt. Ausgangspunkt der Vorgänge des Netzes sind die Marken der Objektklasse Personal, die in der Stelle *benötigtes Personal* liegen. Diese müssen zum Schalten der Transition **Neueinstellung**, den Status „Neueinstellung“ und zum Schalten der Transition **Auswahl passender Mitarbeiter** den Status „Umschulung“ enthalten.

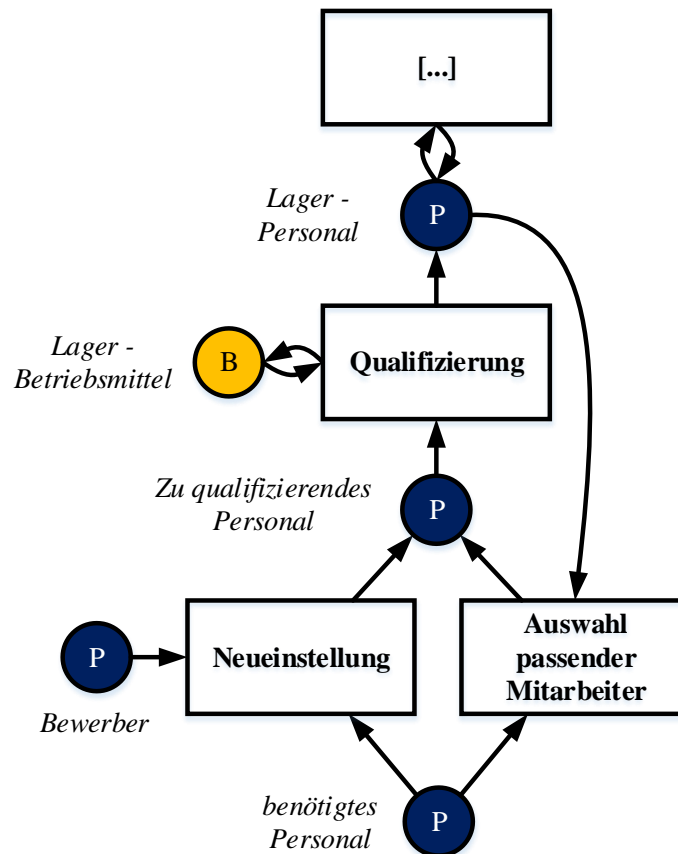


Abbildung 6-8 Teilnetz Personal

Zum Schalten der Transition **Neueinstellung** muss die Schaltbedingung überprüfen, ob in der Stelle *Bewerber*, Marken mit dem gleichen Wert des Attributs vorhandene Qualifizierung, wie durch die Marke der Stelle *benötigtes Personal* vorgegeben wurden, vorhanden sind.

Wenn eine Marke der Stelle *benötigtes Personal* den Status „Umschulung“ hat, schaltet die Transition **Auswahl passender Mitarbeiter**, sofern in der Stelle *Lager-Personal* Marken mit dem gleichen Wert des Attributs vorhandene Qualifizierung verfügbar sind.

Die Schaltaktionen der beiden Transitionen sind fast identisch: Die Marken aus dem Vorbereich der Transition werden von den jeweiligen Stellen abgezogen. Im Nachbereich der Transition werden entsprechend der Marken aus den Stellen *Bewerber* bzw. *Lager-Personal* Marken hinzugefügt. Diese Marken werden um den Wert des Attributs

benötigte Qualifizierung ergänzt, welcher von der Marke aus der Stelle *benötigtes Personal* vorgegeben ist. Die Marken aus der Stelle *Bewerber* erhalten außerdem den Status „vorhanden“ und bekommen eine Mitarbeiternummer zugewiesen.

Nachdem Mitarbeiter mit den nötigen Vorkenntnissen in der Stelle *zu qualifizierendes Personal* vorhanden sind, müssen sie entsprechend der benötigten Qualifikation geschult werden. Damit die Transition **Qualifizierung** schalten kann, müssen dementsprechend die passenden Betriebsmittel vorhanden sein. Diese werden durch einen Abgleich des Attributs Betriebsmittel für Qualifikation bei den Marken aus der Stelle *Lager-Personal* und der vorhandene Qualifizierung der Marke der Stelle *Lager Betriebsmittel* ermittelt.

Das Schalten der Transition bewirkt, dass einerseits die Marken der Stelle *Lager-Betriebsmittel* mit verändertem Zeitstempel wieder zurück gelegt werden und andererseits die Marke der Stelle *zu qualifizierendes Personal* mit verändertem Wert des Attributs vorhandene Qualifizierung (wird angepasst an benötigte Qualifizierung) aus der Stelle entnommen und in die Stelle *Lager-Personal* gelegt wird. Das Resultat des Vorgangs ist, dass ein neuer Mitarbeiter vorhanden ist, der von den anderen, mit [...] ange-deuteten, Transitionen verwendet werden kann.

6.3.4 Teilnetz Betriebsmittel

Das Teilnetz zur Beschaffung und Qualifizierung der Betriebsmittel, welches in **Abbildung 6-9** dargestellt ist, ist vom Aufbau und dem Ablauf ähnlich zum dem in Abschnitt **6.3.3** dargestellten Teilnetz des Personals. In der Stelle *benötigte Betriebsmittel* liegen sowohl die Marken, die den Status „Neubeschaffung“ als auch die Marken, die den Status „Umqualifizierung“ besitzen.

Um Betriebsmittel neu zu qualifizieren, müssen erst entweder Betriebsmittel entsprechend der geforderten Art aus den vorhandenen ausgewählt oder neu beschafft werden. Für das Schalten der Transition **Beschaffung** wird also eine Marke mit dem Status „Neubeschaffung“ in der Stelle *benötigte Betriebsmittel* vorausgesetzt. Diese Marke gibt die benötigte Betriebsmittelart für die Marke der Stelle *neue Betriebsmittel* vor. Wenn eine passende Marke vorhanden ist, kann geschaltet werden, was dazu führt, dass die Marken aus dem Vorbereich abgezogen werden. Die Marke, die durch die Schaltbedingungen in die Stelle *angeschaffte Betriebsmittel* gelangt, hat dann den Status „vorhanden“ und erhält eine Inventarnummer. Die übrigen Werte werden aus der Marke der Stelle *neue Betriebsmittel* übernommen.

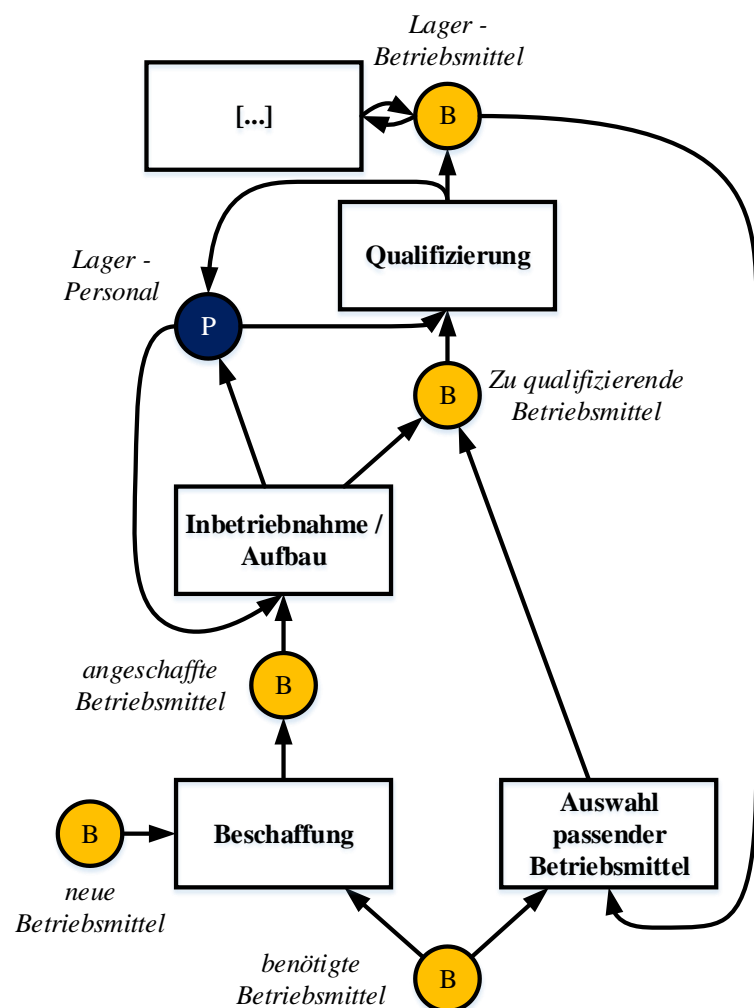


Abbildung 6-9 Teilnetz Betriebsmittel

In der Transition **Auswahl passender Betriebsmittel** erfolgt der Vorgang in der gleichen Art, nur dass der Vergleich in diesem Fall mit den Marken aus der Stelle *Lager-Betriebsmittel* erfolgt und die Marken durch die Schaltbedingungen nicht in der Stelle *angeschaffte Betriebsmittel*, sondern in der Stelle *zu qualifizierende Betriebsmittel* gelangen.

Die Betriebsmittel, die neu angeschafft werden, müssen im Anschluss aufgebaut und in Betrieb genommen werden, wozu passendes Personal benötigt wird. Daher sind nach dem Schalten der Transition **Beschaffung** Marken in der Stelle *zu qualifizierende Betriebsmittel* vorhanden, die die Transition zum Schalten bringen, wenn die passenden Marken im *Lager-Personal* verfügbar sind. Eine Marke gilt als passend, wenn sie die richtige vorhandene Qualifikation, wie mit dem Attribut Personal für Aufbau (der Marke in der Stelle *zu qualifizierende Betriebsmittel*) vorgegeben, enthält. Das Schalten der Transition **Inbetriebnahme/Aufbau** bewirkt eine Änderung des Zustands der Marken der Objektklasse Betriebsmittel zu „aufgebaut“ und eine Weitergabe der Marke zur Stelle *zu qualifizierende Betriebsmittel*. Die Marken der Stelle *Lager-Personal* erfahren nur eine Veränderung des Zeitstempels und werden wieder in dieselbe Stelle zurückgelegt.

Die Betriebsmittel, die neu angeschafft und aufgebaut sind, müssen nun, genau wie die ausgewählten Betriebsmittel, neu qualifiziert werden, wozu wieder passendes Personal notwendig ist. Die Marken auf der Stelle *zu qualifizierende Betriebsmittel* können demzufolge mit der Transition **Qualifizierung** schalten, wenn passende Marken der Stelle *Lager-Personal* mit den richtigen Werten, wie durch das Attribut Personal für Qualifikation vorgegeben, vorhanden sind. Wenn dies der Fall ist, schaltet die Transition, was bei den Marken der Stelle *Lager-Personal* eine Veränderung des Zeitstempels zur Folge hat und die Marke aus der Stelle *zu qualifizierende Betriebsmittel* entfernt und anschließend mit verändertem Wert des Attributs vorhandene Qualifikation in das *Lager-Betriebsmittel* legt. Die Betriebsmittel mit der neuen Qualifikation sind dann für andere Transitionen verfügbar, welche mit der Transition [...] in **Abbildung 6-9** angedeutet werden.

6.4 Verknüpfung der einzelnen Netze

Die Verknüpfung der Teilnetze mit dem Hauptnetz ist eindeutig durch den Zugriff auf die drei Lagerstellen für Personal, Betriebsmittel und Material gegeben. Prinzipiell könnten alle vier Netze zusammen in einem Netz abgebildet werden, indem sie über die Lagerplätze verknüpft würden. Das Netz, welches dadurch entstehen würde, wäre jedoch so unübersichtlich, dass an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet wird.

Die Verknüpfung, die an dieser Stelle noch nicht geklärt wurde, ist diejenige zwischen dem Auftrag und den Marken, die in den Stellen *Benötigte Betriebsmittel*, *Benötigtes Personal* und *Fremdbeschaffung* existieren. Im Allgemeinen muss aufgrund des Auftrags eine Aussage darüber getroffen werden können, welche Betriebsmittel, Materialien und Mitarbeiter für die Umsetzung des Auftrags zusätzlich benötigt werden oder umqualifiziert werden müssen. Diese Entscheidung lässt sich jedoch nicht durch einen einfachen Abgleich von Werten treffen, sondern hängt von vielen Bedingungen ab, die im Rahmen des vorhandenen Modells nicht ohne weiteres abgebildet werden können. Die Einstellung von zusätzlichen Ressourcen hängt etwa von den finanziellen Möglichkeiten, die zur Verfügung stehen und der Geschwindigkeit, mit der der Auftrag abgeschlossen werden soll, ab. Von einer qualifizierten Person muss dazu ein optimaler Punkt zwischen der Menge an Veränderungen und dem Verlauf des Auftragsdurchlaufs ermittelt werden.

Genau wie die Marken in der Stelle *Auftrag* von einem Zuständigen, der die Module mit den jeweiligen Ressourcen geplant hat, gelegt werden, müssen also auch die entsprechenden Marken der Stellen *Benötigte Betriebsmittel*, *Benötigtes Personal* und *Fremdbeschaffung* von einer qualifizierten Person ermittelt werden.

Mit dem vorgestellten Netz kann diese Person testen, wie lange der Auftrag bei welchen Veränderungen dauert und einen Punkt ermitteln, bei dem eine vertretbare Auftragsdurchlaufzeit existiert und trotzdem nur geringe Kosten entstehen.

Alle drei Teilnetze besitzen außerdem eine Schnittstelle, die aus dem Netz hinaus führt und deren Verhalten durch das Netz nicht wiedergegeben werden kann. Gemeint sind die drei Stellen *Neues Material*, *Neue Betriebsmittel* und *Bewerber*, welche den Vorrat angeben, aus dem die neuen Ressourcen genommen werden. Dieser Vorrat existiert in der Realität allerdings nicht in dieser einfachen Form, sondern ist weitaus komplexer.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt ein Konzept vor, mithilfe eines objektorientierten Petrinetzes ein wandlungsfähiges Produktionssystem mit veränderlicher Auftragslage darzustellen. Dabei beschränkt sich das entworfene Modell auf die drei Ressourcen Personal, Betriebsmittel und Material einer Fabrik und teilt diese in einzelne wandlungsfähige Fabrikmodule.

Das entwickelte Modell ermöglicht, einen neuen Auftrag in eine bestehende Fabrik einzuplanen und die Auftragsdurchlaufzeit zu ermitteln. Außerdem können Veränderungen in Form von Neuanschaffungen oder Veränderungen der Qualifizierung der Ressourcen in das System eingeplant und deren Auswirkungen auf die Auftragsdurchlaufzeit ermittelt werden. Mit dem Modell kann der optimale Weg der Veränderungen, die in dem System ausgeführt werden müssen um den Auftrag durchzuführen, ausgetestet werden.

Für das Modell werden einige Überlegungen und Entscheidungen vorausgesetzt, die im Vorfeld schon erfolgt sein müssen. So müssen für den Auftrag bereits die benötigten Fertigungsschritte und dazu benötigten Ressourcen feststehen, da sie für die Benutzung des Modells zwingend notwendig sind. Das Modell ermittelt also nicht die Veränderungen, die durchgeführt werden müssen, sondern schätzt ab, ob die notwendigen Veränderungen im zeitlichen Rahmen durchführbar sind.

Da für das Modell ein Petrinetz benutzt wurde, wird eine einfache Erweiterung des Modells um benötigten Vorgänge und Prozesse ermöglicht. Das Netz kann flexibel erweitert oder in der Struktur verändert werden und lässt sich daher optimal an individuelle Bedürfnisse anpassen. Ein entstandenes Modell kann nach dem einmaligen Verständnis leicht abgewandelt und dadurch erneut wiederverwendet werden, dies reduziert den Aufwand bei der Einplanung neuer Aufträge.

Durch das objektorientierte Konzept, das verwendet wird, können beliebig viele Attribute und Funktionen zu dem Modell hinzugefügt werden. Beispielsweise können Funktionen, die beim Schalten von Transitionen direkt Werte anpassen, eingebaut werden oder es können zusätzliche Objektklassen definiert werden, die die bestehenden vier um weitere gewünschte Aspekte ergänzen. Die bestehende Form des Modells auf Basis eines höheren Petrinetzes bietet daher eine hinreichende Menge an Möglichkeiten der Anpassung.

Der Nachteil des vorliegenden Modellentwurfs ist, dass alle Informationen, auf die das Netz zurückgreift, jeweils in einer Marke oder in den Bedingungen einer Transition vorher definiert werden müssen. So wird das System zunehmend komplexer und die Prozesse und Abläufe sind im Detail nicht mehr nachvollziehbar. Der positive Nutzen einer graphischen Darstellung kann nicht genutzt werden, da die komplexen Schaltbedingungen und die daraus resultierenden Veränderungen der Werte der Marken nicht

wiedergegeben werden können. Die graphische Darstellung eignet sich also nur, um die generelle Struktur der Vorgänge erkennen zu können. Die einzige sinnvolle Möglichkeit, mit der das Netz angewandt werden kann, ist, wenn es softwaretechnisch umgesetzt und von einem Programm simuliert wird. In dieses Programm können dann die entsprechenden Werte, aufbauend auf den Daten, die beispielweise aus einem verwendeten SAP-System stammen, eingegeben und der Ablauf am Computer simuliert werden. Der nächste Schritt wäre also, den vorgestellten Konzeptentwurf um eine Schnittstelle zum Computer zu erweitern. Durch die Anwendung der höheren Petrinetzklasse THORNs, welche mit der Sprache C++ arbeitet, kann dabei der Konzeptentwurf in der hier vorgestellten Form leicht in eine Programmiersprache umgesetzt werden.

Wenn das Modell softwaretechnisch umgesetzt wurde, können in einem nächsten Schritt mit Hilfe von Optimierungsmethoden die bestmöglichen Lösungen für den Auftragsdurchlauf, abhängig von einer Kostenoptimierung der neu zu beschaffenden Ressourcen und einer Minimierung der Auftragsdurchlaufzeit, errechnet werden.

8 Literaturverzeichnis

Balzert, Heide (2005): Lehrbuch der Objektmodellierung. Analyse und Entwurf mit der UML 2. 2. Aufl. Heidelberg, München: Elsevier, Spektrum, Akad. Verl (Lehrbücher der Informatik).

Balzert, Heide (2009): UML 2 in 5 Tagen. Der schnelle Einstieg in die Objektorientierung. 2. Aufl. Herdecke, Bochum: W3L (IT lernen).

Beller, Marcel (2010): Entwicklung eines prozessorientierten Vorgehensmodells zur Fabrikplanung. Dissertation. TU Dortmund, Dortmund. Fakultät Maschinenbau.

Bergholz, Markus (2005): Objektorientierte Fabrikplanung. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.

Berkholz, Daniel (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme – der Zukunft einen Schritt voraus. In: Peter Nyhuis, Gunther Reinhart und Eberhard Abele (Hg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, S. 13–18.

Biedermann, Hubert (2010): Generic Management als umfassendes Konzept zur Sicherstellung der Wandlungsfähigkeit industrieller Produktion. In: Peter Nyhuis (Hg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Berlin: Gito (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V), S. 23–42.

Bracht, Uwe; Wenzel, Sigrid; Geckler, Dieter (2009): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).

Cisek, Robert; Habicht, Christian; Neise, Patrick (2002): Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (9), S. 441–445.

Denkena, Berend; Drabow, Gregor (2005): Gestaltung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln. In: Hans-Peter Wiendahl, Dirk Nofen, Jan Hinrich Klußmann und Frank Breitenbach (Hg.): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München, Wien: Hanser, S. 68–92.

Ebrecht, Lars; Lemmer, Karsten (2008): Konsistente Verknüpfung von Aktivitäts-, Sequenz- und Zustandsdiagrammen. Darstellungsunabhängige und formale Semantik zur Verhaltensbeschreibung von Echtzeit-Systemen. In: Peter Holleczeck und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Mobilität und Echtzeit. Fachtagung der GI-Fachgruppe Echtzeitsysteme (real-time) Boppard, 6./7. Dezember 2007. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (Informatik aktuell), S. 49–58.

Fortmann, Klaus-Michael; Kallweit, Angela (2007): Logistik. 2., aktualisierte Aufl. Stuttgart: Kohlhammer ([W:]).

- Franke, Jörg; Merhof, Jochen; Fischer, Christian; Risch, Florian (2010): Intelligente Steuerungskonzepte für wandlungsfähige Produktionssysteme. In: *Industrie Management* 26 (2), S. 61–64.
- Gadatsch, Andreas (2012): *Prozessmodellierung. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis : eine Einführung für Studenten und Praktiker*. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Grundig, Claus-Gerold (2013): *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 4., aktual. Aufl. München: Hanser.
- Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst (2005): *Produktion und Logistik*. 6., verb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Heger, Christoph Lutz (2006): *Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover. Institut für Fabrikanlagen und Logistik.
- Heinen, Tobias; Rimpau, Christoph; Wörn, Arno (2008): *Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung*. In: Peter Nyhuis, Gunther Reinhart und Eberhard Abele (Hg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, S. 19–32.
- Hernández Morales, Roberto (2003): *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Dissertation. Universität Hannover, Düsseldorf. Institut für Fabrikanlagen und Logistik.
- Hernández Morales, Roberto; Wiendahl, Hans-Peter (2005): *Die wandlungsfähige Fabrik. Grundlagen und Planungsansätze*. In: Bernd Kaluza und Thorsten Blecker (Hg.): *Erfolgsfaktor Flexibilität. Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen*. Berlin: Erich Schmidt (Technological economics, Bd. 60), S. 203–227.
- Jochem, Roland (2001): *Integrierte Unternehmensplanung auf der Basis von Unternehmensmodellen*. Berlin: IPK (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).
- Jung, Hans (2006): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 10., überarb. Aufl. München, Wien: Oldenbourg.
- Kappel, Gerti; Schrefl, Michael (1996): *Objektorientierte Informationssysteme. Konzepte, Darstellungsmittel, Methoden*. Wien, New York: Springer (Springers angewandte Informatik).
- Kastens, Uwe; Kleine Büning, Hans (2005): *Modellierung. Grundlagen und formale Methoden*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Kühling, Martin (2000): *Gestaltung der Produktionsorganisation mit Modell- und Methodenbausteinen*. Dissertation. TU Dortmund, Dortmund. Fakultät Maschinenbau.

- Kuhn, Axel (1995): Prozessketten in der Logistik. Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Unter Mitarbeit von St. Bernemann, Chr. Manthey, J. Kaeseler, Chr. Baron und G. Winz. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Unternehmenslogistik).
- Kuhn, Axel; Keßler, Stephan; Luft, Nils (2010): Prozessorientierte Planung wandlungsfähiger Produktions- und Logistiksysteme mit wiederverwendbaren Planungsfällen. In: Peter Nyhuis (Hg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Berlin: Gito (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V), S. 211–234.
- Kühn, Wolfgang (2006): Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. München, Wien: Hanser.
- Linssen, Oliver (2002): Die objektorientierte Modellierung von Geschäftsprozessen. die erweiterte Object-Behavior-Analysis (OBA) als Ergänzung der Unified Modeling Language (UML). Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fachbereich Wirtschaft- und Sozialwissenschaften.
- Mertins, Kai; Orth, Ronald (2009): Der WM-Prozessassistent. In: Kai Mertins und Holger Seidel (Hg.): Wissensmanagement im Mittelstand. Grundlagen - Lösungen - Praxisbeispiele. Berlin: Springer-Verlag, S. 83–90.
- Meyer, Bertrand (1990): Objektorientierte Softwareentwicklung. München, Wien, London: Carl Hanser Verlag; Prentice-Hall International.
- Moldt, Daniel (1996): Höhere Petrinetze als Grundlage für Systemspezifikationen. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg. Fachbereich Informatik.
- Müller, Joachim (2005): Workflow-based Integration. Grundlagen, Technologien, Management. Berlin: Springer-Verlag (Xpert.press).
- Neuhausen, Jörn (2011): Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- Noche, Bernd; Wenzel, Sigrid (1991): Marktspiegel Simulationstechnik in Produktion und Logistik. Köln: TÜV Rheinland (Praxiswissen aktuell).
- Nofen, Dirk; Klußmann, Jan Hinrich; Löllmann, Frederik (2005a): Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für die Zukunftsrobustheit von Fabriken. In: Hans-Peter Wiendahl, Dirk Nofen, Jan Hinrich Klußmann und Frank Breitenbach (Hg.): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München, Wien: Hanser, S. 8–16.
- Nofen, Dirk; Klußmann, Jan Hinrich; Löllmann, Frederik (2005b): Komponenten und Aufbau einer wandlungsfähigen modularen Fabrik. In: Hans-Peter Wiendahl, Dirk Nofen, Jan Hinrich Klußmann und Frank Breitenbach (Hg.): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München, Wien: Hanser, S. 17–30.

- Nofen, Dirk; Klußmann, Jan Hinrich; Löllmann, Frederik; Wiendahl, Hans-Peter (2003): Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse. Wandlungsfähigkeit auf Basis modularer Fabrikstrukturen. In: wt Werkstattstechnik online 93 (4), S. 238-243.
- Nyhuis, Peter; Fronia, Philip; Pachow-Frauenhofer, Julia; Wulf, Serjosha (2009): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Ergebnisse der BMBF-Vorstudie "Wandlungsfähige Produktionssysteme". In: wt Werkstattstechnik online 99 (4), S. 205-210.
- Partsch, Helmuth (2010): Objektorientierte Methoden. Modellbildung für softwaregestützte Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Petri, Carl Adam (1962): Kommunikation mit Automaten. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt. Fakultät für Mathematik und Physik.
- Prasse, Michael (1998): Die Objektklassifikatoren Typ, Klasse, Rolle und Schnittstelle innerhalb der objektorientierten Modellierungssprache MEMO-OML. In: Informationssystem-Architekturen, Rundbrief des GI Fachausschusses 5.2 (2), S. 23–30.
- REFA (1985): Methodenlehre der Planung und Steuerung. 4. Aufl. 5 Bände. München: Hanser.
- Reisig, Wolfgang (2010): Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Rumbaugh, James; Blaha, Michael; Prmerlani, William; Eddy, Frederick; Lorensen, William (1994): Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen. München [u.a.]: Hanser [u.a.].
- Rupp, Chris; Queins, Stefan (2012): UML2 glasklar. Praxiswissen für die UML-Modellierung. 4., aktualisierte und erw. Aufl. München, Wien: Hanser.
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried (2004): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schöf, Dipl-Inform Stefan; Wieting, Dipl-Inform Ralf; Sonnenschein, Michael (1997): Abschlußbericht des Projekts DNS (Distributed Net Simulation).
- Schöf, Stefan (1997): Verteilte Simulation höherer Petrinetze. Dissertation. Universität Oldenburg, Oldenburg.
- Schuh, Günther; Roesgen, Robert (2006): Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. Aufgaben. In: Günther Schuh (Hg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (VDI), S. 28–80.
- Schwermer, Martin (1998): Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen. Berlin: PTZ [u.a.] (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

Süssenguth, Wolfram (1992): Methoden zur Planung und Einführung rechnerintegrierter Produktionsprozesse. München: C. Hanser (Produktionstechnik Berlin, 93).

Thommen, Jean-Paul; Horn, Gustav A. (2013): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Modell. Hg. v. Springer Gabler Verlag. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/495/modell-v11.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2013.

VDI/VDE-Richtlinie 3681, Oktober 2005: Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik.

VDI-Richtlinie 5200, Februar 2011: Fabrikplanung Planungsvorgehen.

VDI-Richtlinie 4465, Stand 24.02.2012: Unveröffentlichte Arbeitsfassung Modellbildung.

Wenzel, Sigrid; Kuhn, Axel (2008): Simulation logistischer Systeme. In: Dieter Arnold, Kai Furmans, Heinz Isermann, Axel Kuhn und Horst Tempelmeier (Hg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch), S. 73–94.

Westkämper, Engelbert (2009): Turbulentes Umfeld von Unternehmen. In: Engelbert Westkämper und Erich Zahn (Hg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin: Springer (SpringerLink : Bücher), S. 7–25.

Wiendahl, Hans-Peter (2002): Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online 92 (4), S. 122-127.

Zapf, Michael; Heinzl, Armin (2000): Ansätze zur Integration von Petri-Netzen und objektorientierten Konzepten. In: Wirtschaftsinformatik 42 (1), S. 36-46.

9 Anhang

THORNs - Timed Hierarchical Object-Related Nets

Die THORNs (Timed Hierarchical Object-Related Nets) sind eine spezielle Klasse höherer Petrinetze, die im Rahmen des Projekts Distributed Nets Simulation (DNS) entworfen wurden. THORNs sind höhere Petrinetze, in die verschiedene bekannte Konzepte integriert wurden und die dadurch eine kompakte und effiziente Modellbildung komplexer Systeme erlauben. In ihnen werden statt attributloser Marken komplexe Objekte im Sinne der objektorientierten Programmiersprache verwendet (Schöf et al. 1997, S. 4). Die Markentypen und Netzelemente werden in der Sprache C++ ausgedrückt und bieten dadurch eine komfortable Möglichkeit zur weiteren Spezifizierung von Stellen und Transitionen sowie verschiedenen Kantentypen (Schöf 1997, S. 35).

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften und Elemente der THORNs in Anlehnung an Schöf (Schöf 1997, S. 43 ff.) dargestellt und anhand eines beispielhaften Netzes, welches in **Abbildung 9-2** dargestellt ist, erläutert.

Marken

Die Marken des Netzes sind Objekte, das heißt, sie sind Instanzen von C++ Klassen und können Eigenschaften und Funktionen enthalten. Über die Definition von Funktionen und Variablen im Public Bereich der Klasse bieten die Marken Schnittstellen, die durch die Funktionen, mit denen die Transitionen beschriftet werden, verwendet werden können. Die Variablen der Marken können dabei über den Objektnamen und den jeweiligen Variablennamen angesprochen werden.

Eine Klassendefinition für ein Auto mit den privaten Variablen Velocity und Weight, mit einer öffentlichen Variablen Fuel und einer Funktion Consumption würde in C++ dann beispielsweise so aussehen:

```
Class CAR {
    Int Velocity;           // Geschwindigkeit in [km/h]
    Int Weight;            // Gewicht in [kg]
Public:
    Int Fuel;              // Tankinhalt in [l]
    Int Consumption();    // bestimmt Treibstoffverbrauch in
                          // [l/km]
    Double Timefor(int distance); //bestimmt Fahrtdauer in
                          // [s] fuer in [m] gegebene Entfernung
}
```

Stellen

Um festzulegen, zu welcher Klasse die auf den Stellen liegenden Objekte gehören, wird den Stellen ein Typ zugeordnet. Dieser ist durch eine C++ Klasse beschrieben und auf einer Stelle sind jeweils nur Objekte eines Typs erlaubt. Die Stellen werden als Kreis dargestellt, mit einem Stellennamen beschriftet und ihr Typ wird in eckigen Klammern angegeben. In dem Beispiel aus **Abbildung 9-2** heißt beispielsweise eine Stelle Nord und auf ihr liegen Marken, die der Klasse CAR zugehörig sind.

Mithilfe einer Stellenkapazität kann außerdem die Anzahl von Marken, die auf einer Stelle möglich sind, beschränkt werden. Eine Transition kann bei einer solchen Beschränkung nur schalten, wenn auf den Nachbereichsstellen eine ausreichende Kapazität frei ist. Die Stellenkapazität kann einen beliebigen ganzzahligen Wert annehmen oder unbeschränkt sein, dann erhält die Stellenkapazität den symbolischen Wert ∞ .

Kanten

Die Kanten können ein Gewicht zugeordnet bekommen, das angibt, wie viele Marken beim Schalten von der Transition konsumiert bzw. auf ihr produziert werden. Transitionen können nur dann aktiviert werden, wenn Marken in der durch das Kantengewicht vorgegebenen Vielfachheit vorhanden sind. Standardmäßig erhalten die Kanten das Gewicht 1. Die Kanten werden mit einem Variablennamen (ein C++ Bezeichner) beschriftet, um die Objekte in den Schaltbedingungen der Transitionen referenzieren zu können. In dem Netz aus **Abbildung 9-2** sind die Kanten, die von der Stelle Nord zu Transition Fahren gehen, mit dem Bezeichner *Incar* beschriftet.

Bei einem Gewicht von eins kann der Bezeichner in der Schaltbedingungen direkt verwendet werden, ist es jedoch größer als eins werden die Objekte, die durch die Kante gehen, in einem Feld der Länge die ∞ entspricht zur Verfügung gestellt.

Es gibt fünf verschiedene Kantentypen, deren unterschiedliche Darstellungsweise in **Abbildung 9-1** dargestellt sind. Die zwei Standardkanten sind die Eingangs- und die Ausgangskante. Die Eingangskanten nehmen aus den Vorbereichsstellen die entsprechenden Marken und aktivieren die Transition, die Ausgangskante gibt durch das Schalten Marken an die Nachbereichsstellen weiter. Die Testkante (oder auch aktivierende Kante) aktiviert die Transition bei Vorhandensein der entsprechend des Kantengewichts vorgegebenen Marken, entnimmt diese allerdings nicht aus der Stelle. Die Anzahl der Marken der Stelle an einer Testkante bleibt also unverändert. Die Inhibitorkante aktiviert die Transition wenn die Vorbereichsstelle unmarkiert ist, benötigt also keine Marke zum Schalten. Zusätzlich sind konsumierende Kanten vorhanden, die keinen Einfluss auf die Aktivierung der Transition haben. Sie entleeren beim Schalten die Vorbereichsstelle vollständig.

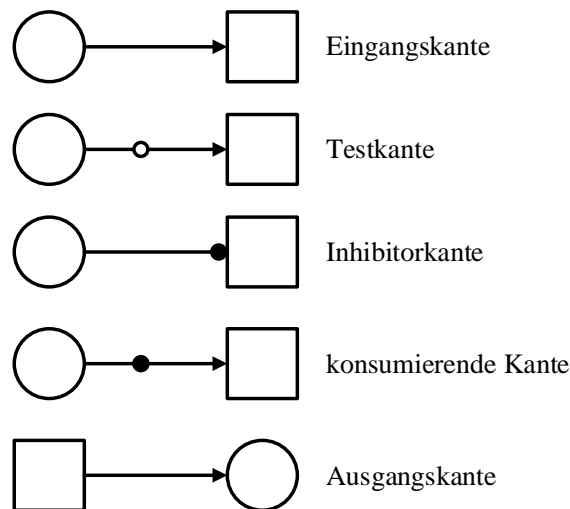


Abbildung 9-1 Kantentypen in THORNs nach (Schöf 1997, S. 48)

Transitionen

Neben den Bedingungen, die sich durch den Vorbereich und Nachbereich der Transitionen ergeben, enthalten die Transition in THORNs zusätzlich Schaltdauerfunktionen, Schaltbedingungen, Schaltaktionen und Schaltkapazitäten.

Schaltbedingungen sind zusätzliche Forderungen an die Vorbereichsmarken, mit denen das Schalten ermöglicht wird. Ob die Transition schaltet ist abhängig von den Werten der Attribute, die den Marken zugeordnet sind. Die Transitionen sind aktiviert, wenn die Schaltbedingungen den Wert „true“ zurückgeben, dabei muss im Vorbereich jede Konfiguration von Marken getestet werden. So kann zum Beispiel in der Transition **Fahren** eine Bedingung überprüfen, ob die Marke an der Kante *Incar* den richtigen Fahrzeugtyp zum Schalten enthält. Dazu muss die Klasse CAR ein Attribut bekommen, das zwischen den Fahrzeugtypen, beispielsweise Bus und Pkw, unterscheidet. In dem folgenden Beispiel soll nicht bei dem Fahrzeugtyp Bus geschaltet werden:

```
Fahren (typeid(INCAR).name != "Bus")
```

Wenn die Schaltbedingung erfüllt ist und die Transition schalten kann, gibt die Schaltaktion an, welche Werte die Attribute der Marken im Nachbereich annehmen sollen. Diese können, abhängig von den Vorbereichsobjekten, durch die Verwendung der entsprechenden Variablen erfolgen. In dem vorgestellten Beispiel werden der ausgehenden Marke die Eigenschaften der eingehenden übertragen und dann der Füllstand über die public Funktion Consumption geändert:

```
Outcar=InCar;
```

```
OutCar.fuel=InCar.Fuel - Consumption () /1000*DISTANCE;
```

Die Schaltdauerfunktion in der Transition gibt an, wie lange die Transition zum Schalten braucht. Dazu wird jede Transition mit einer Schaltdauer beschriftet und die Marken

erhalten einen Zeitstempel, der in der Anfangsmarkierung null ist. Das gesamte Netz hat eine globale Zeit und die Transitionen können nur Schalten, wenn der Zeitstempel der Marken im Vorbereich der Transition eine kleinere oder die gleiche Zeit wie die globale Zeit anzeigt. Wenn keine Transition zum aktuellen Zeitpunkt aktiviert werden kann, wird die globale Uhr auf den nächsten Zeitpunkt gesetzt, bei dem wieder eine Transition aktiviert ist.

Schaltkapazitäten geben an, ob und gegebenenfalls wie oft eine Transition zu sich selbst schalten kann. Eine Transition mit der Schaltkapazität 1, die zu schalten begonnen hat, deren Schaltende aber noch nicht von der globalen Uhr erreicht wurde, kann innerhalb dieser Phase nicht erneut schalten, selbst wenn die Bedingungen dazu erfüllt sind. Sie kann von der Schaltkapazität eins bis zu einer unbeschränkten Kapazität (gekennzeichnet mit ω) reichen.

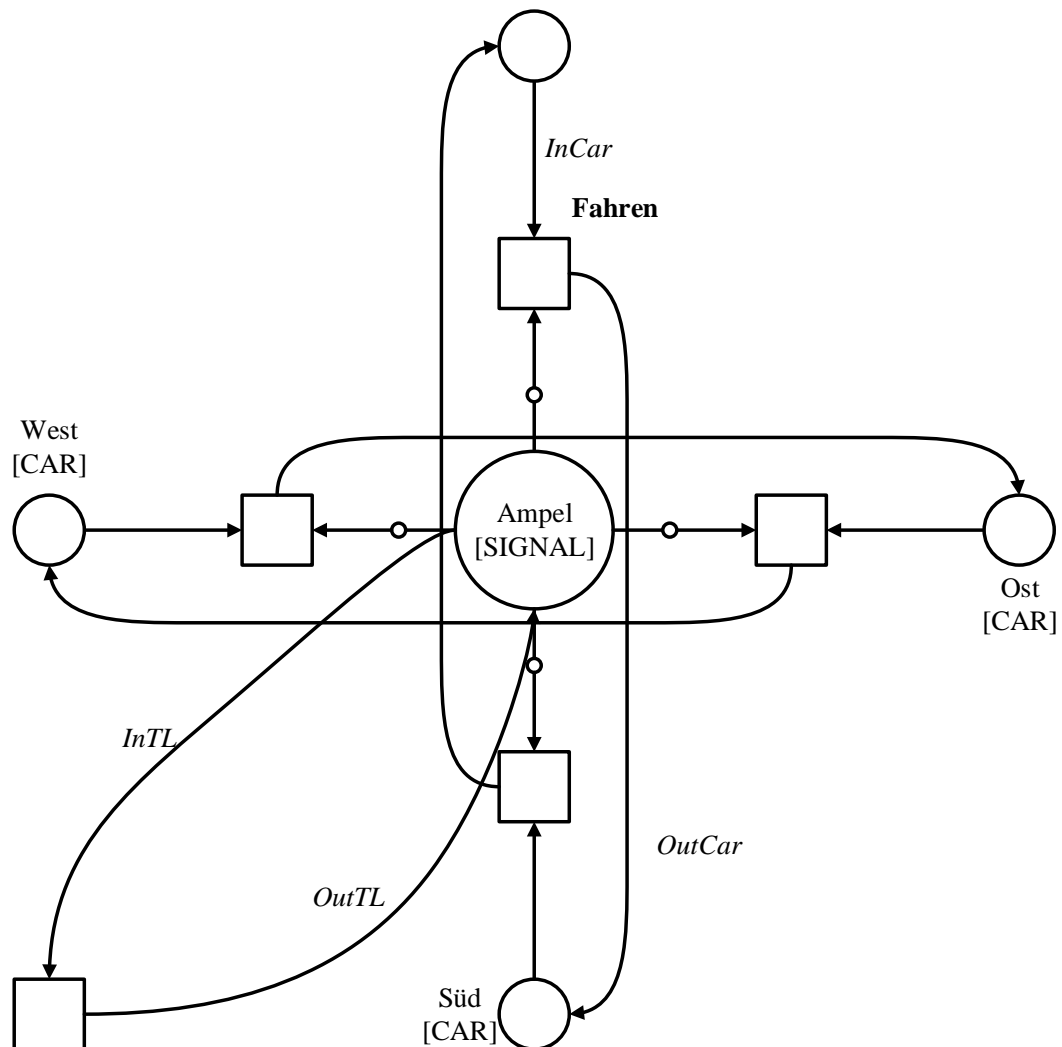


Abbildung 9-2 Beispiel eines THORNs nach (Schöf 1997, S. 51)