

MASTERARBEIT

Konzeptentwicklung für agentenbasierte Produktionsplanung mittels ereignisdiskreter Simulationssoftware

bearbeitet von: Daniel Ortmann

Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen
Matrikel-Nr.: 137043

Ausgegeben am: 03.02.2015

Eingereicht am: 17.07.2015

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Betreuer: Maik Deininger

Inhaltsverzeichnis

Konzeptentwicklung für agentenbasierte Produktionsplanung mittels ereignisdiskreter Simulationssoftware

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
2 Produktionsplanung	4
2.1 Einteilung der Produktionsplanung	4
2.2 Einführung Produktionsplanung und -steuerung.....	5
2.2.1 Definition und Ziele	5
2.2.2 Rahmenbedingungen der Produktionsplanung und -steuerung.....	6
2.2.3 Produktionsplanung und -steuerung im Unternehmensablauf	7
2.3 Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung	9
2.3.1 Hauptfunktionen der Produktionsplanung.....	10
2.3.2 Hauptfunktionen der Produktionssteuerung	12
2.4 Zentrale versus dezentrale Produktionsplanung und -steuerung.....	14
2.5 Agententechnologie.....	16
2.5.1 Definition des Agentenbegriffs	16
2.5.2 Eigenschaften von Agenten	17
2.5.3 Klassifikation von Agenten	18
2.6 Multi-Agenten Systeme.....	20
2.6.1 Kommunikation von Agenten	21
2.6.2 Koordination von Agenten	22
2.6.3 Interaktionsformen von Agenten	23
2.7 Multi-agentenbasierte Produktionsplanung.....	24
2.7.1 Voraussetzungen.....	25
2.7.2 Multi-Agenten Systeme für die Produktionsplanung	25
2.8 Industrie 4.0 im Rahmen agentenbasierter Produktionsplanung.....	27
2.8.1 Begriffsentstehung Industrie 4.0	27
2.8.2 Relevante Elemente der vierten industriellen Revolution	29

2.8.3	Produktionsplanung im Kontext Industrie 4.0.....	33
2.8.4	Aktuelle Forschungsvorhaben	33
3	Simulation.....	37
3.1	Einführung Simulation	37
3.1.1	Der Systembegriff	37
3.1.2	Der Modellbegriff.....	38
3.1.3	Definition, Nutzen und Einsatzbereiche der Simulation	38
3.2	Simulation in der Produktionsplanung.....	40
3.2.1	Voraussetzungen.....	41
3.2.2	Einsatzmöglichkeiten im operativen Betrieb.....	42
3.3	Konzepte und Elemente innerhalb ereignisdiskreter Simulationswerkzeuge	43
3.4	Plant Simulation	44
3.4.1	Die Arbeitsoberfläche.....	45
3.4.2	Wichtige Bausteine.....	46
4	Ableitung und Analyse von Anforderungen an eine Simulationssoftware anhand einer Beispiel-Fertigungslinie	48
4.1	Anforderungen an Simulationssoftware	48
4.1.1	Verknüpfbarkeit der realen und der virtuellen Welt.....	48
4.1.2	Abbilden von Agenten.....	49
4.1.3	Cyber-Physische Systeme	50
4.1.4	Abbilden intelligenter Werkstücke	51
4.1.5	Abbilden intelligenter Produktionseinheiten	52
4.1.6	Zusammenfassung der Anforderungen.....	52
4.2	Vorstellung der Beispiel-Fertigungslinie	54
4.2.1	Heutige reale Anlage (Systembeschreibung)	54
4.2.2	Simulationsmodell.....	55
4.3	Darstellung erfüllter Anforderungen	58
4.3.1	Simulationsmodelle für den operativen Betrieb	58
4.4	Erweiterung der Beispiel-Fertigungslinie	59
4.5	Darstellung nicht erfüllter Anforderungen	60
4.5.1	Automatische Modellgenerierung	60
4.5.2	Verknüpfung der realen mit der digitalen Welt.....	61
4.5.3	Agententechnologie	62
4.5.4	Cyber-Physische Systeme	64
5	Konzeptentwicklung zur Erfüllung nicht modellierbarer Anforderungen.....	65

5.1	Diskussion der nicht erfüllten Anforderungen	65
5.1.1	Agenten.....	66
5.2	Grundlegende Konzeptidee	67
5.3	Intelligentes Werkstück.....	68
5.3.1	Notwendige Informationen.....	69
5.3.2	Zielsystem.....	69
5.3.3	Kommunikationsschnittstelle	70
5.4	Intelligente Produktionsanlage	71
5.4.1	Notwendige Informationen.....	71
5.4.2	Zielsystem.....	72
5.4.3	Kommunikationsschnittstelle	72
5.5	Modellierung in Plant Simulation	73
5.5.1	intelligentes Werkstück	73
5.5.2	intelligente Produktionsanlage	77
5.5.3	Verkettung	80
5.6	Beispiel-Szenario	82
5.6.1	Global vorhandene Informationen.....	82
5.6.2	Simulationsszenarien.....	83
5.6.3	Erweiterung der Bausteine	84
6	Validierung.....	87
6.1	Beispiel-Szenarien.....	87
6.1.1	Aufgaben der Agenten in der Produktionsplanung und -steuerung ...	87
6.1.2	Analyse der einzelnen Szenarien.....	88
6.1.3	Vergleich der Szenarien	89
6.2	Validierung des entwickelten Konzeptes	91
6.2.1	Einsatzmöglichkeiten	93
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	95
8	Literaturverzeichnis	97
	Geheimhaltungserklärung	I
	Anhang.....	II
	Anhang A: Quellcodes.....	II
A.1	Methoden des Fördergutes	II
A.1.1	Die Methode Prüfen	II
A.2	Die Methoden der Parallelstation.....	III
A.2.1	Die Methode Ausgangssteuerung.....	III

A.2.2 Die Methode Eingangssteuerung.....	III
A.2.3 Die Methode Störung	III
A.2.4 Die Methode VergleicheWZe	IV
A.3 Die Methoden des Puffers	IV
A.3.1 Die Methode Ausgangssteuerung.....	IV
A.3.2 Die Methode Eingangssteuerung.....	V
A.4 Die Methoden der Verkettung.....	V
A.4.1 Die Methode Ausgangssteuerung.....	V
A.4.2 Die Methode Ausschuss	V
A.4.3 Die Methode Beobachte_i	VI
A.4.4 Die Methode Eingangssteuerung.....	VI
A.4.5 Die Methode sucheMaschineAFX	VI
A.4.6 Die Methode sucheMaschineAFY	VII
A.4.7 Die Methode sucheMaschineAFZ.....	VII
A.5 Die Methoden des Hilfspuffers	VIII
A.5.1 Die Ausgangssteuerung	VIII
A.5.2 Die Methode DurchsucheAFX	VIII
A.5.3 Die Methode DurchsucheAFY	IX
A.5.4 Die Methode DurchsucheAFZ	X
A.5.5 Die Methode Eingangssteuerung.....	XI

Abkürzungsverzeichnis

ACL	Agent Communication Language
AF	Arbeitsfolge
BDE	Betriebsdatenerfassung
BEs	Bewegliche Elemente
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BoA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
c-Agenten	Community Administration Agenten
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-Physisches System
DAS	Distributed Asynchronous Schedule
DDE	Dynamic Data Exchange
DEPRODEX	Dezentrale Produktionssteuerung durch Expertensysteme
DLZ	Durchlaufzeit
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	Und andere (Lat. Et alii(Maskulinium), et aliae(Femininum))
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
i.A.	In Anlehnung an
MAS	Multi-Agenten System
MES	Manufacturing Execution System
MTTR	Mean Time To Repair
(n.)i.O.	(Nicht) in Ordnung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
ProCPS	Production CPS
PROSA	Product-Resource-Order-Staff-Architecture
s-Agenten	Service Agenten
SOPHIE	Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung
SOPP	Selbstorganisierende Produktionsprozesse
TPM	Total Productive Maintenance
WIP	Work in Process
YAMS	Yet Another Manufacturing System

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einordnung der Produktionsplanung und -steuerung in den Unternehmensablauf [WIENDAHL 2014, S. 278]	8
Abbildung 2-2: Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung [WIENDAHL 2014, S. 282].....	10
Abbildung 2-3: Klassifikation von Agenten i.A. [RUSSELL et al. 2010, S. 49ff]	19
Abbildung 2-4: Agententypen für die Steuerung i.A. [MÖNCH 2006a, S. 86]	25
Abbildung 2-5: Interaktionen zwischen Auftrags-, Produkt-, Ressourcen- und Schedulingagent i.A. [MÖNCH 2006a, S. 91].....	26
Abbildung 2-6: Die vier Stufen der Industriellen Revolution [BAUER et al. 2013, S. 17]28	
Abbildung 2-7: Lösungsansatz im Projekt „SOPHIE“ [KREIMEIER et al. 2015, S. 206]34	
Abbildung 3-1: Steuerungsalgorithmus der ereignisdiskreten Simulation i.A. [Ulrich Hedtstück 2013, S. 24]	44
Abbildung 3-2: Die Arbeitsoberfläche von Plant Simulation 12.....	45
Abbildung 4-1: Simulationsmodell des Beispiel-Szenarios	56
Abbildung 4-2: Modell eines doppelspindligen Bearbeitungszentrums.....	57
Abbildung 4-3: Erweiterung der Fertigungslinie.....	60
Abbildung 4-4: Schnittstellenkonzept Simulation - MES/BDE i.A. [BURGES & FRANK 2015]	61
Abbildung 5-1: Benutzerdefinierte Attribute des Fördergutes	73
Abbildung 5-2: Die Methode PrüfeWZ.....	76
Abbildung 5-3: Benutzerdefinierte Attribute der Parallelstation.....	78
Abbildung 5-4: Quellcode der Methode „schreibeBearbeitungen“	79
Abbildung 5-5: Benutzerdefinierte Attribute der Verkettung.....	81
Abbildung 5-6: Übersicht des Umlagerungs- und Schreibprozess.....	84
Abbildung 6-1: Output der Szenarien je Tag.....	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Datenbasis der PPS [WIENDAHL 2014, S. 284]	8
Tabelle 4-1: Anforderungskatalog einer agentenbasierten Produktionsplanung an ereignisdiskrete Simulationssoftware	53
Tabelle 4-2: Kennzahlen des Systems	55

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen stehen vor der ständigen Herausforderung sich den steigenden Marktdynamiken anzupassen. Kürzere Innovationszyklen, individuell auf den Kunden zugeschnittene Produkte sowie schwer vorhersehbare Nachfrageschwankungen sind nur einige Beispiele hierfür [LASS et al. 2013, S. 47]. Gerade die beiden erstgenannten führen zu einer Zunahme von Produktmodellen. Um dem Kunden trotz dieser Dynamik, gemäß der „6-R-Regel“, das richtige Produkt, in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit, in der richtigen Qualität, am richtigen Ort und zu den richtigen Kosten zur Verfügung zu stellen, werden zum einen immer höhere Ansprüche (bspw. kürzere Durchlaufzeiten) an die eigene Produktion geltend gemacht, zum anderen steigt die Komplexität der Produktion aufgrund der genannten Marktdynamik stetig an [HOMPEL et al. 2007-2011, S. 322]. Um diese Komplexität zu beherrschen, erlangt die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) eine immer bedeutendere Rolle in produzierenden Unternehmen und muss stetig optimiert werden [SCHUH et al. 2014, S. 964].

So wurden zur Verbesserung der Flexibilität und Qualität der Planung, wegen eines immer kürzer werdenden Planungshorizontes und der steigenden Komplexität der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), in der Vergangenheit neue Methoden und Modelle entwickelt. Unter anderem wurden IT-Systeme, wie beispielsweise Enterprise Resource Planning (ERP-) Systeme, PPS-Systeme oder Manufacturing Execution Systems (MES) eingeführt, die dem Menschen bei der Lösung von PPS-Problematiken unterstützen sollen. Neben der Einführung der genannten IT-Systemen, hat auch die Bedeutung der Simulation stetig zugenommen und findet immer mehr Anwendung in diesem Bereich.

Allerdings wurden trotz der Nutzung einer Vielzahl an IT-Systemen Grenzen des traditionellen PPS-Ansatzes erreicht, da die Planungs- und Rückmeldedaten häufig unzuverlässig sind [SCHUH et al. 2014, S. 964]. Deswegen führten die Überlegungen weg vom Lösen eines Gesamtproblems in einer zentralen Produktionsplanung und -steuerung, hin zum Lösen von Teilproblemen in einer dezentralen PPS. Ein Ansatz dafür sind Multi-Agenten Systeme, in denen verschiedene Agenten autonom miteinander kommunizieren, kooperieren und Probleme lösen. Diese Technologie kann auch als Basis Cyber-Physischer Systeme dienen, die ihrerseits die Basis der vierten industriellen Revolution bilden [BAUER et al. 2013, S. 17].

Die Einführung einer agentenbasierten Produktionsplanung führt dabei zu neuen Problemstellungen. So löst dieser Ansatz zwar teilweise, die Probleme einer zentralen PPS, wie beispielsweise das Reagieren auf Störungen, und steigert die Flexibilität, Robustheit und Reaktionsfähigkeit einer Produktion, jedoch führt die Autonomie der

einzelnen Agenten zu einer erschwerten Vorhersagbarkeit von wichtigen Kenngrößen [ZELEWSKI 1995, S. 1ff]. Als Beispiel seien hier die Durchlaufzeit (DLZ) oder die exakte Planbarkeit von Lieferterminen als Kundenanforderung genannt. Gerade letzteres stellt produzierende Unternehmen vor eine große Herausforderung, ist doch die Liefertermintreue für 67% der Unternehmen die bedeutendste logistische Zielgröße [SCHUH et al. 2013a, S. 336]. Umso wichtiger ist die genaue Vorhersagbarkeit des Liefertermins.

Eine vielfach genutzte Möglichkeit zur Bestimmung der gerade genannten Kennwerte und zur Analyse von Produktionssystemen ist die Materialflusssimulation. Ob und inwieweit eine solche Simulationssoftware die Kenngrößen einer agentenbasierten, dezentralen Produktionsplanung bestimmen und damit zur Nutzung in der Produktionsplanung solcher Systeme herangezogen werden kann, soll im Zuge dieser Arbeit analysiert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Möglichkeiten ereignisdiskreter Simulationssoftware im Hinblick auf agentenbasierte Produktionsplanung zu untersuchen. Dies beinhaltet die Analyse von Industrie 4.0 im Rahmen agentenbasierter Produktionsplanung und das Bestimmen von Anforderungen an eine Simulationssoftware im Kontext agentenbasierter Produktionsplanung. Darauf aufbauend soll eine ereignisdiskrete Simulationssoftware bezüglich der abgeleiteten Anforderungen untersucht und ein Konzept zur Erfüllung von nicht erfüllten Anforderungen entwickelt werden. Anschließend wird das Konzept validiert. Als Beispiel für eine ereignisdiskrete Simulationssoftware dient in dieser Arbeit Tecnomatix Plant Simulation der Firma Siemens.

Um Anforderungen einer agentenbasierten Produktionsplanung aufzustellen werden zunächst Grundlagen zu beiden Themengebieten (Produktionsplanung und Agententechnologie) vorgestellt. Dazu wird zuerst der Begriff Produktionsplanung aufgeteilt und die Produktionsplanung und -steuerung innerhalb der Produktionsplanung lokalisiert. Darauf aufbauend werden sowohl die Aufgaben der Produktionsplanung als auch der Produktionssteuerung dargestellt. Nach der Präsentation der Vor- und Nachteile der zentralen und dezentralen PPS, folgt als Möglichkeit der Umsetzung einer dezentralen PPS, die Einführung in die Agententechnologie und Multi-Agenten Systeme. Nach der Vermittlung der Grundlagen werden beide Themengebiete mit einander kombiniert und Möglichkeiten der Multi-agentenbasierten Produktionsplanung vorgestellt. Dabei wird beispielhaft gezeigt welche PPS-Aufgaben von Agenten übernommen werden können. Um einen aktuellen Bezug zu Forschungsvorhaben herzustellen, wird anschließend das Themengebiet Industrie 4.0 (I4.0) im Kontext der agentenbasierten Produktionsplanung dargestellt. Dazu werden für diese Arbeit

wesentliche Elemente von Industrie 4.0, Auswirkungen von I4.0 auf die Produktionsplanung sowie aktuelle Forschungsprojekte beschrieben.

Um im vierten Kapitel Anforderungen an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware aufzuzeigen und zu analysieren, werden im dritten Kapitel die Grundlagen zum Thema Simulation skizziert. Dies beinhaltet die Definition der wichtigsten Begriffe, das Darstellen der Einsatzgebiete der Simulation in der Produktionsplanung sowie das Vorstellen der hier verwendeten Beispielsoftware Plant Simulation.

Basierend auf den Resultaten der Kapitel zwei und drei werden im vierten Kapitel zuerst die Anforderungen einer agentenbasierten Produktionsplanung im Kontext der vierten industriellen Revolution an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware aufgezeigt. Darauf aufbauend wird Plant Simulation bezüglich der entwickelten Anforderungen untersucht. Hierzu wird zunächst eine Beispiel-Fertigungslinie vorgestellt, die als Basis der folgenden Überlegungen dient. Mit Hilfe der Simulationssoftware wird ein Modell der Linie erstellt und simuliert. Anhand dieser Simulation wird der zuvor erstellte Anforderungskatalog analysiert und die bereits erfüllten Anforderungen dargestellt. In einem zweiten Schritt wird die Beispiel-Fertigungslinie um Elemente der agentenbasierten Produktionsplanung erweitert. Mit Bezug auf die Erweiterung der Fertigungslinie werden die nicht erfüllten Anforderungen verdeutlicht und damit Handlungsbedarfe aufgezeigt, die bearbeitet werden müssen um die Einsatzmöglichkeiten der Software im Rahmen agentenbasierter Produktionsplanung zu erhöhen.

Als Basis des fünften Kapitels dienen die nicht erfüllten Anforderungen aus Kapitel vier. Diese werden zu Beginn noch einmal aufgegriffen und erläutert, welche Anforderungen im Zuge der Konzeptentwicklung bearbeitet werden. Im Anschluss werden die einzelnen Konzepte zur Erfüllung der gewählten Anforderungen entwickelt. Dazu werden zuerst die Konzepte allein vorgestellt und danach wird das Simulationsmodell um die entwickelten Konzepte erweitert. Ferner werden die Konzepte validiert. Dazu wird zum einen aufgezeigt inwiefern die Anforderungen nun erfüllt werden können und zum anderen wird mithilfe des Vergleiches beider Simulationsmodelle aufgezeigt, inwiefern sich der Output durch die Optimierungen verändert.

Das siebte und letzte Kapitel fasst die wichtigsten Aussagen der Arbeit noch einmal zusammen und gibt einen kleinen Ausblick auf mögliche folgende Fragestellungen, die aufbauend auf dieser Arbeit behandelt werden können.

2 Produktionsplanung

Dieses Kapitel dient dazu in die Thematik Produktionsplanung einzuführen. Dazu wird zunächst auf die strategische, taktische und operative Produktionsplanung eingegangen. Danach wird der Fokus auf die Produktionsplanung und -steuerung (operative Produktionsplanung) gelegt. Dies beinhaltet die Definition des Begriffs, die Beschreibung der Ziele sowie eine Einordnung in den Unternehmensablauf, wobei die typischen Schnittstellen mit anderen Fachbereichen beleuchtet werden. Im Anschluss werden die Begriffe Produktionsplanung und Produktionssteuerung voneinander abgegrenzt und die jeweiligen Hauptfunktionen dargestellt. Kapitel 2.4 dient zur Diskussion der Vor- und Nachteile einer zentralen gegenüber einer dezentralen PPS. Darauf aufbauend wird die Thematik der agentenbasierten Produktionsplanung beschrieben. Dazu erfolgt zunächst eine Vorstellung der Eigenschaften und Typen von Agenten, um im Anschluss in die Materie der Multi-Agenten Systeme einzuführen. Im Kapitel 2.8 werden abschließend die aktuellen Technologieentwicklungen der vierten industriellen Revolution in die agentenbasierte Produktionsplanung eingeordnet.

2.1 Einteilung der Produktionsplanung

Die Produktionsplanung lässt sich in eine strategische, taktische und operative Produktionsplanung unterteilen [MÄRZ et al. 2011, S. 7]. Die strategische Produktionsplanung „als Teil der langfristigen Unternehmensplanung“ [MÄRZ et al. 2011, S. 7], legt die Wettbewerbsausrichtung hinsichtlich Technologie und Produktkonzept fest. Dazu gehören unter anderem das Definieren der Fertigungstiefe und das anzubietende Sortiment [RAMSAUER 1997, S. 14]. „Ziel der strategischen Produktionsplanung ist es, eine wettbewerbsfähige Produktion zu schaffen und zu erhalten“ [RAMSAUER 1997, S. 14].

Innerhalb der taktischen Produktionsplanung wird die Produktionsstrategie der strategischen Produktionsplanung schrittweise umgesetzt. Dies beinhaltet unter anderem das Festlegen der Produktionskapazitäten, bspw. der Personal- und Betriebsmittelkapazitäten sowie die Layoutplanung [GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 27].

Die operative Produktionsplanung soll, im Rahmen der Festlegungen aus der strategischen und taktischen Produktionsplanung, die vorhandenen Kapazitäten optimal einsetzen, um die Produktion möglichst wirtschaftlich zu betreiben [MÄRZ et al. 2011, S. 7]. Dementsprechend befasst sich die operative Produktionsplanung „mit der Organisation aller Vorgänge, die beim Güterfluß durch die Produktion zu planen oder zu steuern sind“ [RAMSAUER 1997, S. 14].

Da die operative, taktische und strategische Produktionsplanung eng miteinander in Beziehungen stehen, lassen sich diese in Regelkreisen darstellen [BISCHOFF 1999, S.

17]. Dies verdeutlicht das die strategische Produktionsplanung zwar nach einem Top-down-Prinzip, den Rahmen für die taktische und operative Produktionsplanung festlegt [DANGELMAIER 2009, S. 9]. Allerdings müssen genauso Rückmeldungen der operativen Produktionsplanung, an die taktische und strategische Produktionsplanung zurückgegeben und in die entsprechenden Planungen mit einbezogen werden [BISCHOFF 1999, S. 17].

Im Folgenden wird der Fokus der Arbeit auf der operativen Produktionsplanung liegen.

2.2 Einführung Produktionsplanung und -steuerung

Nach der Einteilung der Produktionsplanung in die strategische, taktische und operative Produktionsplanung, wird nun genauer auf die operative Produktionsplanung eingegangen, die im Allgemeinen auch als Produktionsplanung und -steuerung bezeichnet wird [KURBEL 2011, S. 24].

Produzierende Unternehmen legen den Fokus auf die Planung von wertschöpfenden Prozessen, weshalb die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) einen entsprechenden hohen Stellenwert in diesen Unternehmen hat [BRACHT et al. 2009, S. 33]. Dementsprechend wird im Folgenden eine Einführung in dieses Themengebiet gegeben. Dazu wird zuerst der Begriff PPS definiert und die verfolgten Ziele aufgezeigt. Im Anschluss daran, werden Rahmenbedingungen der PPS dargestellt und mit Hilfe der Einordnung der Produktionsplanung und -steuerung in den Unternehmensablauf eine erste Abgrenzung des Themengebiets vorgenommen.

2.2.1 Definition und Ziele

Definition PPS

[HACKSTEIN 1989, S. 4f] gab eine frühe Definition des PPS-Begriffes ab und verstand PPS als die Planung und Steuerung der vier Produktionsbereiche Konstruktion, Fertigung (Teilefertigung und Montage), Arbeitsvorbereitung und Beschaffung. Zu beachten gilt es dabei, dass die PPS diese Produktionsbereiche „nicht vom Standpunkt des technischen, technologischen oder geistigen Vorgangs [...], sondern von ihrer organisatorischen Erfassung und Eingliederung in die technische Auftragsabwicklung zu erfüllen“ [HACKSTEIN 1989, S. 4f] hat.

Heute betrachtet die PPS die gesamte technische Auftragsabwicklung. „Sie plant und steuert die betrieblichen Aufgabenbereiche Konstruktion, Vertrieb, Einkauf, Teilefertigung, Montage und Versand“ [SCHENK et al. 2014, S. 391].

Ziele PPS

Die Definition verdeutlicht die verschiedenen Teilbereiche, die die Produktionsplanung und -steuerung beeinflusst. Folglich gibt es viele verschiedene Teilziele die verfolgt werden, aber teilweise in Konflikt miteinander stehen [JODLBAUER 2007, S. 105].

Generell ist die Produktionsplanung und -steuerung dafür verantwortlich, dass die „vom Markt geforderten Produkte rechtzeitig in der geforderten Qualität und Quantität zu möglichst geringen Kosten fertig gestellt werden“ [JODLBAUER 2007, S. 105].

Zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels, werden in [JODLBAUER 2007, S. 106], [SCHENK et al. 2014, S. 391] und [SCHUH & STICH 2012b, S. 29] folgende Zielgrößen für die Produktionsplanung und -steuerung genannt:

- hohe Termin- und Mengentreue
- hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastung
- kurze Durchlaufzeiten
- geringe Lager- und Werkstattbestände
- minimale Kapitalbindung
- hohes Qualitätsniveau
- hohe Flexibilität und
- Kostenminimierung.

2.2.2 Rahmenbedingungen der Produktionsplanung und -steuerung

Mit Hilfe der Rahmenbedingungen soll hier eine erste Eingrenzung der PPS-Thematik vorgenommen werden. Hierbei kann zwischen betriebsexternen und betriebsinternen Rahmenbedingungen unterschieden werden [JODLBAUER 2007, S. 104].

Beispielhaft werden im Folgenden juristische Rahmenbedingungen und Marktanforderungen als externe sowie technologische und organisatorische als interne Rahmenbedingungen näher erläutert.

„**Juristische Rahmenbedingungen** wirken sich vor allem auf die Entität Mensch aus“ [JODLBAUER 2007, S. 105]. Die verschiedenen Gesetze, wie Arbeitszeit- oder Arbeitsschutzgesetz, aber auch Verordnungen, beispielsweise zum Umgang mit Gefahrstoffen, bilden den rechtlichen Rahmen in dem die PPS eingeordnet wird [JODLBAUER 2007, S. 105].

Marktanforderungen betreffen den Absatz- und den Beschaffungsmarkt. Anforderungen des Absatzmarktes werden in erster Linie vom Kunden an das Unternehmen herangetragen und äußern sich u.a. in Form von Qualitätsanforderungen, Lieferzeiten und Bestellmengen [JUNG 2010, S. 462]. Insbesondere letzteres kann mit Hilfe von Marketinginstrumenten beeinflusst werden und somit zu einer Glättung der Absatzmengen führen, was wiederum die Produktionsplanung vereinfacht. Eigenschaften des Beschaffungsmarktes können beispielsweise Mengenrestriktionen und Lieferzeiten sein und stellen ebenfalls wichtige Rahmenbedingungen für die PPS dar [JODLBAUER 2007, S. 104].

„Die **technologischen Rahmenbedingungen** beziehen sich schwerpunktmäßig auf die Produkte und Fertigungsprozesse“ [JODLBAUER 2007, S. 104]. Als Informationen für die PPS dienen hier beispielsweise Kennzahlen, wie die Bearbeitungs- oder die Rüstzeit, die beispielsweise für die Kapazitätsplanung von Bedeutung sind [JODLBAUER 2007, S. 104].

Unter dem Gesichtspunkt der **organisatorischen Rahmenbedingungen** werden die Aufbau- und Ablauforganisation zusammengefasst [JODLBAUER 2007, S. 104]. Die Einordnung der PPS in letztere wird im folgenden Kapitel mit Hilfe der **Abbildung 2-1** vorgenommen.

2.2.3 Produktionsplanung und -steuerung im Unternehmensablauf

Ausgangspunkt und erste Schnittstelle zur Produktionsplanung und -steuerung stellt der Vertrieb da. Hier gehen, über den Absatzmarkt, die Kundenaufträge ein und werden an die PPS weitergeleitet und verarbeitet. Hinzu kommen Vorratsaufträge, Aufträge für Ersatzteile und unternehmensinternen Bedarf, wie bspw. Prototypen [ARNOLD et al. ©2008, S. 323]. „Die Gesamtheit aller geplanten und erwarteten Aufträge stellt das Produktionsprogramm dar“ [WIENDAHL 2014, S. 279]. In regelmäßigen Abständen wird, mit Hilfe der Stücklisten, das Produktionsprogramm in einzelne Aufträge aufgeteilt. Fremdgefertigte Teile werden, sofern diese nicht im Lager vorhanden sind über den Einkauf geordert. Produkte, die selbst gefertigt werden, werden unter Berücksichtigung der aktuellen Produktionsaufträge, als Fertigungs- und/oder Montageaufträge eingelastet [WIENDAHL 2014, S. 279]. „Eine permanente Überwachung des Auftragsflusses und der Kapazitätsbelastung liefert die notwendigen Rückmeldungen an die PPS“ [WIENDAHL 2014, S. 279].

Eine zusammenfassende Einordnung in den Unternehmensablauf zeigt **Abbildung 2-1**.

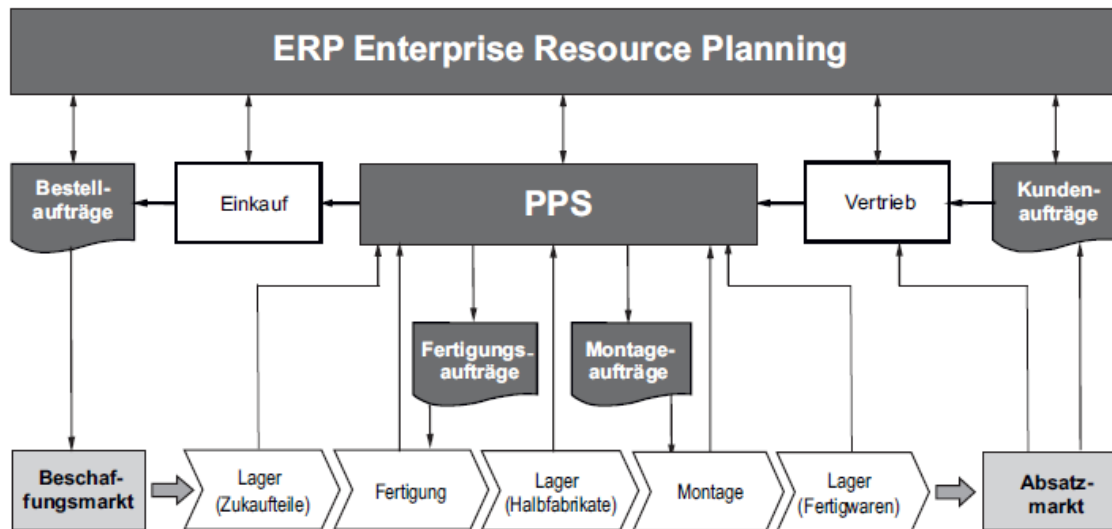


Abbildung 2-1: Einordnung der Produktionsplanung und -steuerung in den Unternehmensablauf [WIENDAHL 2014, S. 278]

Aus dieser Einordnung werden bereits erste Schnittstellen der PPS mit dem Einkauf, dem Vertrieb, der Fertigung und der Montage deutlich. Des Weiteren sind die entsprechenden Lagerbestände und Auftragsstatus zu berücksichtigen [ARNOLD et al. ©2008, S. 323].

Aufgrund dieser Schnittstellen ergeben sich verschiedene Daten, die für die Produktionsplanung und -steuerung benötigt werden. **Tabelle 2-1** zeigt eine Auswahl der Datenbasis.

Tabelle 2-1: Datenbasis der PPS [WIENDAHL 2014, S. 284]

Vertrieb	Ressourcen	Material	Beschaffung
Auftragsbestand Auftragseingang Marktinformationen Fertigerzeugnislager Kundendaten	Betriebsmittel Personal Schichtkalender	Materialstammdaten Stücklisten Arbeitspläne	Lieferantendaten Bestandsdaten Bestelldaten

Zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung werden vielfach PPS-Systeme genutzt. Diese bilden ein rechnergestütztes informationsverarbeitendes System, in dem „die integrierte Gestaltung und Durchführung der Produktionsplanung und -steuerung und die damit verbundene Datenverwaltung“ [EHRMANN op. 1997, S. 394] durchgeführt wird [SCHENK et al. 2014, S. 391].

Vielmehr werden PPS-Systeme in Enterprise Resource Planning (ERP-)Systeme integriert [WIENDAHL 2014, S. 279]. „Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass nicht nur die Produktion, sondern sämtliche an der Wertschöpfung eines Unternehmens beteiligten Ressourcen integriert geplant und gesteuert werden“ [WIENDAHL 2014, S.

279]. Des Weiteren kann die in **Tabelle 2-1** dargestellte Datenbasis im ERP-System als Datenbank hinterlegt und zur Produktionsplanung und -steuerung verwendet werden [WIENDAHL 2014, S. 284].

2.3 Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung

Nach der ersten Vorstellung des Konzeptes der Produktionsplanung und -steuerung werden im Folgenden die beiden Aspekte Produktionsplanung und Produktionssteuerung von einander separat betrachtet und die Funktionen beider Bereiche vorgestellt.

Nach [SPUR 2001, S. 509] ist unter Produktionsplanung: „die ablauforganisatorische Gestaltung von Produktionsprozessen unter Festlegung der technologischen, zeitlichen, örtlichen, mengenmäßigen und logistischen Bedingungen“ [SPUR 2001, S. 509] zu verstehen. Dementsprechend werden der Produktionsplanung klassischerweise die Aufgaben Produktionsprogrammplanung, Materialbedarfsplanung und Termin- und Kapazitätsplanung zugeordnet (s. dazu Kapitel 2.3.1). Insgesamt sind diese Aufgaben lang- bis mittelfristig angelegt (s. **Abbildung 2-2**) [WIENDAHL 2014, S. 282].

Den Übergang von der Planung zur Steuerung legt [BUZACOTT et al. 2010] an die Stelle, „an der Planvorgaben in Durchsetzungsaktivitäten übergehen“ [BUZACOTT et al. 2010, S. 6]. Somit befasst sich die Produktionsplanung mit zukünftigen Perioden, während sich die Produktionssteuerung mit gegenwärtigen Perioden und solchen der allernächsten Zukunft beschäftigt [JUNG 2010, S. 377]. Folglich sind die Aufgaben der Produktionssteuerung eher kurzfristiger Natur und beinhalten „die Ausführung und Durchführung der Pläne der Produktionsplanung“ [THOMMEN 2008, S. 533]. Dies beinhaltet die schrittweise Freigabe der Aufträge für die Produktion sowie die stetige Überprüfung des Produktionsfortschritts und der Einleitung von Korrekturmaßnahmen bei Abweichungen vom Plan [HACKSTEIN 1989, S. 15f]. „Bei größeren Störungen ist eine vollständige Neuberechnung der Produktionsplanung in die Wege zu leiten“ [THOMMEN 2008, S. 533].

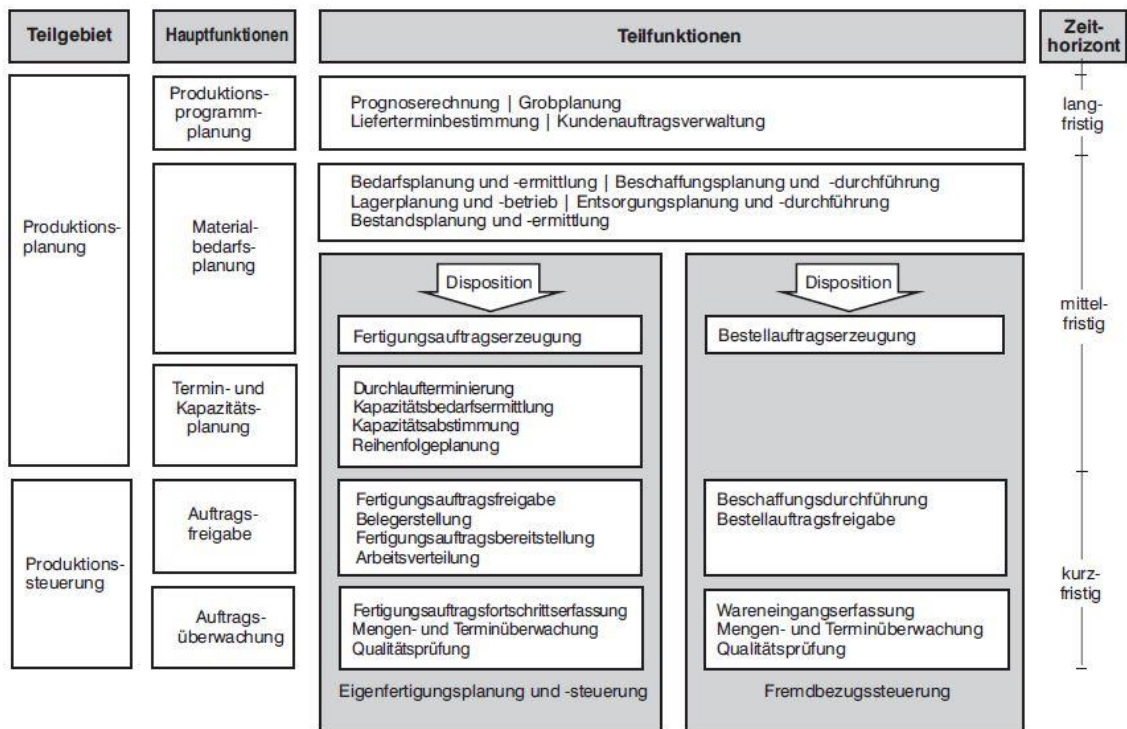


Abbildung 2-2: Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung [WIENDAHL 2014, S. 282]

Die Abgrenzung der Produktionsplanung von der Produktionssteuerung mit den entsprechenden Aufgaben und Zeithorizonten zeigt **Abbildung 2-2**. Die Detaillierung der einzelnen Stufen nimmt von oben nach unten zu [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 88]. Die einzelnen Hauptfunktionen werden in den beiden folgenden Kapiteln detaillierter betrachtet.

2.3.1 Hauptfunktionen der Produktionsplanung

Die Produktionsplanung lässt sich nach [HACKSTEIN 1989, S. 10ff] in drei aufeinander aufbauende Hauptfunktionen unterteilen. Auf die langfristig angelegte Produktionsprogrammplanung, folgen die mittelfristig ausgerichteten Funktionen Materialbedarfsplanung und Termin- und Kapazitätsplanung.

Die **Produktionsprogrammplanung** legt die geplanten Leistungen der Produktion fest. Dabei sind die (*zu produzierenden*) Produkte nach Art, Menge und Zeitraum für einen gewissen Planungshorizont zu definieren. Der Planungszeitraum kann je nach Branche variieren. Gemein ist allen, dass die Produktionsprogrammplanung in regelmäßigen Abständen durchgeführt wird und am Ende, entsprechend des Namens, das Produktionsprogramm steht [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 91f]. Dieses umfasst alle Produkte, die ein Unternehmen zum Verkauf bereitstellt und dient zur Orientierung der folgenden Funktionen, „was in welchen Mengen wann zu produzieren und zu beschaffen ist“ [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 91].

Eine der wichtigsten Schnittstellen zur Planung des Produktionsprogramms befindet sich zwischen Produktion und Vertrieb, „da sich die geplanten Absatzzahlen nur dann realisieren lassen, wenn die Erzeugnisse auch in den jeweils erforderlichen Mengen produziert werden können“ [SCHUH & STICH 2012b, S. 39]. Außerdem wird damit sichergestellt, dass die Produkte den Marktanforderungen genügen [JODLBAUER 2007, S. 143]. Eine weitere Abstimmung muss mit dem Einkauf vorgenommen werden, da eine erste grobe Berechnung des Materialbedarfs durchgeführt wird. Ziel dabei ist es unnötig hohe Lagerbestände zu vermeiden [SCHENK et al. 2014, S. 393]. Ein weiteres Ergebnis der Produktionsprogrammplanung ist entsprechend der Rahmenbeschaffungsplan [SCHUH & STICH 2012b, S. 39ff].

Da die Produktionsprogrammplanung in der Regel einen langfristigen Planungszeitraum betrachtet, werden häufig Verfahren der Datenverdichtung (bspw. Netzplantechnik) eingesetzt. Dies führt zu einer Reduzierung des Umfangs der Planung und ermöglicht eine schnellere und günstigere Produktionsprogrammplanung [SCHUH & STICH 2012b, S. 39].

Im Anschluss an die Produktionsprogrammplanung folgt die **Materialbedarfsplanung** mit der Aufgabe den erforderlichen Materialbedarf zu bestimmen [LÖDDING 2008, S. 83]. Unterschieden wird die Bedarfsplanung nach den verschiedenen Bedarfsarten. Der Primärbedarf beinhaltet die verkaufsfähigen Erzeugnisse. Der Sekundärbedarf enthält die gemäß Stückliste zerlegten Erzeugnisse, bspw. Baugruppen. Außerdem wird der Rohmaterialbedarf dem Sekundärbedarf zugeordnet. Des Weiteren wird der Bedarf an Betriebs- und Hilfsstoffen, als Tertiärbedarf geplant [HARTMANN 2002, S. 275ff].

Ausgehend von den Bedarfsarten werden die einzelnen Bedarfsmengen bestimmt. Hierbei wird zwischen Netto- und Bruttobedarfen unterschieden. Der Bruttobedarf berücksichtigt den vorliegenden Primär-, Sekundär- und Tertiärbedarf, wohingegen der Nettobedarf die aktuellen Bestände der jeweiligen Bedarfsarten mit einbezieht [SCHENK et al. 2014, S. 394f].

Als Methoden für die Bedarfsermittlung stehen nach [WIENDAHL 2014] folgende zur Auswahl. Die deterministische (oder bedarfsgesteuerte) Materialbedarfsplanung basiert auf vorliegenden Kundenaufträgen und kann dementsprechend den Bedarf genau ermitteln. Die stochastische (oder verbrauchsgesteuerte) Bedarfsermittlung orientiert sich am Verbrauch. Dazu wird der Lagerbestand des entsprechenden Materials überwacht und abhängig von der Bestandshöhe eine Bestellung ausgelöst [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 95]. Bei der heuristischen Bedarfsermittlung werden die Bedarfe geschätzt, entweder analog zu einem vergleichbaren Material oder intuitiv [PLÜMER 2003, S. 112].

„Den letzten Schritt der Materialplanung bildet die Auftragserzeugung“ [WIENDAHL 2014, S. 316]. Ausgehend von den erfassten Bedarfsmengen werden zum einen

Aufträge an die eigene Fertigung zur Produktion und zum anderen Aufträge an den Einkauf zur Bestellung der entsprechenden Materialien gesandt [WIENDAHL 2014, S. 319].

Wie in **Abbildung 2-2** zu sehen ist, gliedern sich die Teilfunktionen, ab der Materialbedarfsplanung in zwei Bereiche. Ein Zweig für die Eigenfertigungsplanung und -steuerung, und ein Zweig für die Fremdbezugssteuerung [WIENDAHL 2014, S. 282]. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf der Eigenfertigungsplanung und -steuerung liegt, wird die Fremdbezugssteuerung im weiteren Verlauf vernachlässigt.

Die in der Materialbedarfsplanung erstellten Aufträge werden in der **Termin- und Kapazitätsplanung** in ein Zeitgerüst umgewandelt, innerhalb dessen die Aufträge in der Fertigung abgearbeitet werden sollen. Außerdem wird die Belegung der Betriebsmittel in Abhängigkeit von den verfügbaren Kapazitäten geplant [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 101].

Die Terminplanung bestimmt dabei, „wann ein Auftrag bei vorgegebenen Endtermin gestartet werden muss und wann er an den einzelnen Arbeitsplätzen voraussichtlich ankommen wird“ [WIENDAHL 2014, S. 321]. Diese auch als Durchlaufterminierung benannte Aufgabe, lässt sich grundsätzlich als Rückwärts- oder Vorwärtsterminierung durchführen. Bei der Rückwärtsterminierung wird mit dem geplanten Endtermin begonnen und die einzelnen Arbeitsschritte rückwärts terminiert. Der so berechnete Starttermin sollte vom Zeitpunkt der Planung aus in der Zukunft liegen. Die Vorwärtsterminierung beginnt mit dem frühesten möglichen Starttermin und berechnet den frühesten Endtermin [WIENDAHL 2014, S. 321f]. „Die Durchlaufterminierung prüft also insgesamt die terminliche Machbarkeit.“ [WIENDAHL 2014, S. 322]

Auf die Terminplanung folgt die Planung der kapazitiven Machbarkeit. Aus der Durchlaufterminierung werden die durch die Aufträge erzeugten Kapazitätsbedarfe ermittelt und mit dem Kapazitätsangebot, für eine gewisse Planungsperiode, verglichen. Bei Differenzen zwischen dem Bedarf und dem Angebot gibt es verschiedene Möglichkeiten diese zu regulieren (bspw. Überstunden, Verschieben von Aufträgen, Kurzarbeit, o.ä.). Das Ergebnis dieses Schrittes ist die zeitliche Belegung der Ressourcen, auch Kapazitätsterminierung genannt [WIENDAHL 2014, S. 322]. Generell besteht in diesem Planungsschritt der Konflikt zwischen der Minimierung der Durchlaufzeit und der Maximierung der Kapazitätsauslastung [THOMMEN 2008, S. 335].

2.3.2 Hauptfunktionen der Produktionssteuerung

Die wichtigsten Aufgaben der täglich ablaufenden Produktionssteuerung sind nach [THOMMEN 2008] „die Lösung der Probleme bei der Festlegung der Reihenfolge der Bearbeitung, die Überwachung der Operationen und die Einleitung kurzfristiger

Korrekturmaßnahmen“ [THOMMEN 2008, S. 533]. [HACKSTEIN 1989, S. 223ff] hat diese Aufgaben etwas allgemeiner in zwei Hauptfunktionen: die Auftragsfreigabe und die Auftragsüberwachung unterteilt. Generell kann die Produktionssteuerung in verschiedenen Fertigungsbereichen (Inseln, Einzelarbeitsplätze, o.ä.) durchgeführt und mit Hilfe von IT-Systemen (MES, Leitsysteme, o.ä.) unterstützt werden [SCHUH & STICH 2012b, S. 219f].

Vor der eigentlichen **Auftragsfreigabe** wird die Verfügbarkeit der Kapazitäten und Ressourcen geprüft [WIENDAHL 2014, S. 329]. Dies beinhaltet neben der Verfügbarkeit der Anlagen und des Personals auch die Verfügbarkeit des Materials, der Werkzeuge sowie der Betriebs- und Hilfsstoffe [JODLBAUER 2007, S. 190]. Dieser Schritt dient der Erkennung von Doppelbelegungen oder fehlender Ressourcen [SCHUH & STICH 2012b, S. 221]. Nach der Verfügbarkeitsprüfung werden die einzelnen Belege (Materialentnahmescheine, Auftragskopie, Arbeitsplan u.ä.) bereitgestellt und der Auftrag freigegeben [WIENDAHL 2014, S. 330].

Die eigentliche Auftragsfreigabe kann grundsätzlich nach verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Die automatische Freigabe innerhalb eines bestimmten Zeitfensters wird Freigabe durch Terminvereinbarung genannt. Die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BoA) priorisiert die Fertigungsaufträge zuerst nach dringlichen und nicht dringlichen Aufträgen, um dann für die dringenden eine Verfügbarkeitsprüfung durchzuführen [SCHUH & STICH 2012b, S. 221f].

Die **Auftragsüberwachung** kontrolliert den Status der Fertigungsaufträge. Dies geschieht auf Grundlage der rückgemeldeten Daten aus den Betriebsdaten- bzw. Maschinendatenerfassungssystemen (BDE-, MDE-Systemen) [GAUSEMEIER et al. 2009, S. 46]. Daten, die „für die weitere Planung und Steuerung zeitaktuell zur Verfügung“ [JODLBAUER 2007, S. 200] stehen sollten, sind unter anderem der Status der Anlage, die Ist-Zeiten sowie die vorhandenen Lagerbestände [JODLBAUER 2007, S. 200].

Generell kann zwischen einer Überwachung aufgrund der gefertigten Menge und aufgrund der Auftragstermine differenziert werden. Die Mengenkontrolle gibt eine Rückmeldung über gefertigte Gut- und Schlechtmengen. Bei der Überwachung der Auftragstermine wird der Fertigungsfortschritt anhand vordefinierter Meilensteine angezeigt [SCHUH & STICH 2012b, S. 223].

Zusammenfassend lässt sich die Produktionssteuerung als „Verbindung zwischen der Planung der Fertigungsaufträge und deren Realisierung“ [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 109] darstellen.

2.4 Zentrale versus dezentrale Produktionsplanung und -steuerung

„Planungs- und Steuerungssysteme können nach vielen Gesichtspunkten eingeteilt werden“ [JODLBAUER 2007, S. 107]. Verschiedene Kriterien sind in [JODLBAUER 2007, S. 107] dargestellt. Im Zuge dieser Arbeit ist insbesondere die Einteilung zwischen zentraler und dezentraler PPS von Bedeutung, weswegen auf andere Einteilungen verzichtet wird. Für die zentrale Produktionsplanung und -steuerung wird teilweise auch der Begriff des Push-Prinzips und für die dezentrale PPS der Begriff des Pull-Prinzips verwendet [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 114].

Die **zentrale PPS** konzentriert die Planungs- und Steuerungskompetenzen in einer Instanz und führt alle entsprechenden Aufgaben von dort aus [JODLBAUER 2007, S. 107]. Dieser Ansatz ist auf die Vorstellung zurückzuführen, dass ein gesamtunternehmerisches Ziel nur optimal erreichbar ist, wenn eine zentrale Instanz das vollständige Wissen über die zu koordinierenden Aufgaben vereint [SCHUH & STICH 2012b, S. 302]. Vorteile dieses Konzeptes sind die Sicherstellung einer Abstimmung zwischen den einzelnen Organisationseinheiten, bspw. „im Hinblick auf die Beanspruchung gemeinsam benötigter Ressourcen“ [ZELEWSKI 1995, S. 124], sowie die zentrale Zusammenführung des erforderlichen Wissens [ZELEWSKI 1995, S. 124]. Dementsprechend kann laut [SCHUH & STICH 2012b] „aus einer übergeordneten Sicht, [...] eine zentrale Koordination von Planungs- und Steuerungsprozessen, zumindest auf einer groben Planungsebene, sinnvoll [...] sein“ [SCHUH & STICH 2012b, S. 302]. Nachteile der zentralen PPS sind u.a. der Bedarf einer Betriebsdatenerfassung (BDE) um eine Rückkopplung sicherzustellen, ein erhöhter Kommunikationsaufwand zwischen den betroffenen Stellen, sowie fehlende Akzeptanz auf der operativen Ebene [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 114].

[ZELEWSKI 1995, S. 124ff] führt weiterhin drei Kritikpunkte zentraler PPS-Systeme auf. Zum einen erfordert die Implementierung von zentralen PPS-Systemen den Einsatz von Großrechnern, was im Widerspruch zur zunehmenden Nutzung von Rechnerverbundsystemen steht, zum anderen ergeben sich in der Produktionssteuerung Schwächen, da kurzfristig auftretende Störungen zu einer ständigen Anpassung des Produktionsplans führen. Das dritte Argument beschreibt den Sachverhalt das die Arbeitsanweisungen der zentralen Instanz keine Spielräume für die Mitarbeiter bei der Ausführung lassen, was zur Demotivation der Mitarbeiter beiträgt.

Dezentrale Produktionsplanung und -steuerung bedeutet, dass „die Erfüllung von Aufgaben der Prozesskoordination auf mehrere Instanzen verteilt ist und die Abarbeitung der Aufgaben [...] teilweise parallel erfolgt“ [ZELEWSKI 1995, S. 127]. Die Entwicklung von dezentralen PPS-Ansätzen geht nicht alleine auf die oben genannten Schwachstellen der zentralen PPS zurück, sondern auch auf einen Wandel

der Aufbauorganisationsstrukturen [KURBEL 2003, S. 229ff]. Beispiele für letzteres sind der Wandel von funktionsorientierter zur prozessorientierter Fertigung, der Aufbau von Fertigungssegmenten und die fraktale Fabrik [RAMSAUER 1997, S. 135; WILDEMANN 1998, S. 21; KURBEL 2003, S. 280].

Voraussetzung für eine dezentrale PPS ist, dass die Prozesskoordination als Ganzes zerteilt werden kann und verschiedene Organisationseinheiten die Teilaufgaben bearbeiten können [ZELEWSKI 1995, S. 127]. So sollen unabhängigere Organisationseinheiten geschaffen werden, die dann wiederum schneller und flexibler auf Veränderungen reagieren können [SCHUH & STICH 2012b, S. 301]. Insbesondere durch die parallele Ausführung von Teilaufgaben kann eine Beschleunigung sowie eine Reduktion der Planungskomplexität erreicht werden [ZELEWSKI 1995, S. 127]. Des Weiteren reduziert sich der Aufwand der Produktionsplanung und -steuerung und die Bestände können besser kontrolliert werden [HACHTEL & HOLZBAUR 2010, S. 114]. Nachteil der dezentralen PPS ist, dass innerhalb einer Organisationseinheit die PPS entsprechend der gewählten Kennzahlen optimal ausgeführt wird, dies jedoch in Konflikt mit einem Ziel aus der gesamtunternehmerischen Sicht stehen kann [SCHUH & STICH 2012b, S. 302].

Als Beispiel für eine Umsetzungsmöglichkeit dezentraler Produktionssteuerung sei hier das Kanban-Prinzip erwähnt, welches in den 70er Jahren entwickelt wurde [SCHENK et al. 2014, S. 399]. „Die grundlegende Idee von Kanban ist ein System von selbststeuernden Regelkreisen zur Abstimmung zwischen den Fertigungsstufen“ [KURBEL 2011, S. 168]. Dabei werden mit Hilfe von Karten (jap. Kanban) Informationen zum Materialverbrauch ausgetauscht. So werden bspw. Behälter, die aus der Produktion kommen, gesammelt und lösen bei Erreichen eines gewissen Kartenbestands den Fertigungsprozess aus. Nach Fertigstellung gelangen die Teile im Behälter zurück in die Produktion [KURBEL 2011, S. 169]. Aufgrund der festgelegten Größe des Sicherheitsbestandes handelt es sich bei diesem Verfahren um ein bestandstabilisierendes und nicht um ein bestandminimierendes Verfahren [SCHENK et al. 2014, S. 399].

Zwischen der vollständig zentralen und der vollständig dezentralen PPS gibt es noch das **hybride PPS-Konzept**, welches sich durch die Nutzung beider Funktionen auszeichnet [RÜCKER 2006, S. 9]. „Damit erhalten die Produktionsbereiche eine begrenzte dezentrale Planungs- und Steuerungskompetenz, während die Planungsaufgaben, die einen Gesamtüberblick erfordern, zentral durchgeführt werden“ [RÜCKER 2006, S. 9]. Dies führt zu einer Reduzierung der Komplexität der zentralen PPS, steigert jedoch den Koordinationsaufwand zwischen den einzelnen dezentralen Einheiten. Eine mögliche Ausführung wäre, dass mithilfe einer zentralen bereichsübergreifenden Instanz die Termine zur Fertigungsfreigabe definiert werden,

wobei der zeitliche Ablauf den dezentralen Stellen vorbehalten ist [KURBEL 2003, S. 281]. Nach [ZÄPFEL 1989, S. 33ff] werden insbesondere die Aufgaben, die eine schnelle Reaktionsfähigkeit erfordern dezentralen Planungsstellen zugeordnet. So gehören die kurzfristige Maschinenbelegung (Termin- und Kapazitätsplanung), die Überwachung der Fertigungsprozesse, sowie die Auftragssteuerung des entsprechenden Fertigungsbereiches zu den Hauptaufgaben der dezentralen Planungsstelle.

Auch aus aufbauorganisatorischer Sicht wird bspw. das Erhalten von zentralen Instanzen als sinnvoll erachtet. So kann eine zentrale Personalabteilung oder ein zentraler Wareneingang als nützlich befunden werden [SPATH et al. 2002, S. 132]. Welche Aufgaben optimalerweise zentral und welche dezentral ausgeführt werden, ist jedoch nicht generell bestimmbar [NYHUIS 2008, S. 353].

2.5 Agententechnologie

In den vorherigen Kapiteln (2.1-2.4) wurde sowohl die Produktionsplanung und -steuerung vorgestellt, als auch die Vor- und Nachteile einer zentralen sowie einer dezentralen PPS diskutiert. Darauf aufbauend wird in diesem Kapitel die Agententechnologie, als Möglichkeit zur Umsetzung einer dezentralen Produktionsplanung erläutert.

Diese Technologie hat laut [SCHOLZ-REITER 2001, S. 19f] an Bedeutung stetig zugenommen. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf folgende zwei Gründe. Zum einen können Agenten mithilfe von Kommunikations- und Kooperationsmechanismen miteinander interagieren. Zum anderen steigen mit der agentenorientierten Programmierung die Erweiterbarkeit, die Flexibilität und die Modularität im Vergleich zur objektorientierten Programmierung. Dementsprechend passt sich das Gesamtsystem besser an Veränderungen an [WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 167].

Im Folgenden wird der Begriff des Agenten definiert. Anschließend werden Eigenschaften von Agenten sowie verschiedene Agententypen vorgestellt.

2.5.1 Definition des Agentenbegriffs

Der Begriff des Agenten wird in mehreren wissenschaftlichen Disziplinen verwendet und hat keinen eindeutigen Ursprung. Im Bereich der Wirtschaftswissenschaften wird bspw. vom Prinzipal-Agenten-Problem gesprochen, während der Begriff in der Informatik auf das Fachgebiet der verteilten künstlichen Intelligenz zurückzuführen ist [ICKEROTT 2007, S. 12f]. „Der Fokus sozialwissenschaftlicher Forschungen liegt dagegen eher auf dem Verhalten eines Agenten“ [FISCHER 2004, S. 88]. Aufgrund der verschiedenen Forschungsgebiete in denen der Begriff des Agenten aufgegriffen wird, existiert keine eindeutige Definition des Agenten-Begriffs. Erschwerend kommen unterschiedliche Namensgebungen hinzu. So wird der Begriff häufig noch verfeinert

und von intelligenten, autonomen, Informations- oder Software-Agenten gesprochen [DANGELMEIER et al. 2004, S. 25].

In dieser Arbeit wird der Agentenbegriff aus Sicht der Informatik und synonym für Software-Agent verwendet. Allerdings existieren auch in der Informatik verschiedene Definitionen des Agentenbegriffes. [RUSSELL et al. 2010] definieren einen Agenten wie folgt. „An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through actuators” [RUSSELL et al. 2010, S. 34]. Allerdings ist das, was unter Umgebung, Wahrnehmen und Handeln verstanden wird nicht weiter erläutert und muss weiter abgegrenzt werden. Andernfalls kann der „Ort der Ein- und Ausgabe als Umgebung [...], erhaltene Eingaben als Wahrnehmung und entsprechende Ausgaben als Handlung“ [MURCH & JOHNSON 2000, S. 25] definiert werden, womit jedes Programm einen Agenten im Sinne der Russel und Norvigschen Definition darstellt [MURCH & JOHNSON 2000, S. 25f].

Laut [WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995, S. 116] ist ein Agent ein Computersystem (hardware- oder software-basiert) mit den vier Eigenschaften: Autonomie, Reaktivität, Proaktivität und soziale Fähigkeiten. Die einzelnen Eigenschaften werden im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert.

Dieser Arbeit wird die Definition nach [JEDERMANN et al. 2006] zu Grunde gelegt. „Ein Agent stellt [...] einen computerimplementierten autonomen Entscheidungsträger dar, der in einer gegebenen Umgebung in der Regel mit Fähigkeiten zur Wahrnehmung seiner Umwelt, zur Wahl seiner Handlungen sowie zur Kommunikation mit anderen Agenten ausgestattet ist“ [JEDERMANN et al. 2006, S. 147]. Diese Definition stellt eine Art Minimaldefinition dar und verweist auf die grundlegenden Elemente eines Agenten. Dies sind gleichzeitig auch die relevantesten Elemente im Zuge einer Simulation einer agentenbasierten Produktionsplanung und entsprechend im weiteren Verlauf der Arbeit von Bedeutung.

2.5.2 Eigenschaften von Agenten

Im Folgenden werden die vier Schlüsseleigenschaften von Agenten: Autonomie, Proaktivität, Reaktivität und soziale Fähigkeiten vorgestellt [WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995, S. 116]. An dieser Stelle sei allerdings darauf verwiesen, dass ein Agent nicht zwangsläufig alle dieser Eigenschaften besitzt. Je nach Komplexitätsgrad des Agenten besitzt dieser mehr oder weniger dieser Eigenschaften [BRENNER et al. 1998, S. 25].

Unter **Autonomie** wird eine Eigenschaft verstanden, die Agenten befähigt zu einem gewissen Teil selbstständig zu handeln. Das bedeutet, dass ein Agent seine Ziele ohne direkte externe Einflussnahme erreichen kann. Dieses Charakteristikum betrifft entsprechend das Verhältnis von Agent und Anwender. Es ist ein wesentlicher

Unterschied zwischen Software-Agenten und herkömmlichen Softwaresystemen [ICKEROTT 2007, S. 18f].

Proaktivität bezieht sich auf die Eigeninitiative des Agenten [GÖRZ 2000, S. 950]. Dies bedeutet, dass Agenten nicht nur auf ihre Umwelt reagieren, sondern auch selbst die Initiative ergreifen und zielgerichtet handeln [WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995, S. 116]. Eng verknüpft mit der Proaktivität, und teilweise synonym verwendet, ist der Begriff der Zielorientiertheit [BRENNER et al. 1998, S. 27]. „Denn um selbstständig initiativ werden zu können, muss ein Agent über wohldefinierte Ziele oder sogar ein komplexes Zielsystem verfügen“ [BRENNER et al. 1998, S. 27].

Eine Vorstufe zur Proaktivität ist die **Reaktivität**. Darunter verstehen [WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995, S. 116] die Eigenschaft eines Agenten, seine Umwelt wahrzunehmen und auf Veränderungen in dieser rechtzeitig zu reagieren. Voraussetzung für die Reaktivität eines Agenten sind Sensoren und ein internes Modell der Umwelt, um Veränderungen feststellen zu können [FISCHER 2004, S. 89f].

Eine weitere Eigenschaft, die Agenten besitzen können, sind **soziale Fähigkeiten**. Dies bedeutet, dass ein Agent mit anderen Agenten mit Hilfe einer Agenten-Sprache interagieren kann [DANGELMEIER et al. 2004, S. 29]. Bestandteil dieses Charakteristikums sind Fähigkeiten zur Kommunikation und Kooperation, die insbesondere in Multi-Agenten Systemen wichtig sind [ICKEROTT 2007, S. 19f].

Agenten mit den vier genannten Eigenschaften werden auch schwache Agenten genannt. Demgegenüber steht der Begriff des starken Agenten, welcher zusätzlich Eigenschaften aufweist, die mit menschlichem Verhalten in Verbindung gebracht werden, wie bspw. emotionales Verhalten oder Glaubwürdigkeit [WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995, S. 116f].

Weiterhin gibt es verschiedene andere Eigenschaften von Agenten, wie bspw. Lernfähigkeit, Mobilität, Ausgewogenheit zwischen Reaktivität und Zielorientierung, Rationalität, Wohlwollen, Wahrhaftigkeit, u.a. [NIMIS 2009, S. 37f; LIBERT 2011, S. 33f; GÖRZ 2000, S. 950]. Da diese Eigenschaften jedoch im weiteren Verlauf der Arbeit nicht relevant sind, wird für eine Begriffserklärung auf die genannte Literatur verwiesen.

2.5.3 Klassifikation von Agenten

Bei der Klassifikation von Agenten gibt es unterschiedliche Ansätze. [BRENNER et al. 1998, S. 33ff] identifizieren drei verschiedene Agententypen (Informations-, Kooperations- und Transaktionsagenten) die anhand der drei Eigenschaften Anzahl der Agenten, Mobilität und Grad der Intelligenz differenziert werden. [Nwana 1996, S. 210ff] unterscheidet hingegen in einem ersten Schritt vier Agententypen: intelligente Agenten, kooperative Lernagenten, kooperative Agenten und Interface-Agenten anhand

der Merkmale Kooperation, Lernen und Autonomie. In einem zweiten Schritt wird zur genaueren Einteilung noch das Merkmal Mobilität hinzugefügt und acht Typen identifiziert (Kollaborierende, Interface-, Mobile, Informations-, Intelligente, Hybride und reaktive Agenten, sowie Heterogene Agentensysteme) [NWANA 1996, S. 210ff]. Beide genannten Klassifikationen nutzen zur Unterscheidung der Agenten das beobachtete Agentenverhalten [ICKEROTT 2007, S. 26].

Im Gegensatz dazu gliedern [RUSSELL et al. 2010, S. 46] die Agenten anhand ihrer internen Struktur. Diese besteht zum einen aus der Architektur (bspw. Sensoren und Aktoren) und zum anderen aus dem Agentenprogramm. Letzteres erhält Eingaben über die Sensoren und gibt Aktionen an die Aktoren als Output zurück [RUSSELL et al. 2010, S. 46]. Insgesamt werden vier grundlegende, aufeinander aufbauende Typen von Agentenprogrammen unterschieden, siehe **Abbildung 2-3** [GÜNTNER 2010, S. 66].

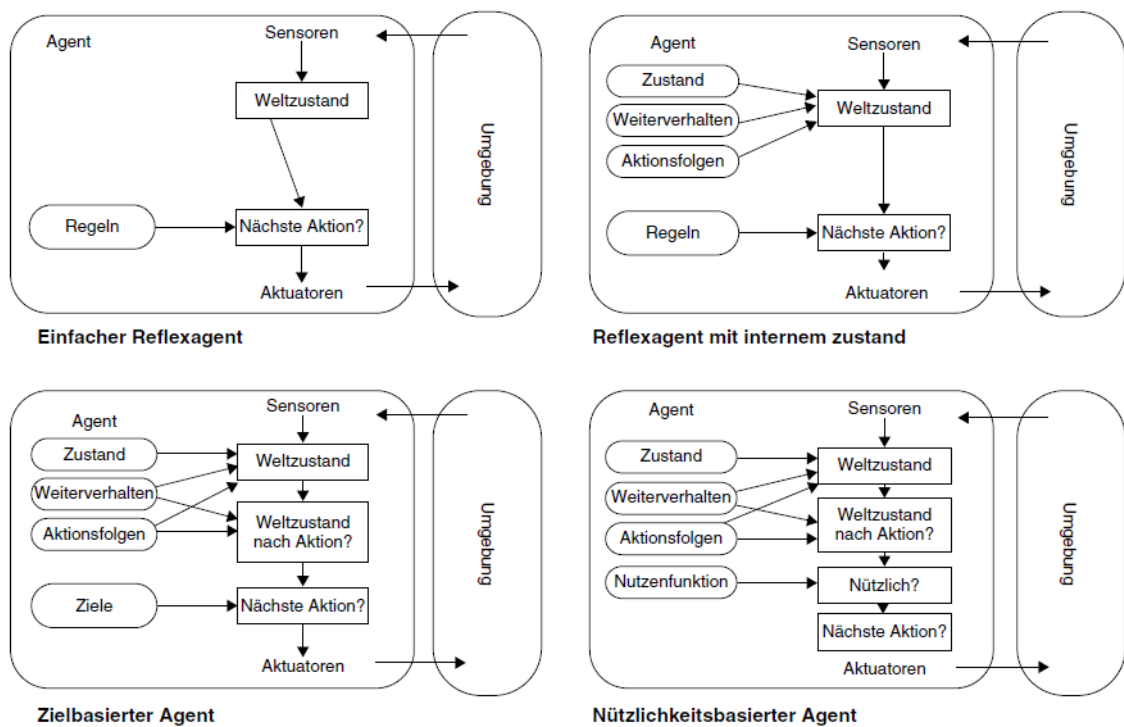


Abbildung 2-3: Klassifikation von Agenten i.A. [RUSSELL et al. 2010, S. 49ff]

Der einfachste Agententyp ist der **einfache Reflexagent** [RUSSELL et al. 2010, S. 48]. Basierend auf Wenn-Dann-Regeln und dem wahrgenommenen Zustand werden Aktionen ausgeführt. Der bisherige Wahrnehmungsverlauf wird dabei ignoriert und Informationen werden lediglich von der Umgebung gespeichert [ICKEROTT 2007, S. 26].

Ein **Reflexagent mit internem Zustand**, auch **modellbasierter Reflexagent** genannt, besitzt zusätzlich zu den Wenn-Dann-Regeln des einfachen Reflexagenten Informationen über die Umwelt sowie Wissen über die Folgen seiner Aktionen [ICKEROTT 2007, S. 26]. Abhängig von seinem Modell wählt der Agent seine

Aktionen. Verändert wird das Modell durch Wahrnehmungen. Außerdem erlaubt das Modell Aspekte der Umwelt zu verwalten die momentan nicht wahrgenommen werden [GÜNTNER 2010, S. 66].

Zusätzlich zur Modellbeschreibung besitzen **zielbasierte Agenten** Ziele, die wünschenswerte Zustände darstellen. Zusammen mit Informationen über die Folgen seiner Aktionen wählt der Agent solche Aktionen, die seine Ziele erfüllen. Ein wesentlicher Unterschied zu den beiden zuvor genannten Agententypen ist also die Entscheidungsfindung. Der zielbasierte Agent reagiert nicht nur über Wenn-Dann-Regeln auf die Umwelt, sondern berücksichtigt auch die Auswirkungen seiner Aktionen [RUSSELL et al. 2010, S. 52f]. „Werden die Aktionen einer Aktionsfolge zusätzlich hinsichtlich einer hinterlegten Nutzenfunktion bewertet, so handelt es sich um einen **nützlichkeitsbasierten Agenten**.“ [DANILUK 2014, S. 25]

Der Agent kann also mithilfe der Nutzenfunktion Alternativen bewerten und somit seine Ziele optimal erreichen [RUSSELL et al. 2010, S. 53]. Bei Zielen, die miteinander in Konflikt stehen, kann die Nutzenfunktion zur Auswahl eines Ziels genutzt werden [LIBERT 2011, S. 36].

2.6 Multi-Agenten Systeme

Ein Multi-Agenten System (MAS) wird als eine Umgebung bezeichnet, „in der mehrere Agenten existieren und sich gegenseitig beeinflussen“ [DANGELMEIER et al. 2004, S. 36]. Somit ist es möglich, innerhalb von Multi-Agenten Systemen Probleme zu lösen, die zu komplex für einen einzelnen Agenten sind. Dies wird ermöglicht, weil mehrere Agenten Teilaufgaben parallel bewältigen können. Dies führt wiederum dazu, dass die Gesamtaufgabe schneller gelöst wird [DANGELMEIER et al. 2004, S. 37]. Weiterhin sind MAS robust gegenüber dem Ausfall von Agenten, da andere Agenten die Aufgaben des ausgefallenen Agenten übernehmen können und somit den Ausfall kompensieren [SYCARA & ZENG 1996, S. 184].

[JENNINGS et al. 1998, S. 17] definieren folgende Eigenschaften für Multi-Agenten Systeme. Die Informationen eines Agenten sind unvollständig, sodass dieser zur Problemlösung mit anderen Agenten interagieren muss. Es existiert keine zentrale Kontrolle, „Daten werden lokal vorgehalten und Berechnungen werden von den einzelnen Agenten lokal durchgeführt“ [DANILUK 2014, S. 27]. Aufgrund dieser Eigenschaften sind die Elemente Kommunikation, Koordination und Möglichkeiten der Interaktion für Multi-Agenten Systeme besonders wichtig [JENNINGS et al. 1998, S. 17].

2.6.1 Kommunikation von Agenten

„Für die meisten Multiagentensysteme und insbesondere solche im Einsatz in der Produktionsplanung und -steuerung stellt die Kommunikation die Schlüsselfunktionalität dar, damit Agenten miteinander kooperieren und ihre Aktionen untereinander koordinieren“ [STEHLI 2010, S. 24]. Die Kommunikation dient dem Austausch von Informationen zwischen zwei oder mehr Agenten [STEHLI 2010, S. 24]. Hierbei können drei Kommunikationsverfahren unterschieden werden: die prozedurale Kommunikation, Blackboard-Systeme und nachrichtenbasierte Kommunikation [BRENNER et al. 1998, S. 96ff].

Bei der **prozeduralen Kommunikation** ruft der erste Agent die Prozedur eines zweiten Agenten auf. Durch die Übermittlung von Eingabewerten für die entsprechende Prozedur wird die Anfrage detailliert und über Rückgabewerte kann geantwortet werden [FISCHER 2004, S. 103f]. [BRENNER et al. 1998, S. 96] argumentieren, dass mithilfe eines Prozeduraufrufs nur einfache Kommunikationsverfahren umgesetzt werden können, weshalb es sich um kein Kommunikationsverfahren im engeren Sinne handelt. „Im Hinblick auf die Realzeitfähigkeit stellt die prozedurale Kommunikation aufgrund ihrer hohen Performance jedoch eine äußerst interessante Kommunikationsvariante dar“ [FISCHER 2004, S. 104].

Das zweite Kommunikationsverfahren sind die **Blackboard-Systeme**. Das Blackboard repräsentiert dabei einen Datenspeicher, der von den Agenten innerhalb des MAS gelesen und verändert werden kann, und somit ermöglicht Informationen, Daten und Wissen auszutauschen [FISCHER 2004, S. 104]. Hierzu „schreibt ein Agent eine Information auf das Blackboard“ [BRENNER et al. 1998, S. 96], welche dann von den anderen Agenten gelesen werden kann. Dabei kann jeder Agent nach Bedarf auf das Blackboard zugreifen und neue Informationen suchen [DANILUK 2014, S. 29]. Häufig wird zusätzlich eine zentrale Instanz installiert, auf der sich Agenten registrieren, um somit die Zugriffe auf das Blackboard zu kontrollieren. Außerdem ist es möglich, mithilfe dieser Instanz die Informationen für gewisse Agenten zu filtern, sodass die Agenten nur Zugriff auf relevante Informationen haben [FISCHER 2004, S. 104]. Die Nachteile des Blackboard-Konzeptes sind nach [KIRN 2006, S. 388] u.a. die zentrale Datenspeicherung sowie die sequenziell erfolgende Problemlösung. Diese Nachteile werden beim Austausch von Nachrichten vermieden.

Bei der **nachrichtenbasierten Kommunikation** werden die Nachrichten direkt zwischen den Agenten ausgetauscht. In der Regel betrifft dieses Kommunikationsverfahren nur zwei Agenten, den Sender und den Empfänger. Allerdings sind auch Formen möglich, in denen ein Sender eine Nachricht an mehrere Empfänger sendet. Hier werden Multicast-Nachrichten, bei denen die Empfänger bekannt und deren Anzahl beschränkt ist, von Broadcast-Nachrichten unterschieden, bei

denen die Empfänger und die Anzahl der Empfänger nicht bekannt sind. Es werden ähnlich wie beim Radio, alle Zuhörer die Nachricht empfangen [GÖRZ et al. 2012, S. 534ff].

Es wurden diverse Kommunikationssprachen für die nachrichtenbasierte Kommunikation entwickelt [STEHLI 2010, S. 25]. Grundsätzlich basieren diese auf der Sprechakttheorie nach [AUSTIN 1962] und [SEARLE 1969]. Hierin werden zwischen der Aussprache (lokutive Komponente), der beabsichtigten Wirkung (illocutionary act) und der tatsächlichen Wirkung (perlocutionary act) unterschieden [GÖRZ 2000, S. 999]. Zwei weit verbreitete Kommunikationssprachen sind die Knowledge Query and Manipulation Language und die Agent Communication Language (ACL) der Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). Letztere definiert zum einen Kommunikationsprotokolle, die die Struktur von Kommunikationsabläufen in MAS festlegen und zum anderen Sprechakttypen, die die Nachrichten spezifizieren (Abfrage von Informationen, Beauftragung von Aktionen, o.ä.) [LIBERT 2011, S. 41].

2.6.2 Koordination von Agenten

Da Multi-Agenten Systeme aus mehreren autonomen Agenten bestehen, die einzelne Ziele oder gemeinsam globale Ziele verfolgen, müssen die Agenten, um diese Ziele zu erreichen, ihre Aktionen koordinieren [DANGELMEIER et al. 2004, S. 42]. „Koordination bedeutet in diesem Zusammenhang die gegenseitige Abstimmung von Tätigkeiten“ [DANGELMEIER et al. 2004, S. 42]. Für die Koordination von Agenten nennen [NWANA et al. 1996, S. 79] folgende Gründe:

- 1.) Verhindern von Anarchie oder Chaos: Da jeder Agent eigene Ziele verfolgt und nur eine begrenzte Wahrnehmung besitzt, müssen die Agenten koordiniert werden, um übergeordnete Ziele zu erreichen und Chaos zu verhindern.
- 2.) Erfüllen von globalen Nebenbedingungen: In der Regel existieren Nebenbedingungen (bspw. Obergrenzen für Kosten) die im MAS eingehalten werden müssen. Agenten müssen koordiniert werden, um solche Nebenbedingungen einzuhalten.
- 3.) Verteiltes Wissen, verteilte Ressourcen oder Informationen: Zur Erreichung übergeordneter Ziele müssen Agenten mit verschiedenen Fähigkeiten koordiniert werden, um sinnvoll zusammenzuarbeiten.
- 4.) Abhängigkeiten zwischen den Aktionen von Agenten: Häufig müssen zur Erreichung eines Zieles andere Aktionen von anderen Agenten durchgeführt werden oder Agenten greifen für verschiedene Aufgaben auf dieselbe Ressource zu.
- 5.) Steigerung der Effizienz: Durch das Koordinieren von Agenten können diese zusammen ein Ziel schneller erreichen als ein Agent alleine.

Zur Koordination von Agenten stehen verschiedene Techniken zur Verfügung. Die einfachste Koordinationstechnik ist die **Organisationsstruktur** [DANGELMEIER et al. 2004, S. 43]. Diese „definiert die Verantwortlichkeiten, Fähigkeiten, Vollmachten, Rollen und Kommunikationswege der einzelnen Agenten“ [DANGELMEIER et al. 2004, S. 43]. Als Beispiel hierfür können in hierarchischen Strukturen Master-Slave- oder Client-Server-Architekturen genannt werden [Nwana et al. 1996, S. 81].

Zwei hier nicht weiter betrachtete Verfahren sind die **Vertragsschließung** und die **Multi-Agentenplanung**. An dieser Stelle sei lediglich auf die Literatur verwiesen, beispielsweise [Smith 1980] für die Vertragsschließung und [GEORGEFF] für die Multi-Agentenplanung.

Eine weit verbreitete Technik zur Koordinierung von Agenten ist die **Verhandlung** [FISCHER 2004, S. 109]. [JENNINGS et al. 2001, S. 200] definieren Verhandlung als den Prozess, in dem eine Gruppe von Agenten gemeinsam zu einer gegenseitig akzeptierten Übereinkunft zu einer bestimmten Angelegenheit kommt.

Ziel einer jeden Verhandlung ist eine Zusammenarbeit zwischen unabhängigen Agenten mit eigenen Zielen zu ermöglichen. Dabei muss zwischen dem Verhandlungsprotokoll und der Verhandlungsstrategie unterschieden werden. Ersteres definiert, wann und wie Angebote ausgetauscht werden. Das Protokoll beinhaltet den Ablauf des Verhandlungsprozesses, Regeln für die Verhandlung, sowie die kommunikationstechnischen Grundlagen. Die Verhandlungsstrategie hängt von der Umsetzung des jeweiligen Agenten ab [BRENNER et al. 1998, S. 121]. Beispiele für Verhandlungsstrategien sind marktbasierter, verhandlungsbasierter, spieltheoretischer oder Künstliche-Intelligenz-basierter Strategien [SHEN et al. 2001, S. 198ff]. Allerdings sollte gewährleistet sein, dass die gewählte Strategie auch mit dem vorhandenen Protokoll durchführbar ist [BRENNER et al. 1998, S. 121].

Ein möglicher Ablauf einer Verhandlung wird in [ALONSO, S. 23] vorgestellt: In einer ersten Runde bietet ein erster Agent, einem zweiten eine Kooperationsmöglichkeit an. In der zweiten Runde wird das Angebot vom zweiten Agenten bewertet und entweder abgelehnt, angenommen oder ein Gegenangebot erstellt. Das Gegenangebot wird wiederum in der dritten Runde vom ersten Agenten angenommen.

2.6.3 Interaktionsformen von Agenten

Interaktion findet laut [FERBER 2001] statt, „wenn zwei oder mehr Agenten durch eine Anzahl wechselseitiger Aktionen in eine dynamische Beziehung zueinander treten“ [FERBER 2001, S. 83]. Dabei werden verschiedene Interaktionsformen unterschieden. Die Klassifikation nach Ferber definiert acht verschiedene Situationstypen, in Abhängigkeit der Ziele und Fertigkeiten der Agenten sowie der Zugänglichkeit zu

Ressourcen [FERBER 2001, S. 90]. Eine etwas gröbere Unterscheidung teilt Interaktionsformen in Wettbewerb und Kooperation [KIRN 2006, S. 386].

Beim **Wettbewerb** konkurrieren die Agenten untereinander bspw. um eine Ressource und können diese Situation lösen, indem sie bspw. miteinander verhandeln [DANILUK 2014, S. 29]. Diese Interaktionsform ist im weiteren Verlauf nur von geringer Bedeutung und wird deswegen vernachlässigt.

Unter **Kooperation** wird hingegen die Interaktion zwischen unterschiedlichen Agenten verstanden, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen [STEHLI 2010, S. 31]. Dabei kann zwar jeder Agent gegenüber den anderen autonom sein, „doch nur durch die Zusammenarbeit erreicht die Gruppe ein höheres Maß an Leistung als der Einzelne“ [GÜNTNER 2010, S. 72]. Kooperation kann durch verschiedene Verfahren erreicht werden. Im einfachsten Fall ist Kooperation durch Client-Server-Architekturen umsetzbar. Allerdings sind auch komplexere Verfahren, wie die Vertragsschließung möglich [DANILUK 2014, S. 29].

Diese möglichen Verfahren zeigen die Nähe und Überschneidungen zwischen Koordination und Kooperation [DANGELMEIER et al. 2004, S. 43]. Allerdings bedeutet Koordination „die gegenseitige Abstimmung von Tätigkeiten. Im Gegensatz dazu wird von einer Kooperation gesprochen, wenn Agenten ein gemeinsames Ziel verfolgen oder vereinbaren.“ [DANGELMEIER et al. 2004, S. 42]

Grundsätzlich können die Interaktionsformen Wettbewerb und Kooperation auch kombiniert werden. So stellen [LIU & YAO 2004, S. 190ff] ein Konzept vor, in dem Agenten zuerst um eine Aufgabe konkurrieren und im Anschluss kooperieren. Das Konzept beinhaltet sogenannte s-Agenten (service agents) und c-Agenten (community (administration) Agents). Ein c-Agent schreibt verschiedene Teilaufgaben aus, um die sich die s-Agenten bewerben (Wettbewerb). Der s-Agent, der den Auftrag erhält die Teilaufgabe zu lösen, kann zur effektiven Ausführung wiederum mit anderen s-Agenten kooperieren.

2.7 Multi-agentenbasierte Produktionsplanung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Themengebiete der Produktionsplanung und -steuerung und der (Multi-)Agententechnologie vorgestellt wurden, sollen nun beide Themen miteinander vereint werden. Dazu werden zuerst Voraussetzungen genannt, die einen Einsatz von Multi-Agenten Systemen in der Produktionsplanung ermöglichen. Im Anschluss wird ein beispielhaftes Konzept vorgestellt, wie eine Multi-agentenbasierte PPS aussehen könnte. Dabei werden allerdings nicht alle Aufgaben der PPS von den Agenten übernommen, sondern lediglich Teilaufgaben (bspw. Kapazitätsplanung).

2.7.1 Voraussetzungen

[WILDEMANN 1998, S. 140] präsentiert drei Voraussetzungen, die im Vergleich zu einem zentralen PPS-Ansatz erfüllt sein müssen, um die Vorzüge eines Multi-Agenten Systems nutzen zu können.

Zum einen muss ein Koordinierungsproblem zerlegbar sein, sodass die Teilaufgaben von Agenten möglichst unabhängig voneinander lösbar sind. Dies wird als Segmentierungsaufgabe bezeichnet. Als zweites wird die Allokationsaufgabe genannt. Diese beinhaltet den Aspekt, dass die Teilaufgaben den Agenten unter Beachtung gewisser Ziele (bspw. gleichmäßige Auslastung der Agenten) zugeordnet werden. Weiterhin muss gegeben sein, dass die gelösten Teilprobleme zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt werden können. Bei dieser Synthesaufgabe ist in der Regel ein übergeordnetes Ziel möglichst gut zu erfüllen [WILDEMANN 1998, S. 140].

2.7.2 Multi-Agenten Systeme für die Produktionsplanung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 2 wird hier beispielhaft anhand der PROSA (Product-Resource-Order-Staff-Architecture)-Referenzarchitektur ein Multi-Agenten System vorgestellt, welches zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung eingesetzt werden kann.

PROSA unterscheidet zwischen Entscheider- und Dienstagenten. Als Entscheideragententypen werden Auftrags-, Ressourcen-, und Produktagenten definiert, die jeweils von Dienstagenten unterstützt werden um Aufgaben zu lösen. Dienstagenten werden unterteilt in Scheduling- und Monitoringagenten und dienen dementsprechend zur Maschinenbelegung und zum Monitoring, siehe **Abbildung 2-4** [MÖNCH 2006a, S. 84ff].

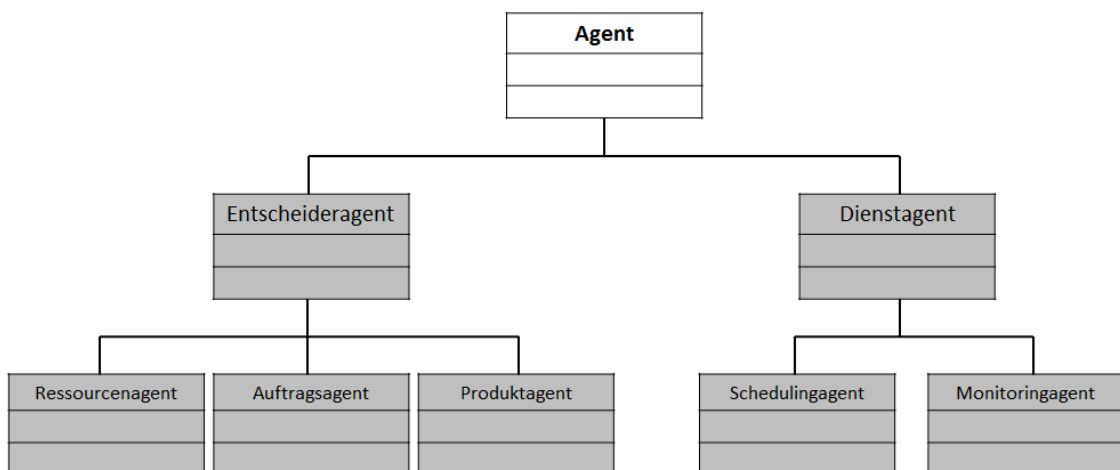


Abbildung 2-4: Agententypen für die Steuerung i.A. [MÖNCH 2006a, S. 86]

Die einzelnen Entscheideragenten können weiter unterteilt werden. So kann ein Ressourcenagent ein Produktionssystem-, Produktionsbereichs- oder

Maschinengruppenagent sein. Auftragsagenten können bspw. nach Los-, Batch- und Instandhaltungsagenten unterschieden werden [MÖNCH 2006a, S. 89].

Damit die einzelnen Agenten Aufgaben der PPS übernehmen können, müssen diese miteinander interagieren und Informationen austauschen. So liefern die Produktagenten den Ressourcenagenten die Arbeitspläne und die Ressourcenagenten versorgen die Produktagenten mit Informationen über Maschinenausfälle. Weiterhin erhalten die Auftragsagenten Informationen über die Ressourcenbelegung (von den Ressourcenagenten) und über die nächsten Prozess-Schritte (von den Produktagenten). Ferner teilt ein Ressourcenagent dem Schedulingagent seine freien Kapazitäten mit und wählt ein Schedulingverfahren mit entsprechender Parametrierung aus. Die verschiedenen Auftragsagenten teilen dem Schedulingagenten mit, was die nächsten Prozessschritte sind oder ob Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind. Umgekehrt werden den Auftrags- und Ressourcenagenten Ablaufpläne zur Verfügung gestellt [MÖNCH 2006a, S. 90ff].

Abbildung 2-5 fasst die jeweiligen Interaktionen zwischen den Agenten zusammen.

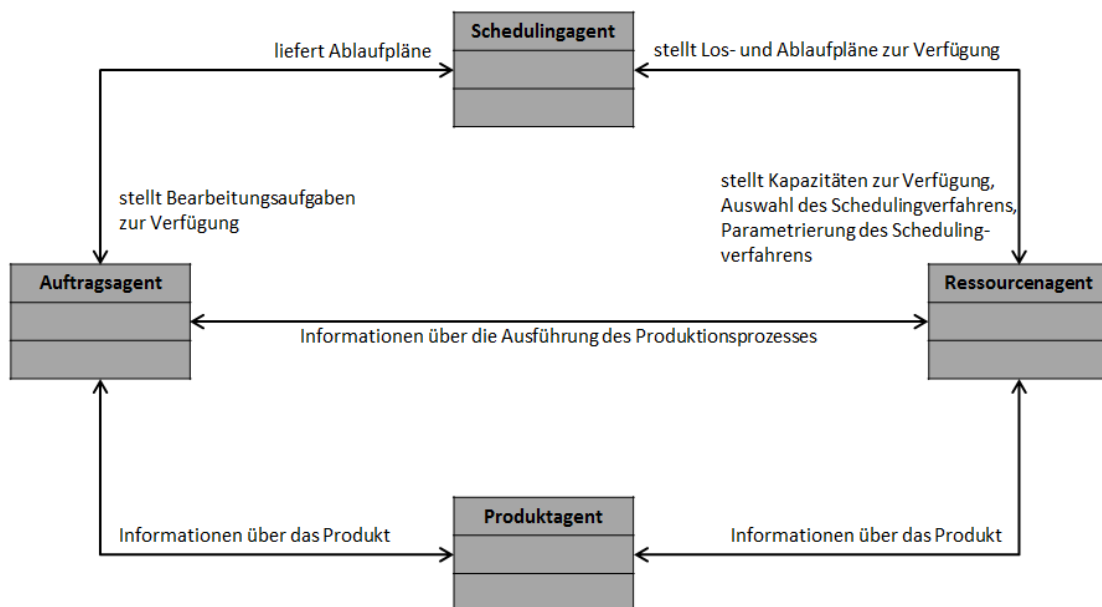


Abbildung 2-5: Interaktionen zwischen Auftrags-, Produkt-, Ressourcen- und Schedulingagent i.A. [MÖNCH 2006a, S. 91]

Auf Grundlage der PROSA-Referenzarchitektur ist es möglich Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung dezentral durch Agenten durchzuführen. So verfolgen die Agenten beispielsweise so lange einen vorgegebenen Ablaufplan, wie dieser gültig ist. Fällt eine Ressource kurzfristig aus, können Agenten mithilfe des Schedulingagenten neue Maschinenbelegungen aushandeln. Dies führt dazu, dass insbesondere Aufgaben der Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Produktionssteuerung von Agenten übernommen werden können [MÖNCH 2006b, S. 110f].

Weitere Beispiele für Agentensysteme für den Produktionsbereich sind YAMS (Yet another Manufacturing System), DAS (Distributed Asynchronous Schedule), SOPP (Selbstorganisierende Produktionsprozesse) und DEPRODEX (Dezentrale Produktionssteuerung durch Expertensysteme). YAMS wird für die Fertigungssteuerung genutzt. Dabei handelt es sich um ein hierarchisches Fertigungssystem, in dem Agenten entweder die an sie übergebene Aufgabe ausführen können oder diese in einfache Teilaufgaben zerlegen und an eine tiefere Hierarchiestufe übergeben. Ein ähnlicher Ansatz zur Fertigungssteuerung ist DAS, in dem ebenfalls Aufgaben über verschiedene Hierarchiestufen verteilt werden. Ein drittes System zur Fertigungssteuerung ist SOPP, welches einen hybriden Ansatz verfolgt. Aus einem zentralen Produktionsplanungssystem wird dem Planungsagent ein Fertigungsauftrag samt Produktionsplan übergeben. Der Planungsagent führt die Feinplanung zentral durch. Die dabei entstehenden Elementaraufgaben werden an den Brokeragenten übergeben, der diese Aufgaben per Verhandlung an die verschiedenen Transport- und Fertigungsagenten verteilt. Dem gegenüber stellt das Agentensystem DEPRODEX ein Ansatz zur dezentralen Maschinenbelegungsplanung dar. Hierin werden Maschinengruppen durch Agenten repräsentiert, die für ihre jeweiligen Maschinen eine Reihenfolgeoptimierung durchführen. Diese wird danach den vor- und nachgelagerten Stufen mitgeteilt [DANGELMEIER et al. 2004, S. 49ff]. Nach „dem Abgleich erfolgt eine neue Disposition auf Grundlage der aktuellen Daten“ [DANGELMEIER et al. 2004, S. 52].

2.8 Industrie 4.0 im Rahmen agentenbasierter Produktionsplanung

Nachdem in den vorigen Kapiteln die Grundlagen für den Themenbereich Produktionsplanung geschaffen worden sind, werden diese nun in den Kontext der aktuellen Forschungsbestrebungen zum Thema Industrie 4.0 (I4.0) eingeordnet. Dazu wird zuerst die Entstehung des Begriffes Industrie 4.0 beschrieben und im Anschluss daran wichtige Elemente von I4.0 vorgestellt. Die präsentierten Elemente bilden gleichzeitig den Verknüpfungspunkt zur agentenbasierten Produktionsplanung. Abschließend werden aktuelle Forschungsvorhaben präsentiert, die sich mit den entsprechenden Themengebieten dieser Arbeit beschäftigen.

2.8.1 Begriffsentstehung Industrie 4.0

Die Initiative Industrie 4.0 (I4.0) wurde im Rahmen der Hannover Messe 2011 erstmals veröffentlicht [KAGERMANN et al. 2011]. Im Zuge der Hightech-Strategie der Bundesregierung zielt das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 darauf ab, die deutsche Industrie auf die Zukunft der Produktion vorzubereiten. Dazu fördert das

Bundesministerium für Bildung und Forschung eine Vielzahl von Forschungsprojekten [Bundesministerium für Bildung und Forschung 2014a].

Der Begriff Industrie 4.0 zielt dabei auf die vierte industrielle Revolution, siehe **Abbildung 2-4**. Nachdem Ende des 18. Jahrhunderts die erste industrielle Revolution durch die Einführung erster mechanischer Produktionsanlagen mit Hilfe von Wasser- und Dampfkraft begann, führten Veränderungen der Arbeitsorganisation sowie die Nutzung elektrischer Energie zur zweiten industriellen Revolution, die in der Fließbandfertigung perfektioniert wurde [DRATH 2014, S. 2]. Ab den 1970er Jahren wurde mit dem vermehrten Einzug von Elektronik und Informationstechnik in die Produktionshallen, „die Automatisierung von Produktionsprozessen [...] vorangetrieben“ [BAUER et al. 2013, S. 18]. Dies wird als dritte industrielle bzw. digitale Revolution bezeichnet [THEUER 2013, S. 16]. Die vierte industrielle Revolution „meint im Kern die technische Integration von CPS [Cyber-Physischen Systemen] in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation“ [BAUER et al. 2013, S. 18].

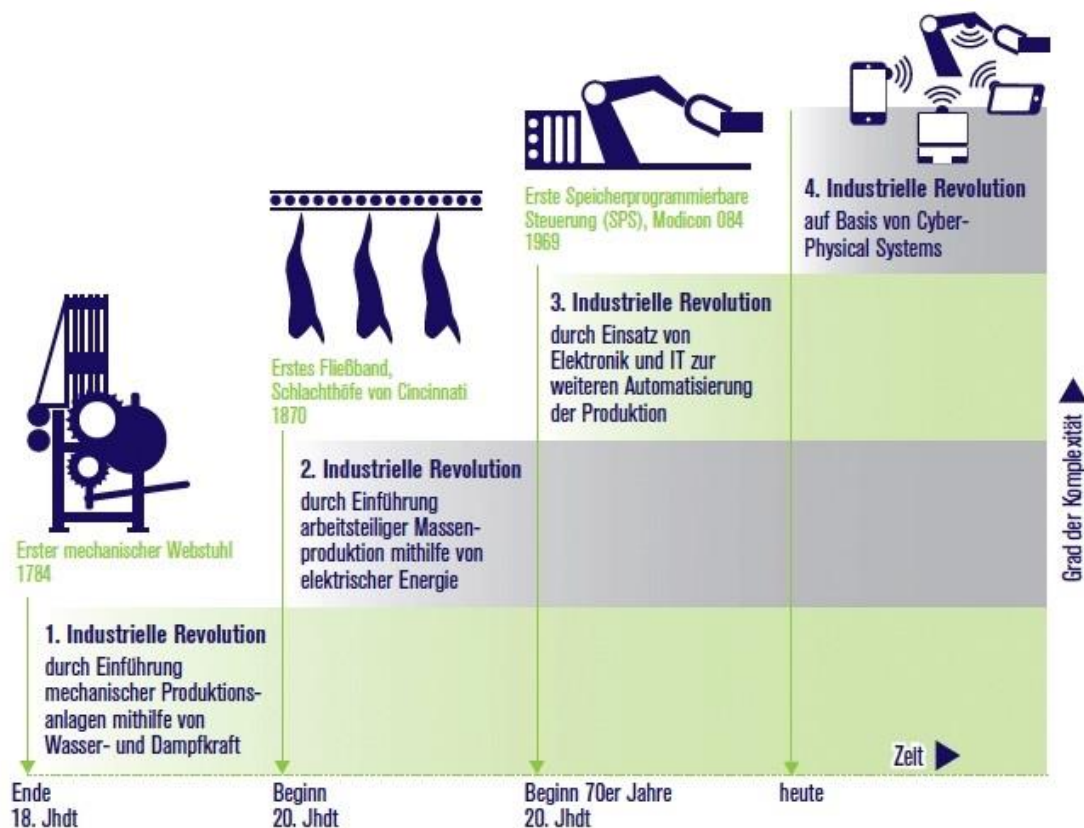


Abbildung 2-6: Die vier Stufen der Industriellen Revolution [BAUER et al. 2013, S.

Das übergeordnete Ziel der Zukunftsstrategie Industrie 4.0 ist es den Produktionsstandort Deutschland zu sichern, indem die Wettbewerbsfähigkeit gestärkt wird [Bundesministerium für Bildung und Forschung 2014a]. Dabei ist Deutschland „als ‚Fabrikaurüster der Welt‘ wie kein anderes Land dafür geeignet, die Potentiale dieser neuen Form der Industrialisierung zu erschließen“ [BAUER et al. 2013, S. 18]. Als Potentiale der vierten industriellen Revolution werden unter anderem folgende identifiziert. Eine Produktion von Kleinstmengen bis zur Produktion von Einzelstücken soll rentabel werden und somit den Kundenanforderungen nach individuellen Produkten entsprechen. Eng damit verbunden ist das Ziel der Flexibilisierung, welches sich unter anderem in einer dynamischen Gestaltung von Geschäftsprozessen widerspiegelt. Weiterhin sollen durch die Vernetzung von Cyber-Physischen Systemen kurzfristige Ausfälle ausgeglichen und schnell auf Änderungen der Liefermenge reagiert werden können, was die Robustheit steigert [BAUER et al. 2013, S. 19f]. Insbesondere das kurzfristige Reagieren auf Veränderungen soll durch eine Echtzeit-Verknüpfung der realen Welt mit der entsprechenden IT-Welt zu einer optimierten Entscheidungsfindung führen [LASS et al. 2013, S. 47]. Als Beispiel sei hier das Simulieren von alternativen Abläufen beim Auftreten einer Störung einer Maschine innerhalb der Produktionssteuerung genannt.

2.8.2 Relevante Elemente der vierten industriellen Revolution

Um die in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Inhalte in das Themengebiet I4.0 einzuordnen und damit einen aktuellen Bezug herzustellen, werden nun einzelne, für diese Arbeit relevante Elemente von I4.0 vorgestellt.

Cyber-Physische Systeme (CPS)

Wie bereits in der Industrie 4.0-Begriffserklärung und der **Abbildung 2-6** zu sehen, sind Cyber-Physische Systeme (Cyber-Physical Systems) die Basis der vierten industriellen Revolution. Für den Begriff CPS existieren in der Literatur verschiedene Erklärungen [VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik 2013, S. 2]. Für diese Arbeit soll folgende Definition zu Grunde gelegt werden:

„Cyber-Physical Systems umfassen typischerweise Eingebettete Systeme (als Teil von [...] Produktionsanlagen, Logistik- und Managementprozessen, etc.), die

- mittels Sensoren und Aktuatoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und auf physikalische Vorgänge einwirken,
- mit digitalen Netzen verbunden sind [...],
- weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen

und über eine Reihe multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen [...] verfügen“ [VOGEL-HEUSER 2011, S. 7].

Diese Definition zeigt das Cyber-Physische Systeme auf zwei konvergierende Technologieinnovationen beruhen. Zum einen die eingebetteten Systeme, also „hochleistungsfähige ‚Kleinstcomputer‘, die in alle möglichen Materialien und Gegenstände integriert werden“ [Bundesministerium für Bildung und Forschung, S. 10] und mit Sensoren und Aktuatoren ausgestattet sind. Zum anderen die globalen Netze, die immer schneller große Datenmengen verarbeiten können [Bundesministerium für Bildung und Forschung, S. 10].

Weiter gehen verschiedene Charakteristika von CPS mit der genannten Begriffserklärung einher. So werden in CPS reale Objekte mit virtuellen verknüpft und über ein offenes Informationsnetz (bspw. das Internet) miteinander verbunden [VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik 2013, S. 2]. Ferner müssen Daten ausgewertet werden und darauf aufbauend wird „aktiv oder reaktiv mit der physikalischen und der digitalen Welt“ [GEISBERGER & BROY 2012, S. 22] interagiert. Dementsprechend ist eine „direkte Verbindung zwischen physikalischer Welt und digitaler Welt“ [BROY 2010, S. 22] wichtig. Damit eng verbunden sind entsprechende Zeitanforderungen (bspw. Echtzeit). Weiterhin werden Automatisierung, Autonomie sowie Zugriffssicherheit und Datenschutz genannt [BROY 2010, S. 22f].

„Ein spezialisiertes Konzept der Cyber-Physischen Systeme“ [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 1] sind Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS), auch Production CPS (ProCPS) genannt, wobei unter CPPS folgendes verstanden wird [VOGEL-HEUSER 2011, S. 7]:

„Ein CPPS ist der Zusammenschluss mehrerer, zunächst unabhängiger Cyber-Physikalischer-Systeme (CPS) zu einem größeren Produktionssystem, welches durch einen hohen Vernetzungsgrad der Systeme untereinander gekennzeichnet ist und eine eigenständige intelligente Produktionseinheit darstellt“ [BAUERNHANSL 2014, S. 146].

Als Merkmale von CPS und CPPS werden unter anderem in [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 3ff] Architekturmodelle, Intelligente Produkte und Produktionseinheiten, sowie die Datenaufbereitung für den Menschen genannt. Letzteres beinhaltet das Aufbereiten der Daten, sodass entsprechend der Rolle des Mitarbeiters die richtigen Daten dargestellt werden, diese durchsucht, gefiltert und darauf aufbauend Entscheidungen getroffen werden können.

Unter Architekturmodellen werden die Anstrengungen verstanden, die nötig sind „um heterogene Anlagen [...] unterschiedlicher Architekturen unter den geforderten Randbedingungen einsetzen zu können“ [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 3]. Ein Lösungsansatz hierfür sind Multi-Agenten Systeme (MAS). Agenten repräsentieren Maschinen mit deren entsprechenden Fähigkeiten und können durch den Austausch von

Nachrichten Dienste anbieten und Aufträge annehmen [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 3].

Weiterhin wird unter **intelligenten Produkten** und Produktionseinheiten verstanden, dass in diesen ein gewisses Wissen über sich selbst vorhanden ist [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 194]. Für ein intelligentes Produkt (auch smart product genannt) bedeutet dies, „das Wissen über sich selbst, d.h. die eigenen Eigenschaften, Schnittstellen zu anderen (Teil-)Produkten und Maschinen zu kennen sowie die möglichen Produktionsoperationen, die zur eigenen Herstellung ausgeführt werden können“ [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 194] zu kennen.

Insbesondere im Zuge der Produktionsplanung und -steuerung ist das Wissen über die möglichen Produktionsoperationen zur eigenen Herstellung von Bedeutung. Benötigt beispielsweise ein intelligentes Produkt eine Maschinenfunktionalität die innerhalb des Produktionssystems nicht verfügbar ist, so kann eine Anfrage in das CPPS-Netzwerk gestartet werden um eine entsprechende intelligente Maschine mit der Fähigkeit zu finden [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 194]. Smart Products steuern also aktiv den Produktionsprozess [BAUERNHANSL 2014, S. 603]. Weiterhin könnten intelligente Produkte aber auch mit Qualitätsmerkmalen versehen werden, die entsprechend überprüft werden und eventuell frühzeitig zu einer Nachbesserung führen [BAUER et al. 2013, S. 23].

Intelligente Produkte bilden damit die Grundlage für eine autonome Steuerung, da sie in der Lage sind mit anderen Werkstücken oder Maschinen zu interagieren, Informationen auszutauschen sowie Entscheidungen zu treffen und diese selbstständig durchzuführen [GRUNDSTEIN et al. 2015, S. 220].

„Cyber-Physical Systems in der Produktion umfassen intelligente Maschinen [...] und Betriebsmittel“ [BAUERNHANSL 2014, S. 606]. Analog zu den intelligenten Produkten sind diese **intelligenten Produktionseinheiten** ebenfalls mit Informationen über sich selbst ausgestattet. Zwischen verschiedenen Maschinen können diese Informationen ausgetauscht und verarbeitet werden. Aktionen können von den Maschinen selbst ausgelöst werden und Anlagen können sich selbstständig steuern [BAUER et al. 2013, S. 5]. Weiterhin werden „Produktionseinheiten flexibel und zur Laufzeit adaptierbar sein“ [BAUERNHANSL 2014, S. 42]. So wird die gesamte Produktion flexibler und eine Anpassung auf schnell wechselnde Produkthanforderungen ermöglicht. Ferner sind intelligente Produktionseinheiten fähig sich selbst zu überwachen. So können die Daten (bspw. Prozess- und Alarmdaten), während des Betriebs dokumentiert und ausgewertet werden und unmittelbar zur Verbesserung des Betriebs genutzt werden [BAUERNHANSL 2014, S. 42ff].

Einhergehend mit der steigenden Intelligenz und den Eigenschaften der Agenten (Kommunikationsfähigkeit, Autonomie, ...) der Produkte und Produktionseinheiten,

steigen der Autonomiegrad und die Fähigkeit zur Selbstorganisation in der Produktion [BAUERNHANS� 2014, S. 576]. Damit können in Zukunft Produkte und Maschinen „gemeinsam entscheiden, welche Werkzeuge zum Einsatz kommen und wohin sich Einzelteile für den nächsten Produktionsschritt bewegen sollen“ [BAUERNHANS� 2014, S. 576]. Die Kommunikation kann sowohl direkt zwischen zwei Entitäten mittels Nachrichten stattfinden oder über ein Blackboard-System. Weiterhin können einzelne Anlagenteile durch eine agentenbasierte Steuerungssoftware neu angesteuert werden und somit notwendige Funktionalitäten bereitgestellt werden. [VOGEL-HEUSER et al. 2015, S. 4]

Dezentralisierung

Ein weiteres zentrales Element der vierten industriellen Revolution ist die Dezentralisierung [REHDER & SCHATZ 2014, S. 129]. Diese ist eng mit dem vorgestellten Konzept der Cyber-Physischen Systeme verbunden, da diese gewisse Freiheitsgrade voraussetzen „um ihre Fähigkeiten und Nutzenpotentiale voll auszuspielen“ [REHDER & SCHATZ 2014, S. 130f]. So sind intelligente Produktionsanlagen in der Lage selbstständig eine optimale Reihenfolge aus gegebenen Aufträgen zu ermitteln. Würde die Auftragsreihenfolge von einer zentralen Instanz festgelegt werden, so wäre dieses Potential nicht nutzbar [REHDER & SCHATZ 2014, S. 130f]. Dies steht in Einklang mit dem Agentenansatz, der ebenfalls „darauf abzielt, Probleme nicht mehr durch eine einzelne informationsverarbeitende Instanz bearbeiten zu lassen“ [ZELEWSKI & BODE 1993, S. 14].

Mit der Einführung von intelligenten Objekten steigt der Grad der Selbstorganisation und Dezentralität. Entscheidungen, welche Aufträge zu welchen Maschinen zugeordnet werden, können agentenbasiert und erst im Moment der Entscheidungsnotwendigkeit getroffen werden. So ist es möglich Entscheidungen auf Basis aktueller Informationen (bspw. Rüstzustände, Warteschlange, etc.) zu treffen. Damit entsteht eine dynamische Produktionsumgebung, die schnelle Reaktionen auch auf unvorhergesehene Ereignisse ermöglicht. Weiterhin kann durch die dezentrale Entscheidungsfindung eine zentrale Steuerungsinstanz abgelöst und die Flexibilität der Fertigung gesteigert werden [UHLMANN et al. 2013, S. 115f].

Angemerkt sei hier das eine Dezentralisierung nicht nur auf den operativen Betrieb beschränkt ist, sondern auch Einfluss auf die Aufbauorganisation oder die Datenhaltung hat. Wobei durchaus noch zentrale Instanzen bestehen bleiben werden. So werden bspw. Stammdaten weiterhin zentral vorgehalten werden. Insgesamt wird es eine Verknüpfung von zentralen und dezentralen Elementen geben [SPATH 2013, S. 97f].

2.8.3 Produktionsplanung im Kontext Industrie 4.0

Im Zuge der vierten industriellen Revolution wird sich auch die Produktionsplanung weiterentwickeln. Insbesondere die bessere Datenverfügbarkeit und –qualität wird sich positiv auswirken. Durch die Einführung Cyber-Physischer Systeme bzw. Cyber-Physischer Produktionssysteme wird ein steter Datenaustausch zwischen CPS und Planungssystem ermöglicht [KUPRAT et al. 2015, S. 11]. Dies führt dazu, dass eine Produktionsplanung basierend auf aktuellen Informationen durchgeführt werden kann. So ist es zukünftig beispielsweise möglich die Ist-Durchlaufzeiten hochaufgelöst zurückzumelden und auszuwerten. Dies kann wiederum genutzt werden um die Güte der Plan-Durchlaufzeiten zu erhöhen. Diese sind Basis der Auftragsterminierung, die dadurch optimiert werden kann [NYHUIS et al., S. 90].

Als wichtige Aufgaben der Produktionsplanung bleiben die Schaffung eines Zielsystems, die Prognostizierung zukünftiger Bedarfsmengen, sowie die Termin- und Kapazitätsplanung. Die Planungsqualität wird dabei aufgrund der steigenden Datenqualität verbessert. Hinzukommen werden Aspekte der Lieferkettenüberwachung, welche sich ebenfalls durch den Einsatz von CPPS und damit einhergehend der besseren Informationsverfügbarkeit innerhalb der Lieferkette vereinfachen wird [KUPRAT et al. 2015, S. 11ff]. Insgesamt dient „eine Verbesserung der Datengrundlage [...] eine[r] Verbesserung der Planungsgenauigkeit im Rahmen der Produktionsplanung“ [NYHUIS et al., S. 91]. Zu beachten bleibt dabei das eine zentrale Planung nicht obsolet wird, sondern „die Optimierung des Gesamtsystems zum Fokus hat und die Grundlage für die Selbststeuerung von CPS liefert“ [KUPRAT et al. 2015, S. 14].

Neben der zentralen Planung wird die Produktionssteuerung zunehmend dezentral durchgeführt werden. Durch die Einführung von CPS mit den entsprechenden Ausprägung, wie intelligente Produkte und Produktionseinheiten, können Aufgaben wie die Reihenfolgebildung von den entsprechenden Objekten zukünftig selbst durchgeführt werden [KUPRAT et al. 2015, S. 13].

2.8.4 Aktuelle Forschungsvorhaben

Im Zuge der Hightech-Strategie der Bundesregierung gibt es zahlreiche Forschungsprojekte zum Zukunftskonzept Industrie 4.0, die vom Bundeministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt und gefördert werden. Repräsentativ werden hier drei Forschungsprojekte vorgestellt, die entsprechende relevante Elemente für diese Arbeit bearbeiten und einen aktuellen Forschungsbezug herstellen.

SOPHIE

Als ein Teil der Hightech-Strategie, genauer gesagt „Teil des Rahmenförderprogramms ‚Virtuelle Techniken für die Fabrik der Zukunft – Ein Beitrag zum Zukunftskonzept

Industrie 4.0“ [KREIMEIER et al. 2015, S. 205] sei hier das Forschungsvorhaben „Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung“ (kurz SOPHIE) vorgestellt [KREIMEIER et al. 2015, S. 205]. „Ziel des Projektes ist es, die digitale Welt der Fabrikplanung in Echtzeit mit der realen Welt in der Produktion zu verknüpfen“ [Bundesministerium für Bildung und Forschung 2014b, S. 64]. Mit Hilfe dieser Verknüpfung soll unter anderem Entscheidungsträgern die Möglichkeit gegeben werden, Eingriffe in den realen Produktionsprozess abzusichern. So könnte beispielsweise ein mit aktuellen Produktions- und Maschinendaten gestütztes Simulationsmodell eine Entscheidungsfindung unterstützen. Dies soll insbesondere die Defizite beheben, die derzeitig eingesetzte PPS-Systeme insbesondere bei kurzfristigen Störungen haben [KREIMEIER et al. 2015, S. 205ff].

Der grundsätzliche Lösungsansatz unterteilt sich in drei Ebenen, siehe **Abbildung 2-7**:

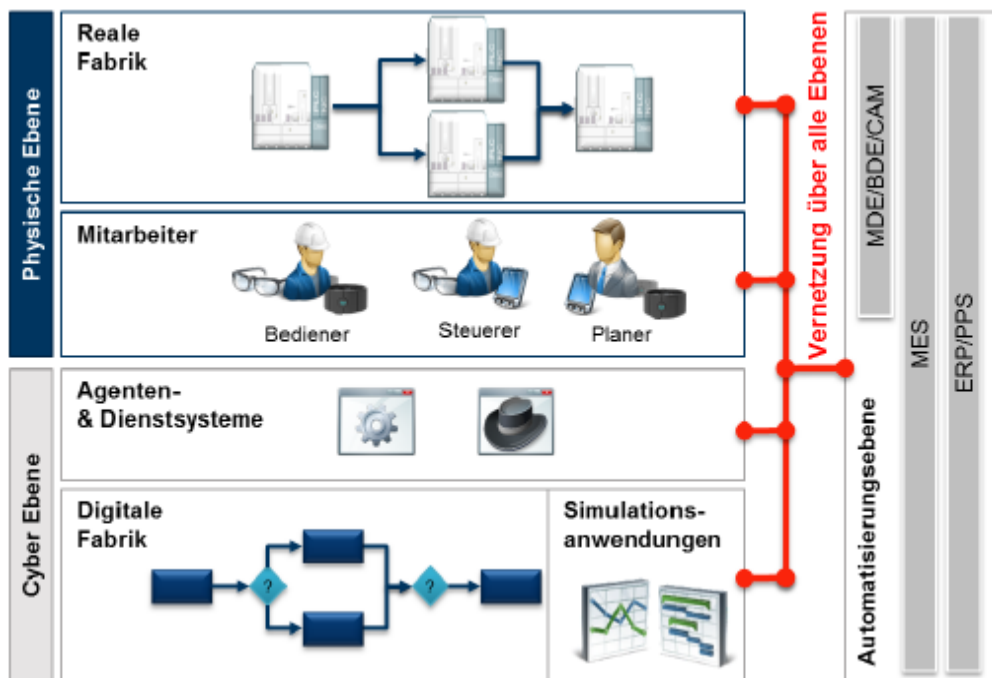


Abbildung 2-7: Lösungsansatz im Projekt „SOPHIE“ [KREIMEIER et al. 2015, S. 206]

Die physische Ebene beinhaltet dabei die Mitarbeiter der verschiedenen Hierarchieebenen sowie die technischen Elemente, wie Maschinen und Anlagen. In der Cyber-Ebene werden die realen Elemente (Maschinen, Werker, Produkte) als Agenten repräsentiert. Die dritte Ebene ist die Automatisierungsebene, diese bildet die Schnittstelle zwischen realer und virtueller Fabrik [KREIMEIER et al. 2015, S. 206f]. Dabei wird sich im Zuge von Industrie 4.0 die Automatisierungspyramide weitgehend auflösen [GÜNTNER 2010, S. 250].

CyProS

Ein weiteres vom BMBF gefördertes Forschungsprojekt ist das Projekt CyProS: „Cyber-Physische Produktionssysteme – Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik“ [REINHART et al. 2013, S. 87]. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Komplexität und eines wachsenden Wettbewerbs soll durch die Einführung von CPPS, die Produktivität und Flexibilität von produzierenden Unternehmen gesteigert werden. Dieses Projekt hat zum Ziel CPPS und damit auch CPS zu erforschen, umzusetzen und zu evaluieren [FRANK]. Dabei werden „beispielsweise Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung und den Betrieb von cyber-physischen Systemen“ [SCHUH & STICH 2014, S. 74] betrachtet. Insgesamt wird ein dreistufiges Zielsystem verfolgt. Zuerst soll eine Referenzarchitektur geschaffen werden, die als übertragbare Implementierungsvorlage für Cyber-Physische Produktionssysteme dient. In der zweiten Stufe werden Hilfsmittel und Plattformen zur Einführung von CPPS bereitgestellt und in der dritten Stufe soll der Betrieb eines CPPS in einer realen Produktionsumgebung getestet werden [FRANK].

Aufbauend auf den drei Stufen unterteilt sich das Projekt in fünf Teilprojekte, wovon insbesondere das Teilprojekt zwei: „Planung, Steuerung und Prozessgestaltung“ für diese Arbeit relevante Forschungsgebiete enthält. Die weiteren Teilprojekte werden dementsprechend vernachlässigt. „Fokus innerhalb des zweiten Teilprojektes ist die Entwicklung von Methoden zur Planung und Steuerung von Cyber-Physischen Produktionssystemen“ [FRANK]. Dabei sollen sowohl bestehende Planungsmethoden weiterentwickelt als auch neue Verfahren, die die entsprechenden CPS-Eigenschaften (Ad-hoc-vernetzung, dezentrale Entscheidungsfindung) ermöglichen, erarbeitet werden. Als Grundlage hierfür dient eine selbst aktualisierende Datenbasis der Cyber-Physischen Systeme. Diese ermöglicht eine situative PPS auf Basis von Echtzeit-Informationen. Weiterhin wird diese Datenbasis als Input für ein Simulationsmodell genutzt um Produktionspläne abzusichern. Durch die Einführung Cyber-Physischer Systeme werden also Informationen in Echtzeit bereitgestellt und dienen somit für die PPS und die Simulation als Input, wo bislang nur Vergangenheitswerte genutzt werden konnten [FRANK].

ProSense

Das Forschungsvorhaben ProSense verfolgt das Ziel auf Basis intelligenter Sensorik und kybernetischer Unterstützungssysteme eine adaptive, hochauflösende Produktionssteuerung zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einem Steuerungssystem, welches benutzerfreundlich ist und dem Menschen auf Grundlage von hochauflösenden Daten und einer intelligenten Visualisierung eine Entscheidungsunterstützung bietet [BRAMBRING]. Als Rahmen für die Produktionssteuerung dient ein Cyber-Physisches Produktionssystem, welches sich in die vier Aufgaben: Massendatenerfassung, Massendatenverarbeitung,

selbstoptimierendes Feinsteuerungssystem und Mensch-Maschine-Interaktion unterteilt [MEIßNER et al. 2013, S. 22]. Im ersten Schritt werden die Daten über Sensoren erfasst und in einer zentralen Datenbank gespeichert. Die Basis dafür bildet der Shopfloor [SCHUH et al. 2013b, S. 98]. „Hier befinden sich sowohl die Maschinen, Mitarbeiter und Ressourcen sowie die zu fertigenden Produkte“ [SCHUH et al. 2013b, S. 98]. Diese Komponenten werden durch Informationen (bspw. Betriebs-, Maschinen-, Prozessdaten) detailliert. Mithilfe der Massendatenverarbeitung werden die Informationen entsprechend aufbereitet und die für die Planung relevanten Daten werden in das Feinsteuerungssystem gespeist. Dieses basiert auf einem Simulationsmodell, welches aufgrund der hochauflösenden aktuellen Informationen, stets die reale Produktion abbildet [SCHUH et al. 2013b, S. 98f]. Aufgrund verschiedener Simulationsläufe werden dem Anwender verschiedene sinnvolle Steuerungsalgorithmen zur Verfügung gestellt [MEIßNER et al. 2013, S. 23]. Durch eine entsprechende Visualisierung erhält der Anwender „einen Überblick über die Konsequenzen seiner Entscheidungen und kann darauf aufbauend die richtige Entscheidung treffen“ [MEIßNER et al. 2013, S. 23]. Das System bietet dabei Unterstützung sowohl zu kurzfristigen „Maßnahmen in den Handlungsfeldern ‚Kapazitiver Engpass‘, ‚personeller Engpass‘, ‚Umlaufbestand‘ sowie ‚Eilaufträge““ [SCHUH et al. 2014, S. 965], als auch eine Analysemöglichkeit zu systematischen Planabweichungen für einen langfristigen Zeitraum [SCHUH et al. 2014, S. 965].

3 Simulation

Das dritte Kapitel dient der Einführung in das Themengebiet Simulation. Dazu werden zunächst Grundlagen der Simulation vermittelt, was insbesondere die Definition der Begriffe System, Modell und Simulation beinhaltet. Darauf aufbauend werden die Simulationsmöglichkeiten im Rahmen der Produktionsplanung diskutiert. Es werden zum einen Voraussetzungen und zum anderen Möglichkeiten für den Einsatz von Simulationssoftware in der operativen Produktionsplanung präsentiert. Die Vorstellung der wesentlichen Elemente eines ereignisdiskreten Simulationswerkzeuges sowie die Vorstellung, der in dieser Arbeit verwendeten ereignisdiskreten Simulationssoftware Plant Simulation, schließen das dritte Kapitel ab und leiten in das vierte über.

3.1 Einführung Simulation

Um in die Thematik Simulation einzusteigen, werden zunächst die Begriffe System und Modell eingeführt und definiert, da diese die Grundlagen bilden um Simulation zu definieren. Weiterhin wird die ereignisdiskrete Simulationsmethode vorgestellt sowie Ziele, Nutzen und Einsatzbereiche der Simulation.

3.1.1 Der Systembegriff

Unter dem Begriff System wird eine Menge von „miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“ [DIN IEC 60050-351, S. 21] können, verstanden. Dabei werden die Vorgänge, die Änderungen innerhalb des Systems bewirken, als Aktivität und die Eigenschaften der Elemente als Attribute bezeichnet [GORDON 1972, S. 12]. Ferner können die Elemente entweder temporär also nur zeitweise, oder permanent in einem System existieren und als stationär also immer am selben Ort befindlich, oder mobil bezeichnet werden [Ulrich Hedtstück 2013, S. 10]. Weiterhin wird unter dem Zustand eines Systems, „die Beschreibung aller Elemente, Attribute und Aktivitäten in einem bestimmten Zeitpunkt“ [GORDON 1972, S. 12] verstanden.

Um das zu untersuchende System von der Umwelt abzugrenzen, müssen die Systemgrenzen klar definiert werden [KÜHN 2006, S. 41]. Die Abgrenzung des Systems muss in Abhängigkeit der jeweiligen Aufgabe vorgenommen werden. Allerdings sollte versucht werden die Systemgrenzen und damit das System, so klein wie möglich zu halten [FELDMANN 2000, S. 15]. „Die durch die Abgrenzung ‚geschnittenen‘ Wirklinien zwischen System und Außenwelt stellen die Gesamtheit der Ein- und Ausgangsgrößen des Systems dar“ [KAHLERT 2004, S. 10]. Existieren keine Ein- und Ausgangsgrößen so wird von einem geschlossenen System gesprochen, ansonsten von einem offenen [GORDON 1972, S. 13].

Zur Untersuchung des Systems werden die Veränderungen der Zustände des Systems verfolgt [GORDON 1972, S. 12]. Dazu kann zwischen Experimenten am realen System, oder am Modell unterschieden werden [GÜNTNER 2010, S. 149].

Da im Kontext dieser Arbeit nur Experimente am Modell relevant sind, wird im Folgenden nur auf diese Variante eingegangen.

3.1.2 Der Modellbegriff

Als Modell wird hier eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System [definiert]. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“ [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 3].

Diese Definition ist eng mit der Charakterisierung des Modellbegriffs nach [STACHOWIAK ©1973] verbunden. Dieser führt die drei folgenden Merkmale von Modellen auf, die teilweise bereits in der Definition anklingen. Das Abbildungsmerkmal verdeutlicht das Modelle lediglich Abbilder eines Originalsystems sind. Das Verkürzungsmerkmal legt dar das Modelle nur einen Teil des Systems abbilden. „Sie sind Vereinfachungen der Realität“ [ENGELHARDT-NOWITZKI et al. 2008, S. 61] und bilden nur solche Attribute ab, „die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen“ [STACHOWIAK ©1973, S. 132]. Des Weiteren ist es nicht möglich Modelle eindeutig ihren Originalen zuzuordnen, da sie „nicht nur Modelle von etwas“ [STACHOWIAK ©1973, S. 133] sind, sondern auch für jemanden, zu einem bestimmten Zweck erstellt wurden und ihre Funktion in der Zeit erfüllen. Dieser Sachverhalt wird unter dem Begriff des pragmatischen Merkmals zusammengefasst [STACHOWIAK ©1973, S. 131ff].

Generell ist bei der Modellierung darauf zu achten, dass sich auf die Bereiche fokussiert wird, die im Kontext der Fragestellung relevant sind. Ähnlich zur Systemabgrenzung (s. 3.1.1) gilt: „Die Modellierung sollte so genau wie nötig und nicht so genau wie möglich sein“ [HOLTEWERT et al. 2014, S. 34].

3.1.3 Definition, Nutzen und Einsatzbereiche der Simulation

Simulation wird vom [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1] als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 3] definiert. Das zur Simulation gehörige Modell wird als Simulationsmodell bezeichnet [ELEY 2012, S. 4]. Die wesentlichen Eigenschaften „der Simulation sind die Modellierung der Zeit, die Möglichkeit zur Abbildung von Zufälligkeiten, die Experimentierbarkeit der Modelle über systematische Struktur- und

Parametervariationen sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse“ [BRACHT et al. 2009, S. 112].

Mit Hilfe der Abbildung des Zeitverhaltens kann zwischen verschiedenen Simulationsmethoden (kontinuierlich, zeitgesteuert, ereignisdiskret) differenziert werden [BRACHT et al. 2009, S. 112]. In dieser Arbeit wird lediglich die ereignisdiskrete Simulation betrachtet, weshalb nur auf diese Form näher eingegangen wird.

Die ereignisdiskrete Simulation zeichnet sich dadurch aus, dass der Zeitfortschritt mit Hilfe von Ereignissen abgebildet wird [MÄRZ et al. 2011, S. 14]. Die Uhr wird also „auf den Zeitpunkt vorgerückt, bei dem das nächste Ereignis auftreten soll“ [GORDON 1972, S. 129]. Diese Form eignet sich insbesondere für das Abbilden von Materialfluss- oder Produktionssystemen, da hier bspw. die Ankunft eines Werkstückes an einer Maschine als Ereignis deklariert und somit ausgewertet werden kann [ELEY 2012, S. 8].

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff ereignisdiskret weggelassen und nur noch von Simulation gesprochen, aber die ereignisdiskrete Simulation gemeint.

Generell kann die Verwendung von Simulation helfen verschiedene Ziele zu erreichen. So kann nach [KÜHN 2006, S. 22] „die Simulation von produktionstechnischen Anlagen und Prozessen helfen“ [KÜHN 2006, S. 22], folgende Ziele zu erreichen: Planungsvorhaben können abgesichert, die Durchlaufzeit kann minimiert oder die Termintreue verbessert werden.

Die Gründe für eine Simulation bzw. die Vorteile von Simulation lassen sich wie folgt zusammenfassen. Das System kann untersucht werden, ohne das ein reales System bereits existiert bzw. ohne in das reale System einzugreifen. So müssen bspw. Produktionsprozesse nicht unterbrochen werden [ELEY 2012, S. 6]. Außerdem können „Prozesse, die in der Realität lange Laufzeiten benötigen, [...] mit Hilfe der Simulation in einem Bruchteil dieser Zeit betrachtet werden“ [GÜNTNER 2010, S. 153]. Weiterhin können verschiedene Strategien untersucht und bezüglich gewisser Kenngrößen bewertet werden. Dies wiederum führt dazu, dass Entscheidungen auf Basis einer objektiven Grundlage gefasst werden [ELEY 2012, S. 6]. Unterstützt werden kann diese Entscheidungsfindung mittlerweile auch durch, vielfach in Simulationswerkzeugen implementierte, (3D-)Animationen. Diese ermöglicht es auch fachfremden Personen ein Verständnis des Systems zu erlangen [GÜNTNER 2010, S. 153].

Aus den Vorteilen und Gründen für die Simulation ergeben sich folgende Nutzenaspekte. Es kann ein Sicherheitsgewinn erreicht werden, wenn bspw. ein Planungsvorhaben überprüft wird, es können kostengünstigere Lösungen realisiert

werden, bspw. durch Reduktion von Puffergrößen, das Systemverständnis wird verbessert und die Prozessführung kann verbessert werden, bspw. durch die Optimierung der Anlagensteuerung [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 40]. Dem Nutzen steht entsprechend ein Aufwand gegenüber. Dieser wird nach [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 40] wie folgt beschrieben. Zunächst einmal muss das Problem definiert werden, was eine Zielbeschreibung und Aufgabendefinition beinhaltet. Weiterhin werden zur Systemanalyse Daten beschafft und aufbereitet, sowie ein Modell gebildet. Das Modell muss implementiert und mithilfe von Simulationsläufen analysiert werden. Letzteres besteht aus den Teilprozessen Auswertung, Ergebnisinterpretation und Dokumentation. Generell „müssen die Ergebnisse von Simulationsstudien den damit verbundenen Aufwand rechtfertigen“ [LIEBL 1992, S. 198]. Dabei sollten allerdings in einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung nicht nur die Kosten, dem erwarteten Nutzen gegenübergestellt, sondern auch schwer-quantifizierbare Größen, wie bspw. der Gewinn an methodischem Know-How mit einbezogen werden. [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 39ff]

Aus den verschiedenen Gründen für die Simulation ergeben sich genauso vielseitige Einsatzmöglichkeiten. In [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 6ff] werden die Nutzungsmöglichkeiten anhand der Phasen eines Lebenszyklus von technischen Systemen unterteilt. In der Planungsphase können bspw. Anlagen auf Funktion und Leistung überprüft werden. Die Realisierungsphase kann durch einen simulierten Probebetrieb unterstützt werden und in der Betriebsphase erlaubt die Simulation „die vergleichende Bewertung kurzfristiger und situationsabhängiger Ablaufvarianten“ [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 8]. Ebenfalls in der Betriebsphase angesiedelt ist die Produktionsplanung und -steuerung [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 6ff].

3.2 Simulation in der Produktionsplanung

„Das derzeit in Deutschland [...] herrschende Wirtschaftsumfeld ist von einer verstärkten Marktvolatilität und -dynamik [...] geprägt“ [SCHUH & STICH 2012a, S. 195]. Dies ist auf neue Technologien und kurzzyklische Absatzschwankungen zurückzuführen und schlägt sich auch auf wachsende Anforderungen an die Produktionsplanung und -steuerung nieder. Da konventionelle PPS-Systeme nach wie vor auf „der Annahme statischer Randbedingungen“ [SCHUH & STICH 2012a, S. 195] basieren, „führen die dynamischen Rahmenbedingungen der heutigen Marktsituation zu einem meist suboptimalen Betrieb der Produktion“ [SCHUH & STICH 2012a, S. 195]. So führen beispielsweise fehlende Schnittstellen, mit einer entsprechenden Möglichkeit zur Rückmeldung, zwischen dem PPS-System und der operativen Ebene zu Fehlplanungen [SPATH et al. 2002, S. 131]. Die Simulation ist eine Möglichkeit um die hier bestehenden Potentiale zur Steigerung der Planungsqualität zu nutzen [SCHUH & STICH 2012a, S. 196]. Die entsprechenden Voraussetzungen für den Einsatz von

ereignisdiskreter Simulationssoftware in der Produktionsplanung werden in Kapitel 3.2.1 dargestellt um im Anschluss daran, die Einsatzmöglichkeiten von Simulationssoftware im operativen Betrieb (3.2.2) zu präsentieren.

3.2.1 Voraussetzungen

Um die Materialflusssimulation zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung effizient einzusetzen sind verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen. Als Grundlagen sind dabei zwei Voraussetzungen zu nennen. Zum einen sollte die Simulationssoftware die Produktions- und Logistikprozesse abbilden können, was sich „in der Fähigkeit zur ereignisorientierten, stochastischen und deterministischen Abbildung“ [SCHUH & STICH 2012a, S. 222] der Prozesse niederschlägt. Zum anderen muss ein Modell erstellt werden, welches den realen Produktionsprozess abbildet. Hierfür sind entsprechende Datensätze notwendig, die das zu simulierende System beschreiben [SCHUH & STICH 2012a, S. 222]. Die Güte der Daten ist also eine „elementare Voraussetzung für die Verwertbarkeit“ [SCHUH & STICH 2012a, S. 204] der Simulationsergebnisse. Zur Validierung des Modells werden Experimente durchgeführt und sofern möglich mithilfe der realen Vorgänge überprüft. Gegebenenfalls müssen dabei die Parameter innerhalb des Simulationsmodells angepasst werden [MAYR & ERKOLLAR 1999, S. 192].

Gerade für den letztgenannten Schritt werden vielfach noch spezialisierte Abteilungen bzw. Simulationsexperten benötigt. Diese sind wiederum selten in den entsprechenden Abteilungen der Produktionsplanung und -steuerung angesiedelt. Als Lösungsmöglichkeiten werden eine einfacher zu bedienende Simulationssoftware und eine (teil-)automatisierte Generierung von Modellen genannt [SCHUH & STICH 2012a, S. 197f]. Letzteres setzt jedoch eine Schnittstelle voraus aus der Daten eingelesen und darauf aufbauend ein Modell erstellt werden kann [KÜHN 2006, S. 94f].

Eine weitere Voraussetzung für den Einsatz von Simulationssoftware in der Produktionsplanung und -steuerung ist die automatische Parametrierbarkeit von Simulationsmodellen. Das heißt es werden Schnittstellen zum Datenaustausch benötigt. Dies beinhaltet beispielsweise eine Funktionalität, die das Modell zum Start der Simulation entsprechend mit den aktuellen Beständen und Maschinenzuständen speist. Weiterhin sollten die Simulationsmodelle „hinreichend schnell sein, um direkt im operativen Betrieb einsetzbar zu sein“ [KÜHN 2006, S. 94]. Ferner sollte die Genauigkeit des Modells auf den jeweiligen Einsatzfall angepasst werden. Darüber hinaus gelten besondere Anforderungen an den Aufbau des Simulationsmodells. Um hier die Aktualität zu gewährleisten gibt es zwei Möglichkeiten des Modellaufbaus. Zum einen können Modelle aus aktuellen Datensätzen automatisch aufgebaut und mit Parametern versehen werden. Zum anderen kann das Simulationsmodell bereits

vorgefertigt, getestet und validiert sein um lediglich die Parameter mit Hilfe von aktuellen Daten anpassen zu müssen [KÜHN 2006, S. 94f].

3.2.2 Einsatzmöglichkeiten im operativen Betrieb

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 erwähnt, können die Einsatzmöglichkeiten der Simulation in die Phasen: Planung, Realisierung und Betrieb eingeteilt werden [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 4]. Dieses Kapitel beschränkt sich auf die Einsatzmöglichkeiten im operativen Betrieb und innerhalb dessen auf den sinnvollen Einsatz von Simulation zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung. Dazu werden nachfolgend einige Beispiele vorgestellt, die aufzeigen welche Aufgaben der PPS mithilfe der ereignisdiskreten Simulation unterstützt werden können. Weitere Beispiele auch zu den anderen Phasen finde sich u.a. in [KÜHN & RABE 1998, S. 150ff] wieder.

Innerhalb der Produktionssteuerung kann die Simulation eingesetzt werden um eine ideale Auftragsreihenfolge festzulegen [KÜHN 2006, S. 92]. Werden in der Vormontage die Aufträge rüstoptimal bearbeitet, kann dies zu einer Erhöhung der Gesamtdurchlaufzeit des Endproduktes führen. Mithilfe der Simulation kann dies im Vorhinein geprüft und vermieden werden. Außerdem können verschiedene Reihenfolgen miteinander verglichen und bewertet werden [SCHUH & STICH 2012a, S. 216]. Die Bewertung erfolgt anhand vorgegebener Zielgrößen (bspw. Nivellierung der Arbeitsinhalte, Liefertermintreue, Minimierung der DLZ). Bei einer direkten Kopplung von Simulationsumgebung und PPS-System kann die beste Reihenfolgeplanung direkt an das PPS-System überspielt werden [KÜHN 2006, S. 92]. Eine ähnliche Möglichkeit ergibt sich bei kurzfristig auftretenden Störungen (bspw. Maschinenausfällen). So kann zum einen im Vorhinein eine Störung simuliert und mögliche Strategien entwickelt und überprüft werden, wie auf entsprechende Störungen am besten reagiert werden kann. Zum anderen können, bei entsprechender Kopplung der Betriebsdatenerfassung mit der Simulationsumgebung, Umgehungen der Störung simuliert werden [SCHUH & STICH 2012a, S. 216].

Im Bereich der Produktionsplanung kann die Simulation helfen die Planungssicherheit zu erhöhen. So können ganz generell die einzelnen Planungsmöglichkeiten simuliert und die Auswirkungen der jeweiligen Möglichkeit analysiert werden. Durch eine Bewertung der Planungsvarianten anhand eines Zielsystems kann die Beste ausgesucht und umgesetzt werden [VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 8ff]. Ein weiteres wichtiges Beispiel zum Einsatz der Simulation ist die Bestimmung von Lieferterminen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, kann die Simulation hier auch im Bereich der agentenbasierten Produktionsplanung eine wichtige Rolle einnehmen. So kann durch eine Simulation als vorausschauende Planung der Liefertermin bestimmt werden [SCHUH & STICH 2012a, S. 215ff]. „Dabei wird die Planungsgenauigkeit insbesondere durch die Verwendung dynamisch ermittelter Vorgangszeiten und die

simultane Berücksichtigung von Termin- und Ressourcenrestriktionen innerhalb der Simulation verbessert“ [SCHUH & STICH 2012a, S. 215].

Wie in Kapitel 2.4 und 2.8 aufgezeigt gibt es vielfach Bestrebungen einen eher dezentralen Ansatz in der Produktion zu verfolgen. Dies führt auch zu einer Veränderung der Produktionsplanung und -steuerung. Hier kann mithilfe der Simulation die Transparenz des Wertschöpfungsprozesses erhöht werden. Insgesamt ist es möglich mit dem Einsatz von Simulationssoftware eine reaktive PPS-Strategie zu ersetzen indem in verschiedenen Experimenten am Simulationsmodell präventive Szenarien aufgezeigt werden [WILDEMANN 1998, S. 35].

„Ein moderner Ansatz in der operativen Produktionsplanung ist die simulationsbasierte Optimierung“ [ZSIFKOVITS 2014, S. 3]. Dabei wird die Simulation mit einem mathematischen Optimierungsverfahren gekoppelt. Da in der Produktion häufig verschiedene Ziele gleichzeitig verfolgt werden, ist es nötig die Optimierungsverfahren mit unterschiedlichen Parametern zu starten. Zur Bewertung der einzelnen Optimierungen kann die Simulation genutzt werden und helfen bei heuristischen Optimierungsverfahren ein Optimum zu finden [ZSIFKOVITS 2014, S. 3ff].

3.3 Konzepte und Elemente innerhalb ereignisdiskreter Simulationswerkzeuge

Um eine Grundlage in Bezug auf ereignisdiskrete Simulationswerkzeuge zu schaffen, werden im Folgenden elementare Konzepte dieser Simulationswerkzeuge (Simulationsuhr, Entitäten, Ressourcen, Attribute, Methoden und Variablen) vorgestellt.

Als erstes sei hier die **Simulationsuhr** (auch als **Ereignisverwalter** bezeichnet) genannt [ELEY 2012, S. 9]. Diese dient zur Fortschreibung der Zeit innerhalb der Simulation. In der ereignisdiskreten Simulation „springt“ die Simulationsuhr von einem Ereignis zum nächsten“ [SUHL & MELLOULI 2013, S. 275]. Dabei greift der Ereignisverwalter auf die **Ereignisliste** (auch **Zeitliste** genannt) zurück. In dieser werden Ereignisse entsprechend ihrem Eintrittszeitpunkt sortiert und nacheinander abgearbeitet. „Nach dem Abarbeiten eines Ereignisses wird dieses aus der Zeitliste entfernt“ [ELEY 2012, S. 9]. Entstehen, während des Simulationslaufs, neue Ereignisse werden diese in die Zeitliste einsortiert. Das Ende der Simulation ist erreicht, wenn keine Ereignisse mehr in der Zeitliste stehen oder die Simulationsuhr den Simulationszeitraum abgedeckt hat [ELEY 2012, S. 9].

Dementsprechend sieht der Steuerungsalgorithmus der ereignisdiskreten Simulation wie folgt aus, siehe **Abbildung 3-1**:

```

while (simZeit < simEnde)
    {„Hole das nächste Ereignis nextEvent aus der Ereignisliste
    und lösche diesen Eintrag“;
    simZeit = „Eintrittszeitpunkt von nextEvent“;
    typAktuell = „Typ von nextEvent“;
    „Führe die Ereignisroutine zu typAktuell aus“;}

```

Abbildung 3-1: Steuerungsalgorithmus der ereignisdiskreten Simulation i.A. [Ulrich Hedtstück 2013, S. 24]

Nach den Konzepten zur Steuerung einer ereignisdiskreten Simulation folgen nun wesentliche Elemente zum Aufbau eines Simulationsmodells. Der erste Baustein sind die **Entitäten** (Entities). Dies sind Objekte, die sich innerhalb eines Simulationslaufs verändern (bspw. ihren Standort) oder vernichtet werden können. Dementsprechend werden Entitäten teilweise auch als bewegliche Elemente (BEs) bezeichnet. Mit Hilfe einer Entität können im Simulationsmodell bspw. Werkstücke oder Fahrzeuge abgebildet werden. Weiterhin ist es möglich für jede Entität eine Statistik zu führen [ELEY 2012, S. 9]. Entitäten nehmen **Ressourcen** für eine gewisse Zeit in Anspruch. Diese repräsentieren beispielsweise Bearbeitungs- oder Montagestationen. Die entsprechende Verweildauer auf der Ressource kann von Entität zu Entität variieren [SUHL & MELLOULI 2013, S. 275]. Ressourcen „sind während eines ganzen Simulationslaufs vorhanden, [...] [und] werden daher auch als unbewegliche Elemente bezeichnet“ [ELEY 2012, S. 9]. Um Entitäten und Ressourcen genauer zu spezifizieren werden diese durch **Attribute** beschrieben. Das sind Eigenschaften der Entitäten und Ressourcen, die sich im Verlaufe der Simulation verändern können, bspw. kann eine Ressource gestört sein und dementsprechend keine Entitäten mehr aufnehmen. Um Attribute, während der Simulation verändern zu können werden **Methoden** genutzt [ELEY 2012, S. 9f]. Methoden sind Prozeduren, „mit deren Hilfe in den Ablauf eines Simulationslaufs eingegriffen werden kann“ [ELEY 2012, S. 10]. Neben dem Ändern von Attributswerten, können Methoden auch Entitäten erzeugen oder Zustandsänderungen steuern. Allerdings müssen Methoden mit Hilfe einer Programmiersprache programmiert werden. Als letztes Element sind hier noch **Variablen** zu nennen, die zum Speichern von Informationen genutzt werden können. Hier können einfache Variablen, wie ganzzahlige Werte und komplexe Datenstrukturen, wie Tabellen und Listen unterschieden werden [ELEY 2012, S. 10].

3.4 Plant Simulation

Als Beispiel für eine ereignisdiskrete Simulationssoftware liegt dieser Arbeit Tecnomatix Plant Simulation (früher eM-Plant, Simple++), in der Version 12.0.0, der Firma Siemens zu Grunde. Diese Software ist insbesondere in der Automobilproduktion weit verbreitet. Mithilfe der Software ist es möglich digitale Modelle, insbesondere

logistischer Systeme, zu erstellen, damit die Eigenschaften des Systems analysiert werden können ohne in das reale System eingreifen zu müssen [Siemens AG]. „Die Software zeichnet sich durch objektorientierte, grafische und integrierte Modellierung, Simulation und Animation von Systemen sowie Geschäftsprozessen aus“ [SimPlan AG].

3.4.1 Die Arbeitsoberfläche

Den Aufbau der Arbeitsoberfläche zeigt **Abbildung 3-2**. Die wichtigsten Elemente der Oberfläche sind folgende:

Die Klassenbibliothek (links) gliedert sich in die Bibliotheken Materialfluss, Flüssigkeiten, Ressourcen, Informationsfluss, Oberfläche, BEs (Bewegliche Elemente) und Tools. Diese enthalten wiederum die einzelnen Bausteine, die zur Modellierung genutzt werden können. Weiterhin ist der Ordner Modelle enthalten, in dem das Simulationsmodell (Netzwerk) abgelegt ist und eigene erstellte Bausteine abgelegt werden können. Das Netzwerk-Fenster ist in der Mitte dargestellt. In diesem wird mit Hilfe der Bausteine aus der Klassenbibliothek das Modell erstellt. Oberhalb der Klassenbibliothek befindet sich die Toolbox, die einen Schnellzugriff auf die Elemente der Klassenbibliothek ermöglicht [ELEY 2012, S. 33f]. Unten befindet sich die Konsole, in der verschiedene Meldungen (z.B. Fehlermeldungen oder selbst programmierte Ausgaben) ausgegeben werden [BANGSOW 2008, S. 16].

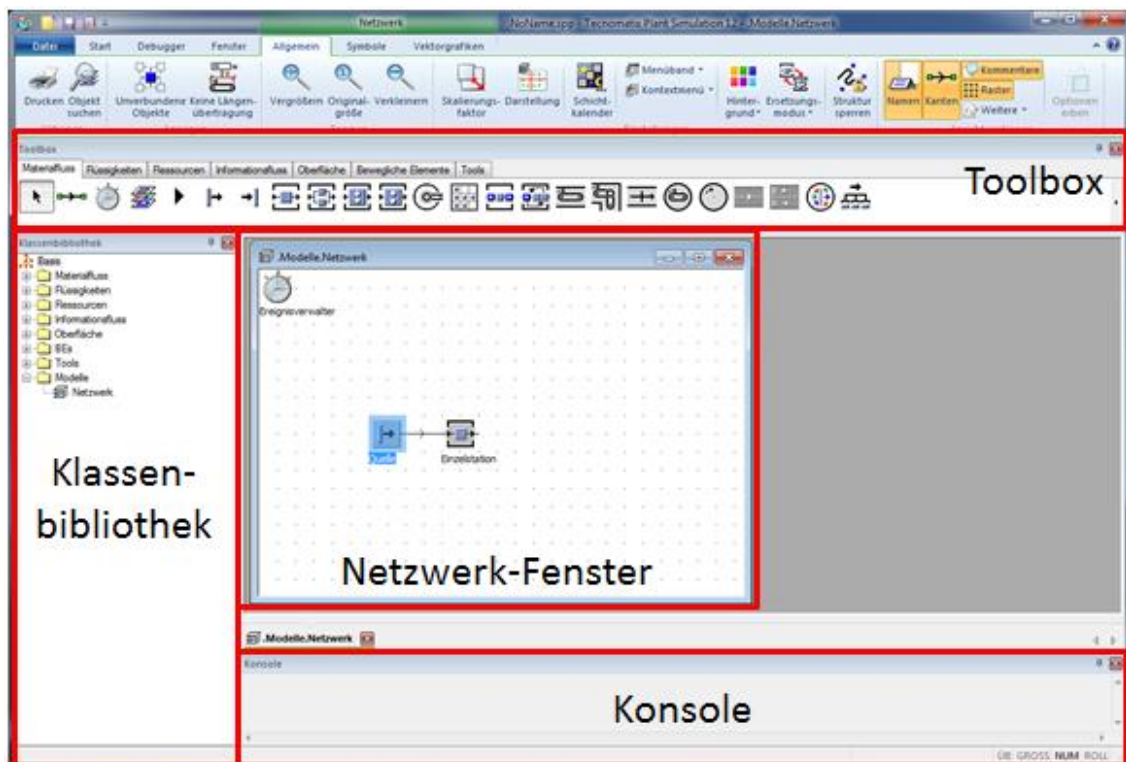


Abbildung 3-2: Die Arbeitsoberfläche von Plant Simulation 12

3.4.2 Wichtige Bausteine

Im Folgenden werden einzelne Plant Simulation Bausteine vorgestellt, die im weiteren Verlauf eingesetzt werden. Diese befinden sich in den Bibliotheken Materialfluss, Informationsfluss oder BEs.

Das **Fördergut** gehört zu den beweglichen Elementen und bewegt sich entsprechend durch das Simulationsmodell. Mit Hilfe des Fördergutes können bspw. Werkstücke modelliert werden. Die wesentlichen Einstellungen die vorgenommen werden können, betreffen die Abmaße (Höhe, Breite, Länge) und den Zielort. Weiterhin gibt es, wie für alle Bausteine, verschiedene Attribute und Methoden die vordefiniert sind und mithilfe von Methoden abgerufen und verwendet werden können [BANGSOW 2011, S. 78ff].

In der Bausteinbibliothek Materialfluss befinden sich die Bausteine, die die jeweilige Infrastruktur (Maschinen, Förderstrecken, Lager, etc) des Systems repräsentieren [BANGSOW 2011, S. 57]. Mit Hilfe des Bausteins **Puffer** können Pufferbestände abgebildet werden. Dazu kann die Kapazität, also die Anzahl der Plätze innerhalb des Puffers angegeben werden [BANGSOW 2011, S. 281f]. Die **Einzelstation** dient zur Modellierung von Maschinen, die immer nur ein Werkstück aufnehmen können. Sollen mehrere Werkstücke aufgenommen werden, wird eine **Parallelstation** eingesetzt. Dies entspricht dem Grundverhalten von mehreren, parallelen, identischen Einzelstationen. Im Baustein Parallelstation können die Anzahl von Stationen (X- und Y-Dimension), verschiedene Zeiten (Bearbeitungs-, Rüst-, Erhol- und Zykluszeit), sowie Störungen angegeben werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit Eingangs- und Ausgangssteuerungen, die eine Methode auslösen können, sobald ein bewegliches Element in den Baustein eintritt bzw. austritt, zu verwenden. Diese Funktion besitzt der Baustein **Förderstrecke** ebenfalls. Darüber hinaus können hier Sensoren eingefügt werden, die eine Methode aufrufen, sofern ein BE den Sensor auslöst. Ferner können in diesem Baustein verschiedene Attribute wie Geschwindigkeit, Länge oder Staufähigkeit angegeben werden. Letzteres bedeutet das die Förderstrecke nicht anhält, obwohl sich am Ende der Strecke ein BE befindet, was zurzeit nicht umgelagert werden kann. Dementsprechend stauen sich die Fördergüter also auf der Förderstrecke. Darüber hinaus können Störungen angegeben werden [BANGSOW 2008, S. 19ff]. Ferner können in den genannten Bausteinen **Beobachter** eingerichtet werden. Diese beobachten einen Wert und lösen bei einer Veränderung des Wertes eine Methode aus [BANGSOW 2011, S. 45].

Weiterhin können im Netzwerk-Fenster weitere **Netzwerk** Bausteine eingefügt werden, womit das Modell hierarchisch aufgebaut werden kann. Um verschiedene Netzwerke zu verbinden ist der Baustein **Übergang** notwendig. Dieser kann entweder einen Eingang oder einen Ausgang abbilden [BANGSOW 2011, S. 313f].

Die Bausteinbibliothek Informationsfluss beinhaltet unter anderem die Bausteine **Methode**, Variable und Tabelle. Erstgenanntes dient als Programmierplattform um Materialflussprozesse abzubilden, die über die Standard-Funktionalitäten der Bausteine hinausgeht. Die zu verwendende Programmiersprache ist SimTalk [BANGSOW 2008, S. 89]. **Variablen** dienen zum Speichern von Informationen. Diesen muss ein Datentyp (bspw. Integer, String, Boolean o.ä.) zugewiesen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit einen Anfangswert anzugeben. Soll die Variable, während der Simulation automatisch verändert werden, so muss dies über eine Methode entsprechend programmiert werden [BANGSOW 2011, S. 18]. Ebenso können Informationen in einer **Tabelle** gespeichert werden. Hier können die Spalten verschiedene Datentypen enthalten und somit können viele verschiedene Informationen (Zahlenwerte, Wörter, o.ä.) gespeichert werden [BANGSOW 2008, S. 191f].

4 Ableitung und Analyse von Anforderungen an eine Simulationssoftware anhand einer Beispiel-Fertigungslinie

Aufbauend auf den Ergebnissen der Kapitel zwei und drei werden im Folgenden Anforderungen einer agentenbasierten Produktionsplanung an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware abgeleitet. Zur Darstellung der erfüllten Anforderungen wird eine Beispiel-Fertigungslinie eingeführt. Diese wird anschließend um Elemente einer agentenbasierten Produktionsplanung sowie um Merkmale von Cyber-Physischen Systemen erweitert. Mit Hilfe der Erweiterungen werden die nicht abbildbaren Anforderungen dargestellt und zur Entwicklung des Konzeptes herangezogen.

4.1 Anforderungen an Simulationssoftware

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen einer agentenbasierten Produktionsplanung und der Simulation dargestellt. Darauf aufbauend werden nun die Anforderungen vorgestellt, die eine ereignisdiskrete Simulationssoftware erfüllen muss, um die vorgestellten Konzepte umsetzen zu können. Dazu werden zuerst Anforderungen, die im Rahmen der Produktionsplanung zu erfüllen sind vorgestellt (4.1.1). Dabei liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der Aktualität der Daten bzw. ganz generell auf der Verknüpfbarkeit der realen (Produktionssystem) mit der virtuellen (Simulationsmodell) Welt. Im Anschluss daran werden Anforderungen vorgestellt, die im Kontext der Agententechnologie relevant sind und darauf aufbauend Anforderungen, die im Kontext von Industrie 4.0 relevant sind.

4.1.1 Verknüpfbarkeit der realen und der virtuellen Welt

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 angedeutet, sind Schnittstellen mit entsprechenden Systemen für den effizienten Einsatz von Simulationen in der Produktionsplanung unabdingbar. Grundsätzlich sind dabei Schnittstellen zu MES, BDE-, ERP- und, oder PPS-Systemen vorstellbar um ein Simulationsmodell (virtuelle Welt) mit der realen Welt zu verknüpfen. Zu unterscheiden gilt es zwischen der Schnittstelle um Daten in das Simulationsmodell zu laden, und der Schnittstelle um die Ergebnisse der Simulation in die jeweiligen Systeme zurückzuspielen. Dabei können auch verschiedene Systeme bedient werden. Eine Möglichkeit ist beispielsweise, die aktuellen Zustände (Maschinenzustände, WIP, etc) des zu simulierenden (Produktions-)Systems über ein Manufacturing Execution System in die Simulation zu laden. Um nach dem Simulationslauf die Ergebnisse weiterzuverwenden, werden diese entsprechend über die zweite Schnittstelle in das operative System der Produktionsplanung und -steuerung (bspw. PPS-System) überspielt.

Neben dem grundsätzlichen Bedarf an Schnittstellen, stellt sich die Frage, welche Informationen zwischen den Systemen und der Simulationssoftware ausgetauscht werden sollen. Als Input für das Simulationsmodell sind insbesondere Informationen über anstehende und aktuell angefangene Aufträge, deren Status, den Status der Ressourcen sowie der aktuelle Umlaufbestand (Work in Process) von Bedeutung. Weiterhin ist die Aktualität der Daten zu beachten. Je nach Anwendungsfall müssen diese sehr aktuell sein, um bspw. in der eher kurzfristig ausgerichteten Produktionssteuerung Entscheidungen mit Hilfe des Simulationsmodells auf Basis des aktuellen Produktions-Zustandes zu treffen. Dementsprechend unterliegt die Schnittstellen-Thematik einer Echtzeitanforderung. Damit ist gemeint, dass die Daten entsprechend schnell in das Simulationsmodell geladen werden müssen, da ansonsten die Aktualität der Daten hinfällig ist. Beim Zurückspielen der Simulationsergebnisse gilt ähnliches, wobei je nach Anwendungsfall und Simulationszeitraum die Echtzeitanforderungen mehr oder weniger relevant sein können. Je kürzer der Planungshorizont wird, desto detaillierter werden die Ausführungen und dementsprechend müssen auch die Daten aktuell sein. Ansonsten werden Entscheidungen getroffen auf Basis von Daten, die bereits nicht mehr der Realität entsprechen.

Je nach dem für welchen Zweck die Simulation durchgeführt wurde, werden unterschiedliche Ergebnisse generiert, die in das entsprechende System (bspw. ERP-System) zurückgespielt werden. Beispielsweise können mit Hilfe der Simulation verschiedene Auftragsreihenfolgen getestet werden, wovon die beste Alternative übernommen wird. Somit sollten die entsprechenden, optimierten Termin- und Kapazitätspläne übermittelt werden. Je nach Systemarchitektur des Anwenders sind die Ergebnisse aus der Simulation für verschiedene Systeme (ERP-, oder PPS-System) relevant, sodass die Schnittstelle eine Verbindung zu möglichst allen Systemen bieten sollte. Dies gilt sowohl beim Importieren als auch beim Exportieren von Daten.

4.1.2 Abbilden von Agenten

Für eine agentenbasierte Produktionsplanung sind Agenten, die bspw. das Werkstück oder ein Bearbeitungszentrum repräsentieren unabdingbar. Dementsprechend muss es möglich sein mithilfe der Simulationssoftware Agenten modellieren zu können. Dies beinhaltet die Modellierbarkeit der grundlegenden Eigenschaften eines Agenten.

Von der Agenten-Definition (siehe Kapitel 2.5.1) ausgehend, sollte eine Simulationssoftware folgende Elemente eines Agenten abbilden können:

Ein Agent sollte mit Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung, sowie mit Effektoren zur Ausführung von Handlungen ausgerüstet sein. Wird über die Sensoren eine Veränderung der Umwelt wahrgenommen und darauf vom Agenten reagiert, so ist auch

die Reaktivität abgebildet. Um eine Veränderung der Umwelt festzustellen, muss der Agent einen internen Zustand besitzen. In diesem kann nicht nur ein internes Modell der Umwelt gespeichert sein, sondern bspw. auch ein entsprechendes Zielsystem. Aufbauend auf diesem Zielsystem kann ein Agent zur Wahl einer Handlung befähigt werden, sodass eine Entscheidung zwischen Alternativen getroffen werden kann. Eng damit verbunden ist die Eigenschaft Proaktivität. Soll diese Eigenschaft modelliert werden, so wird ein Zielsystem benötigt damit der Agent Eigeninitiative ergreift und autonom Schritte ausführt um sein Ziel zu erfüllen.

Ferner muss, ausgehend von einem Multi-Agenten System, die Möglichkeit der Kommunikation geschaffen werden. In welcher Form diese Kommunikation (prozedurale, nachrichtenbasierte Kommunikation oder Blackboard System siehe Kapitel 2.5.3) modelliert wird, wird in Kapitel 5.1 diskutiert. Eine weitere Eigenschaft wäre die soziale Fähigkeit, welche auf die Kommunikation und Kooperation in Multi-Agenten Systemen abzielt.

Die oben beschriebenen Merkmale eines simulierten Agenten fasst [KLÜGL 2001], wie folgt zusammen:

„Ein (simulierter) Agent

1. verändert nicht nur sich selbst, sondern wirkt auf seine Umwelt und bleibt in dieser persistent. [...]
2. agiert in Relation zu seiner Umwelt – er verändert sie nicht nur, sondern kann Informationen über sie beziehen.
3. besitzt einen beschränkten Wahrnehmungs- und Aktionsradius (Lokalität des Verhaltens)“ [KLÜGL 2001, S. 67].

4.1.3 Cyber-Physische Systeme

Im Zuge der vierten industriellen Revolution, werden Cyber-Physische Systeme zunehmend an Bedeutung gewinnen. Wie bereits in Kapitel 2.8.2 dargestellt umfassen CPS eingebettete Systeme, die mit Hilfe von Sensoren Daten erfassen und mit Hilfe von Effektoren auf die Umwelt einwirken. Weiterhin sind Cyber-Physische Systeme über digitale Netze verbunden, können auf weltweit verfügbare Daten und Dienste zugreifen und verfügen über Mensch-Maschine-Schnittstellen [BROY 2010, S. 21f].

Ausgehend von diesen CPS-Eigenschaften wird die Analogie zwischen dem CPS- und dem Agenten-Begriff deutlich. Dementsprechend kann auf das Konzept der Agenten zurückgegriffen werden, um Cyber-Physische Systeme in einer Simulation abzubilden. So ermöglichen simulierte Agenten je nach Ausführung das Abbilden von Sensoren, Effektoren, sowie einer Kommunikationsmöglichkeit mit anderen Agenten.

Weiterhin sind CPS eingebettete Systeme. Mit dieser Verknüpfung der realen (physischen) und der virtuellen (cyber) Welt ist hier im Unterschied zu Kapitel 4.1.1, gemeint, dass Produkte oder Produktionsanlagen mit Computerchips o.ä. versehen werden und Informationen über ihren eigenen Zustand speichern und versenden können. So könnte beispielsweise ein Werkstück mit Informationen über dessen Zielzustand ausgestattet werden und somit überwachen können, wie der Fertigungszustand ist.

Zum Abbilden von CPS sollten dementsprechend die wichtigsten Informationen, die für die Simulation des entsprechenden Szenarios benötigt werden, im Simulationsmodell hinterlegt und verfügbar sein. Für diese Arbeit sind dabei insbesondere die Ausprägungen von intelligenten Werkstücken und Produktionseinheiten von Interesse, die in den beiden folgenden Kapiteln noch detaillierter betrachtet werden.

4.1.4 Abbilden intelligenter Werkstücke

Neben den in den vorangegangenen Kapiteln bereits dargestellten und benötigten Elementen intelligenter Werkstücke, wie Sensoren, Aktoren, Kommunikationsmöglichkeiten und Zielsysteme, wird hier insbesondere das Wissen über den eigenen Zustand verdeutlicht. Dieses beinhaltet für ein Werkstück nicht nur den momentanen Zustand sondern auch die vergangenen Zustände. Das Werkstück muss wissen, welche Bearbeitungsschritte bereits durchgeführt wurden.

Darüber hinaus sind Informationen über die zukünftigen Bearbeitungsschritte und den Zielzustand, also wie das fertige Produkt aussieht, vonnöten. Damit weiß das Werkstück, welche Bearbeitungsschritte noch auszuführen sind oder ob es den Zielzustand bereits erreicht hat. Um bei ersterem ein nächstes zu bearbeitendes Feature zu finden werden Informationen benötigt, in welcher Reihenfolge bestimmte Features bearbeitet werden müssen. Es bedarf also eines Arbeitsplans. Darüber hinaus müssen Informationen bereitstehen, wie das Feature bearbeitet werden soll, also welche Fertigungsverfahren und welche Werkzeuge benötigt werden. Mit diesem Wissen kann ein Werkstück dann eine Ressource zur Bearbeitung suchen und dem Zielzustand näher kommen.

Wichtig ist ganz allgemein dass die Möglichkeit besteht die notwendigen Informationen beim Werkstück zu hinterlegen. Je nach Anwendungsfall sind grundsätzlich verschiedene Informationen relevant. Werden beispielsweise Informationen hinterlegt, wann welcher Bearbeitungszustand erreicht sein sollte, so kann durch den Vergleich mit dem aktuellen Fertigungszustand jederzeit festgestellt werden, ob das Werkstück rechtzeitig fertiggestellt wird oder nicht. Bei einer Verspätung könnte somit frühzeitig der Kunde informiert werden.

4.1.5 Abbilden intelligenter Produktionseinheiten

Analog zum intelligenten Werkstück, kann für die intelligenten Produktionseinheiten ebenfalls auf die Elemente Sensoren, Aktoren, Kommunikationsmöglichkeit und Zielsystem zurückgegriffen werden. Diese Elemente müssen genauso abbildbar sein, wie das Wissen über den eigenen Zustand. Dieses beinhaltet insbesondere Informationen, ob die Produktionsanlage arbeitet, pausiert, wartet oder gestört ist. Im Zuge der Produktionsplanung ist insbesondere von Interesse ob Werkstücke aufgenommen werden können oder nicht, weswegen die Zustände aggregiert werden können zum Zustand bereit, Werkstück kann aufgenommen werden und belegt, Werkstücke können nicht aufgenommen werden.

Weiterhin sind für eine intelligente Produktionsanlage Informationen über die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren und Werkzeuge von Bedeutung. Damit besitzt die Ressource das Wissen darüber, welche Bearbeitungen von ihr durchgeführt werden können.

Je nach Anwendungsfall und zu modellierendem System können weitere Restriktionen zu beachten sein. Weiß die Anlage beispielsweise welche Aufspannung gerüstet ist und welche Achsen drehbar sind, kann zusammen mit den oben genannten Informationen entschieden werden ob gewisse Feature des Werkstücks bearbeitet werden können oder nicht.

4.1.6 Zusammenfassung der Anforderungen

Als Basis der nachfolgenden Kapitel werden in **Tabelle 4-1** die herausgestellten Anforderungen an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware stichpunktartig zusammengefasst. Dabei wird auf die in Kapitel 4.1 herausgestellten Anforderungen zurück ge-griffen, sowie die Ausführungen aus Kapitel 3.2.1.

Tabelle 4-1: Anforderungskatalog einer agentenbasierten Produktionsplanung an ereignisdiskrete Simulationssoftware

Themengebiet	Anforderung
Operativer Betrieb (s. Kapitel 3.2.1)	Abbildung des Produktions- und Logistikprozesses
	<i>Automatische Modellgenerierung</i>
	Schnittstellen zum Datenaustausch
	Hinreichende Schnelligkeit des Modells
Verknüpfung reale und virtuelle Welt	Schnittstelle zwischen Simulationsmodell und verschiedenen Systemen(MES, BDE-, PPS-, ERP-System)
	Parameter-Übergabe (WIP, Status der Ressourcen, u.a.) an das Simulationsmodell
	Übergabe der Simulationsergebnisse in das operative System der PPS
	Echtzeitanforderungen
Agent	Sensoren
	Effektoren
	Kommunikation
	Interner Zustand
	Zielsystem
CPS	s. Agent
	Informationen über den eigenen Zustand
	Mensch-Maschine-Schnittstelle
Intelligente Werkstücke/Produktionseinheiten	s. CPS

4.2 Vorstellung der Beispiel-Fertigungslinie

Um die Software Plant Simulation bezüglich der aufgestellten Anforderungen einer agentenbasierten Produktionsplanung zu untersuchen, wird im Folgenden eine Beispiel-Fertigungslinie vorgestellt. Dazu wird zuerst das zu simulierende System, also die real bestehende Fertigungslinie beschrieben. Im Anschluss wird dann das Simulationsmodell vorgestellt und aufgezeigt, welche Unterschiede zwischen dem System und dem Modell bestehen beziehungsweise welche Systembestandteile nicht modelliert werden.

4.2.1 Heutige reale Anlage (Systembeschreibung)

Die Produktionsanlage, die als Beispiel-Szenario dient, wird zur Bearbeitung eines Zylinderkurbelgehäuses bei einem Automobilproduzenten eingesetzt. Die Gesamtanlage besteht aus drei Arbeitsfolgen (X, Y und Z) und 17 Maschinen. Die Maschinen sind allesamt doppelspindlige Bearbeitungszentren und bearbeiten entsprechend immer zwei Bauteile parallel. Eine Arbeitsfolge besteht jeweils aus identischen Maschinen. Ein Werkstück wird jeweils nur in einer Maschine der entsprechenden Arbeitsfolge bearbeitet. Bei drei Arbeitsfolgen, wird das Werkstück also nur von drei Bearbeitungszentren bearbeitet (nicht von 17). Die Arbeitsfolgen sind jeweils über ein Förderband starr miteinander verkettet. Dies führt dazu, dass ein Werkstück sobald es eine Arbeitsfolge verlassen hat, nicht mehr zurückgeführt werden kann. Die Förderbänder haben jeweils eine Länge von sechs Metern und befördern die Werkstücke mit einer Geschwindigkeit von 6,4 m/min.

Den Systemeingang bildet eine Förderstrecke, die die erste Arbeitsfolge (AFX) mit Werkstücken versorgt. Hier wird alle 30 Sekunden, jeweils ein Werkstück auf das Förderband gelegt. (Das Auflegen geschieht automatisiert durch einen Roboter.) Am Ende des Förderbandes nimmt ein Linearportal ein Werkstück auf und belädt die fünf Maschinen der ersten Arbeitsfolge. Die Bearbeitungszentren der AFX können sowohl die A- als auch die B-Achse drehen.

Die Beladung der Ressourcen durch das Linearportal läuft wie folgt ab. Die Maschinen melden das die Werkstücke fertig sind. Daraufhin befördert das Linearportal nacheinander beide Werkstücke aus der Maschine auf ein zweites Förderband, welches die Arbeitsfolgen X und Y verkettet. Im Anschluss belädt das Portal beide Nester der Bearbeitungszentren mit Rohteilen. Erst wenn beide Werkstücke geladen sind, beginnt die Bearbeitung der entsprechenden Feature. Generell werden vom Portal die Maschinen zuerst bedient, die näher am Zulaufband stehen. Die Bearbeitungszeit in der ersten Arbeitsfolge beträgt 296,8 Sekunden.

Die Arbeitsfolge Y besteht aus sechs identischen Bearbeitungszentren, mit einer Bearbeitungszeit von jeweils 391,5 Sekunden. In der dritten Arbeitsfolge (AFZ) stehen ebenfalls sechs Maschinen, die zur Bearbeitung jeweils 332,9 Sekunden für zwei

Werkstücke benötigen. Diese beiden Arbeitsfolgen sind ebenfalls über eine Förderstrecke miteinander verkettet und werden über ein Linearportal be- und entladen. Die Maschinen der Arbeitsfolgen Y und Z können jeweils nur die A-Achse drehen.

Den Systemausgang bildet erneut eine Förderstrecke. Das Abführband wird vom Linearportal der Arbeitsfolge Z beladen und fördert die Werkstücke aus dem System.

Die Verfügbarkeit, der einzelnen Bearbeitungszentren beträgt 96,6% mit einer MTTR (mean time to repair) von 15 Minuten. Dabei ist zu beachten, dass eine Störung der Maschine sofort dazu führt, dass diese komplett still gelegt wird. Ist also beispielsweise nur eine Motorspindel defekt, so steht das komplette Bearbeitungszentrum nicht mehr zur Verfügung, obwohl die zweite Motorspindel weiterhin noch ein Werkstück bearbeiten könnte. Tritt ein Werkzeugbruch auf so wird das Werkstück, in dem das Werkzeug gebrochen ist, entsorgt. Dazu befördert das Linearportal das Werkstück auf das Förderband. Dort wird es dann entsprechend ausgeschleust.

Die wichtigsten Daten fasst **Tabelle 4-2** noch einmal zusammen:

Tabelle 4-2: Kennzahlen des Systems

Systemelement	Kennzahlen
AFX	Fünf Bearbeitungszentren, AB-Achse drehbar; Bearbeitungszeit: 296,8s; Verfügbarkeit: 96,6%; MTTR: 15min
AFY	Sechs Bearbeitungszentren, A-Achse drehbar; Bearbeitungszeit: 391,5s; Verfügbarkeit: 96,6%; MTTR: 15min
AFZ	Sechs Bearbeitungszentren A-Achse drehbar; Bearbeitungszeit: 332,9s; Verfügbarkeit: 96,6%; MTTR: 15min
Verkettung	Fördergeschwindigkeit: 6,4 m/min; Länge 6m

4.2.2 Simulationsmodell

Ausgehend von der Systembeschreibung wurde in Plant Simulation folgendes Modell erstellt, siehe **Abbildung 4-1**:

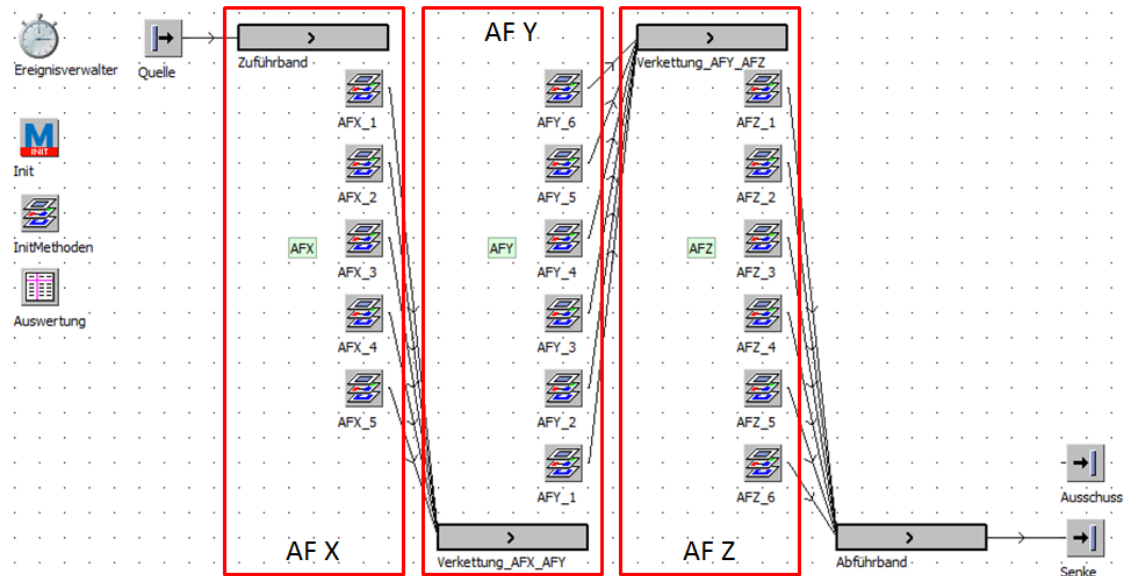


Abbildung 4-1: Simulationsmodell des Beispiel-Szenarios

Die Quelle erzeugt konstant in Abständen von 30 Sekunden ein Fördergut (Werkstück). Das Zuführband (Typ: Förderstrecke) befördert, sowie alle Elemente vom Typ Förderstrecke, die Werkstücke mit einer Geschwindigkeit von 6,4 m/min und ist staufähig. Über eine programmierte Ausgangssteuerung wird überprüft ob ein Bearbeitungszentrum der Arbeitsfolge X frei ist. Falls nicht wartet das Werkstück auf der Förderstrecke bis eine Maschine frei ist und wird dann auf die entsprechende Ressource umgelagert. Dabei wird der Reihenfolge AFX_1 bis AFX_5 nach abgefragt, welche Ressource bereit ist und entsprechend zuerst AFX_1 beladen und nur falls die anderen vier Maschinen belegt sind, wird das Bearbeitungszentrum AFX_5 beladen.

Der Werkstücktransport durch das Portal wird nicht modelliert. Dies spielt im weiteren Verlauf keine Bedeutung und kann entsprechend vernachlässigt werden. Im Vergleich zur Realität führt dies jedoch im Simulationsmodell zu einem leicht höheren Output, da die Durchlaufzeit in der Realität, durch die Transportzeiten des Portals, höher ist.

Da es sich bei den Maschinen um Doppelspindler handelt, werden jeweils zwei Werkstücke parallel bearbeitet. Nach Fertigstellung beider Werkstücke werden diese auf das folgende Förderband umgelagert. Die weiteren Umlagerungsvorgänge finden analog zum gerade Beschriebenen statt. Am Ende des Abfuhrbandes werden die Fördergüter in eine Senke umgelagert und vernichtet.

Die einzelnen Netzwerkbausteine der Arbeitsfolgen (bspw. AFY_3) sind alle identisch, analog zur **Abbildung 4-2**, aufgebaut und repräsentieren jeweils ein Bearbeitungszentrum mit zwei Motorspindeln.

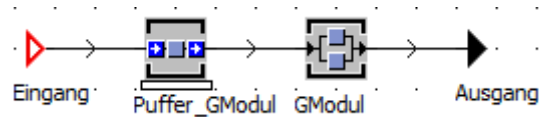


Abbildung 4-2: Modell eines doppelspindigen Bearbeitungszentrums

Ein Netzwerkbaukasten besteht dabei aus einem Eingang und einem Ausgang, vom Typ Übergang, um die Werkstücke aufzunehmen und nach der Bearbeitung wieder auf die jeweilige Förderstrecke umzulagern. Zwischen dem Eingang und dem Ausgang befindet sich ein Puffer (Puffer_GModul), der zwei Bauteile aufnehmen kann und eine Parallelstation (GModul) mit X-Dimension eins und Y-Dimension zwei, sodass zwei Werkstücke gleichzeitig in der Parallelstation bearbeitet werden. Um zu gewährleisten, dass die Bearbeitungszeit für beide Werkstücke erst beginnt, wenn beide Fördergüter umgelagert wurden, werden diese zuerst im Puffer gesammelt. Dazu gibt es eine Methode Eingangssteuerung, die beim Eingang eines BEs ausgelöst wird. Bei Eintritt des ersten Werkstücks sperrt diese Methode den Ausgang des Puffers. Tritt das zweite Werkstück ein, wird der Eingang gesperrt und der Ausgang wieder geöffnet. Nach Ablauf der Bearbeitungszeit der Parallelstation werden beide Werkstücke auf das nachfolgende Förderband umgelagert, dabei wird durch die Ausgangssteuerung eine Methode (Ausgangssteuerung) ausgelöst, die den Eingang des Puffers öffnet, sobald beide Werkstücke das Bearbeitungszentrum verlassen haben. Somit wird zum einen gewährleistet das beide Werkstücke gleichzeitig umgelagert werden und zum anderen wird verhindert, dass der Puffer zwei weitere Werkstücke aufnimmt, während sich zwei in der Parallelstation befinden. Dies würde zu einem erhöhten Umlaufbestand (max. 4 Werkstücke pro Bearbeitungszentrum) führen und nicht der Realität (max. 2 Werkstücke pro Bearbeitungszentrum) entsprechen.

Weiterhin stimmen die Bearbeitungszeiten der Parallelstationen mit den jeweiligen Zeiten aus der Systembeschreibung (s. **Tabelle 4-2**) überein. Die Störungen sind grundsätzlich abbildbar, werden allerdings in diesem Modell („Ist-Stand“) nicht abgebildet, da dieses Modell als Basis für spätere Auswertungen dient und die maximal mögliche Ausbringung darstellt.

Aufbauend auf diesem Modell wird ein zweites Modell („Störung 1h“) entwickelt. Dieses ist eine Erweiterung des Ist-Standes um einen Generator, der nach zwei Stunden, eine Störung in der Arbeitsfolge X (hier AFX_3) verursacht. Die Störung repräsentiert dabei einen Werkzeugbruch in dem entsprechenden Bearbeitungszentrum. Dies führt dazu, dass das Werkstück indem das Werkzeug gebrochen ist, als Ausschuss deklariert wird. Dazu wird bei einer auftretenden Störung ein Werkstück als nicht in Ordnung beschrieben. Am Anfang jedes Förderbandes wird dann überprüft, ob das Werkstück in Ordnung ist. Falls es nicht in Ordnung ist, wird es ausgeschleust, also in die Senke „Ausschuss“ umgelagert. Damit wird das Ausschleusen und Entsorgen der Werkstücke

abgebildet. Weiterhin wird diese Störung mit einer Dauer von einer Stunde abgebildet. In dieser Zeit wird das Bearbeitungszentrum wieder mit einem entsprechenden Werkzeug versorgt und anschließend weiter verwendet.

4.3 Darstellung erfüllter Anforderungen

Die zu Beginn dieses Kapitels aufgeführten Anforderungen einer agentenbasierten Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0 an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware werden im Folgenden anhand der bestehenden Simulationssoftware Plant Simulation analysiert. Dabei sind lediglich solche Anforderungen, die bereits heute erfüllt werden können, Inhalt dieses Kapitels. Dies enthält insbesondere die Anforderungen an Simulationsmodelle für den operativen Betrieb.

4.3.1 Simulationsmodelle für den operativen Betrieb

Die grundlegendste Voraussetzung für einen Einsatz von Materialflusssimulationen im operativen Betrieb bzw. hier in der operativen Produktionsplanung ist die Abbildbarkeit des realen Produktions- und Logistikprozesses. Dazu stehen in Plant Simulation verschiedene Klassenbibliotheken zur Verfügung. In der Klassenbibliothek Materialfluss stehen beispielsweise eine Reihe von Bausteinen zur Verfügung um verschiedene Produktions- und Logistikprozesse modellieren zu können. So könnte eine Maschine mit Hilfe der Einzelstation oder ein Roboter mit Hilfe des PickAndPlace-Bausteins modelliert werden. Grundsätzlich ist auch die Anpassung der Bausteine beziehungsweise das Zusammenfügen verschiedener Bausteine zu neuen Bausteinen (als Netzwerke) möglich. Darüber hinaus können mit Hilfe der softwareinternen Programmiersprache SimTalk verschiedene Steuerungen modelliert werden, die nicht mit Hilfe der Bausteine abzudecken sind.

Generell wurde in Kapitel 4.2 bereits das für diese Arbeit zu Grunde liegende Beispiel-Szenario und die Abbildung dieses Produktionsprozesses in Plant Simulation vorgestellt, was beweist das ein Produktions- und Logistikprozess mit dieser Software modellierbar ist. Weiterhin beweist der Einsatz der Software Plant Simulation in verschiedenen Industriezweigen (insbesondere in der Automobilproduktion), dass eine Vielzahl von Produktionsabläufen abbildbar sind (s. bspw. [MÄRZ et al. 2011]) und eine Anwendung im operativen Betrieb unter diesem Gesichtspunkt möglich erscheint.

Ausgehend von einer grundsätzlichen Abbildbarkeit des Produktionsprozesses ist eine weitere Anforderung der Bedarf an Schnittstellen, um zum einen Parameter des Modells automatisch zu importieren und zum anderen Daten bspw. die Ergebnisse der Simulation zu exportieren. Plant Simulation besitzt generell zum Datenaustausch eine Dynamic Data Exchange (DDE) Funktionalität. Damit wird der Austausch mit

Programmen, die ebenfalls eine DDE Funktionalität bereitstellen (bspw. Excel), ermöglicht. Ein Datenaustausch ist dabei stets mit einem gewissen Programmieraufwand verbunden. Des Weiteren müssen bspw. beim Importieren, die Daten auch erst vom MES oder BDE-System nach bspw. Excel importiert werden. Je nach Simulationszweck, spielt aber die Aktualität der Daten eine hohe Rolle, weshalb diese Möglichkeit keine praktikable Lösung darstellt.

Zur Lösung dieses Problems wird in Kapitel 4.5.2 ein mögliches Konzept vorgestellt, um Daten aus einem Manufacturing Execution System in eine Simulationssoftware zu im- und exportieren.

Die beiden weiteren genannten Anforderungen, dass ein Simulationsmodell hinreichend schnell sein muss sowie die Modellgenauigkeit dem jeweiligen Einsatzfall angepasst werden sollte, hängen nicht direkt nur von der ereignisdiskreten Simulationssoftware ab und werden dementsprechend hier nur kurz analysiert. Beide Anforderungen hängen unter anderem vom Ersteller des Modells ab. Generell sollte das Modell nur so genau sein, wie es auch benötigt wird. Dies führt dazu, dass ein Simulationsmodell nicht mit unnötig vielen Daten und Prozessen gefüllt wird, was eine schnellere Ausführung des Modells ermöglicht. Weiterhin hängt dieser Punkt auch von der Rechnerleistung ab, die entsprechend hoch sein muss um komplexe Modelle berechnen zu können. Ferner hängt die notwendige Schnelligkeit auch damit zusammen, wann die Simulationsergebnisse benötigt werden und für welchen Zeitraum eine Simulation durchgeführt wird. Kurzfristige Entscheidungen benötigen dabei ein schnelles Simulationsergebnis, müssen aber auch keinen so großen Zeitraum abdecken, wie es beispielsweise Simulationen zu Problemen mit langfristigem Charakter müssen. Dies entschärft die Forderung nach hinreichend schnellen Simulationsmodellen.

4.4 Erweiterung der Beispiel-Fertigungslinie

Aufbauend auf der Beispiel-Fertigungslinie aus Kapitel 4.2 wird im Folgenden ein Szenario entwickelt, wie eine bestehende Anlage umgerüstet wird um besser auf Störungen von Maschinen zu reagieren. Dazu bleibt die Grundfunktionalität der Fertigungslinie bestehen. Die Anzahl der Anlagen, sowie der Materialtransport des Linearportals bleiben unverändert (s. **Tabelle 4-2**).

Ziel der Erweiterung ist es, den Bearbeitungszentren und Werkstücken zu ermöglichen auf kurzfristig auftretende Störungen zu reagieren. Als Störungen werden hier jeweils Werkzeugbrüche betrachtet, die dazu führen, dass eine Maschine komplett ausfällt. Durch die Erweiterungen sollen die Maschinen nun weiterhin produzieren können. Lediglich die Feature, für die nun kein Werkzeug mehr verfügbar ist, werden nicht bearbeitet. Die Informationen, welche Feature bearbeitet wurden und welche nicht, werden dem Werkstück von der Anlage übermittelt. Darauf aufbauend kann das

Werkstück entscheiden, ob es die Arbeitsfolge verlassen kann und welche Maschine die fehlenden Feature bearbeiten soll.

Um dieses Szenario abzudecken werden die Werkstücke und Anlagen zu Cyber-Physischen Systemen, beziehungsweise zu intelligenten Werkstücken und intelligenten Maschinen weiterentwickelt. Dabei sollen die Cyber-Physischen Systeme auf Basis von Agenten implementiert werden. Dazu werden Werkstücke und Anlagen zuerst mit den entsprechenden Elementen eines Agenten (Sensoren, Effektoren, Kommunikation, ...) ausgestattet und darauf aufbauend noch um die Elemente eines CPS erweitert. Die Erweiterung der Fertigungslinie zeigt **Abbildung 4-3**.

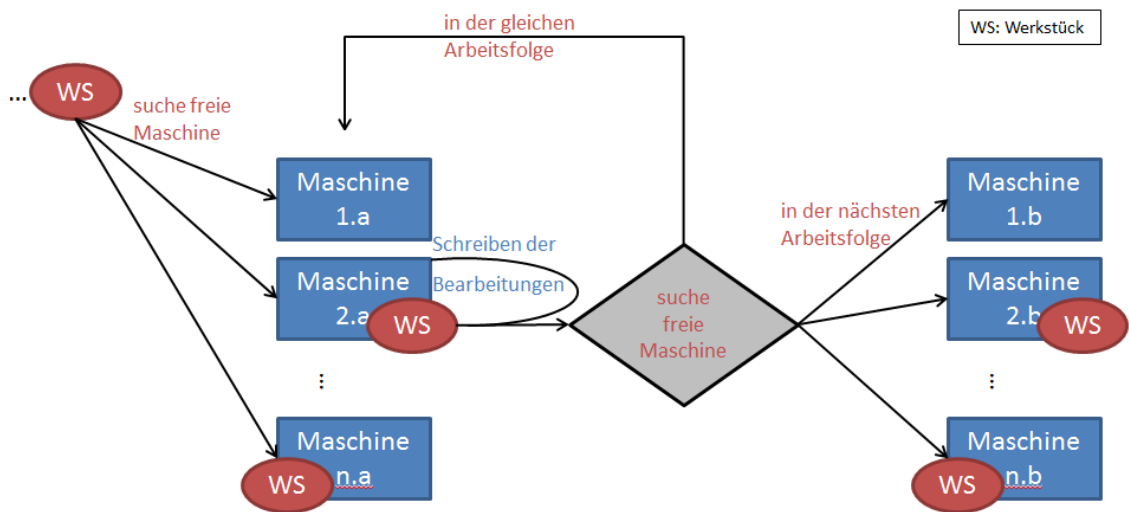


Abbildung 4-3: Erweiterung der Fertigungslinie

Neben dem Bedarf für intelligente Werkstücke und Anlagen zeigt **Abbildung 4-3** das eine Koordinierung zwischen den Werkstücken und den Maschinen benötigt wird. Diese dient zur Abstimmung und Zuordnung zwischen den Werkstücken und Maschinen.

4.5 Darstellung nicht erfüllter Anforderungen

Analog zu der Darstellung der erfüllten Anforderungen werden nun solche analysiert, die noch nicht erfüllt sind. Basis dafür ist weiterhin der Anforderungskatalog der **Tabelle 4-1**. Als nicht erfüllte Anforderungen werden die automatische Modellgenerierung, die Verknüpfbarkeit der realen mit der digitalen Welt, die Modellierung von Agenten sowie die Abbildung von Cyber-Physischen Systemen betrachtet.

4.5.1 Automatische Modellgenerierung

Unter der automatischen Modellgenerierung wird die vollständige automatische Generierung eines funktionsfähigen Simulationsmodells aus einem Datensatz (bspw. einer Excel-Tabelle) heraus verstanden. Dies ist mit der Software Plant Simulation (hier

Version 12) nicht möglich. Zwar gibt es verschiedene Schnittstellen und Dialogfelder die teilweise eine Modellgenerierung ermöglichen, jedoch sind damit nur einfachere Simulationsmodelle automatisch generierbar.

Grundsätzlich stellt die automatische Modellgenerierung kein Muss-Kriterium für einen Einsatz im operativen Betrieb dar. Zur manuellen Modellgenerierung bedarf es zwar mehr Aufwand, da das Simulationsmodell aber mehrfach eingesetzt werden kann, kann der Aufwand relativiert werden. Weiterhin sind heutige Produktionsprozesse noch nicht so flexibel und wandelbar, dass ein Modell ständig angepasst oder gar neu entworfen werden muss, sodass der Bedarf für die automatische Modellgenerierung noch als gering einzuschätzen ist.

Im Kontext der vierten industriellen Revolution ist jedoch mit einer zunehmenden Flexibilität und Wandelbarkeit der Produktionsanlagen und damit auch der Produktionsprozesse zu rechnen. Dementsprechend wird eine automatische Modellgenerierung zunehmend an Bedeutung gewinnen, da ein ständiges manuelles Anpassen der Simulationsmodelle an den aktuellen Produktionsprozess nicht mehr handhabbar sein wird.

4.5.2 Verknüpfung der realen mit der digitalen Welt

Wie bereits in Kapitel 4.3.1 gezeigt, verfügt Plant Simulation grundsätzlich über die Funktionalität des Datenaustauschs. Um diese Funktion jedoch handhabbar zu machen und grundsätzlich eine Schnittstelle zu einem Manufacturing Execution System zu generieren bedarf es weiterer Arbeiten. Dazu wird im Zuge des Forschungsprojektes SOPHIE (s. Kapitel 2.8.4) eine Import- und Export-Möglichkeit zwischen einem Manufacturing Execution System und einer Simulationssoftware entwickelt, siehe **Abbildung 4-4**.

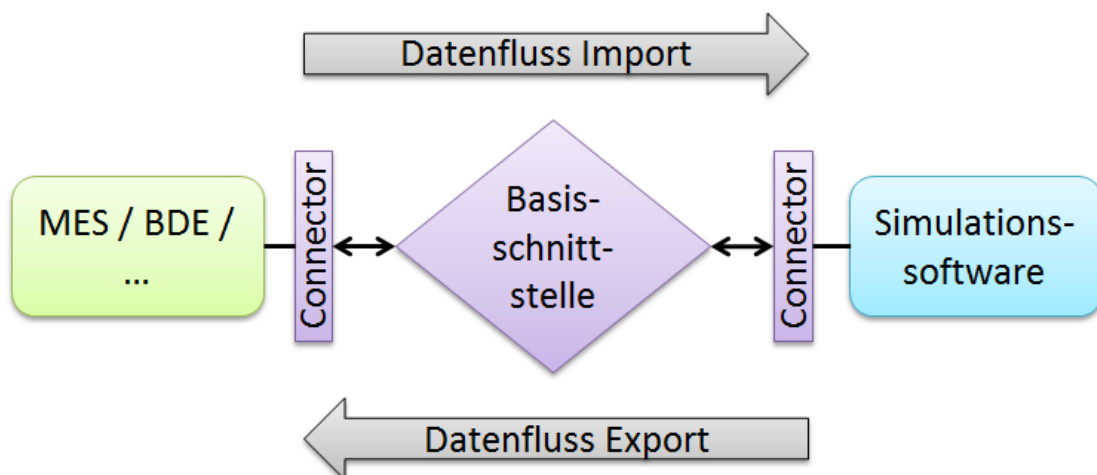


Abbildung 4-4: Schnittstellenkonzept Simulation - MES/BDE i.A. [BURGES & FRANK 2015]

Die Idee hierbei ist es eine Basisschnittstelle (Java-Programm) zu erstellen, welche einen bidirektionalen Datenfluss zwischen den Systemen ermöglicht. Dazu sollen beim Start des Simulationsexperimentes die relevanten Daten übermittelt werden. Dabei handelt es sich im Einzelnen um die Schichtpläne, verschiedene Auftragsdaten (Fertigstellungstermin, Artikel-Nummer, ...), die Maschinenzustände und -kennzahlen sowie den Umlaufbestand. Durch den Import der Daten bildet das Simulationsmodell den aktuellen Zustand der Fabrik ab [BURGES & FRANK 2015].

Analog zum Import, werden beim Export die Daten mithilfe der Basisschnittstelle aus dem Simulationsmodell in das MES eingespielt. Je nach Anwendungsfall können hier unterschiedliche Daten zurückgespielt werden. So könnte mithilfe der Simulation beispielsweise eine optimale Auftragsreihenfolge oder ein idealer Termin für eine Instandhaltungsmaßnahme gefunden und überspielt werden [BURGES & FRANK 2015].

Der grundsätzliche Aufbau der Schnittstelle besteht aus der Basisschnittstelle, den Connectoren, sowie den beiden zu verbindenden Systemen. Die Basisschnittstelle ist dabei systemneutral und beinhaltet unter anderem die Aufgaben der Kommunikation und des Datenmapping. Demgegenüber stehen die Connectoren, die systemspezifisch sind. Beispielsweise wird für die Simulationssoftware Plant Simulation ein anderer Connector verwendet als für eine andere Simulationssoftware (bspw. Witness). Die Connectoren haben dabei die Aufgabe die notwendigen Informationen aus dem System zu lesen bzw. in das System zu schreiben [BURGES & FRANK 2015].

4.5.3 Agententechnologie

Die Agententechnologie gehört zu den nicht erfüllten Anforderungen, da Plant Simulation keine agentenbasierte Simulationssoftware ist und keine Möglichkeiten bereitstellt Agenten zu modellieren bzw. Objekte innerhalb des Simulationsmodells als Agent zu deklarieren.

Grundsätzlich ist Plant Simulation eine ereignisdiskrete Simulationssoftware und ist damit bereits für eine agentenbasierte Modellierung eingeschränkt, da das Simulationsmodell immer ein Ereignis nach dem anderen abarbeitet und somit nicht jeder beliebige Zeitpunkt (bspw. zwischen zwei Ereignissen) ausgewertet werden kann. In einem agentenbasierten Modell sollten jedoch grundsätzlich alle Zeitpunkte analysiert werden können. Auf der einen Hand bietet dies grundsätzlich mehr Gestaltungsmöglichkeiten, auf der anderen Hand führt dies zu einem erhöhten Rechenaufwand.

Neben dieser generellen Problematik sind auch die Charakteristika von Agenten nicht ohne weiteres modellierbar. Eine Kommunikationsmöglichkeit zwischen verschiedenen Entitäten besteht nicht. Ein direkter Nachrichtenaustausch auf Basis einer

Agentensprache (bspw. FIPA-ACL) ist nicht möglich. Ebenso wenig besteht die Möglichkeit ein Blackboard-System zu nutzen. Weiterhin ist die prozedurale Kommunikation nicht ohne großen Programmieraufwand modellierbar. Es besteht grundsätzlich kein Baustein indem eine Kommunikationsschnittstelle mit anderen Bausteinen vorgesehen ist.

Weitere für einen Agenten grundlegende Elemente sind Sensoren und Effektoren. Erstere sind teilweise modellierbar. So lassen sich beispielsweise auf dem Baustein Förderstrecke Sensoren einfügen, die wiederum eine Methode auslösen sobald der Sensor von einem beweglichen Element passiert wird. Ferner besitzen die Bausteine aus der Klassenbibliothek Materialfluss (mit Ausnahme der Kante, des Ereignisverwalters, des Netzwerks und des Übergangs), sogenannte Eingangs- und/oder Ausgangssteuerungen, die ausgelöst werden sobald ein bewegliches Element (BE) in den Baustein eintritt (Eingangssteuerung) oder austritt (Ausgangssteuerung). Da diese Möglichkeit aber nicht für ein bewegliches Element besteht, kann beispielsweise ein Werkstück nicht mit Sensoren modelliert werden. Demnach fehlt hier die Fähigkeit die Umwelt wahr zu nehmen, weshalb ein BE auch nicht auf diese reagieren kann.

Die Effektoren sind in Plant Simulation ebenfalls nur teilweise modellierbar. Im realen System wären die Effektoren für eine Produktionsanlage beispielsweise die Spindel und das Werkzeug. Diese führen Bewegungen aus und verändern das Werkstück. Dies wird allerdings in Plant Simulation nicht abgebildet. Es ist lediglich möglich den Materialfluss betreffende Effektoren zu modellieren. So sind beispielsweise Förderstrecken oder Transportsysteme abbildbar, die jeweils das Werkstück oder den Werkstückträger o.ä. von einer Station zur nächsten befördern.

Die letzten beiden Anforderungen, die die Agententechnologie an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware stellen sind ein Zielsystem und ein innerer Zustand. Diese sind analog zu den Sensoren nur teilweise in Plant Simulation modellierbar. Der innere Zustand wird benötigt um eine Veränderung in der Umwelt wahrzunehmen. Für die Bausteine, die Sensoren besitzen, ist ein innerer Zustand gespeichert, da diese eine Veränderung des zu beobachtenden Elements registrieren. Für alle anderen Bausteine gilt dies nicht. Weiterhin ist auch ein Zielsystem nur für manche Bausteine wählbar. Für Bausteine, die mehr als einen Nachfolger haben, kann aus verschiedenen Möglichkeiten gewählt werden, an welchen Nachfolger das BE weitergegeben wird. Hier sind also einige einfache Zielsysteme hinterlegt. Für ein BE selbst, ist dies nicht möglich und Zielsysteme, wie beispielsweise eine möglichst kurze Durchlaufzeit, können nicht gewählt oder modelliert werden.

4.5.4 Cyber-Physische Systeme

Da die Elemente eines Agenten in Plant Simulation nur mit einigen Ausnahmen abbildbar sind, diese aber grundsätzlich auch für Cyber-Physische Systeme benötigt werden, sind CPS ebenfalls nicht abbildbar. Die Elemente Sensoren, Effektoren, Kommunikationsmöglichkeit, sowie innerer Zustand und Zielsystem werden für beide Technologien benötigt und sind, wie bereits in Kapitel 4.5.3 aufgezeigt, nicht beziehungsweise nur für bestimmte Bausteine modellierbar.

Über diese Charakteristika hinaus, zeichnet sich ein Cyber-Physisches System durch das Wissen über den eigenen Zustand sowie eine Mensch-Maschine-Schnittstelle aus. Letzteres ist grundsätzlich über die Bausteine Werker, WerkerPool, Arbeitsplatz und Broker in Verbindung mit entsprechenden Ressourcen (Einzelstation, o.ä.) modellierbar. So ist es möglich Störungen einer Einzelstation von Werkern beheben zu lassen oder einen Werker anzufordern um das Werkstück zur nächsten Station zu tragen.

Ebenfalls nur teilweise abbildbar ist das Wissen über den eigenen Zustand. Für eine intelligente Produktionsanlage (Einzelstation, o.ä.) sind die Zustände gestört, pausiert, arbeitend, blockierend und rüstend abbildbar. Allerdings ist es nicht möglich Informationen anzugeben, welche Werkzeuge im Werkzeugmagazin vorhanden sind oder welche Fertigungsverfahren durchgeführt werden können. Für ein intelligentes Werkstück (Entität, o.ä.) sind gar keine Informationen über den Zustand vorhanden. Grundlegende Qualitätsmerkmale wie in Ordnung (i.O.) oder nicht in Ordnung (n.i.O.) sind genauso wenig modellierbar, wie Informationen über die bereits bearbeiteten oder noch zu bearbeitenden Features.

5 Konzeptentwicklung zur Erfüllung nicht modellierbarer Anforderungen

Nachdem im vorherigen Kapitel, anhand der Beispiel-Fertigungslinie herausgestellt wurde, welche Anforderungen einer agentenbasierten Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0 bereits von Plant Simulation abgedeckt werden und anhand der Erweiterung der Beispiel-Linie dargestellt wurde, welche Anforderungen noch nicht abgedeckt werden, wird im Folgenden ein Konzept entwickelt um zukünftig Agenten und darauf aufbauend Cyber-Physische Systeme modellieren zu können.

Dazu werden zuerst die nicht erfüllten Anforderungen diskutiert und begründet, warum, welche Anforderung im Konzept betrachtet wird oder nicht. Danach wird die grundlegende Idee des Konzeptes vorgestellt. Darauf aufbauend wird detaillierter auf die einzelnen Bausteine (intelligentes Werkstück und intelligente Produktionsanlage) eingegangen und beschrieben, welche Informationen diese jeweils innehaben müssen. Ferner wird das Konzept beispielhaft mit Plant Simulation umgesetzt und die entsprechenden Bausteine erstellt, die zur Simulation von Cyber-Physischen Systemen genutzt werden können.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nicht alle Elemente des Konzeptes umgesetzt werden. Es wird anhand eines Beispiel-Szenarios untersucht, welchen Nutzen Cyber-Physische Systeme haben können. Zur Modellierung des Szenarios werden jedoch nicht alle Elemente des Konzeptes gebraucht und entsprechend nicht alle umgesetzt. Welche Aspekte im Einzelnen benötigt werden, wird in Kapitel 5.5 erläutert. Weiterhin soll im Beispiel-Szenario lediglich die Möglichkeit aufgezeigt werden, dass Informationen hinterlegt werden können. Welche Informationen im Einzelnen benötigt werden hängt vom zu simulierenden System ab.

5.1 Diskussion der nicht erfüllten Anforderungen

Nachdem im vorherigen Kapitel aufgezeigt wurde, welche Anforderungen erfüllt und nicht erfüllt sind, soll nun diskutiert werden, welche nicht erfüllten Anforderungen für eine agentenbasierte Produktionsplanung am wichtigsten sind und darauf aufbauend ein Konzept für diese Anforderungen entwickelt werden.

Wie bereits in Kapitel 4.5.1 beschrieben, ist die Anforderung „Automatische Modellgenerierung“ momentan noch zu vernachlässigen. Grundsätzlich ist diese Anforderung auch kein Muss-Kriterium, um eine agentenbasierte Produktionsplanung zu simulieren. Allerdings würde eine Möglichkeit zur automatischen Modellgenerierung den Simulationsaufwand deutlich verringern und den Einsatz auch für Mitarbeiter ermöglichen, die kaum Expertise auf diesem Gebiet haben. Eine Voraussetzung für diese Anforderung ist jedoch eine Schnittstelle zu anderen Systemen zu haben. Eine

Möglichkeit wäre, dass die Simulationssoftware Daten aus einem MES, BDE- oder PPS-System erhält. Diese Systeme könnten die Anzahl der Ressourcen, sowie deren Standorte übermitteln und somit wichtige Daten für den Aufbau eines Modells generieren. Allerdings bedarf es dafür einer Schnittstelle zwischen solchen Systemen und der Simulationssoftware.

Eine solche Schnittstelle bildet ebenfalls eine Anforderung an Simulationssoftware. Hierbei handelt es sich allerdings auch nur teilweise um ein Muss-Kriterium. Grundsätzlich können die Daten auch manuell in das Modell übertragen werden. Wird das Simulationsmodell jedoch verwendet um kurzfristig auf Störungen oder ähnliches zu reagieren, führt das manuelle Eintragen der Daten dazu, dass zu spät reagiert werden kann. Dementsprechend ist eine solche Schnittstelle insbesondere für die Produktionssteuerung wichtig. Für Planungen mit einem längeren Zeithorizont, in denen die Entscheidung nicht sofort getroffen werden muss, können die Daten auch manuell eingegeben werden und müssen nicht zwangsläufig hoch aktuell sein. Für eine solche Entscheidung spielt der aktuelle Zustand der Ressourcen nur eine Rolle, falls die Anlagen über einen längeren Zeitraum ausfallen.

Eine Schnittstelle zwischen der Simulationssoftware und einem MES, BDE-, PPS-, oder ERP-System ist also nur bedingt ein Muss-Kriterium. Eine solche Schnittstelle bildet jedoch eine Voraussetzung für die automatische Modellgenerierung. Diese wiederum könnte, wie erläutert, im Zuge der vierten industriellen Revolution an Bedeutung gewinnen, weshalb eine Schnittstelle eine zukünftig wichtige Anforderung darstellt. Da es hierzu jedoch bereits Forschungsarbeiten (s. Kapitel 4.5.2) gibt, wird diese Anforderung nicht zur Entwicklung eines Konzeptes herangezogen.

5.1.1 Agenten

Um eine agentenbasierte Produktionsplanung zu modellieren, ist das Abbilden von Agenten und deren Eigenschaften erforderlich. Grundsätzlich steht jedoch eine agentenbasierte Modellierung im Widerspruch zur ereignisdiskreten. Erstere befähigt die Agenten dazu, immer reagieren zu können und ein Simulationsmodell stetig auszuwerten. Demgegenüber werden bei einer ereignisdiskreten Modellierung, nur gewisse Ereignisse berücksichtigt und das Simulationsmodell nur zu diesen Ereignissen ausgewertet. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Laufleistung eines Modells aus, schränkt jedoch die Flexibilität ein. Für die Produktionssteuerung ist jedoch eine gute Laufleistung wichtig um schnell reagieren zu können, wohingegen in der Produktionsplanung auch ein Simulationsmodell verwendet werden könnte, welches eine längere Laufzeit aufweist. Grundsätzlich würden dafür allerdings zwei verschiedene Systeme benötigt werden, ein ereignisdiskretes für die Produktionssteuerung und ein agentenbasiertes für die Produktionsplanung. Dies führt wiederum zu einer höheren Einarbeitungszeit in das jeweilige System sowie zu höheren

Kosten führt. Ob jedoch tatsächlich eine agentenbasierte Modellierung in der Produktionsplanung notwendig ist, hängt vom Anwendungsfall ab. Für diese Arbeit wird eine ereignisdiskrete Software analysiert, da diese sowohl in der Produktionssteuerung, als auch in der Produktionsplanung eingesetzt werden kann.

Allerdings muss diese Simulationssoftware trotzdem Agenten abbilden können, um eine agentenbasierte Produktionsplanung simulieren zu können. Dabei stellt sich die Frage, in welcher Form Agenten modelliert werden müssen.

Die Kommunikation bspw. kann nachrichtenbasiert, prozedural oder über ein Blackboard-System geschehen. Für ersteres wird eine Agentensprache benötigt. Diese im Simulationsmodell abzubilden ist sehr aufwendig. Hingegen sind ein Blackboard-System und die prozedurale Kommunikation einfacher zu modellieren. Da jedoch ein Blackboard-System eine zentrale Instanz bildet und im Zuge der vierten industriellen Revolution die Dezentralisierung zunimmt, wird insbesondere die prozedurale Kommunikation für das Konzept genutzt. Diese bietet mithilfe der Übergabe von Parametern sowohl beim Aufrufen von Methoden als auch als Antwort, eine ausreichende Möglichkeit um Informationen zwischen Agenten auszutauschen.

Neben der Kommunikation gehören Effektoren zu den wesentlichen Eigenschaften eines Agenten. Allerdings besitzen verschiedene Typen von Agenten, verschiedene Effektoren. So sind beispielsweise die Effektoren einer Förderstrecke, die Motoren die das Förderband antreiben, wohingegen die Effektoren eines Maschinenagenten beispielsweise die Motorspindel mit dem Werkzeug sind. Im Zuge einer Materialflusssimulation wird aber letzteres nicht betrachtet. Weiterhin hat ein Werkstück-Agent in der Regel keine Effektoren. Für die Konzeptentwicklung sind die Effektoren entsprechend nur von untergeordneter Rolle. Generell werden nur solche betrachtet, die auch einen Einfluss haben auf die Materialflusssimulation.

5.2 Grundlegende Konzeptidee

Die grundlegende Konzeptidee beinhaltet das Modellieren von Agenten und deren Eigenschaften. Weiterhin soll das Abbilden von Cyber-Physischen Systemen, in der Ausprägung von intelligenten Werkstücken und intelligenten Produktionsanlagen, in der Simulationssoftware Plant Simulation ermöglicht werden. Wie bereits in den Anforderungen beschrieben beinhaltet das Modellieren von Agenten das Abbilden der Teilelemente Sensoren, Effektoren, interner Zustand, Kommunikation und Zielsystem. Ferner werden durch das Modellieren des eigenen Zustands und der Mensch-Maschine-Schnittstelle Cyber-Physische Systeme abgebildet. Welche Teilelemente jeweils benötigt werden und in welcher Anzahl hängt unter anderem von den Anforderungen an das Simulationsmodell ab. Dementsprechend werden einige Elemente im Beispiel-Szenario modelliert und andere nicht.

Die Sensoren werden benötigt um die Umwelt zu überwachen und entsprechend auf diese reagieren zu können. Die Reaktion selbst wird wiederum über die Effektoren ausgeführt. Hier sei angemerkt das innerhalb der Materialflusssimulation lediglich die Zeiten abgebildet werden, bspw. wie lange ein Werkstück auf der Anlage bearbeitet wird. Die eigentliche Bearbeitung wird nicht simuliert. (Dies kann separat mithilfe von CAM-Systemen geschehen.) Ferner wird die Kommunikation über Methodenaufrufe modelliert. Hierbei können Parameter zum Start einer Methode übergeben und/oder Parameter als Antwort auf den Methodenaufruf übergeben werden. Diese Funktionalität reicht in der Regel als Kommunikationsstruktur innerhalb des Simulationsmodells aus.

Der eigene Zustand, das Zielsystem, sowie der interne Zustand variieren in Abhängigkeit der Ausprägung des CPS (hier intelligentes Werkstück oder Produktionsanlage), weshalb die Erläuterung diesbezüglich in den entsprechenden Kapiteln geschieht. Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle ist grundsätzlich über den Baustein Broker modellierbar und stellt keine nicht erfüllte Anforderung dar. Darüber hinaus spielt die Mensch-Maschine-Schnittstelle im hier aufgeführten Beispiel-Szenario keine Rolle und würde zum einen keine neuen Erkenntnisse liefern, zum anderen das Simulationsmodell später unnötig komplex machen, weshalb auf diese Schnittstelle im weiteren Verlauf verzichtet wird.

Die Konzeptidee soll im Folgenden umgesetzt werden indem bestehende Plant Simulation Objekte erweitert werden um die gerade genannten Elemente von Agenten bzw. CPS in Zukunft schneller modellieren zu können. Um die Verwendung der Bausteine aufzuzeigen, werden diese anhand eines Beispiels mit Daten gefüllt. Allerdings sollen die Bausteine generell auch über das Beispiel-Szenario hinaus verwendet werden können. Dazu bedarf es jeweils einige Anpassungen. Ziel ist es jedoch die Anpassungen so gering wie möglich zu halten und somit einen schnelleren Modellaufbau zu ermöglichen. Dementsprechend sollen die Bausteine gewisse Methoden und Tabellen enthalten auf die zurückgegriffen werden kann und zur Verwendung lediglich mit Daten gefüllt werden müssen.

5.3 Intelligentes Werkstück

Als ein Beispiel für ein Cyber-Physisches System wird hier das intelligente Werkstück aufgeführt. Um entsprechend den Überlegungen aus Kapitel 4.4 eingesetzt zu werden, bedarf es einiger Elemente die im Folgenden vorgestellt werden. Dazu gehören die notwendigen Informationen, insbesondere über den eigenen Zustand, das Zielsystem, nach dem zwischen Alternativen gewählt werden kann sowie eine entsprechende Kommunikationsschnittstelle samt Sensoren.

5.3.1 Notwendige Informationen

Eine der wesentlichsten Informationen Cyber-Physischer Systeme ist die, über den eigenen Zustand. Dies bedeutet für ein intelligentes Werkstück den aktuellen Bearbeitungszustand zu kennen. Um diese Information jedoch sinnvoll verwenden zu können bedarf es weiterer Informationen. So beinhaltet der aktuelle Bearbeitungszustand, sofern die durchgeführten Bearbeitungen abgespeichert werden, lediglich die Informationen darüber welche Bearbeitungsvorgänge bereits am Werkstück vorgenommen wurden. Werden ferner dem Werkstück die Informationen über die Gesamtheit der Bearbeitungsvorgänge angehängt, so kann ständig kontrolliert werden, welche Bearbeitungen bereits vorgenommen wurden und welche Feature noch zu bearbeiten sind. Diese Daten müssen ständig aktuell gehalten werden. So muss die Maschine nach dem Bearbeitungsvorgang dem Werkstück die Information über die erfolgte Bearbeitung übermitteln. Da dieser Prozess von der Maschine angestoßen wird, wird dieser entsprechend in Kapitel 5.4.3 detailliert betrachtet.

Neben diesen grundlegenden Informationen ist weiterhin Arbeitsplan mit den zu berücksichtigenden Restriktionen für das Werkstück von Bedeutung. Im Arbeitsplan sollte eine Reihenfolge der Bearbeitungsvorgänge enthalten sein sowie Informationen darüber, welche Vorgänge vor anderen durchgeführt werden müssen. Werden weiterhin Informationen hinterlegt, welches Fertigungsverfahren (Bohren, Fräsen, Drehen, o.ä.) und welches Werkzeug für welchen Bearbeitungsvorgang benötigt wird, kann ein nächster durchzuführender Bearbeitungsschritt gefunden werden. Darauf aufbauend kann mithilfe der Kommunikationsschnittstelle eine nicht belegte Maschine gesucht werden, die die noch fehlenden Bearbeitungsschritte durchführen kann. Dazu werden wiederum Informationen benötigt, wo am Werkstück sich das zu bearbeitende Feature befindet, da bspw. ein Bearbeitungszentrum das Feature grundsätzlich bearbeiten könnte, aber aufgrund der Ausführung (nur A-Achse drehbar) oder der Spannvorrichtung das Werkzeug nicht an den Werkzeug-Eingriffspunkt bewegen kann.

5.3.2 Zielsystem

In der Regel bestehen für das Werkstück mehrere Optionen. Zum einen ist es möglich zwischen verschiedenen Bearbeitungsvorgängen, die als nächstes bearbeitet werden können, auszuwählen, zum anderen gibt es meistens mehr als eine Maschine, die diesen Vorgang ausführen kann. Um dem Werkstück zu ermöglichen zwischen diesen Alternativen zu wählen, wird ein Zielsystem benötigt. Anhand dessen kann die beste Option gewählt werden.

Grundsätzlich sind dabei verschiedene Zielsysteme vorstellbar. So kann das Werkstück bspw. eine möglichst kurze Durchlaufzeit verfolgen. Damit würde immer der Bearbeitungsvorgang bzw. die Maschine ausgewählt werden, die die kürzeste

Bearbeitungszeit bzw. eine zeitnahe Bearbeitung ermöglicht. Hier könnten die möglichen Bearbeitungsverfahren und Maschinen aufgrund des frühesten Fertigstellungstermins gewählt werden. Weiterhin wäre es auch möglich den Maschinen entsprechende Bearbeitungskosten zu hinterlegen, sodass ein Werkstück die Produktionsanlage auswählt, die die geringsten Bearbeitungskosten ermöglicht. Ferner könnte das Einhalten der Termintreue ein Zielkriterium sein.

Generell lassen sich diese Kriterien auch miteinander kombinieren, sodass nicht nur ein Ziel verfolgt wird, sondern ein Zielsystem, in dem einzelne Ziele unterschiedlich gewichtet werden. Als Beispiel sei hier die Kombination aus Bearbeitungskosten und Termintreue genannt. Kennt das Werkstück seinen Fertigstellungstermin, so kann zu Beginn noch ein langsameres aber günstigeres Verfahren gewählt werden. Je näher der Fertigstellungstermin rückt, desto eher werden dann teurere, aber schnellere Verfahren gewählt. Dies kann auch noch verfeinert werden in dem Prioritäten vergeben werden. So können Werkstücke mit zeitnahe Fertigstellungstermin eine höhere Priorität und damit Vorrang vor anderen Werkstücken erhalten. Dies könnte beispielsweise die Liefertermintreue des Unternehmens verbessern.

5.3.3 Kommunikationsschnittstelle

Wie bereits in den vorigen Kapiteln kurz erwähnt, ist es für das Werkstück notwendig kommunizieren zu können. Dabei ist insbesondere die Kommunikationsschnittstelle zur Maschine wichtig.

Grundsätzlich sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Kommunikation im Simulationsmodell lediglich über einen Methodenaufruf vollzogen wird. Dabei können Variablen sowohl als Eingangsparameter zum Start der Methode, als auch als Ausgabewert am Ende der Methode übergeben werden. Die Methoden selbst werden in der Regel mit Hilfe von Sensoren, oder von anderen Methoden aufgerufen. Die Sensoren können entweder bestimmte Variablenwerte überwachen und bei einer Veränderung des Wertes eine Methode auslösen oder beim Auftreten eines bestimmten Ereignisses eine Methode aufrufen. Das könnte beispielsweise das Passieren des Werkstückes eines bestimmten Punktes auf einer Förderstrecke oder das Verlassen einer Maschine sein.

Die Kommunikation des Werkstückes mit der Maschine sollte kurz vor dem nächsten Bearbeitungsschritt ausgelöst werden. Somit wird der Zeitraum, indem eine bereits ausgewählte Maschine doch plötzlich gestört ist, minimiert. Außerdem bleibt, während der Abarbeitung einer Methode die Simulationsuhr stehen, sodass diese nicht zeitwirksam sind. (Im realen System müsste die Kommunikation eher angestoßen werden, da aufgrund von Rechen- und Übertragungszeiten die Entscheidungsfindung länger dauert.)

Generell sucht das Werkstück zunächst eine freie Ressource. Danach wird eine Liste erstellt mit den noch zu bearbeitenden Feature und den dafür notwendigen Werkzeugen sowie zu berücksichtigende Restriktionen. Diese Informationen werden der Maschine übermittelt. Durch den Vergleich der nachgefragten Feature und denen, die von der Maschine bearbeitet werden können, wird die Bearbeitungszeit berechnet und dem Werkstück als Antwort übergeben. Daraufhin wird das Werkstück auf die Maschine umgelagert und bearbeitet. Am Ende der Bearbeitung erhält das Werkstück von der Maschine die Information darüber, welche Feature erfolgreich bearbeitet wurden.

5.4 Intelligente Produktionsanlage

Analog zum intelligenten Werkstück, werden auch verschiedene Anforderungen an eine intelligente Produktionsanlage gestellt, die erfüllt sein müssen um eine agentenbasierte Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0 modellieren zu können. Dazu werden die benötigten Informationen, mögliche Zielsysteme sowie die Kommunikationsschnittstellen erläutert, die einen Einsatz bspw. wie im aufgezeigten Szenario (s. Kapitel 4.4) ermöglichen.

5.4.1 Notwendige Informationen

Wie bereits beim intelligenten Werkstück, ist auch bei der intelligenten Produktionsanlage eine grundlegende Information, die Kenntnis über den eigenen Zustand. Für die Maschine bedeutet dies, Kenntnis über die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren (bspw. Fräsen und Bohren) zu haben. Ferner werden zur Durchführung von Bearbeitungsvorgängen entsprechende Werkzeuge benötigt. Welche Werkzeuge im Werkzeugmagazin der Maschine vorhanden sind, muss der Anlage ebenfalls bekannt sein. Darüber hinaus werden weitere Informationen über die Fähigkeiten der Maschine benötigt. Für ein Bearbeitungszentrum ist es beispielsweise relevant welche Achsen gedreht werden können. Zusammen mit der Information, welche Spannvorrichtung gerüstet ist, kann dies dazu führen, dass ein Werkstück nur von gewissen Seiten und somit nur bestimmte Feature bearbeitet werden können.

Darüber hinausgehend gehört zum eigenen Zustand, die Information ob gerade ein Werkstück bearbeitet wird, die Maschine gestört ist oder freie Kapazitäten besitzt. Für den Fall das gerade ein Werkstück bearbeitet wird, ist der Fertigstellungstermin von Interesse, da ab diesem Zeitpunkt wieder neue Werkstücke bearbeitet werden können und dies bspw. für das Werkstück-Ziel minimale Durchlaufzeit der entscheidende Faktor ist. Ist die Maschine hingegen gestört, muss das ebenfalls vermerkt werden. So lange eine Störung vorliegt kann kein Werkstück bearbeitet werden und dementsprechend muss dieser Zustand für das Werkstück ersichtlich sein, damit eine mögliche Kommunikationsaufnahme nicht gestartet wird.

5.4.2 Zielsystem

Ausgehend von dem obigen Beispiel-Szenario, ist ein Zielsystem für die intelligenten Produktionsanlagen nicht zwangsläufig erforderlich, da im Beispiel-Szenario die Zielvorgabe minimale Durchlaufzeit und maximaler Output ist. Allerdings wäre ebenfalls ein Szenario möglich in dem die Produktionsanlagen die Werkstücke abweisen können oder verschiedene Werkstücke ein und dieselbe Ressource anfragen und somit die Anlage die Entscheidung treffen kann, welches Werkstück bearbeitet wird. Dementsprechend müsste die Maschine ein Ziel oder Zielsystem innehaben, nach welchem Entscheidungen getroffen werden können. Ein Beispiel für ein Ziel wäre beispielsweise die rüstzeitoptimale Belegung der Maschine. Wenn also verschiedene Werkstücke Anfragen an die Ressource stellen, werden zuerst solche bearbeitet, für die die Anlage nicht umgerüstet werden muss. Weiterhin wäre auch ein Ziel für eine komplette Arbeitsfolge möglich. Hier könnte als Ziel die gleichmäßige Auslastung aller in der Arbeitsfolge befindlichen Maschinen verfolgt werden.

Generell ist eine Vielzahl von Zielen vorstellbar und auch die Kombination von unterschiedlich gewichteten Zielen innerhalb eines Zielsystems ist möglich.

5.4.3 Kommunikationsschnittstelle

Für die intelligente Produktionsanlage ist insbesondere die Kommunikation mit dem Werkstück von Bedeutung. Je nach Ausführung des Szenarios, kann die Kommunikationsschnittstelle mehr oder weniger komplex sein und entsprechend erweitert werden.

Wesentlich zur Kommunikation zwischen Maschine und Werkstück sind folgende Informationen. Hat das Werkstück die Maschine ausgewählt, erhält die Ressource die Informationen welche Feature noch zu bearbeiten sind, damit das Werkstück seinen Zielzustand erreicht. Daraufhin prüft die Maschine welche Bearbeitungen davon von ihr durchgeführt werden können und berechnet entsprechend die Bearbeitungszeit. Diese wird dem Werkstück als Antwort übermittelt.

Weiterhin muss nach der Bearbeitung die Maschine dem Werkstück die Informationen mitteilen, welche Feature bearbeitet wurden. Dazu werden die Informationen direkt in den Arbeitsplan des Werkstücks eingetragen.

Für andere Szenarien wird die Kommunikationsschnittstelle der intelligenten Produktionsanlage möglicherweise komplexer gestaltet. Denkbar wäre beispielsweise ein Szenario indem die Maschine einem Werkstück die Bearbeitung einiger Feature anbietet und somit eine Anfrage an das Werkstück stellt. Daraufhin wird das Werkstück zu- oder absagen. Damit benötigt die Maschine auch eine Schnittstelle um Rückmeldungen zu verarbeiten. Dies könnte grundsätzlich ähnlich wie beim

intelligenten Werkstück über den Aufruf von Methoden und der Übergabe und Rückmeldung von Parametern geschehen.

5.5 Modellierung in Plant Simulation

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Eigenschaften der intelligenten Werkstücke und Produktionsanlagen vorgestellt wurden, werden diese nun in Plant Simulation umgesetzt. Als Bausteine werden hierbei ein Fördergut für das intelligente Werkstück, eine Parallelstation zur Abbildung einer intelligenten Produktionsanlage sowie die Förderstrecke genutzt. Diese werden entsprechend mit Informationen versehen. Weiterhin werden mithilfe der Programmierung von verschiedenen SimTalk-Methoden und der Schaffung von Sensoren, diese Bausteine für eine agentenbasierte Produktionsplanung weiterentwickelt. Die entwickelten Methoden und Sensoren sind dabei grundsätzlich auch auf andere Bausteine übertragbar, so dass es keine Rolle spielt, ob es sich dabei um eine Parallelstation, Einzelstation oder ähnliches handelt.

5.5.1 intelligentes Werkstück

Als Grundlage für das intelligente Werkstück dient der Baustein Fördergut. Dieser wurde um folgende benutzerdefinierte Attribute erweitert, siehe **Abbildung 5-1**.

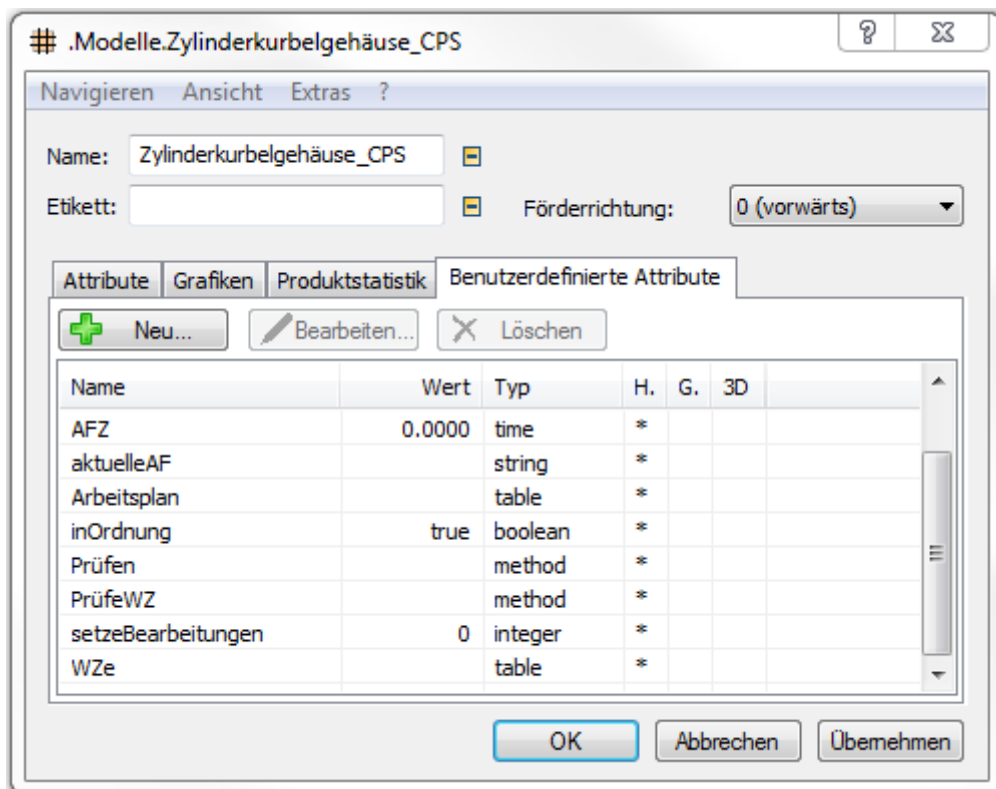


Abbildung 5-1: Benutzerdefinierte Attribute des Fördergutes

Die ersten drei Attribute, **AFX**, **AFY** und **AFZ** sind Variablen des Typs Zeit. Diese beinhalten die Bearbeitungszeit, die das Werkstück in der jeweiligen Arbeitsfolge

benötigt. Zu Beginn sind die Werte auf null gesetzt und werden erst berechnet, sobald das Werkstück weiß auf welcher Ressource es bearbeitet wird und welche Bearbeitungen durchgeführt werden können. Dementsprechend berechnet sich die Bearbeitungszeit aus der Summe der Zeiten je Bearbeitung und wird auf dem Werkstück gespeichert, dies geschieht innerhalb der Methode PrüfeWZ.

Die Variable **aktuelleAF** enthält den aktuellen Standort des Werkstückes. Der Standort bezieht sich jedoch nur auf die Ebene der Arbeitsfolge, es wird also nicht weiter spezifiziert, wo genau in der Arbeitsfolge das Werkstück ist, bspw. auf der Maschine AFX_5 oder auf dem Zuführband. Die Variable wird beim Eintreten in die Arbeitsfolge verändert. Der Übergang in die nächste Arbeitsfolge befindet sich jeweils am Anfang eines Förderbandes, welches die Werkstücke zu den Maschinen der entsprechenden Arbeitsfolge befördert. Dementsprechend wird diese Variable über eine Methode (Eingangssteuerung) der Förderbänder verändert.

Als weiteres benutzerdefiniertes Attribut enthält das Fördergut den **Arbeitsplan**, welcher in Form einer Tabelle hinterlegt wird. In diesem befinden sich folgende Informationen. In der ersten Spalte steht die Arbeitsfolge, in der die Bearbeitung planmäßig durchgeführt werden sollte. Die zweite Spalte enthält das Feature, welches bearbeitet werden soll. Die dritte Spalte (Bearbeitet) enthält die Werte „true“ oder „false“, die anzeigen, ob das entsprechende Feature bereits bearbeitet wurde oder nicht. In der vierten und fünften Spalte folgen die Zeit, die benötigt wird zur Bearbeitung des Features sowie die Bezeichnung des entsprechenden Werkzeugs. Mit Hilfe dieser Werte erhält das Werkstück wesentliche Informationen. Durch die Angabe in der Spalte Bearbeitet, weiß das Werkstück stets, welche Bearbeitungen fehlen und welche bereits durchgeführt wurden. Dies spiegelt zum einen den eigenen Zustand wider, da das Werkstück nun weiß welche Bearbeitungen durchgeführt wurden, zum anderen kann damit die entsprechende Suche nach einer noch fehlenden Bearbeitung gestartet werden. Verbunden mit dem Wissen über die entsprechende Arbeitsfolge kann diese Suche auf einige Maschinen eingegrenzt werden und durch die Abfrage der Werkzeuge, kann überprüft werden, ob eine Ressource die entsprechende Bearbeitung durchführen kann. Die Zeit wird wiederum benötigt um die Aufenthaltsdauer für das Werkstück in der entsprechenden Maschine zu berechnen.

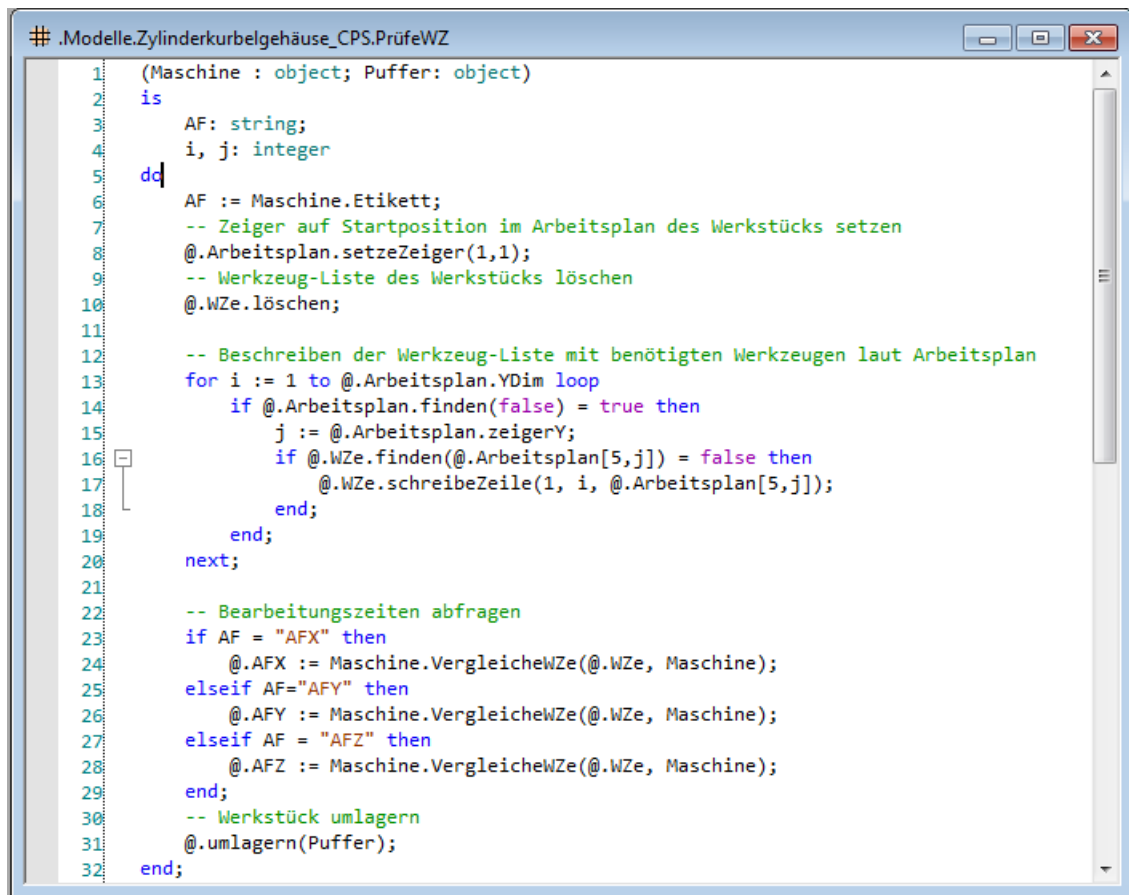
Neben den gerade genannten Bearbeitungen, die den Zustand des Werkstückes beschreiben, gibt es noch das Attribut **inOrdnung**, welches den Qualitätszustand darstellt. Dieses ist generell als „true“ deklariert. Die Qualität ist also in Ordnung, kann jedoch geändert werden. Falls eine Ressource eine Störung hat und dabei das Werkstück negativ beeinträchtigt wird, wie beispielsweise bei einem Werkzeugbruch wird der Wert auf „false“ gesetzt. Der Wert „false“ führt dann entsprechend dazu, dass das Werkstück ausgeschleust wird.

Die Methode **Prüfen** bildet zusammen mit dem Attribut **setzeBearbeitungen** einen Sensor. Der Zahlenwert `setzeBearbeitungen` wird überwacht. Dies ist mit Hilfe der Funktion „Beobachter bearbeiten“ möglich. Wird der Wert von `setzeBearbeitungen` verändert, so löst dies stets die Methode `Prüfen` aus. Geprüft werden soll mit Hilfe dieser Methode der Zustand des Werkstückes. Dazu wird der Wert `setzeBearbeitungen` verändert, sobald eine Ressource alle Veränderungen im Arbeitsplan eingetragen hat. Also die Informationen übergeben worden sind, welche Feature gerade durch die Ressource bearbeitet wurden. Dementsprechend ist die Methode `Prüfen` dafür zuständig zu prüfen, welche Bearbeitungen durchgeführt worden sind und welche noch fehlen. Aufgrund der weiteren Informationen im Arbeitsplan wird dann entschieden, ob das Werkstück in die nächste Arbeitsfolge umgelagert werden darf oder nicht. Dazu beinhaltet die Methode `Prüfen` folgende Befehlskette. Zu Beginn wird der Zeiger des Arbeitsplans in das Tabellenfeld (1,1) gesetzt, um bei der Suche innerhalb des Arbeitsplans immer am Tabellenanfang zu starten. Danach wird der Standort des Werkstückes überprüft. Je nach dem, wo sich das Werkstück befindet, gibt es Feature, die innerhalb dieser Arbeitsfolge durchgeführt werden müssen. Diese werden im Arbeitsplan gesucht und überprüft ob diese durchgeführt wurden oder nicht. Falls diese Feature bearbeitet wurden, wird das Werkstück in die nächste Arbeitsfolge umgelagert. Gibt es Feature, die in der aktuellen Arbeitsfolge bearbeitet werden müssen, aber nicht bearbeitet wurden, so darf das Werkstück die aktuelle Arbeitsfolge noch nicht verlassen, da die Feature sonst nicht mehr bearbeitet werden können, weil eine Rückführung der Werkstücke nicht möglich ist. Um ein Umlagern beider Werkstücke innerhalb der Arbeitsfolge zu ermöglichen wird zuerst der Ausgang des Zuführbands der aktuellen Arbeitsfolge gesperrt. Daraufhin werden die Werkstücke in einen Hilfspuffer umgelagert, der wiederum ein Umlagern innerhalb der Arbeitsfolge veranlasst und den Ausgang des Förderbands wieder öffnet.

Grundsätzlich könnte als zu beobachtender Wert auch der Arbeitsplan genutzt werden, schließlich werden die bearbeiteten Feature hier sowieso entsprechend verändert. Allerdings würde jede Veränderung im Arbeitsplan, beispielsweise auch das Setzen der Bearbeitungszeit, die Methode `Prüfen` ausführen, ohne das sich der Zustand des Werkstücks verändert hat. Ferner wird die Spalte `Bearbeitet` von der Ressource anhand der durchgeführten Bearbeitungen nacheinander beschrieben. Das heißt die Methode `Prüfen` würde ausgeführt werden, sobald die Ressource das erste Tabellenfeld verändert. Da eine Ressource aber eventuell mehrere Bearbeitungen durchführt, würde die Methode mehrmals aufgerufen werden. Beim ersten Ausführen würden basierend auf dem aktuellen Arbeitsplan Aktionen ausgelöst werden. Der Arbeitsplan ist aber von der Produktionsanlage noch nicht vollständig beschrieben worden, weshalb eventuell unnötige Aktionen ausgelöst werden. Dementsprechend wird zur Modellierung der

Wert setzeBearbeitungen zur Hilfe genommen, der verändert wird sobald die Maschine alle Veränderungen im Arbeitsplan eingetragen hat.

Die zweite benutzerdefinierte Methode **PrüfeWZ** im Werkstück, zeigt **Abbildung 5-2**:



```

1 (Maschine : object; Puffer: object)
2 is
3   AF: string;
4   i, j: integer
5 dd
6   AF := Maschine.Etikett;
7   -- Zeiger auf Startposition im Arbeitsplan des Werkstücks setzen
8   @.Arbeitsplan.setzeZeiger(1,1);
9   -- Werkzeug-Liste des Werkstücks löschen
10  @.WZe.löschen;
11
12  -- Beschreiben der Werkzeug-Liste mit benötigten Werkzeugen laut Arbeitsplan
13  for i := 1 to @.Arbeitsplan.YDim loop
14    if @.Arbeitsplan.finden(false) = true then
15      j := @.Arbeitsplan.zeigerY;
16      if @.WZe.finden(@.Arbeitsplan[5,j]) = false then
17        @.WZe.schreibeZeile(1, i, @.Arbeitsplan[5,j]);
18      end;
19    end;
20  next;
21
22  -- Bearbeitungszeiten abfragen
23  if AF = "AFX" then
24    @.AFX := Maschine.VergleicheWZe(@.WZe, Maschine);
25  elseif AF="AFY" then
26    @.AFY := Maschine.VergleicheWZe(@.WZe, Maschine);
27  elseif AF = "AFZ" then
28    @.AFZ := Maschine.VergleicheWZe(@.WZe, Maschine);
29  end;
30  -- Werkstück umlagern
31  @.umlagern(Puffer);
32 end;

```

Abbildung 5-2: Die Methode PrüfeWZ

Die Methode PrüfeWZ wird von der Ausgangssteuerung des jeweiligen Zuführbandes zu den Ressourcen aufgerufen. Als Übergabeparameter werden die Maschine und deren Puffer übergeben, auf die das Werkstück umgelagert werden soll. Danach wird der Zeiger des Arbeitsplans auf den Tabellenanfang gesetzt und die Tabelle **WZe** gelöscht. Diese Tabelle ist ebenfalls ein benutzerdefiniertes Attribut, in welches die benötigten Werkzeuge gespeichert werden sollen. Dazu wird in der Methode PrüfeWZ der Arbeitsplan nach den noch auszuführenden Bearbeitungen durchsucht. Falls sich das Werkzeug dieser Bearbeitung noch nicht in der Tabelle WZe befindet, wird dieses in die Tabelle geschrieben. Dies führt dazu, dass auch Werkzeuge für Bearbeitungen in die Tabelle geschrieben werden, die in der nächsten Arbeitsfolge nicht durchgeführt werden können. Grundsätzlich hat aber das Werkstück das Bestreben, alle Bearbeitungen, die noch fehlen, durchzuführen und die Ressource führt entsprechend nur die möglichen Bearbeitungen durch. Dazu wird nach dem Beschreiben der Tabelle WZe überprüft in welcher Arbeitsfolge sich die nächste Maschine befindet. Entsprechend der Arbeitsfolge wird die Bearbeitungszeit für diese Arbeitsfolge berechnet. Dazu wird die Methode

VergleicheWZe der Produktionsanlage aufgerufen. Als Übergabeparameter wird die Maschine und die Tabelle WZe übergeben. Als Rückgabewert wird die Bearbeitungszeit von der Methode berechnet und zurückgemeldet. Zum Schluss wird das Werkstück in den Puffer der Maschine umgelagert.

Das Fördergut wurde um einige Elemente erweitert und zu einem intelligenten Werkstück. Dieses besitzt nun, über die Beobachtung des Wertes setzeBearbeitungen, einen Sensor. Mit Hilfe des Internen Zustandes werden Veränderungen dieses Wertes sofort wahrgenommen. Da bei einer Veränderung des Wertes entsprechend reagiert wird, wurde auch die Eigenschaft der Reaktivität abgebildet. Des Weiteren wurde mit Hilfe verschiedener Methodenaufrufe und der Übergabe von Parametern eine Kommunikationsmöglichkeit modelliert. Ferner agiert das Werkstück völlig autonom, also ohne Eingriff des Anwenders. Da auch die Informationen über den eigenen Zustand abgebildet wurde, kann das Fördergut nun als ein Cyber-Physisches System deklariert werden.

5.5.2 intelligente Produktionsanlage

Als Basis der intelligenten Produktionsanlage dient der Baustein Parallelstation. Grundsätzlich lassen sich die folgenden Ausführungen aber auch auf die Bausteine Einzelstation, Montage- oder Demontagestation übertragen. Die grundsätzliche Modellierung des Doppelspindlers (Puffer und Parallelstation) bleibt wie im Modell Ist-Stand bestehen (s. **Abbildung 4-2**). Der Baustein Puffer wird nicht verändert und dementsprechend hier nicht weiter betrachtet. Der Baustein Parallelstation wird um folgende benutzerdefinierte Attribute erweitert, siehe **Abbildung 5-3**:

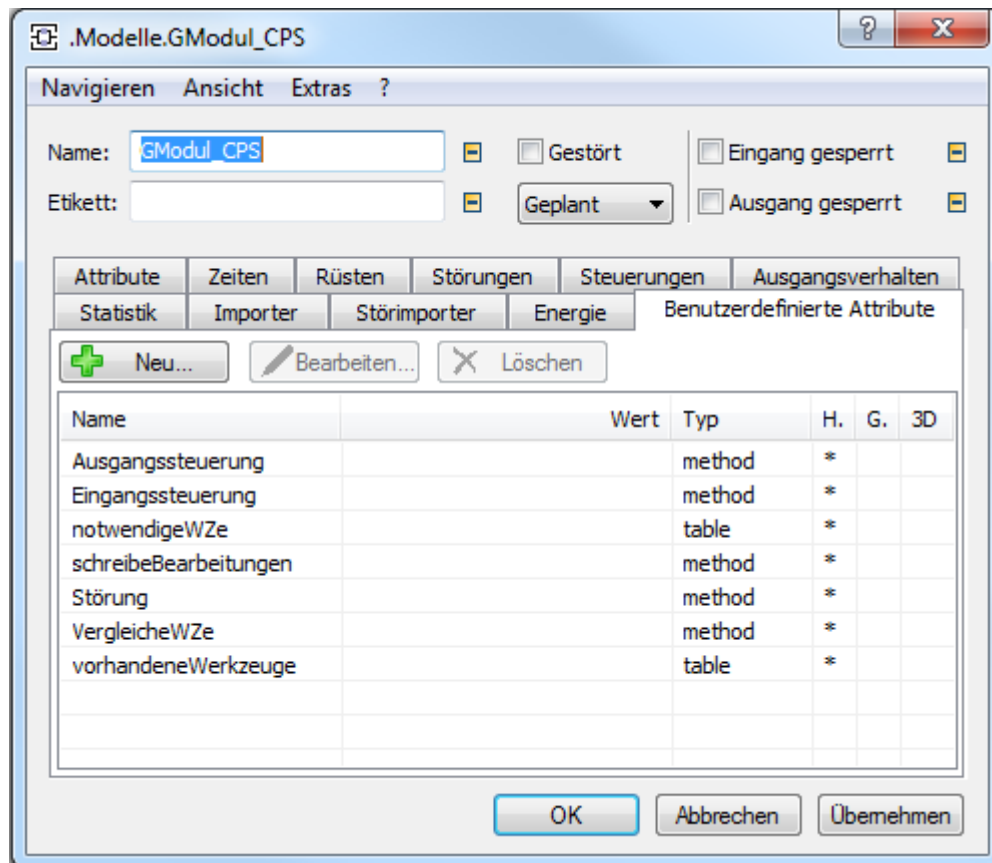


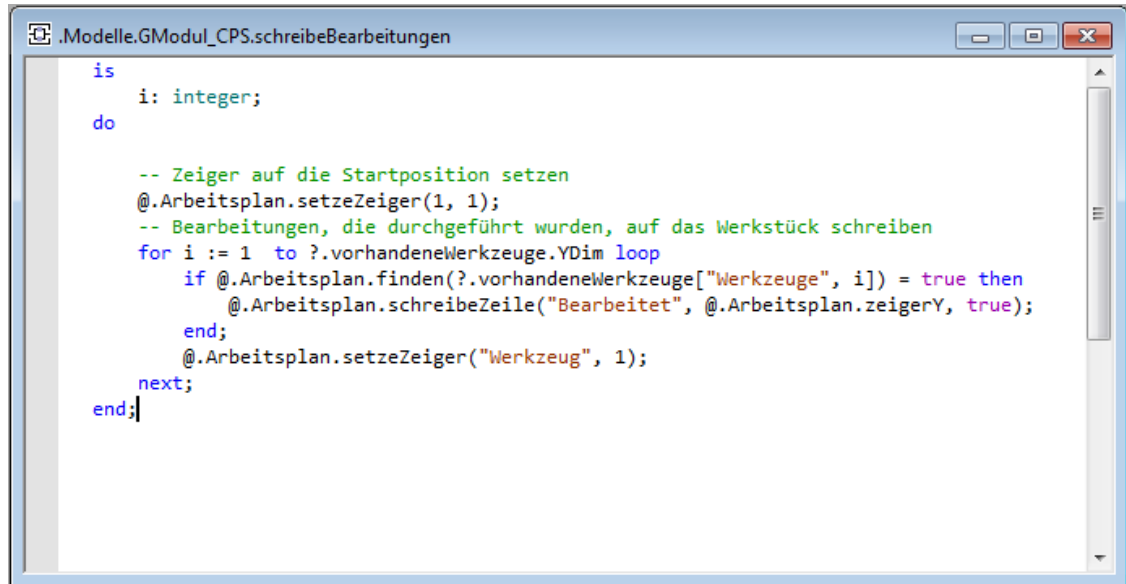
Abbildung 5-3: Benutzerdefinierte Attribute der Parallelstation

Die Methode **Ausgangssteuerung** öffnet, wie bereits im Modell Ist-Stand, den Eingang des Puffers. Darüber hinaus wird nun die Methode `schreibeBearbeitungen` aufgerufen, die das jeweilige Bauteil mit den durchgeführten Bearbeitungen beschreibt. Damit das Werkstück diese Veränderung wahrnimmt wird danach das Attribut `setzeBearbeitungen` des Werkstückes um eins erhöht. Weiterhin wird die Bearbeitungszeit der Parallelstation wieder auf null gesetzt. Ausgelöst wird die Ausgangssteuerung durch den Sensor des Ausgangs der Parallelstation, also so bald ein Werkstück die Parallelstation verlässt.

Analog dazu wird die Methode **Eingangssteuerung** ausgelöst sobald ein Werkstück in den Baustein Parallelstation eintritt. Diese Methode setzt die Bearbeitungszeit der Produktionsanlage fest. Dazu wird zunächst abgefragt, zu welcher Arbeitsfolge die Maschine gehört. In Abhängigkeit der AF wird entsprechend die Bearbeitungszeit der Arbeitsfolge dem Werkstück entnommen (Variable AFX, AFY oder AFZ) und an die Maschine übergeben.

Die dritte Methode, **schreibeBearbeitungen**, übergibt dem Bauteil die jeweils durchgeführten Bearbeitungen. Dazu wird zuerst der Zeiger im Arbeitsplan des Werkstückes an den Tabellenanfang gesetzt. Danach werden im Arbeitsplan des Werkstückes nacheinander alle Werkzeugbezeichnungen gesucht, die auch in der Maschine vorhanden sind. Dies geschieht mithilfe einer for-Schleife. Für die

Übereinstimmungen wird überprüft, ob diese bereits durchgeführt wurden, also ob im Arbeitsplan in der Spalte Bearbeitet „true“ steht. Falls dies nicht der Fall ist, wird das Tabellenfeld entsprechend auf „true“ gesetzt. Bevor die Schleife erneut durchlaufen wird, wird der Zeiger im Arbeitsplan in die erste Zeile und die Spalte „Werkzeug“ gesetzt. Den genauen Quellcode zeigt **Abbildung 5-4**.



```
.Modelle.GModul_CPS.schreibeBearbeitungen

is
  i: integer;
do
  -- Zeiger auf die Startposition setzen
  @.Arbeitsplan.setzeZeiger(1, 1);
  -- Bearbeitungen, die durchgeführt wurden, auf das Werkstück schreiben
  for i := 1 to ?.vorhandeneWerkzeuge.YDim loop
    if @.Arbeitsplan.finden(?.vorhandeneWerkzeuge["Werkzeuge", i]) = true then
      @.Arbeitsplan.schreibeZeile("Bearbeitet", @.Arbeitsplan.zeigerY, true);
    end;
    @.Arbeitsplan.setzeZeiger("Werkzeug", 1);
  next;
end;
```

Abbildung 5-4: Quellcode der Methode „schreibeBearbeitungen“

Die Methode **Störung** überwacht einen Teil des Zustands der Maschine. Wird dieser auf „gestört“ gesetzt oder zurück auf „nicht gestört“, so wird die Methode **Störung** aufgerufen. Dies geschieht ebenfalls über einen Beobachter, der den internen Zustand „gestört“ überwacht. Für den Fall das die Anlage gestört ist, erhöht die Methode, die globale Variable AnzahlStörungen um eins und sofern ein Werkstück geladen ist, wird dessen Attribut *inOrdnung* auf „false“ gesetzt. Wird die Methode aufgerufen, weil die Maschine nicht mehr gestört ist, geschieht nichts.

Die letzte benutzerdefinierte Methode des Bausteins Parallelstation heißt **VergleicheWZe**. Wie bereits beschrieben, wird diese Methode vom Werkstück aufgerufen, kurz bevor es in den Puffer der Parallelstation umgelagert wird. Als Eingangsparameter erhält die Methode eine Werkzeug-Liste (WZListe), mit allen Werkzeugen, die benötigt werden um die noch fehlenden Bearbeitungen durchzuführen sowie die Maschine selbst. Als Rückgabewert wird die Bearbeitungszeit, die das Werkstück auf der Ressource benötigt zurückgegeben.

Zu Beginn der Methode wird die übergebene Werkzeug-Liste in die Liste der Parallelstation **notwendigeWZe** gespeichert. (Dies erleichtert, während der Simulation das Kontrollieren von übergebenen Werten und benötigten Werkzeugen. Dies könnte auch weggelassen werden und hätte keinen weiteren Einfluss.) Da im Folgenden die Tabellen WZListe und vorhandeneWerkzeuge durchsucht werden, wird entsprechend

der Zeiger in beiden Tabellen auf den Anfang (Spalte: 1; Zeile: 1) gesetzt. Im Anschluss werden die beiden Tabellen, auf eine Übereinstimmung der Werkzeuge miteinander verglichen. Dazu wird in einer for-Schleife nacheinander ein Werkzeug aus der WZ-Liste ausgelesen und überprüft ob dieses in der Tabelle vorhandeneWerkzeuge der Produktionsanlage vorhanden ist. Falls dies der Fall ist, wird der Zeiger im Arbeitsplan auf die Stelle gesetzt, in der das Werkzeug im Arbeitsplan steht. Innerhalb dieser Zeile wird die Bearbeitungszeit, die für dieses Feature benötigt wird ausgelesen und der bisherigen schon bestimmten Bearbeitungszeit hinzugefügt. Danach werden die Zeiger in den Tabellen WZListe und vorhandeneWerkzeuge wieder auf den Tabellenanfang gesetzt und der nächste Schritt der for-Schleife wird ausgeführt. Dies geschieht solange, bis die komplette Tabelle mit den benötigten Werkzeugen des Werkstücks durchsucht wurde. Zum Ende der Methode VergleicheWZe wird die Variabel Bearbeitungszeit als Ergebnis zurückgegeben.

Das letzte benutzerdefinierte Attribut der Parallelstation ist die Tabelle **vorhandeneWerkzeuge**. Diese Tabelle enthält die Werkzeuge, die in der Maschine im Werkzeugmagazin vorhanden sind. Die Tabelle ist standardmäßig leer und wird erst zu Beginn der Simulation von der Methode Init mit den entsprechenden Werkzeugen befüllt.

Analog zum intelligenten Werkstück, besitzt auch die Parallelstation durch die benutzerdefinierten Attribute nun die Agenten-Elemente Sensoren, Kommunikation, Interner Zustand sowie, als CPS-Element, das Wissen über den eigenen Zustand. Als Sensoren werden, die bereits vorhandene Überwachung des Eingangs und Ausgangs sowie als neuen Sensor die Beobachtung von Störungen genutzt. Da eine Veränderung der entsprechenden Sensorwerte eine Methode mit entsprechenden Reaktionen auslöst, ist auch die Reaktivität von Agenten modelliert. Weiterhin gibt es verschiedene Kommunikationsschnittstellen. Zum einen werden Anfragen vom Werkstück mit Hilfe des Aufrufes von Methoden realisiert. Zum anderen sendet die Produktionsanlage Informationen, sowohl als Antwort auf die Anfrage des Werkstückes, als auch von sich selbst aus über bearbeitete Feature, an das Werkstück. Eine Anfrage des Werkstücks führt hierbei allerdings zwangsläufig zu einer Antwort der Produktionsanlage. Die Maschine kann die Beantwortung nicht ablehnen oder ignorieren, wie es beispielsweise in einer komplexen Agentensprache möglich wäre.

5.5.3 Verkettung

Als Grundlage der Verkettung dient der Baustein Förderstrecke. Dieser wurde um folgende benutzerdefinierte Attribute ergänzt, siehe **Abbildung 5-5**, um eine agentenbasierte Produktionsplanung zu modellieren.

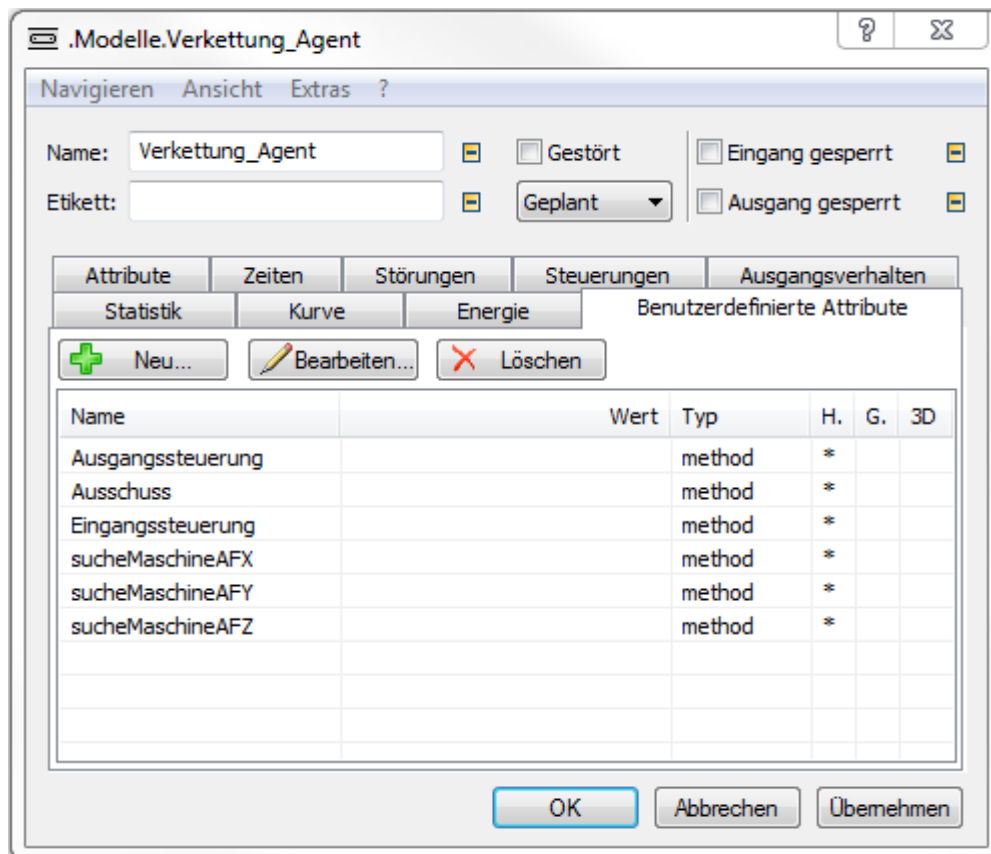


Abbildung 5-5: Benutzerdefinierte Attribute der Verkettung

Die Methode **Ausgangssteuerung** wird von einem Werkstück, welches die Förderstrecke verlässt, ausgelöst. Zu diesem Zeitpunkt weiß das Werkstück jedoch noch nicht, auf welche Maschine es umgelagert wird. Da dies allerdings der nächste Schritt für das Werkstück ist, muss dies in der Ausgangssteuerung festgelegt werden. Würde bereits früher eine Produktionsanlage gesucht werden, könnten bis zum wirklichen Umlagerungsvorgang bereits Änderungen, wie Störungen oder ähnliches eintreten.

Um eine Produktionsanlage zu finden wird zunächst der Standort des Werkstücks überprüft, also in welcher Arbeitsfolge sich das Werkstück befindet. Je nach Arbeitsfolge wird die Methode `sucheMaschineAF*` (mit * = X, Y oder Z) aufgerufen und übergibt als Ergebnis den Pufferplatz der freien Ressource. Danach wird die Methode `PrüfeWZe` des Werkstücks aufgerufen mit der Information auf welchen Pufferplatz das Werkstück umgelagert wird und welche Parallelstation zum Pufferplatz gehört.

Für die Methode **Ausschuss** wurde im Baustein Verkettung ein neuer Sensor eingebaut. Dieser befindet sich am Anfang der Förderstrecke und wird direkt nach der Eingangssteuerung ausgelöst. Mit Hilfe der Methode wird überprüft, ob das Werkstück noch in Ordnung ist oder Fehler aufweist. Für den Fall, dass das Werkstück nicht in Ordnung ist, wird es ausgeschleust und in die Senke Ausschuss umgelagert.

Die **Eingangssteuerung** dient lediglich dazu dem Werkstück die Information der aktuellen Arbeitsfolge zu übergeben. Diese wird entsprechend im Attribut `aktuelleAF` des Werkstücks gespeichert. Da die jeweiligen Förderstrecken den Eingang zur Arbeitsfolge bilden, muss diese Information direkt hier beschrieben werden.

Das benutzerdefinierte Attribut **`sucheMaschineAFX`** wird von der Ausgangssteuerung aufgerufen. Dieser Methodenbaustein überprüft ob die Puffereingänge der Arbeitsfolge X frei sind. Sind alle gesperrt, so wird gewartet bis ein Puffereingang geöffnet wird. Im Anschluss wird der Pufferplatz zurückgegeben dessen Eingang frei ist. Hierbei wird, falls mehrere Puffereingänge geöffnet sind, immer der Pufferplatz übergeben, der näher am Zuführband der Arbeitsfolge ist. Analog zur Methode `sucheMaschineAFX`, durchsucht die Methode **`sucheMaschineAFY`** die Arbeitsfolge Y und **`sucheMaschineAFZ`** die Arbeitsfolge Z.

Aufgrund der benutzerdefinierten Attribute kann nun auch die Förderstrecke als Agent bezeichnet werden. Mit Hilfe der bereits vordefinierten Eingangs- und Ausgangssensoren, sowie dem zusätzlich definierten Sensor, ist dieses Agenten-Element modelliert. Weiterhin ist über die Informationsweitergabe an das Werkstück die Kommunikation abgebildet. Im Gegensatz zu den intelligenten Werkstücken und Produktionsanlagen hat die Förderstrecke keine Informationen über den eigenen Zustand. Es handelt sich also nicht um ein Cyber-Physisches System.

5.6 Beispiel-Szenario

Die zuvor vorgestellten Bausteine intelligentes Werkstück, intelligente Produktionsanlage und Verkettung, werden nun in das Simulationsmodell aus Kapitel 4.2.2 überführt, um damit die Erweiterungen aus Kapitel 4.4 zu ermöglichen. Darauf aufbauend werden die Bausteine noch um kleinere Änderungen erweitert, die die Simulation der beiden Beispiel-Szenarien ermöglicht.

Den Ausgangspunkt bildet das Simulationsmodell „Ist-Stand“ siehe **Abbildung 4-1**. In diesem Modell werden keine Störungen betrachtet. Es wird also der optimale Produktionsverlauf auf Basis des Produktionsplans simuliert. Dieses Modell dient später zur besseren Vergleichbarkeit der Szenarien.

5.6.1 Global vorhandene Informationen

In allen Simulationsmodellen gibt es noch einige global vorhandene Informationen, die kurz vorgestellt werden. Zu Beginn des Simulationslaufes wird die Methode `Init` durchgeführt. Diese ruft die Methoden `EingängeÖffnen` und `BearbeitungszeitenSetzen` auf, welche sich im Netzwerkbaustein `InitMethoden` befindet. Weiterhin wird die Tabelle `Auswertung` gelöscht. Die Methode `EingängeÖffnen` setzt die Eingänge aller

Puffer Bausteine zurück, so dass diese geöffnet sind. Analog dazu setzt die Methode `BearbeitungszeitenSetzen` die Bearbeitungszeit aller Parallelstationen auf null zurück.

Weiterhin gibt es eine Variable `AnzahlStörungen`, die beim Auftreten einer Störung hochgezählt wird. Dies dient lediglich zur Kontrolle, dass während des Simulationslaufs lediglich die Störung auftritt, die auch auftreten soll. Für die Bauteile, die nicht in Ordnung sind wird entsprechend eine separate Quelle Ausschuss eingefügt. Ferner werden in der Tabelle Auswertung alle BEs erfasst, die die Senke erreichen. Hierzu werden die BE-Bezeichnung, der Erzeugungszeitpunkt, der Austrittszeitpunkt, die Durchlaufzeit und der Fertigstellungstermin bestimmt. Der Austrittszeitpunkt ist vom Typ `time` und bezeichnet den Zeitpunkt, indem das BE die Senke erreicht. Die Durchlaufzeit berechnet sich aus der Differenz zwischen Austritts- und Erzeugungszeitpunkt. Der Fertigstellungstermin ist vom Typ `datetime` und erhält entsprechend eine Datumsangabe sowie die Uhrzeit zu der das bewegliche Element die Senke erreicht.

5.6.2 Simulationsszenarien

Um die erstellten Bausteine zu testen, werden diese nun eingesetzt um das in Kapitel 4.4 aufgezeigte Beispiel-Szenario zu simulieren. Dabei wird von folgender Grundsituation ausgegangen. Das Simulationsmodell läuft zwei Stunden wie das Modell Ist-Stand ohne Störung. Damit ist gewährleistet, dass sich das System bereits eingeschwungen hat. Nach zwei Stunden tritt eine Störung an der Parallelstation des Netzwerks `AFX_3` auf. Die Störung bildet weiterhin einen Werkzeugbruch ab. Allerdings soll nun nicht eine Stunde gewartet werden bis das Werkzeug ersetzt wird. Stattdessen erhält die Maschine die Information, dass das gebrochene Werkzeug nicht mehr zur Verfügung steht. Jedoch können die anderen Bearbeitungen, für die andere Werkzeuge benötigt werden, weiterhin durchgeführt werden.

Aufbauend auf diesen Überlegungen werden zwei Szenarien simuliert. Das erste Szenario „andere AF“ simuliert den Fall, dass ein Werkzeug ausfällt und die Möglichkeit besteht die entsprechenden Bearbeitungen innerhalb einer anderen Arbeitsfolge durchzuführen. Diese Bearbeitungen sind aufgrund von Spannprinzipien und eingeschränkten Möglichkeiten das Werkstück zu drehen sehr begrenzt. Als Beispiel sollen hier Bohrungen dienen, die in jeder Arbeitsfolge bearbeitet werden können. Eine Verlagerung in eine andere Arbeitsfolge hat dabei den Vorteil, dass die Zeiten zur Beladung, und Entnahme des Werkstücks nicht doppelt berücksichtigt werden, da diese Zeiten sowieso anfallen, wenn das Werkstück in die entsprechende Arbeitsfolge umgelagert wird.

Das zweite Szenario „gleiche AF“ simuliert den Fall, dass ein Werkzeug ausfällt, dieses Werkzeug jedoch ein Feature betrifft, was nur in dieser Arbeitsfolge bearbeitet werden

kann. Dementsprechend muss das Werkstück noch auf eine weitere Maschine der gleichen Arbeitsfolge umgelagert werden. Hierfür müssen entsprechend erneut die Zeiten für das Beladen und Spannen des Werkstücks berücksichtigt werden.

Die **Abbildung 5-6** zeigt den grundsätzlichen Aufruf der einzelnen Methoden beim Umlagerungs- und Schreibprozess. Ersteres beginnt mit der Eingangssteuerung des Zuführbandes der jeweiligen Arbeitsfolge und endet mit der Umlagerung in den Puffer der Maschine. Der Schreibprozess beinhaltet das Beschreiben des Arbeitsplanes des Werkstücks.

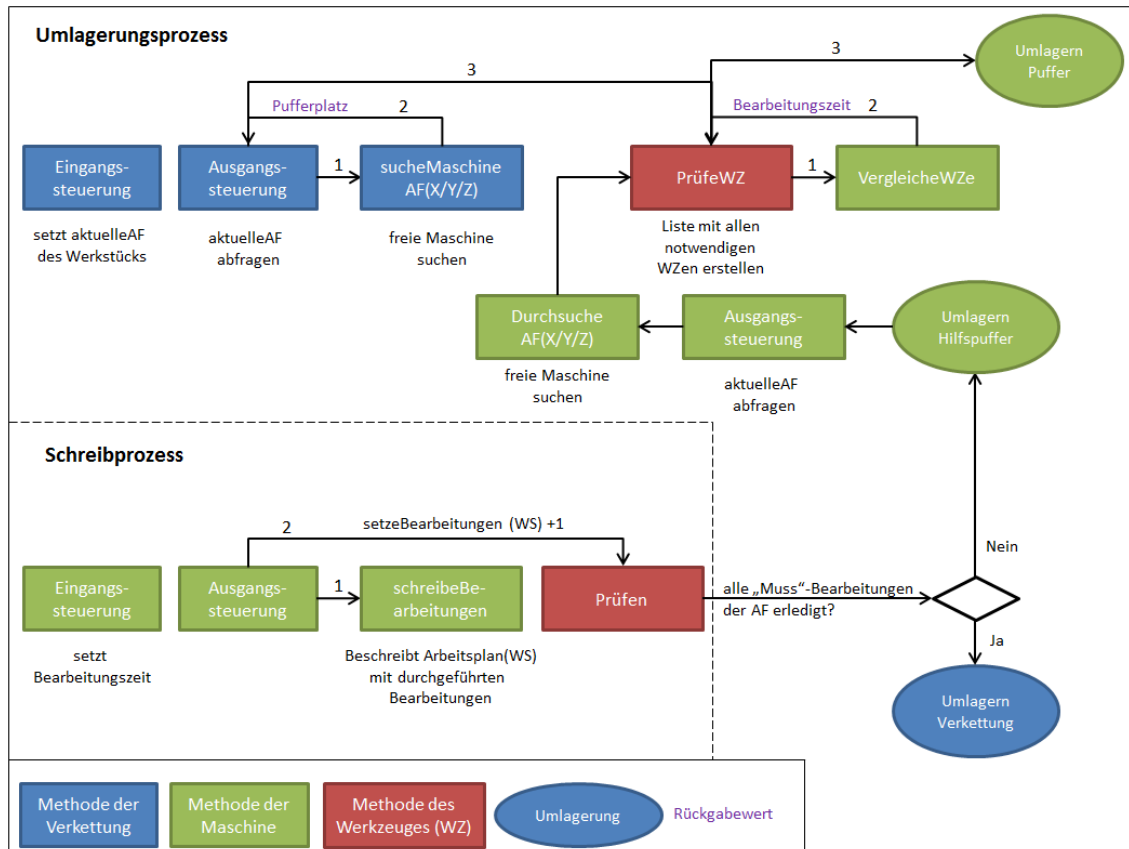


Abbildung 5-6: Übersicht des Umlagerungs- und Schreibprozess

5.6.3 Erweiterung der Bausteine

Um die erstellten Bausteine für die gerade genannten Beispiel-Szenarien zu nutzen, sind noch einige kleinere Ergänzungen notwendig. Neben dem Füllen der entsprechenden Tabellen (Arbeitsplan und vorhandeneWerkzeuge) werden weitere Methoden und Variablen eingeführt bzw. bestehende Methoden ergänzt.

Im Baustein intelligente Produktionsanlage wird die Methode Störung ergänzt, sodass falls eine Störung auftritt ein vorhandenes Werkzeug aus der entsprechenden Tabelle gelöscht wird. Danach wird die Anlage wieder entstört, da diese, entsprechend den Szenarien, die weiteren Feature, mit den noch zur Verfügung stehenden Werkzeugen bearbeiten kann.

Im Baustein Puffer wird eine Methode Ausgangssteuerung ergänzt. Diese gleicht die Bearbeitungszeiten der beiden Werkstücke im Puffer an. Insbesondere im Szenario „andere AF“ haben die Werkstücke nicht mehr alle den gleichen Bearbeitungszustand, wodurch sich auch die Bearbeitungszeiten unterscheiden. Da die Werkstücke erst entladen werden können, wenn beide Werkstücke fertig bearbeitet wurden, müssen die Zeiten entsprechend angepasst werden. Dementsprechend werden im Puffer die Bearbeitungszeiten der Werkstücke verglichen. Bei einem Unterschied wird die kürzere Bearbeitungszeit um den entsprechenden Differenzbetrag erhöht, sodass beide Werkstücke die gleiche Verweildauer auf der Maschine haben.

Um die Verlagerung innerhalb der gleichen Arbeitsfolge durchzuführen, wird für jede Ressource ein Hilfspuffer (Kapazität 2) eingeführt. Wird festgestellt, dass nach der Bearbeitung das Bauteil die Arbeitsfolge noch nicht verlassen darf, so werden die Bauteile in den Hilfspuffer umgelagert. Die Eingangssteuerung funktioniert analog zur Eingangssteuerung des bereits vorhandenen Puffers der Parallelstation, mit dem Unterschied das vorher erneut der Eingang des bereits vorhandenen Puffers gesperrt wird. Ansonsten würden bereits neue Werkstücke in diesen Puffer umgelagert werden, obwohl der Netzwerkbaustein noch zwei Werkstücke beinhaltet. Die Ausgangssteuerung des Hilfspuffers ruft in Abhängigkeit des eigenen Standortes (AFX, AFY oder AFZ) die eigene Methode DurchsucheAFX oder entsprechend DurchsucheAFY oder DurchsucheAFZ auf. Danach wird überprüft ob, der Hilfspuffer leer ist. Ist dies der Fall, so wird die Bearbeitungszeit der Parallelstation zurückgesetzt und der Eingang des Puffers geöffnet. Zum Schluss wird die Variable *i* des Zuführbandes um eins erhöht.

Die Methoden DurchsucheAF* (mit * = X, Y, oder Z) fragt zu Beginn ab, wie viele Werkstücke im Hilfspuffer vorhanden sind. Falls zwei Bauteile im Hilfspuffer sind wird überprüft welche Puffer in der entsprechenden Arbeitsfolge leer und geöffnet sind. Falls sich nur ein Bauteil im Hilfspuffer befindet, wird nur überprüft, welcher Puffer der Arbeitsfolge geöffnet ist. Somit wird gewährleistet, dass beide Werkstücke aus dem Hilfspuffer auf dieselbe Anlage umgelagert werden. Wurde ein entsprechender Puffer gefunden wird die Methode PrüfeWZ des Werkstücks mit dem Puffer und der Parallelstation aufgerufen.

Der Baustein Verkettung wird um die Variable *i* vom Datentyp integer und die Methode Beobachte_*i* erweitert. Verändert sich der Wert *i* so wird die Methode Beobachte_*i* aufgerufen. Hierbei handelt es sich also erneut um einen Sensor. Die Methode Beobachte_*i* öffnet den Ausgang der Verkettung und setzt *i* auf null zurück, falls *i* gleich zwei ist. Damit wird gewährleistet, dass die Werkstücke aus dem Hilfspuffer in die gleiche Parallelstation umgelagert werden. Ansonsten könnte das erste Werkstück aus dem Hilfspuffer umgelagert werden, dann ein Werkstück vom Förderband und

danach das zweite Werkstück aus dem Hilfspuffer. Dies würde zu verschiedenen Bearbeitungszeiten innerhalb einer Parallelstation führen und nicht der Realität entsprechen, da hier das Portal erst beide Nester des Bearbeitungszentrums entladen würde, bevor das Förderband entladen wird.

Als letzte Ergänzung wurde auf der Förderstrecke, die zur Senke führt, ein weiterer Sensor eingebaut. Passieren die Werkstücke diesen Sensor wird die Methode Kontrolle aufgerufen. Diese Methode durchsucht den Arbeitsplan, ob der Wert „false“ vorkommt. Dies würde bedeuten, dass mindestens ein Feature nicht bearbeitet wurde. Damit würde ein Werkstück das System verlassen obwohl noch Bearbeitungen fehlen. Um dies zu verhindern, würde ein solches Werkstück in die Senke Fehler (wurde ebenfalls ergänzt) umgelagert werden. Dies wird lediglich durchgeführt um zu kontrollieren ob alle Feature bearbeitet wurden und hat, bei entsprechender Funktionalität des Simulationsmodells, keinerlei Auswirkungen auf die Ausbringung.

6 Validierung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Arbeit validiert werden. In einem ersten Schritt werden die Beispiel-Szenarien miteinander verglichen und verifiziert. Dazu wird zuerst aufgezeigt, welche Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung in den Beispiel-Szenarien von Agenten übernommen wurden. Danach werden die vorgestellten Szenarien miteinander verglichen, um aufzuzeigen, welchen Nutzen ein mögliches Umlagern von Arbeitsinhalten hat.

In einem zweiten Schritt wird das entwickelte Konzept validiert, indem die einzelnen Bausteine intelligentes Werkstück, intelligente Produktionsanlage und die Verkettung überprüft werden. Dabei wird unter anderem dargestellt in wie weit eine weitere Nutzung dieser Bausteine möglich oder sinnvoll ist.

6.1 Beispiel-Szenarien

Um die Beispiel-Szenarien zu validieren wird im Folgenden aufgezeigt, welche Aufgaben die entwickelten Agenten in der Produktionsplanung und -steuerung übernehmen können. Damit wird gezeigt, dass die Bausteine eine agentenbasierte Produktionsplanung mittels ereignisdiskreter Simulationssoftware ermöglichen. Weiterhin werden die einzelnen Szenarien anhand verschiedener Kennzahlen analysiert und miteinander verglichen.

6.1.1 Aufgaben der Agenten in der Produktionsplanung und -steuerung

Die Aufgaben der Produktionsplanung sind die Produktionsprogrammplanung, die Materialbedarfsplanung und die Termin- und Kapazitätsplanung, siehe **Abbildung 2-2**.

In der Produktionsprogrammplanung werden unter anderem Liefertermine bestimmt. Diese können als Ergebnis der Simulation ausgegeben werden. Im Beispiel-Szenario werden die Fertigstellungstermine gespeichert. Diese Daten können aggregiert werden, um somit beispielsweise zu überprüfen, wann eine gewisse Anzahl an Werkstücken fertig gestellt wird. Die Materialbedarfsplanung baut auf den Ergebnissen der Produktionsprogrammplanung auf und ist damit angewiesen auf die Simulationsergebnisse. Da die Bedarfsplanung allerdings durch eine Kanban-Steuerung dezentralisiert werden kann, geht eine gewisse Planungssicherheit verloren. Diese kann mit Hilfe der Simulation teilweise zurückgewonnen werden indem überprüft wird, welche Bauteile verwendet wurden. In diesem Beispiel-Szenario wurden jedoch nur die Werkstücke selbst, sowie die Werkzeuge benötigt, sodass dieser Punkt nur eine geringe Berücksichtigung findet.

Die Terminplanung kann ebenfalls durch die Agenten und die Materialflusssimulation vereinfacht werden. So kann mit Hilfe der Simulation eine durchschnittliche Durchlaufzeit bestimmt werden, die wiederum genutzt werden kann um einen Starttermin für den entsprechenden Auftrag festzulegen. Weiterhin entfällt die Kapazitätsterminierung, da die Agenten die Ressourcen selbst auswählen und belegen. Dies wurde entsprechend in den Beispiel-Szenarien aufgezeigt.

Die Produktionssteuerung umfasst die Aufgaben der Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung. Ersteres enthält eine Verfügbarkeitsprüfung. Diese entfällt ebenfalls, da bei nicht verfügbaren Ressourcen, die Werkstücke eine entsprechend andere Maschine belegen, die die Feature bearbeiten kann. Notwendig wird die Verfügbarkeitsprüfung erst, wenn gewisse Feature überhaupt nicht mehr bearbeitet werden können. Dementsprechend ist auch die Auftragsüberwachung nur noch bedingt erforderlich, da die Werkstücke selbstständig auf auftretende Störungen reagieren können.

6.1.2 Analyse der einzelnen Szenarien

Zur Analyse der einzelnen Szenarien werden verschiedene Kennzahlen, die Plant Simulation automatisch generiert herangezogen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem prozentualen Anteil in dem die Parallelstationen arbeiten sowie blockiert sind und die relative Belegung der Förderstrecken.

Im Simulationsszenario **Ist-Stand** kann gezeigt werden, dass der Engpass in der Arbeitsfolge Y liegt. Hier befinden sich zum einen die Parallelstationen alle zu über 95% im Status arbeitend (durchschnittlich 95,61%), zum anderen hat die Förderstrecke zu Beginn der Arbeitsfolge Y die höchste relative Belegung mit 96,8%. Zwar weist das Zuführband mit 96,64% eine ähnlich hohe relative Belegung auf, allerdings sind die Maschinen der AF X mit durchschnittlich 87,68% nicht so hoch ausgelastet, wie die Stationen der AF Y. Weiterhin weisen die Maschinen in der Arbeitsfolge X einen Blockiert-Anteil auf. Dies zeigt, dass die Parallelstationen ihre Werkstücke nicht umlagern können, da das nachfolgende Förderband voll ist. Die Anlagen der AF Z sind mit durchschnittlich 80,87% am geringsten ausgelastet. Grundsätzlich sind die Maschinen, die am Anfang der Arbeitsfolge stehen, höher ausgelastet. Dies ist damit zu begründen, dass diese vom Portal vor den anderen Maschinen beladen werden. Die mittlere Durchlaufzeit der Werkstücke beträgt 28:58 min. Davon sind 17:01 min reine Bearbeitungszeit auf den Maschinen und 11:57 min Transport- und Liegezeiten.

Im zweiten Szenario **Störung 1h** liegt der Anteil, in der die Parallelstationen in der ersten Arbeitsfolge arbeiten bei 87,38%. Dies ist insbesondere auf den niedrigen Wert der gestörten Maschine (AFX_3) zurückzuführen, der mit 84,02% deutlich unter dem Durchschnitt liegt. Die mittlere DLZ beträgt 28:26 min. Dies ist damit zu begründen,

das während der Störung die AF X zum Engpass wird und damit die Liegezeiten der Werkstücke auf dem Förderband zwischen den Arbeitsfolgen X und Y geringer sind, was ebenfalls die relative Belegung von 90,56% zeigt.

Im Szenario **andere AF** werden Bearbeitungsschritte, die eigentlich in der Parallelstation AFX_3 durchgeführt werden sollten, in die Arbeitsfolge Z verlagert. Dementsprechend liegt die Auslastung der AF Z bei durchschnittlich 86%. Weiterhin ist die Auslastung der Parallelstation X_3 mit 72,2% vergleichsweise niedrig, wohingegen die Wartend- und Blockiert-Anteile mit 18,74 und 9,06% vergleichsweise hoch sind. Dies kann damit begründet werden, dass durch die kürzere Bearbeitungszeit ein Umlagern eher vorgenommen wird und zu diesem Zeitpunkt die folgende Förderstrecke noch belegt ist und der Zeitraum bis das Förderband wieder BEs aufnehmen kann nun länger ist. Der durchschnittliche Arbeitend-Anteil der AF Y liegt bei 95,61%, die mittlere Durchlaufzeit beträgt 28:56 min.

Im letzten Simulationsszenario **gleiche AF** werden Bearbeitungsschritte von der Maschine AFX_3 auf die anderen Maschinen der Arbeitsfolge X verlagert. Dementsprechend ist der durchschnittliche Arbeitend-Anteil der Parallelstationen bei 89,08%, obwohl die Parallelstation X_3 selbst nur einen Anteil von 75,84% hat. Dafür beträgt der Wartend-Anteil 23,75%. Dieser ist so hoch, da immer auf eine Umlagerungsmöglichkeit innerhalb der Arbeitsfolge gewartet werden muss. Die entsprechenden Werte der AF Y und Z sind identisch mit denen des Ist-Szenarios, da hier keine Veränderungen vorgenommen wurden. Die mittlere Durchlaufzeit beträgt 27:43 min, was auf eine geringere Liegezeit auf dem Förderband zwischen der AF X und Y zurückzuführen ist. Hier liegt die relative Belegung bei 72,59%. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass nur noch Werkstücke von vier Maschinen auf das Förderband umgelagert werden und zum anderen haben sich die Taktzeiten der Arbeitsfolgen angenähert. Da jedes Bauteil aus der Station X_3 erneut entladen und beladen werden muss, steigt die Zeit, die die entsprechenden Werkstücke in der Arbeitsfolge verbleiben.

6.1.3 Vergleich der Szenarien

Zum Vergleich der beiden aufgezeigten Szenarien werden als Grundlage die beiden Simulationsmodelle „Ist-Stand“ und „Störung 1h“ herangezogen. Der „Ist-Stand“ bildet den momentanen optimalen Produktionsverlauf dar. Das Modell „Störung 1h“ bildet einen Werkzeugbruch ab. Dieser führt in diesem Modell zum sofortigen Ausfall der Maschine und erst nachdem ein neues Werkzeug eingefügt wurde, kann die Maschine wieder genutzt werden.

Mit Hilfe von Agenten und Cyber-Physischen Systemen soll in Zukunft besser auf Störungen reagiert werden können. Dazu wurden die beiden Beispiel-Szenarien

untersucht, die nun nacheinander mit den beiden Modellen „Ist-Stand“ und „Störung 1h“ verglichen werden.

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten werden folgende Daten definiert. Der Simulationszeitraum beträgt immer 22:30h, was bei einem Drei-Schichtmodell einem Arbeitstag entspricht. Die Störungen treten jeweils nach 2h Simulationszeit auf. Damit wird gewährleistet, dass das System beim Eintreten der Störung bereits eingeschwungen ist. Weiterhin wird die Störung stets bei der Parallelstation des Netzwerkbausteins AFX_3 hervorgerufen. Als Kriterium zur Bewertung der Szenarien wird der Output, also die Menge der Werkstücke, die die Senke erreichen, betrachtet.

Der maximale Output des Simulationsmodells (Ist-Stand) beträgt 2354 Werkstücke pro Tag. Für den Fall das eine Ressource eine Stunde lang ausfällt (Simulationsmodell: „Störung 1h“), fällt der Output auf 2346 Werkstücke pro Tag, bei einem ausgeschleusten Werkstück. Durch die Störung werden also acht Werkstücke, die in Ordnung sind am Tag weniger produziert. Das entspricht einer Reduzierung von 0,34%.

Für das Szenario „gleiche AF“ beträgt der Output 2354 Werkstücke pro Tag, plus ein fehlerhaftes Werkstück, welches ausgeschleust wurde. Durch die Verlagerung der Bearbeitungen innerhalb der Arbeitsfolge bleibt der Output also genauso hoch, als wenn die komplette Anlage ohne Störung läuft. Gegenüber dem Szenario „Störung 1h“ werden entsprechend acht Werkstücke pro Tag mehr produziert, was also im Vergleich zur heutigen Störungsbehandlung eine deutliche Verbesserung darstellt.

Das Szenario „andere AF“ produziert einen Output von 2352 Werkstücken pro Tag und einem fehlerhaften Werkstück. Im Vergleich zum Optimalfall werden also zwei Bauteile weniger produziert, jedoch sechs Werkstücke mehr bezogen auf die heutige Störungsbehandlung („Störung 1h“). Der Output fällt also nur um 0,08%, anstatt um 0,34%. Im Vergleich zum Szenario „gleiche AF“ werden zwei Werkstücke weniger produziert, obwohl im Szenario „gleiche AF“ noch zusätzliche Belade- und Entladezeiten entstehen, da das Werkstück auf eine Maschine mehr umgelagert werden muss. Allerdings sind nach dem Verlassen der Arbeitsfolge X, alle Werkstücke auf dem gleichen Bearbeitungsstand. Dies ist im Szenario „andere AF“ nicht der Fall, was dazu führt, dass teilweise Werkstücke mit unterschiedlichen Bearbeitungszuständen auf ein Bearbeitungszentrum geladen werden. Entsprechend muss ein Werkstück auf das andere warten. Dies führt zu den verschiedenen Durchlaufzeiten und Outputmengen.

Die Output-Ergebnisse der Simulationsszenarien zeigt **Abbildung 6-1**.

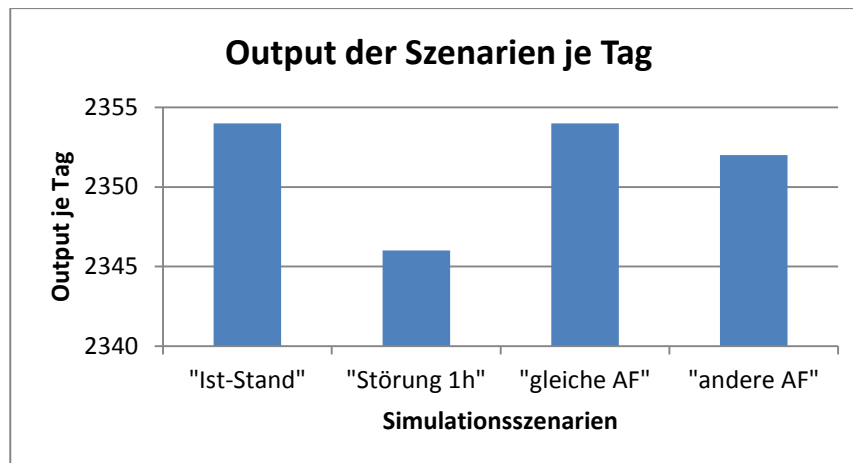


Abbildung 6-1: Output der Szenarien je Tag

Entsprechend der **Abbildung 6-1** ist zu sehen, dass die Erweiterung des Systems um intelligente Werkstücke und Anlagen zu einer verbesserten Ausbringung im Vergleich zum bisherigen Störungsmanagement führt und im Falle „gleiche AF“ sogar zu einer optimalen Ausbringung führt. Zu beachten ist hierbei, dass die AF X, in der die Störung auftritt nicht der Engpass des Systems ist, sondern selbst im Optimalfall nicht komplett ausgelastet ist. Würde eine Störung in der Arbeitsfolge Y, welche den Engpass darstellt, auftreten und ein Feature betreffen, welches nur in dieser Arbeitsfolge bearbeitet werden kann, würde der Output entsprechend sinken. Auf der anderen Seite könnte die Verlagerung eines Features aus der AF Y in die AF Z zu einer Output Erhöhung führen. Um diese Fälle jedoch genauer zu analysieren, müssten entsprechende Simulationen durchgeführt werden.

Generell konnte gezeigt werden, dass die Implementierung von intelligenten Werkstücken und Produktionsanlagen zu einem verbesserten Reagieren auf Störungen führt. Dies kann genutzt werden um in Zukunft nicht sofort auf Störungen reagieren zu müssen, sondern Maschinen entsprechend der Szenarien nur die Feature bearbeiten zu lassen, für die noch Werkzeuge im Magazin vorhanden sind. Die fehlenden Werkzeuge können entsprechend nicht sofort, sondern erst in einer TPM-Schicht (Total Productive Maintenance) ersetzt werden.

6.2 Validierung des entwickelten Konzeptes

Nach dem Analysieren der Simulationsszenarien soll nun das Konzept validiert werden. Dazu wird aufgezeigt, welchen Nutzen die entwickelten Bausteine haben und inwiefern das Ziel der Ermöglichung einer agentenbasierten Produktionsplanung zu simulieren erreicht wurde.

Die Idee der Konzeptentwicklung war es, die Elemente der Agenten und darauf aufbauend auch Elemente von Cyber-Physischen Systemen in Plant Simulation abzubilden. Hierzu wurden die Bausteine mit den entsprechenden Elementen versehen.

Die Bausteine enthalten alle Sensoren, die es ermöglichen die Umwelt zu beobachten und auf Veränderungen in der Umwelt mit Hilfe der hinterlegten Methoden zu reagieren. Hiermit wurde entsprechend auch die Reaktivität abgebildet. Weiterhin wird auch ein interner Zustand modelliert, da ansonsten keine Veränderung in der Umwelt wahrzunehmen wäre. Dies geschieht in Plant Simulation jedoch automatisch. Die Effektoren wurden vernachlässigt, da diese in einer Materialflusssimulation keine zu simulierenden Elemente darstellen.

Neben den Sensoren wurde auch die Kommunikationsmöglichkeit realisiert. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit andere Methoden aufzurufen und über die Weitergabe von Parametern können Informationen ausgetauscht werden. Die entwickelten Bausteine können insbesondere untereinander kommunizieren. Jedoch ist der momentan bereitgestellte Informationsaustausch beschränkt auf einige wenige Methoden bzw. Informationen. Sollen weitere Informationen ausgetauscht werden, müssen diese entsprechend vom Modell-Ersteller ergänzt werden. Allerdings können dabei die bestehenden Methoden als Orientierungsmöglichkeit dienen.

Des Weiteren bestand die Anforderung ein Zielsystem zu modellieren. Im Beispiel-Szenario haben die Werkstücke das Ziel eine möglichst kurze Durchlaufzeit zu erreichen. Dieses Zielsystem wurde jedoch nicht explizit im Baustein intelligentes Werkstück realisiert, sondern vielmehr im Baustein Verkettung. Hier wird die nächste Ressource für das Werkstück gesucht und dabei stets die Ressource gewählt, die als nächstes verfügbar ist. Dies war jedoch auch bereits im „Ist-Zustand“ hinterlegt und konnte somit immer abgebildet werden. Allerdings wird zunächst eine Ressource gesucht und erst dann überprüft ob diese Ressource auch noch fehlende Feature bearbeiten kann. Existieren mehrere gestörte Maschinen führt dies dazu, dass ein Werkstück auf eine Ressource umgelagert wird, obwohl diese keine der Bearbeitungen durchführen kann. Im Beispiel-Szenario ist dies nicht möglich, um die Bausteine in anderen Szenarien einsetzen zu können, sollte dies trotzdem entsprechend optimiert werden.

Neben diesen Elementen von Agenten, wurde wie bereits oben genannt die Eigenschaft Reaktivität sowie die Autonomie abgebildet. Letzteres zeigt das Simulationsmodell, da die Bausteine ohne weiteren Eingriff eines Mitarbeiters funktionieren.

Wie gezeigt, bilden die Bausteine Förderstrecke, Parallelstation und Fördergut, durch die entwickelten Methoden, Variablen und Tabellen einige Elemente von Agenten ab und können somit auch als Agenten bezeichnet werden. Darüber hinaus wurden die Bausteine Fördergut und Parallelstation mit Informationen über den eigenen Zustand erweitert. Das Werkstück besitzt Informationen, welche Bearbeitungsschritte durchgeführt wurden beziehungsweise, welche noch durchgeführt werden müssen und ob es die Qualitätsanforderungen erfüllt oder nicht. Analog dazu hat die

Produktionsanlage nun die Informationen über die vorhandenen Werkzeuge im Werkzeugmagazin. Je nach Simulationsmodell werden noch weitere oder andere Informationen benötigt. Diese können entsprechend ergänzt werden. Generell ist durch das Abbilden der entsprechenden Informationen sowie durch die bereits modellierten Agenten-Elemente, ein Cyber-Physisches System modelliert worden.

6.2.1 Einsatzmöglichkeiten

Neben der grundsätzlichen Erweiterung der Bausteine Fördergut, Parallelstation und Förderstrecke spielt die mögliche Weiterverwendung der Entwicklungen eine wesentliche Rolle um aufzuzeigen welchen Nutzen die Bausteine haben. Dabei wurde mit Hilfe der Beispiel-Szenarien „gleiche AF“ und „andere AF“ bereits aufgezeigt, dass die Bausteine grundsätzlich funktionieren und eine agentenbasierte Produktionsplanung modellieren können. Weiterhin sind Systeme, die ähnlich aufgebaut sind, mit kleinen Änderungen modellierbar. Ähnliche Systeme sind dabei verkettete Anlagen mit einer anderen Anzahl an Arbeitsfolgen oder einer anderen Anzahl an Ressourcen, die aber ähnlich verkettet sind und in denen Werkstücke ebenfalls nur eine Ressource einer Arbeitsfolge belegen. Insbesondere in der Automobilbranche betrifft dies Systeme zur spanenden Bearbeitung von Zylinderkurbelgehäusen, Zylinderköpfen, Getriebegehäusen, Kupplungsgehäusen, und weitere. Im Unterschied zum Referenzsystem können diese Systeme teilweise aus einspindligen und doppelspindligen Maschinen bestehen. Für die einspindligen Ressourcen bietet sich die Modellierung mit Hilfe einer Einzelstation an. Diese wurde in der Konzeptentwicklung nicht berücksichtigt, kann aber mit den benutzerdefinierten Attributen des Bausteins „intelligente Anlage“ versehen und so genutzt werden. Diese Anlagen sind also durch kleinere Anpassungen ebenfalls modellierbar. Dementsprechend bestehen in der Automobilbranche vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für diese Bausteine.

In wie weit die Bausteine in anderen Branchen verwendet werden können ist nur schwer zu bewerten. Allerdings entfalten die Bausteine ihren vollen Nutzen nur, wenn diese zusammen eingesetzt werden. Dementsprechend ist für Systeme, die starr verkettet und hoch automatisiert sind ein Einsatz gut möglich. In wie weit die Bausteine oder Teile der Bausteine auch verwendet werden können, wenn diese Kriterien nicht auf das zu simulierende System zutreffen, kann nur anhand von Beispiel-Szenarien validiert werden.

Grundsätzlich liegt der Nutzen der Bausteine sicherlich zum Großteil in einem nun schnelleren Modellaufbau. Insbesondere für ähnliche Systeme können die Bausteine übernommen werden. Allerdings müssen wohl für andere Simulationsszenarien, die Bausteine entsprechend angepasst werden. Dies ist zum einen generell möglich, zum anderen ist dies nahezu immer der Fall, da sich die Simulationsszenarien immer voneinander unterscheiden. Wird auf Standard-Bausteine zurückgegriffen, so werden

diese in der Regel auch noch auf das entsprechende Szenario angepasst und gegebenenfalls durch Methoden oder andere Attribute erweitert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden bereits existierende Objekte der ereignisdiskreten Simulationssoftware Plant Simulation weiter entwickelt, um eine agentenbasierte Produktionsplanung mit Hilfe der Software modellieren zu können.

Ausgehend von den Grundlagen aus Kapitel 2 und 3 wurden Anforderungen an eine ereignisdiskrete Simulationssoftware im Zuge einer agentenbasierten Produktionsplanung ermittelt. Anhand einer Beispiel-Fertigungslinie wurden diese Anforderungen analysiert und verdeutlicht welche Elemente bereits heute abbildbar sind. Mit Hilfe einer möglichen Erweiterung der Fertigungslinie im Zuge der vierten industriellen Revolution wurde gezeigt, welche Elemente nicht modellierbar sind. Darauf aufbauend wurden die nicht erfüllten Anforderungen diskutiert und dadurch aufgezeigt, warum das Konzept die Erfüllung der Anforderungen von Agenten und Cyber-Physischen Systemen beinhaltet. Weiterhin wurde die Konzeptidee vorgestellt und insbesondere die Umsetzung von intelligenten Werkstücken und Produktionsanlagen detailliert erläutert.

Basierend auf der Konzeptidee wurden die Objekte der Simulationssoftware Plant Simulation Fördergut, Parallelstation und Förderstrecke um die Elemente eines Agenten erweitert und darauf aufbauend auch Eigenschaften von Agenten abgebildet. Zentraler Bestandteil der Entwicklungen waren die Elemente Sensoren und Kommunikation, da dies die wichtigsten Bestandteile für eine Materialflusssimulation sind. Ferner wurden die Eigenschaften Autonomie und Reaktivität modelliert.

Für die Modellierung von intelligenten Werkstücken und intelligenten Maschinen wurden die entwickelten Bausteine Fördergut und Parallelstation noch mit Informationen über den eigenen Zustand versehen. Damit wurde die Grundlage geschaffen um, die im Zuge der vierten industriellen Revolution an Bedeutung gewinnenden Cyber-Physischen Systeme zu modellieren.

Durch die Verwendung der weiterentwickelten Bausteine in den beiden Beispiel-Simulationsszenarien wurde die grundsätzliche Nutzbarkeit der Entwicklungen bewiesen. Weiterhin wurde damit eine agentenbasierte Produktion simuliert und entsprechende Kennzahlen generiert. Damit konnte gezeigt werden, das mit Hilfe der Simulation beispielsweise die mittlere Durchlaufzeit oder die Fertigstellungstermine und damit die Liefertermine der Werkstücke prognostiziert werden kann. Dementsprechend kann die Simulationssoftware Plant Simulation durch die Verwendung der entwickelten Bausteine, eine agentenbasierte Produktionsplanung unterstützen. Ferner wurde im Zuge der Validierung ein möglicher weiterer Einsatz der Entwicklungen kritisch hinterfragt.

Ausgehend von der Anwendung und Erweiterung der Plant Simulation Bausteine gibt es folgende mögliche weitere Frage- und Aufgabenstellungen, die behandelt werden können:

1. An erster Stelle steht die weitere Validierung der entwickelten Bausteine. Zunächst sollten weitere ähnliche Produktionssysteme untersucht werden, die ebenfalls aus mehreren verketteten Maschinen bestehen. Darauf aufbauend kann untersucht werden, in wie weit die Bausteine auch in anderen Produktionssystemen Anwendung finden können oder eventuell ergänzt werden müssen um einen Einsatz in diesen Systemen zu ermöglichen.
2. Des Weiteren können die entwickelten Bausteine erweitert werden. Das Agenten-Element Zielsystem wurde bislang nur als minimale Durchlaufzeit entwickelt. Hier können weitere Zielsysteme implementiert und einfache Verhandlungsmechanismen eingeführt werden. Dies kann in Verbindung mit dem ersten Punkt geschehen, indem beispielsweise eine Werkstattfertigung analysiert wird.
3. Neben den in Punkt zwei erwähnten Erweiterungen, kann das Agenten-Element Effektor näher untersucht werden. Insbesondere die Effektoren der Maschine könnten detaillierter untersucht werden. Hier kann eine Kopplung zwischen der Materialflusssimulation und einem Computer-Aided Manufacturing (CAM)-System untersucht werden, um somit auch die jeweiligen Veränderungen am Werkstück darstellen zu können. Ferner kann durch diese Kopplung ein detailliertes Modell der Fabrik erstellt werden und damit einen Beitrag zur digitalen Fabrik leisten.
4. Ein weiteres Forschungsgebiet kann die automatische Modellgenerierung darstellen. Sollten im Zuge der vierten industriellen Revolution die Anlagen flexibler und adaptierbarer werden, so müssten auch die Simulationsmodelle ständig angepasst werden, sodass eine automatische Generierung der Modelle einen großen Nutzen darstellt. Hierzu kann auch eine Schnittstelle zwischen einem Manufacturing Execution System und einer ereignisdiskreten Simulationssoftware getestet werden, inwieweit diese genutzt werden kann um wesentliche Daten zur automatischen Modellgenerierung bereitzustellen.

8 Literaturverzeichnis

Alonso, E.: How individuals negotiate societies. In: International Conference on Multi Agent Systems. Paris, France, 3-7 July 1998, S. 18–25.

Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (©2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).

Austin, J. L. (1962): How to do things with words: Oxford University Press.

Bangsow, Steffen (2008): Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen. München [u.a.]: Hanser (Edition Cad.de).

Bangsow, Steffen (2011): Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen. München: Hanser.

Bauer, Klaus; Diegner, Bernhard; Diemer, Johannes; Dorst, Wolfgang; Ferber, Stefan; Glatz, Rainer et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Hg. v. Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster und Johannes Helbig. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. Online verfügbar unter http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2014.

Bauernhansl, Thomas (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Bischoff, Jürgen (1999): Ein Verfahren zur zielorientierten Auftragseinplanung für teilautonome Leistungseinheiten. Berlin [u.a.]: Springer (IPA-IAO-Forschung und -Praxis, 292).

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

Brambring, Felix (Hg.): ProSense. Projektziele. WZL - RWTH Aachen. Online verfügbar unter <http://www.prosense.info/de/a167b9912c72bf96c1257a770040e496.html>, zuletzt geprüft am 14.05.2015.

Brenner, Walter; Zarnekow, Rüdiger; Wittig, Hartmut (1998): Intelligente Softwareagenten. Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio: Springer.

Broy, Manfred (2010): Cyber-Physical Systems. Innovation Durch Software-Intensive Eingebettete Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Acatech DISKUTIERT, 0).

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.): Zukunftsbild "Industrie 4.0". Bundesministerium für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2014a): Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter Bundesministerium für Bildung und Forschung, zuletzt geprüft am 25.04.2015.

- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2014b): Industrie 4.0. Innovationen für die Produktion von morgen. Online verfügbar unter http://www.bmbf.de/pub/broschuere_Industrie-4.0-gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2015.
- Burges, Ulrich; Frank, Timo (2015): Synchroner Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung. Anforderungen an eine Schnittstelle zwischen Automatisierungsebene und der Digitalen Fabrik. 1. Meilenstein. Chemnitz, 06.05.2015.
- Buzacott, John A.; Corsten, Hans; Gössinger, Ralf; Schneider, Herfried M. (2010): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Konzepte und integrative Entwicklungen. München: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).
- Dangelmaier, Wilhelm (2009): Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschrainen? Dordrecht, New York: Springer (VDI-Buch).
- Dangelmeier, Wilhelm; Pape, Ulrich; Rüther, Michael (2004): Agentensysteme für das Supply Chain Management. Grundlagen, Konzepte, Anwendungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Wirtschaftsinformatik).
- Daniluk, Damian (2014): Verteilte Simulation und Emulation von Materialflusssystemen mit dezentraler Steuerung. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Logistik für die Praxis).
- DIN IEC 60050-351, 09.2014: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik.
- Drath, Rainer (2014): Industrie 4.0 - eine Einführung. In: *open automation* (3), S. 2–7. Online verfügbar unter http://www.openautomation.de/fileadmin/user_upload/Stories/Bilder/oa_2014/oa_3/oa_3_14_ABB.pdf.
- Ehrmann, Harald (op. 1997): Logistik. Ludwigshafen (Rhein): Kiehl (Kompendium der praktischen Betriebswirtschaft).
- Eley, Michael (2012): Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Engelhardt-Nowitzki, Corinna; Nowitzki, Olaf; Krenn, Barbara (2008): Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation. State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (Leobener Logistik Cases).
- Feldmann, Klaus (2000): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Berlin [u.a.]: Springer.
- Ferber, Jacques (2001): Multiagentensysteme. Eine Einführung in die verteilte künstliche Intelligenz. München, Boston [u.a.]: Addison-Wesley (Agententechnologie).
- Fischer, Torsten (2004): Multi-Agenten-Systeme im Fahrzeugumschlag. Agentenbasierte Planungsunterstützung für Seehafen-Automobilterminals. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Gabler Edition Wissenschaft).
- Frank, Heiko: Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS). Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. Das

Forschungsprojekt CyProS. Online verfügbar unter <http://www.projekt-cypros.de/projekt-cypros-cps.html>, zuletzt geprüft am 09.05.2015.

Frank, Heiko: Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS). Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. TP 2: Planung, Steuerung und Prozessgestaltung. Online verfügbar unter <http://www.projekt-cypros.de/teilprojekt-planung-steuerung-prozessgestaltung-cypros.html>, zuletzt geprüft am 09.05.2015.

Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph; Wenzelmann, Christoph (2009): Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München, Wien: Hanser.

Geisberger, Eva; Broy, Manfred (2012): agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer (SpringerLink : Bücher).

Georgeff, Michael: Communication and interaction in multi-agent planning. In: Proceedings of the third national conference on artificial intelligence, S. 125–129. Online verfügbar unter <http://www.aaai.org/Papers/AAAI/1983/AAAI83-003.pdf>, zuletzt geprüft am 07.03.2015.

Gordon, G. (1972): Systemsimulation. München: Oldenbourg (Verfahren der Datenverarbeitung).

Görz, Günther (2000): Handbuch der künstlichen Intelligenz. 3., vollst. überarb. Aufl. München, Wien: Oldenbourg.

Görz, Günther; Schneeberger, Josef; Schmid, Ute (2012): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 5., korrigierte Auflage. München: Oldenbourg, R.

Grundstein, S.; Schukraft, S.; Freitag, M.; Scholz-Reiter, B. (2015): Planorientierte autonome Fertigungssteuerung. Simulationsbasierte Untersuchung der Planeinhaltung und der logistischen Zielerreichung. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (4), S. 220–225.

Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst (2005): Produktion und Logistik. 6., verb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

Günthner, Willibald A. (Hg.) (2010): Internet der Dinge in der Intralogistik. Heidelberg [u.a.]: Springer (VDI).

Hachtel, Günther; Holzbaur, Ulrich D. (2010): Management für Ingenieure. Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik ; mit 73 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).

Hackstein, Rolf (1989): Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl.

Hartmann, Horst (2002): Materialwirtschaft. Organisation, Planung, Durchführung, Kontrolle. 8., überarb. und erw. Aufl. Gernsbach: Dt. Betriebswirte-Verl.

Holtewert, Philipp; Oesterle, Jonathan; Bruns, Axel; Wirtz, Helmut (2014): Detaillierungsgrad von Simulationsmodellen. In: *PRODUCTIVITY Management* 19 (5), S. 31–34.

Hompel, Michael ten; Sadowsky, Volker; Beck, Maria (2007-2011): Materialflusssysteme. Berlin: Springer (VDI-Buch).

- Ickerott, Ingmar (2007): Agentenbasierte Simulation für das Supply-Chain-Management. 1. Aufl. Lohmar, Köln: Eul (Informationsmanagement und Unternehmensführung, Bd. 2).
- Jedermann, Reiner; Gehrke, Jan D.; Lorenz, Martin; Herzog, Otthein; Lang Walter (2006): Realisierung lokaler Selbststeuerung in Echtzeit. Der Übergang zum intelligenten Container. In: Hans-Christian Pfohl (Hg.): Wissenschaft und Praxis im Dialog. Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag (Schriftenreihe Wirtschaft und Logistik), S. 145–166.
- Jennings, N. R.; Faratin, P.; Lomuscio, A. R.; Parsons, S.; Wooldridge, M. J.; Sierra, C. (2001): Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges. In: *Group Decision and Negotiation* 10 (2), S. 199–215. DOI: 10.1023/A:1008746126376.
- Jennings, Nicholas R.; SYCARA, KATIA; Wooldridge, Michael (1998). In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 1 (1), S. 7–38. DOI: 10.1023/A:1010090405266.
- Jodlbauer, Herbert (2007): Produktionsoptimierung. Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. 2. Aufl. Vienna: Springer-Verlag/Wien (Springers Kurzlehrbücher der Wirtschaftswissenschaften).
- Jung, Hans (2010): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 12., aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg.
- Kagermann, Henning; Wolf-Dieter, Lukas; Wahlster, Wolfgang (2011): Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In: *VDI Nachrichten* 2011, 01.04.2011 (13). Online verfügbar unter <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>, zuletzt geprüft am 25.04.2015.
- Kahlert, Jörg (2004): Simulation technischer Systeme. Eine beispielorientierte Einführung. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (Vieweg Praxiswissen).
- Kirn, Stefan (Hg.) (2006): Multiagent engineering. Theory and applications in enterprises ; with 24 tables. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (International handbooks on information systems).
- Klügl, Franziska (2001): Multiagentensimulation. Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen. München [u.a.]: Addison-Wesley (Agententechnologie).
- Kreimeier, D.; Müller, E.; Morlock, F.; Jentsch, D.; Unger, H.; Börner, F.; Block, C. (2015): Die synchrone Produktion. Ansatz mit teilautonomer Produktionsplanung/-steuerung und humanzentrierter Entscheidungsunterstützung. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (4), S. 204–208.
- Kuhn, Axel; Rabe, Markus (1998): Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin [u.a.]: Springer.
- Kühn, Wolfgang (2006): Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. München [u.a.]: Hanser.
- Kuprat, Thorben; Mayer, Jonas; Nyhuis, Peter (2015): Aufgaben der Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0. In: *Industrie Management* 31 (2), S. 11–14.
- Kurbel, Karl (2003): Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 5., durchges. und aktualisierte Aufl. München,

- Wien: Oldenbourg (Handbuch der Informatik Anwendungen in Naturwissenschaften, Technik und Medizin, ; 2).
- Kurbel, Karl (2011): Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. 7., völlig überarb. und aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg.
- Lass, Sander; Theuer, Hanna; Hennig, Gregor; Schumacher, Jochen (2013): Modellierung intelligenter Produktionssysteme. In: *PRODUCTIVITY Management* 18 (1), S. 47–50.
- Libert, Sergey (2011): Beitrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen. Hg. v. Michael ten Hompel. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Logistik für die Praxis).
- Liebl, Franz (1992): Simulation. Problemorientierte Einführung. München [u.a.]: Oldenbourg.
- Liu, Jiming; Yao, Chunyan (2004): Rational competition and cooperation in ubiquitous agent communities. In: *Knowledge-Based Systems* 17 (5-6), S. 189–200. DOI: 10.1016/j.knosys.2004.06.002.
- Lödding, Hermann (2008): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. [Online-Ausg. der] 2., erw. [gedr.] Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI).
- März, Lothar; Krug, Wilfried; Rose, Oliver; Weigert, Gerald (2011): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistic. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Mayr, H. C.; Erkollar, A. (1999): Simulation im Bereich Produktionsplanung und -steuerung(PPS). In: *Elektrotechnik und Informationstechnik (e & i)* 116 (3), S. 191–194.
- Meißner, Jan; Hering, Niklas; Hauptvogel, Annika; Franzkoch, Bastian (2013): Cyberphysische Produktionssysteme. In: *PRODUCTIVITY Management* 18 (1), S. 21–24.
- Mönch, Lars (2006a): Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl (Wirtschaftsinformatik).
- Mönch, Lars (2006b): Autonome und kooperative Steuerung komplexer Produktionsprozesse mit Multi-Agenten-Systemen. In: *Wirtschaftsinformatik* 48 (2), S. 107–119.
- Murch, Richard; Johnson, Tony (2000): Agententechnologie. Die Einführung : intelligente Software-Agenten auf Informationssuche im Internet. München [etc.]: Addison-Wesley.
- Nimis, Jens (2009): Eine Referenzarchitektur für zuverlässige Multiagentensysteme. Dissertation. Universität Friedericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe.
- Nwana, Hycinth S. (1996): Software Agents: An Overview. In: *Knowledge Engineering Review* 11 (3), S. 205–244.
- Nwana, Hycinth S.; Lee, L.; Jennings, Nicholas R. (1996): Co-ordination in software agent systems. In: *BT Technology Journal* 14 (4), S. 79–88.
- Nyhuis, Peter (2008): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer.
- Nyhuis, Peter; Mayer, Jonas; Kuprat, Thorben: Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle. In: *Industrie 4.0 Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*, S. 79–100.

- Plümer, Thomas (2003): *Logistik und Produktion*. München [u.a.] (Managementwissen für Studium und Praxis).
- Ramsauer, Christian (1997): *Dezentrale PPS-Systeme. Neue Strukturen bei hoher Innovationsdynamik*. Wiesbaden: Gabler.
- Rehder, E.; Schatz, A. (2014): Reifegradbasierte Kopplung - koordinierte Selbststeuerung für dezentrale Produktionssysteme. In: *wt Werkstattstechnik online* 104 (3), S. 129–133.
- Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T. R.; Wahlster, W.; Zühlke, D. et al. (2013): Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (02), S. 84–89.
- Rücker, Thomas (2006): *Optimale Materialflusssteuerung in heterogenen Produktionssystemen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Gabler-Edition Wissenschaft : Schriften zum Produktionsmanagement).
- Russell, Stuart J.; Norvig, Peter; Davis, Ernest (2010): *Artificial intelligence. A modern approach*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (Prentice Hall series in artificial intelligence).
- Schenk, Michael; Müller, Egon; Wirth, Siegfried (2014): *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg.
- Scholz-Reiter, B. (2001): Potenzial der Agententechnologie in Produktions- und Logistikanwendungen. In: *Industrie Management* 17 (6), S. 19–20.
- Schuh, G.; Potente, T.; Hauptvogel, A. (2013a): Cyber-physische Feinplanung. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (4), S. 336–339.
- Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, K.; Hauptvogel, A. (2013b): High Resolution Production Management. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (2), S. 96–99.
- Schuh, Günther; Reuter, Christina; Hauptvogel, Annika; Brambring, Felix (2014): Cyber-physische Produktionssteuerung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (12), S. 964–967.
- Schuh, Günther; Stich, Volker (2012a): *Evolution der PPS*. 4., überarbeitete Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Produktionsplanung und -steuerung, 2).
- Schuh, Günther; Stich, Volker (2012b): *Grundlagen der PPS*. 4., überarbeitete Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Produktionsplanung und -steuerung, 1).
- Schuh, Günther; Stich, Volker (2014): *Enterprise -Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen*. Online-Ausg. Dordrecht: Springer (EBL-Schweitzer).
- Searle, John R. (1969): *Speech acts. An essay in the philosophy of language*. London: Cambridge University Press.
- Shen, Weiming; Norrie, D. H.; Barthès, Jean-Paul (2001): *Multi-agent systems for concurrent intelligent design and manufacturing*. London, New York: Taylor & Francis.
- Siemens AG: *Plant Simulation*. Hg. v. Siemens Industry Software GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter

http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml, zuletzt geprüft am 14.05.2015.

SimPlan AG: Plant Simulation. Simulation von Produktions- und Logistikprozessen. Hg. v. SimPlan AG. Online verfügbar unter http://www.plant-simulation.de/images/stories/Dokumente/Infoblatt_Plant_Simulation.pdf, zuletzt geprüft am 14.05.2015.

Smith (1980): The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. In: *IEEE Trans. Comput.* C-29 (12), S. 1104–1113. DOI: 10.1109/TC.1980.1675516.

Spath, Dieter (Hg.) (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Unter Mitarbeit von Oliver Ganschar, Stefan Gerlach, Moritz Hämmerle, Tobias Krause und Sebastian Schlund. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.

Spath, Dieter; Klinkel, Silja; Barrho, Thomas (2002): Auftragsabwicklung in dezentralen Strukturen. Erfolgsfaktoren und Probleme - Ergebnisse einer Studie. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (3), S. 130–132.

Spur, Günther (2001): Begriffe der Fertigungstechnik sind genormt. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (9), S. 509.

Stachowiak, Herbert (©1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer-Verlag.

Stehli, Marcel (2010): ManufAg - ein Rahmenwerk für agentenbasierte Produktionssteuerungssysteme. Dissertation. FernUniversität Hagen, Hagen.

Suhl, Leena; Mellouli, Taieb (2013): Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen: Gabler.

SYCARA, KATIA; ZENG, DAJUN (1996): COORDINATION OF MULTIPLE INTELLIGENT SOFTWARE AGENTS. In: *Int. J. Coop. Info. Syst.* 05 (02n03), S. 181–211. DOI: 10.1142/S0218843096000087.

Theuer, Hanna (2013): Voraussetzungen der vierten industriellen Revolution. In: *PRODUCTIVITY Management* 18 (1), S. 16.

Thommen, Jean-Paul (2008): Lexikon der Betriebswirtschaft. Managementkompetenz von A bis Z. 4., überarb. und erw. Auflage. Zürich: Versus Verlag AG.

Uhlmann, E.; Hohwieler, E.; Kraft, M. (2013): Selbstorganisierende Produktion mit verteilter Intelligenz. Intelligente Werkstücke steuern ihren Weg durch die Fertigung. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (2), S. 114–117.

Ulrich Hedtstück (2013): Simulation Diskreter Prozesse. [s.l.]: Springer Vieweg (eXamen.Press).

VDI Richtlinie 3633 Blatt 1, 12.2014: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen.

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hg.) (2013): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. Online verfügbar unter https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2015.

- Vogel-Heuser, Birgit (Hg.) (2011): Erhohte verfügbarkeit und transparente produktion. tagungsband automation symposium 2011. Embedded Systems Tagungen und Berichte 2. Kassel: Kassel University Press G.
- Vogel-Heuser, Birgit; Schütz, Daniel; Göhner, Peter (2015): Agentenbasierte Kopplung von Produktionsanlagen. In: *Informatik Spektrum* 38 (3), S. 191–198. DOI: 10.1007/s00287-015-0880-2.
- Westkämper, E.; Zahn, E. (2008): Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. 1. Aufl. Berlin: Springer.
- Wiendahl, Hans-Peter (2014): Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit ... 3 Tabellen. 8., überarb. Aufl. München: Hanser.
- Wildemann, Horst (1998): Innovationen in der Produktionswirtschaft. Produkte, Prozesse, Planung und Steuerung. München: TCW, Transfer-Centrum-Verl.
- Wooldridge, Michael; Jennings, Nicholas R. (1995): Intelligent agents: theory and practice. In: *The Knowledge Engineering Review* 10 (02), S. 115–152. DOI: 10.1017/S0269888900008122.
- Zäpfel, Günther (1989): Neuere Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung. Linz: R. Trauner (Schriften zur Fertigungswirtschaft).
- Zelewski, Stephan (1995): Multi-Agenten-Systeme zur Koordinierung von Produktionsprozessen. In: August-Wilhelm Scheer (Hg.): Rechnungswesen und EDV. Aus Turbulenzen zum gestärkten Konzept? Heidelberg: Physica-Verl., S. 123–150.
- Zelewski, Stephan; Bode, Jürgen (1993): Koordination von Produktionsprozessen - Ein Ansatz auf Basis von Multi-Agenten-Systemen. In: *IM Die Fachzeitschrift für Information Management* 8 (2), S. 14–24.
- Zsifkovits, Helmut E. (Hg.) (2014): Logistische Modellierung. 2. Wissenschaftlicher Industrielogistik-Dialog in Leoben (Wild). Wissenschaftlicher Industrielogistik-Dialog. München, Mering, Schwab: Hampp.