

Diplomarbeit

**Entwicklung eines computergestützten
Modells zur Abbildung wandlungsfähiger
Produktionssysteme für Scheduling-
Algorithmen**

Dominik Schmitt

Abgabedatum: 11.08.2014

Gutachter:

Name des Erstgutachters: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Name des Zweitgutachters: Prof. Dr. Peter Buchholz

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

FG IT in Produktion und Logistik (ITPL)

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

In Kooperation mit

Fakultät Informatik

Lehrstuhl für Praktische

Informatik (LS IV)

Abstract

Produktionssysteme weisen ein hochkomplexes Verhalten auf. So sind insbesondere in der operativen Produktionsplanung und -steuerung vielschichtige Optimierungsprobleme zu lösen, die gegebenenfalls mit Anpassungen des Produktionssystems verbunden sind. Die simulationsgestützte Optimierung hat sich in diesem Bereich als eine passende Technologie zur Lösungsfindung etabliert. In dieser Arbeit wird eine Methode zur Abbildung und Analyse wandlungsfähiger Produktionssysteme im Kontext einer Werkstattfertigung mit Parallelfertigung vorgestellt. Ziel ist die Bewertung des zugrundeliegenden Produktionssystems durch die Generierung und Analyse potentieller Ablaufpläne. Für das sich daraus ergebende Flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem (FJSSP) werden durch ein heuristisches Suchverfahren potentielle Lösungen bestimmt, die sich auf das zugrundeliegende Simulationsmodell auswirken. Durch eine anschließende Simulation werden die Optimierungsergebnisse in einen zeitlichen Kontext gebracht und anschließend bewertet. Anhand der daraus resultierenden Ablaufpläne wird entschieden, ob die betrachteten Aufträge fristgerecht erfüllt werden, so dass sich Rückschlüsse auf das originale Produktionssystem ziehen lassen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Symbolverzeichnis.....	x
1 Einleitung.....	12
2 Grundlagen.....	14
2.1 Wandlungsfähige Produktionssysteme	15
2.1.1 Definition Produktionssystem.....	15
2.1.2 Die Ausgangslage	16
2.1.3 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen	17
2.1.4 Folgen des Wandels	18
2.2 Produktionsplanung und –steuerung.....	18
2.2.1 Definition Produktionsplanung und –steuerung	18
2.2.2 Aufgaben und Ziele der Produktionsplanung und –steuerung.....	19
2.2.3 Operative Produktionsplanung und –steuerung	20
2.2.4 Termin- und Kapazitätsplanung.....	22
2.3 Operations Research	22
2.3.1 Aufgaben und Ziele des Operations Research	23
2.3.2 Teilgebiete des Operations Research	23
2.3.3 Optimierung im Kontext der Produktionsplanung.....	26
2.4 Scheduling im Kontext von Produktion und Logistik	26
2.4.1 Definition Scheduling	27
2.4.2 Aufgaben und Ziele des Scheduling in der Produktionsplanung.....	27
2.4.3 Modell eines Maschinenbelegungsproblems	28

2.4.3.1	Grundlegende Restriktionen	29
2.4.3.2	Aufträge	31
2.4.3.3	Maschinen	32
2.4.3.4	Weiterführende Restriktionen	33
2.4.4	Varianten eines Scheduling-Problems	35
2.4.5	(Flexibles-)Job-Shop-Scheduling	37
2.5	Optimierungsmethoden im Kontext der Ablaufplanung	39
2.5.1	Simulated Annealing	39
2.5.2	Tabu-Search	40
2.5.3	Genetische Algorithmen	40
2.5.4	Partikel-Schwarm-Optimierung	41
2.5.5	Ameisenalgorithmus	42
2.5.6	Bienenalgorithmus	42
2.6	Simulation als Planungsunterstützung in der Produktion und Logistik	44
2.6.1	Definition System	44
2.6.2	Definition Modellierung	45
2.6.3	Definition Simulation	45
2.6.4	Begrifflichkeiten der Simulation	46
2.6.5	Klassifikation von Systemen und Simulationsmethoden	51
3	Simulationsgestützte Optimierung zur Ablaufplanbestimmung einer Werkstattfertigung	53
3.1	Einleitung	54
3.2	Ausgangssituation und Zielsetzung	54
3.3	Annahmen und Vereinfachungen	55
3.4	Optimierungsaufgabe	56
3.4.1	Optimierungsziel	57
3.4.2	Zusammenhänge	57
3.4.2.1	Eingangsgrößen	57

3.4.2.2	Stellgrößen	58
3.4.2.3	Zielgrößen	59
3.5	Optimierungsansatz	60
3.6	Vorgehensweise	62
3.7	Systemarchitektur und –abgrenzung.....	63
3.8	Einbindung der simulationsgestützten Optimierung.....	64
3.8.1	Einbindung des simulationsbasierten Optimierungssystems in den operativen Planungsprozess	64
3.8.2	Methode zur Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells	65
4	Entwicklung der Struktur des Simulationsmodells.....	66
4.1	Aufbaustruktur des Modells.....	66
4.1.1	Betriebsmittel.....	67
4.1.2	Personal.....	68
4.1.3	Arbeitsschritt.....	68
4.1.4	Auftrag	69
4.1.5	Fabrikmodell	69
4.2	Ablaufstruktur des Modells	70
4.2.1	Quelle.....	70
4.2.2	Ereignisse & Aktivitäten.....	71
4.2.2.1	Verteile-Ereignis	71
4.2.2.2	Ankunft-Ereignis	73
4.2.2.3	Prüfe-Ereignis	74
4.2.2.4	Bearbeitung	75
4.2.2.5	Entlade-Ereignis.....	76
4.2.3	Senke.....	78
5	Heuristischer Suchalgorithmus zur Lösung des Flexiblen-Job-Shop-Scheduling-Problems	81

5.1	Aufgabe der Optimierung	81
5.2	Anforderungen, Bewertung und Auswahl einer Optimierungsmethode	81
5.3	Ablauf der Optimierungsmethode	82
5.3.1	Ablauf zur Generierung einer initialen Lösung des Flexiblen-Job-shop-Scheduling-Problems	82
5.3.2	Heuristische Suche.....	85
6	Simulation.....	88
6.1	Durchführung eines Simulationslaufs.....	88
6.2	Simulationsauswertung und Ausgabe.....	89
7	Durchführung und Analyse eines exemplarischen Planungslaufs	90
8	Zusammenfassung und Ausblick	93
9	Literatur	95
Anhang	101
	Anleitung Programm.....	101
	Für das Experiment verwendeter Datensatz	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich zwischen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität [7]	17
Abbildung 2: Teilgebiete der operativen Produktionsplanung und –steuerung [24].	20
Abbildung 3: Typisches Vorgehensmodell des Operations Research [31].	24
Abbildung 4: Grafische Darstellung der Grundbegriffe zur Systemdefinition	44
Abbildung 5: Übersicht über die Systemklassifikationen nach Cassandras und Lafortune [55].	52
Abbildung 6: Graphischer Ansatz zur Einplanung zusätzlicher Aufträge nach Rabe und Deininger [12]... ..	55
Abbildung 7: Simulation zur Überprüfung und Bewertung der Optimierungsergebnisse [22]	59
Abbildung 8: Einordnung der Eingangs-, Stell- und Zielgrößen in das simulationsgestützte Optimierungssystem	60
Abbildung 9: Übersicht über den Optimierungsansatz der simulationsgestützten Optimierung	61
Abbildung 10: Abbildung des zugrundeliegenden relationalen Datenbankmodells	63
Abbildung 11: Systemarchitektur und -abgrenzung	64
Abbildung 12: Einordnung der simulationsgestützten Optimierung in die Methodik von Rabe und Deininger [12].	66
Abbildung 13: Klassendiagramm im Kontext der Aufbaustruktur des Fabrikmodells.....	70
Abbildung 14: Programmablaufplan des Ereignisses Verteile	72
Abbildung 15: Programmablaufplan des Ereignisses Ankunft.....	73
Abbildung 16: Programmablaufplan des Ereignisses Prüfe	75
Abbildung 17: Programmablaufplan der Aktivität Bearbeitung	77
Abbildung 18: Programmablaufplan des Ereignisses Entlade	79
Abbildung 19: Aufbau- und Ablaufstruktur des Simulationsmodells	80
Abbildung 20: Einordnung des Ablaufs der Optimierung in den Kontext der simulationsbasierten Optimierung	87
Abbildung 21: Konzept der ereignisdiskreten Simulationsdurchführung	89
Abbildung 22: Exemplarischer Verlauf der Eignung über die Anzahl gefundener Lösungen	91
Abbildung 23: Übersicht über die Fertigstellungszeitpunkte und eingehaltenen -fristen einer exemplarischen Lösung.....	92
Abbildung 24: Auftragsfeine Ablaufplanung für Auftrag 8 eines beispielhaften Planungslaufs.....	92
Abbildung 25: Auftragsfeine Ablaufplanung für Personal 5 eines beispielhaften Planungslaufs	93
Abbildung 26: Bedienoberfläche des simulationsbasierten Optimierungssystems	101
Abbildung 27: Anlagentabelle.....	102
Abbildung 28: Relation zwischen Anlage und Rüstzustand	102
Abbildung 29: Rüstzustandstabelle.....	103
Abbildung 30: Umrüststabelle	103
Abbildung 31: Qualifikationstabelle	104

<i>Abbildung 32: Auftragstabelle</i>	105
<i>Abbildung 33: Arbeitsschritttabelle</i>	105
<i>Abbildung 34: Personaltabelle</i>	106
<i>Abbildung 35: Qualifikationstabelle des Personals</i>	106

Abkürzungsverzeichnis

- bzw. beziehungsweise
et al. und andere
vgl. vergleiche
vs. versus, ‚gegenübergestellt‘
d.h. das heißt

Symbolverzeichnis

Symbol	Zugehörigkeit	Beschreibung und Informationen
S	Belegungsproblem	Menge aller Lösungen des zugrundeliegenden Belegungsproblems.
$f(s)$	Belegungsproblem	Zielfunktion des Belegungsproblems, nach der die Eignung etwaiger Lösungen hin beurteilt werden.
s^{opt}	Belegungsproblem	Optimale Lösung des zugrundeliegenden Belegungsproblems.
J	Auftrag	Menge aller Aufträge.
J_i	Auftrag	Auftrag i .
n	Auftrag	Anzahl an Aufträgen.
o_i	Auftrag	Anzahl an Arbeitsschritte eines Auftrags.
C_i	Auftrag	Fertigstellungszeitpunkt des Auftrags i .
St_i	Auftrag	Anfangszeitpunkt des Auftrags i .
r_i	Auftrag	Allgemeiner Freigabezeitpunkt des Auftrags i .
O	Arbeitsschritt	Menge aller Arbeitsschritte
O_k	Arbeitsschritt	Arbeitsschritt k .
$O_{i,k}$	Arbeitsschritt	Arbeitsschritt k des Auftrags i .
Z_k	Arbeitsschritt	Bearbeitungszeitraum des Arbeitsschritts O_k . Wird definiert durch den Start- und Fertigstellungszeitpunkt des Arbeitsschritts.
t_k^s	Arbeitsschritt	Startzeitpunkt des Arbeitsschritts O_k
t_k^e	Arbeitsschritt	Fertigstellungszeitpunkt des Arbeitsschritts O_k
p_k	Arbeitsschritt	Bearbeitungsdauer des Arbeitsschritts O_k , auch Prozesszeit genannt. Ergibt sich aus der Differenz zwischen Fertigstellungs- und Startzeitpunkt.
r_k	Arbeitsschritt	Freigabezeitpunkt des Arbeitsschritts O_k . Gibt den frühestmöglichen Beginn der Bearbeitung an.
t_0	Arbeitsschritt	Allgemeiner Freigabezeitpunkt für alle Arbeitsschritte aus O .
d_k	Arbeitsschritt	Fälligkeitszeitpunkt des Arbeitsschritts O_k . Gibt die spätestmöglichen Fertigstellungszeitpunkt des Arbeitsschrittes an, um die Bearbeitung fristgerecht abzuschließen.
$p_k(M)$	Arbeitsschritt	Von der zugewiesenen Maschine abhängige Bearbeitungszeit des Arbeitsschritts O_k .
M	Maschine	Menge der Maschinen (Maschinenpark).
m	Maschine	Anzahl an Maschinen.
M_l	Maschine	Maschine l .

$\mu(O_{i,k})$	Maschine	Die dem Arbeitsschritt k des Auftrags i zugeordnete Maschine.
----------------	----------	---

1 Einleitung

Eine ökonomische Produktion am Standort Deutschland ist zu einer anspruchsvollen Herausforderung geworden. Dies wird nicht zuletzt dadurch bedingt, dass Unternehmen der industriellen Fertigung einem immer turbulenter werdenden Umfeld ausgesetzt sind. Gründe für diese Turbulenzen sind beispielsweise eine Individualisierung der Kundennachfrage, sowie eine zunehmende Globalisierung und Dynamik der Märkte [1–5]. Dies hat eine abnehmende Vorhersagbarkeit zukünftiger Absatzmengen eines Produkts und eine reduzierte Planbarkeit der Produktion zur Folge. Die effiziente Anpassung der Produktion an die sich stetig verändernden Anforderungen wird somit ein immer entscheidender werdendes Wettbewerbskriterium [1, 6, 7].

Um den damit einhergehenden Herausforderungen zu begegnen, reagieren Unternehmen mit einer Erweiterung des Produktspektrums, einer Verkürzung der Produktlebenszyklen und einer erhöhten Flexibilität der Produktionskette [1, 2, 5, 6, 8]. Folglich müssen immer häufiger neue Produkte in die bereits bestehenden Produktionssysteme integriert werden, was zu einer Steigerung der Planungskomplexität und zu spezifischen Anforderungen an die mittelfristige Fabrikplanung führt. Um der steigenden Komplexität und der erhöhten Frequenz an Planungsaufgaben zu begegnen, werden zunehmend Möglichkeiten für den Einsatz digitaler Werkzeuge – unter dem Begriff der „Digitalen Fabrik“ zusammengefasst – diskutiert, die den Planer bei der Entscheidungsfindung unterstützen sollen [9, 10]. Als eine nützliche Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung und –steuerung hat sich die Simulation etabliert, die zum Teil einen erheblichen Beitrag zur Entscheidungsfindung liefern kann [10]. Obwohl das Potential von Hilfsmittel, die sich im Kontext der aufgezeigten Problemstellung zunehmend zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor entwickeln, erkannt wurde, fehlt es an ganzheitlichen Ansätzen in diesem Bereich.

Um diesem Problem zu begegnen, wird an der Technischen Universität Dortmund am Fachgebiet IT in Produktion und Logistik der Fakultät Maschinenbau, unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe und Dipl.-Geoinf. Maik Deininger, an einem Vorgehen der Fabrikplanung geforscht. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Methodik zur Fabrikplanung und Entscheidungsunterstützung bei der Produktionsplanung und -steuerung, durch Simulation und Optimierung. Das System analysiert die Auswirkungen kurzfristiger Anpassungen der Produktion und generiert

daraufhin nahezu optimale Ablaufpläne oder Vorschläge für etwaige Anpassungen des Produktionssystems. Die Ablaufpläne sollen dem Fabrikplaner als Entscheidungsunterstützung dienen und werden im Hinblick auf die Liefertreue optimiert. Dieses Zielkriterium gilt gemeinhin als eines der Hauptmerkmale der Kundenzufriedenheit [11].

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in das obige Projekt ein und erweitert einen vorliegenden graphischen Ansatz zur Repräsentation eines wandlungsfähigen Produktionssystems [12] um eine computergestützte Darstellung. Der Schwerpunkt der Ausarbeitung liegt in der Entwicklung eines passenden Simulationsmodells, welches die wesentlichen Komponenten des zugrundeliegenden Produktionssystems abbildet. Zur Abbildung des Produktionssystems dient als Ansatz die objektorientierten Modellierung. Die das zugrundeliegende Produktionssystem definierenden wesentlichen Informationen werden aus einer Datenbank geladen und dienen als Grundlage der Modellierung. Für die Repräsentation des Produktionssystems werden für die Komponenten Maschine, Personal, Auftrag und Arbeitsschritt Fabrikmodule entwickelt, die in Form von Klassen zur Verfügung gestellt werden. Für jede konkrete Instanz einer Komponente wird ein Objekt erstellt. Die Wirkzusammenhänge zwischen den Objekten werden durch Ereignisse und Aktivitäten abgebildet. Das so entwickelte Simulationsmodell dient als Grundlage für eine automatische Analyse und Auswertung durch ein simulationsgestütztes Optimierungssystem.

Betrachtet wird eine Werkstattfertigung mit Parallelfertigung. Das sich daraus ergebende Flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem wird durch ein heuristisches Suchverfahren, basierend auf dem Konzept der lokalen Suche, gelöst. Die Auswirkungen kurzfristiger Änderungen des Produktionsprogramms oder -systems, beispielsweise durch die Annahme eines neuen Auftrags oder durch eine Veränderung der zur Verfügung stehenden Ressourcen, lassen sich durch das Optimierungssystem analysieren. Die Heuristik generiert, basierend auf dem zugrundeliegenden Simulationsmodell, eine Zuordnung und Reihenfolge von Aufträgen zu Betriebsmitteln und eine Zuordnung von Personal zu Arbeitsschritten, die zur Auswertung an die Simulation übergeben werden.

Die sich an die Optimierung anschließende Simulation analysiert die Optimierungsergebnisse, indem auf Grundlage des Simulationsmodells und den Optimierungsergebnissen das Systemverhalten simuliert wird. Ferner werden die

Optimierungsergebnisse durch die Simulation bewertet, auf Grund dessen weitere Lösungen ermittelt werden. Für jede durch die Optimierung ermittelte Belegung wird ein Simulationslauf durchgeführt. Die jeweiligen Simulationsergebnisse lassen Rückschlüsse auf das originale Produktionssystem zu.

Ziel des Systems ist die Generierung von Ablaufplänen mit möglichst hoher Liefertreue, so dass eine optimale Zuordnung und Sequenz der Fertigungsaufträge zu den Betriebsmitteln, sowie optimale Schichtpläne bestimmt werden können. Auf Basis der Ablaufpläne lässt sich entscheiden ob die betrachteten Aufträge fristgerecht fertiggestellt werden und eine Bewertung des zugrundeliegenden Produktionssystems vornehmen. Das Verfahren schlägt verschiedene Ablaufpläne vor, die für den menschlichen Entscheider als Entscheidungsgrundlage dienen können. In der betrachteten Literatur wurden die Auswirkungen von kurzfristigen Veränderungen der zur Verfügung stehenden Ressourcen auf das Produktionssystem, sowie die simultane Bestimmung optimaler Schichtpläne kaum untersucht, so dass die vorliegende Arbeit eine Erweiterung des aktuellen Forschungsstandes darstellt.

Die Verifikation der Funktionalität und Korrektheit des simulationsgestützten Optimierungssystems wird Anhand eines beispielhaften Planungslaufs dargestellt.

Der Aufbau der Arbeit beginnt mit den Grundlagen (vgl. Kapitel 2). Der konzeptionelle Ablauf der simulationsgestützten Optimierung erfolgt im Kapitel 3. Eine detaillierte Betrachtung der wesentlichen Komponenten des Optimierungssystems wird in den darauffolgenden Kapiteln vorgestellt. Im Kapitel 4 wird die Entwicklung des Simulationsmodells analysiert. Anschließend wird das heuristische Suchverfahren zur Lösung des Flexiblen-Job-Shop-Scheduling-Problems dargestellt (vgl. Kapitel 5). Ferner wird im Kapitel 6 die Simulationsdurchführung und –auswertung betrachtet. Eine Zusammenfassung und der Ausblick erfolgen im Kapitel 8.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis des weiteren Verlaufs der schriftlichen Ausarbeitung notwendigen Grundlagen vorgestellt. In Unterkapitel 2.1 wird die allgemeine Ausgangslage, sowie das Prinzip der Wandlungsfähigkeit im Kontext heutiger Produktionssysteme dargestellt. Anschließend erfolgt in Unterkapitel 2.2 eine Beschreibung der Produktionsplanung und –steuerung im Bezug zur

Zielsetzung dieser Ausarbeitung (vgl. Kapitel 1) und der Problematik aus Unterkapitel 2.1. In Unterkapitel 2.3 wird das Operations Research, als Wissensbereich zur Lösung komplexer Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit der Produktionsplanung und -steuerung betrachtet. Die aus den vorherigen Unterkapiteln und Kapitel 1 erarbeitete Problemstellung wird anschließend detailliert untersucht, indem in Unterkapitel 2.4 das Prinzip der Ablaufplanung im Kontext der Produktion und Logistik betrachtet, sowie in Unterkapitel 2.5 mögliche Optimierungsmethoden zur Lösung der Problemstellung vorgestellt werden. Zum Schluss dieses Grundlagenkapitels wird in Unterkapitel 2.6 die Simulation als Methodik zur Abbildung von Systemkomponenten und deren Wirkzusammenhänge, sowie zum Nachbilden und Analysieren des Systemverhaltens betrachtet.

2.1 Wandlungsfähige Produktionssysteme

In diesem Unterkapitel wird das Konzept wandlungsfähiger Produktionssysteme vorgestellt. Im Abschnitt 2.1.1 wird zunächst die Definition des Produktionssystems vorgestellt. Um anschließend die aktuelle Situation der Produktionssysteme darzustellen, wird im Abschnitt 2.1.2 die Ausgangslage der deutschen Industrie betrachtet, die zunehmenden Markturbulenzen und Unvorhersehbarkeiten ausgesetzt ist. Die Produktionssysteme begegnen diesen Problemen mit den Konzepten der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit, die in Abschnitt 2.1.3 detailliert vorgestellt werden. Anschließend werden in Abschnitt 2.1.4 die Folgen des Wandels und die damit einhergehenden Herausforderungen aufgezeigt.

2.1.1 Definition Produktionssystem

Ein Produktionssystem ist ein soziotechnisches System, welches durch das Zusammenwirken von Organisation, Methoden, Menschen und technischen Ressourcen charakterisiert wird. In einem Produktionssystem wird Input (bspw. Know-how, Material oder Energie) in wertschöpfenden (Fertigung oder Montage) und assoziierten Prozessen (Transport) zu Output (bspw. Produkte) umgewandelt [6]. Ein Produktionssystem kann durch unterschiedliche Produktionsebenen charakterisiert werden, die hierarchisch aufeinander aufbauen. Auf unterster Ebene befinden sich die sogenannten Maschinen- oder Submodule, die zusammen eine Maschine bilden.

Mehrere Maschinen lassen sich zu einer Arbeitsstation zusammenfügen. Ein Montage- oder Fertigungsbereich wird durch eine Menge von Arbeitsstationen gebildet. Eine Menge von Arbeitsbereichen bildet eine Fabrik, die wiederum mit anderen Fabriken zu Netzwerken zusammengefasst werden [1]. Ziel eines Produktionssystems ist die Herstellung von End- oder Zwischenprodukten, in der verlangten Menge, mit der vereinbarten Qualität und zum vereinbarten Zeitpunkt [2].

2.1.2 Die Ausgangslage

Das produzierende Gewerbe in Deutschland hat nach wie vor eine herausragende Stellung und einen großen Anteil an dem wirtschaftlichen Erfolg Deutschlands. Die Bruttowertschöpfung der fertigen Industrie lag 2012 bei 728,26 Milliarden Euro [13] und hatte somit einen Anteil von 30,5% am gesamten Bruttoinlandsprodukt [14]. Die Ausfuhren der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2012 summierten sich auf 1.096 Milliarden Euro [15], wobei der Auslandsumsatz des produzierenden Gewerbes ca. 768 Milliarden Euro betrug [16].

Die hervorragende Stellung der deutschen Industrie im internationalen Wettbewerb hat sich in den vergangenen Jahren trotz Turbulenzen, wie beispielsweise der Wirtschaftskrise 2008 und wandelnder Marktbedingungen, behauptet. Dieser zunehmende Wandel wird charakterisiert durch die Globalisierung und Dynamik der Märkte, sowie eine steigende Individualisierung der Kundennachfragen. Hinzu kommt die schnelle Ausbreitung neuer Technologien, offensiver Wettbewerber und eine immer dichtere Vernetzung der einzelnen Warenströme [1, 4, 5]. Infolgedessen wird der Markt immer unvorhersehbarer und Absatzmengen sind schwieriger vorherzusagen, was eine abnehmende Planbarkeit der mittel- und langfristigen Produktion zur Folge hat [1]. Gleichzeitig bleiben die hohen Anforderungen der Kunden nach kurzen Lieferzeiten und hoher Liefertreue erhalten [3].

Die betroffenen Unternehmen reagieren auf diese Turbulenzen mit einer erhöhten Flexibilität der Produktionskette und einem kostspieligen Bevorratungsniveau, um Schwankungen innerhalb der Nachfrage auszugleichen [5]. Zudem werden neue Produkte in immer kürzer werdenden Abständen dem Produktspektrum hinzugefügt und der Produktlebenszyklus stetig verkürzt [1, 2]. Ein weiterer Aspekt ist die verstärkte Auslagerung von Fertigungs- und Montagetätigkeiten an externe Partner, die sogenannte verlängerte Werkbank [3].

Bei den aufgezeigten Lösungen handelt es sich grundsätzlich um reaktive Maßnahmen, die zum einen mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden sind und zum anderen nur bedingt die erforderlichen Anpassungsmöglichkeiten bieten [5].

Um diesem Problem zu begegnen und die herausragende Stellung der deutschen Industrie zu behaupten, gewinnt die proaktive Anpassung der Produktionssysteme an die sich stetig ändernden Anforderungen des Markts – zusammengefasst unter dem Begriff der wandlungsfähigen Produktionssysteme – immer mehr an Bedeutung [5].

2.1.3 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen

Um sich den stetig ändernden Marktanforderungen und Turbulenzen anzupassen, reagieren die Unternehmen mit einer Flexibilität der Produktionskette [7]. Die Flexibilität beschreibt eine reaktive Fähigkeit des Produktionssystems, eine Anpassung in einem vordefinierten Bereich durchzuführen, die sich aus der Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen ergibt [17, 18], wie beispielsweise einer kurzfristigen Erhöhung der Produktionskapazitäten.

Um jedoch langfristig und nachhaltig wettbewerbsfähig zu bleiben, bedarf es einer proaktiven Anpassungsfähigkeit der Produktionssysteme – die Wandlungsfähigkeit – mit der sich strukturelle Anpassungen des Produktionssystems schnell und effizient (ohne hohen finanziellen oder zeitlichen Aufwand) auch außerhalb zuvor festgelegter Korridore realisieren lassen [6] (vgl. Abbildung 1).

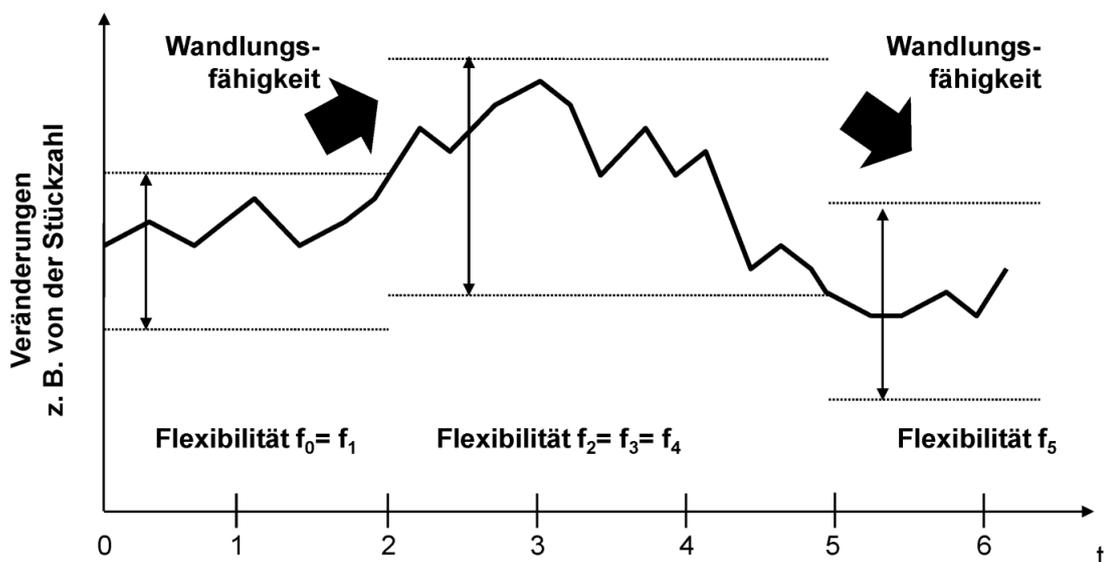


Abbildung 1: Vergleich zwischen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität [7]

Ein in diesem Sinne ideales Produktionssystem besitzt eine optimale Balance zwischen einer maximalen und einer notwendigen Wandlungsfähigkeit, um auf die Turbulenzen zu reagieren, die auf das System wirken. Entsprechend verfügt das Produktionssystem nur in den Arbeitsbereichen über Wandlungsfähigkeit, in denen später tatsächlich Anpassungen notwendig werden [1].

2.1.4 Folgen des Wandels

Als Folge der immer häufiger auftretenden Anpassungen des Produktionssystems an die sich ändernden Marktbedingungen müssen zunehmend neue Produkte in die bereits bestehenden Produktionssysteme integriert werden. Änderungen der Auftragsdaten können in gleicher Weise auftreten wie Modifikationen in den Bereichen Ressource oder Organisation. Daraus ergibt sich eine erhöhte Komplexität und zusätzliche Anforderungen an die mittelfristige Fabrikplanung [12, 19, 20]. Es bedarf geeigneter Methoden für die Einplanung neuer Aufträge, die Anschaffung neuer Ressourcen oder die Anpassung der Organisationsstruktur. Infolgedessen gewinnt der Planungsprozess immer mehr an Bedeutung, da er einen signifikanten Beitrag zur Einhaltung von Lieferzeiten und Terminen hat [4].

2.2 Produktionsplanung und –steuerung

In diesem Unterkapitel wird die Produktionsplanung und –steuerung vorgestellt, zu deren Aufgabe die Planung und Steuerung der Auftragsabwicklung innerhalb des Produktionssystems gehört. Zunächst erfolgen in Abschnitt 2.2.1 eine Definition und in Abschnitt 2.2.2 eine Beschreibung der Aufgaben und Ziele der Produktionsplanung und -steuerung. Anschließend wird in Abschnitt 2.2.3 der Teilbereich der operativen Produktionsplanung und –steuerung genauer betrachtet. Die Termin- und Kapazitätsplanung, als Teil der operativen Produktionsplanung, wird in Abschnitt 2.2.4 detailliert aufgezeigt.

2.2.1 Definition Produktionsplanung und –steuerung

Die Definition der Produktionsplanung und –steuerung (PPS) wurde mit der Zeit, den sich immer wieder ändernden Gegebenheiten neu angepasst, so dass eine Vielzahl von Bedeutungen in der Literatur zu finden ist. Nach heutiger Sicht beinhaltet die

Produktionsplanung und -steuerung den kompletten technischen Prozess der Auftragsabwicklung, beginnend mit der Angebotsbearbeitung bis hin zum Versand des Produkts und umfasst somit die betrieblichen Aufgabenbereiche Konstruktion, Vertrieb, Einkauf, Fertigung, Montage und Versand [21].

2.2.2 Aufgaben und Ziele der Produktionsplanung und –steuerung

Betrachtet man den Aufgabenbereich und die Ziele der Produktionsplanung und –steuerung, so sind zunächst die Ebenen der strategischen, taktischen und operativen Produktionsplanung zu unterscheiden. Die folgende Darstellung der einzelnen Ebenen der PPS richten sich, falls nicht explizit anders angegeben, nach März et al. [22].

In der strategischen Produktionsplanung werden langfristige Entscheidungen der Unternehmensplanung getroffen, wie beispielsweise die Ausrichtung des Produkt- und Produktionskonzepts. Ziel der strategischen Produktionsplanung ist das Erreichen bzw. Behaupten einer wettbewerbsfähigen Stellung im Markt.

Die strategisch getroffenen Entscheidungen werden in der taktischen Produktionsplanung in konkrete Konzepte, Projekte oder Pläne der entsprechenden Produktionssysteme umgesetzt. Entscheidungen bzgl. neuer Produkte oder Verfahren werden in der taktischen Produktionsplanung ebenso getroffen, wie die Festlegung notwendiger Kapazitäten.

Der optimale Einsatz vorhandener Kapazitäten, wie beispielsweise Personal, Produktionsmittel oder Produktionsorganisation, wird auf der Ebene der operativen Produktionsplanung ermittelt.

Die zentrale Aufgabe der Produktionsplanung ist das Bestimmen eines wirtschaftlichen Produktionsprogramms zur Leistungserstellung. Das Produktionsprogramm beinhaltet die für die jeweilige Planungsperiode benötigte Art und Menge der Erzeugnisse, sowie deren räumliche und zeitliche Zuordnung.

Der Produktionssteuerung obliegt die Umsetzung der Planungsergebnisse, unter Einhaltung vorgegebener Restriktionen, wie beispielsweise Zeit-, Kosten- oder Qualitätsanforderungen. Dieser Vorgang beinhaltet alle erforderlichen Maßnahmen zur Einhaltung und bei Planabweichung (Störung) die Wiederherstellung der Planmäßigkeit [23].

2.2.3 Operative Produktionsplanung und –steuerung

Aufgabe der operativen Produktionsplanung und –steuerung ist eine termingerechte Einordnung vorhandener und prognostizierter Kunden- und Lageraufträge in den Produktionsplan [23]. Die vom Produktionssystem durchzuführenden Produktionsaufgaben sind nach Sortiment, Menge und Werteinheit zu bestimmen und auf die einzelnen Teilsysteme wie beispielsweise Fertigungsbereiche und –abschnitte aufzuteilen [9].

Die operative Produktionsplanung lässt sich, abhängig von der betrachteten zeitlichen Ausrichtung, in die unterschiedlichen Kategorien der langfristigen, mittelfristigen und kurzfristigen Produktionsplanung einteilen. Ein grafischer Überblick über die Teilgebiete der operativen Produktionsplanung und –steuerung und deren Funktionen erfolgt in der folgenden Abbildung 2.

Teilgebiete der PPS	Hauptfunktionen der PPS	Funktionen der PPS	
Produktionsplanung	Produktionsprogrammplanung	Prognoserechnung, Grobplanung, Kundenauftragsverwaltung, Vorlaufsteuerung	
	Mengenplanung	Bedarfsermittlung, Bestandsführung, Beschaffungsrechnung	
	Termin- und Kapazitätsplanung	Fertigungsaufträge	Bestellaufträge
Produktionssteuerung	Auftragsveranlassung	Durchlaufterminierung Kapazitätsbedarfsrechnung Kapazitätsabstimmung Reihenfolgeplanung	
		Fertigungsauftragsfreigabe Fertigungsbelegerstellung Arbeitsverteilung	Bestellauftragsfreigabe Bestellschreibung
	Auftragsüberwachung	Fertigungsfortschrittterfassung Kapazitätsgruppenüberwachung Fertigungsauftragsüberwachung Kundenauftragsüberwachung	Wareneingangserfassung Bestellauftragsüberwachung

Abbildung 2: Teilgebiete der operativen Produktionsplanung und –steuerung [24].

Im Rahmen der langfristigen Produktionsplanung, auch Grobplanung genannt [25], wird unter Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten ein Produktionsprogramm erstellt.

Basis des Produktionsprogramms sind Absatzprognosen, sowie vorliegende Kunden- oder Lageraufträge [2, 9].

In der mittelfristigen Produktionsplanung, auch Feinplanung genannt [25], werden die Aufträge des Produktionsprogramms den Komponenten Eigenaufträge und Fremdaufträge zugeordnet. Die Unterteilung erfolgt unter Berücksichtigung der Bestände nach Art, Menge und Termin. Des Weiteren erfolgt eine Planung des zeitlichen Durchlaufs der einzelnen Aufträge, die sogenannte Terminplanung. Auf Basis der Terminplanung erfolgt die Kapazitätsplanung, eine Bestimmung der Belastung für Maschinen- und Personalkapazitäten. Gegebenenfalls werden Anpassungen an den eingeplanten Kapazitäten oder der zeitlichen Einordnung vorgenommen. Abschließend erfolgt auf der Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung eine zeitliche Zuordnung der einzelnen Aufträge auf die zur Verfügung stehenden Maschinen, die sogenannte Reihenfolgeplanung [2, 9].

Auf der Ebene der kurzfristigen Produktionsplanung, der sogenannten Shopfloorebene [25], befindet sich die Freigabe der Eigen- und Fremdaufträge. Vor Produktionsbeginn werden die Voraussetzungen zur Durchführung der Produktion, wie beispielsweise der ordnungsgemäße Zustand der zugeordneten Betriebsmittel und die Bereitstellung des benötigten Materials, geprüft. Nachdem die Arbeitsverteilung auf die einzelnen Arbeitsplätze durchgeführt und die Produktion gestartet wurde, erfolgt eine Auftragsüberwachung für den laufenden Betrieb [2].

Die operative Produktionssteuerung konkretisiert und setzt die von der operativen Produktionsplanung gegebenen Vorgaben um. Somit wird das Zusammenwirken der beteiligten Prozesselemente Arbeitsgegenstand, Arbeitsmittel und Arbeitskraft, unter Einhaltung aller Restriktionen, koordiniert. Außerdem sind die Einhaltung der Prozessvoraussetzungen, sowie die Behebung von Prozessstörungen, Teil der operativen Produktionssteuerung [9].

Ziele der operativen Produktionsplanung und -steuerung sind die Einhaltung einer hohen Termin- und Mengentreue, eine möglichst konstante Beschäftigung bei hoher Kapazitätsauslastung, sowie kurze Durchlaufzeiten. Zudem werden niedrige Lager- und Werkstattbestände, eine minimale Kostenbindung, sowie eine allgemeine Kostenminimierung angestrebt [2, 9].

2.2.4 Termin- und Kapazitätsplanung

Ein wichtiger Aspekt der operativen Produktionsplanung und –steuerung ist die Termin- und Kapazitätsplanung. Als produktionsnahe Planungsebene kommt diesem Arbeitsbereich eine entscheidende Bedeutung zu [26].

Teil der Kapazitätsplanung ist die Bestimmung der benötigten Betriebsmittel und des Personalbedarfs. Zudem ist die Machbarkeit der Ausführung aller Aufträge sicherzustellen und eine Belastungsrechnung der einzelnen Ressourcen aufzustellen. Differenzen zwischen dem Belastungs- und dem Kapazitätsprofil der jeweiligen Kapazitätseinheiten sind bei Bedarf anzupassen, beispielsweise durch Kurzarbeit oder Überstunden [2, 9].

Aufgabe der Terminplanung ist die Planung und Bereitstellung von Ablaufplänen. Ablaufpläne beinhalten den ermittelten Ressourcenbedarf und die mit der Bearbeitung der Aufträge einhergehende zeitliche Abfolge von Aktivitäten [27, 28]. Jedem Auftrag wird ein Startzeitpunkt und eine zeitliche Reihung der einzelnen Arbeitsschritte zugewiesen, so dass eine Zuordnung zwischen Auftrag und Ressource, über die gesamte Bearbeitungsdauer, eindeutig möglich ist [2, 9].

Ziel der Termin- und Kapazitätsplanung ist die Bereitstellung konkreter Arbeitsplan- und Betriebsmitteldaten, sowie Plandurchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge, beispielsweise in Form eines Maschinenbelegungsplans [9]. Ergebnis dieses Arbeitsfelds sind konkrete Instruktionen für die Produktion.

2.3 Operations Research

In diesem Unterkapitel wird der Bereich des Operations Research (OR) betrachtet, dem die Analyse komplexer betriebswirtschaftlicher Problemstellungen zugeordnet wird. Zu Beginn erfolgt die Definition des Operations Research. Anschließend werden die Aufgaben und Ziele (vgl. Abschnitt 2.3.1), sowie die wichtigsten Optimierungsmethoden des Operation Research vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.3.2). In Abschnitt 2.3.3 wird die Optimierung im Kontext der Produktionsplanung betrachtet.

Definition Operations Research

Operations Research (OR) ist ein Wissensbereich, der sich mit dem wissenschaftlichen Vorgehen der Analyse und Optimierung komplexer Problemstellungen und dem Einsatz von Modellen und Methoden, zur Entscheidungsunterstützung in Unternehmen und Organisationen beschäftigt [29–31].

2.3.1 Aufgaben und Ziele des Operations Research

Hauptaufgabe des Operations Research ist das Aufstellen von Optimierungsmodellen und das Lösen der Strukturen durch computergestützte Optimierungsmethoden [31]. Ein Optimierungsmodell ist eine formale Darstellung eines Entscheidungs- oder Planungsproblems [30] und besteht mindestens aus einer mathematischen Beschreibung des zu optimierenden Sachverhalts, die sogenannte Zielfunktion [32, 33]. Diese gilt es durch eine systematische Modifikation der eingehenden Parameter, den sogenannten Entscheidungsvariablen, zu minimieren oder maximieren, um so eine im mathematischen Sinn beste Lösung zu bestimmen [33]. Ferner beinhaltet ein Optimierungsmodell gegebenenfalls Nebenbedingungen, die bei der Lösungsfindung einzuhalten sind, die sogenannten Restriktionen [33]. Der Prozess, von der Erstellung der Zielfunktion bis hin zur Lösungsfindung und Bereitstellung der Ergebnisse, wird als Optimierung bezeichnet [32]. Ziel des Operations Research ist eine Entscheidungsunterstützung bei betriebswirtschaftlichen Problemstellungen, durch eine Bewertung der Optimierungsergebnisse und einer Analyse der sich daraus ergebenden Rückschlüsse auf das Ursprungssystem [31]. Ein typisches Vorgehensmodell des Operations Research ist in Abbildung 3 dargestellt.

2.3.2 Teilgebiete des Operations Research

Innerhalb des Operations Research existiert eine Vielzahl an Modellierungs- und Lösungsmethoden. Die folgende Darstellung der wichtigsten Technologien richtet sich nach Suhl und Mellouli [31].

Lineare Optimierung

Modellierungs- und Lösungsmethoden der linearen Optimierung, auch lineare Programmierung (LP) genannt, können dann eingesetzt werden, falls sowohl die

Zielfunktion, als auch die Restriktionen eines Optimierungsmodells aus einer Linearkombination der Entscheidungsvariablen bestehen [33]. Die Zielfunktion ist unter Berücksichtigung linearer Restriktionen zu optimieren. Lineare Optimierung wird häufig dann eingesetzt, wenn eine bestmögliche Verteilung von Operationen zu einer beschränkten Menge von Ressourcen zu bestimmen ist.

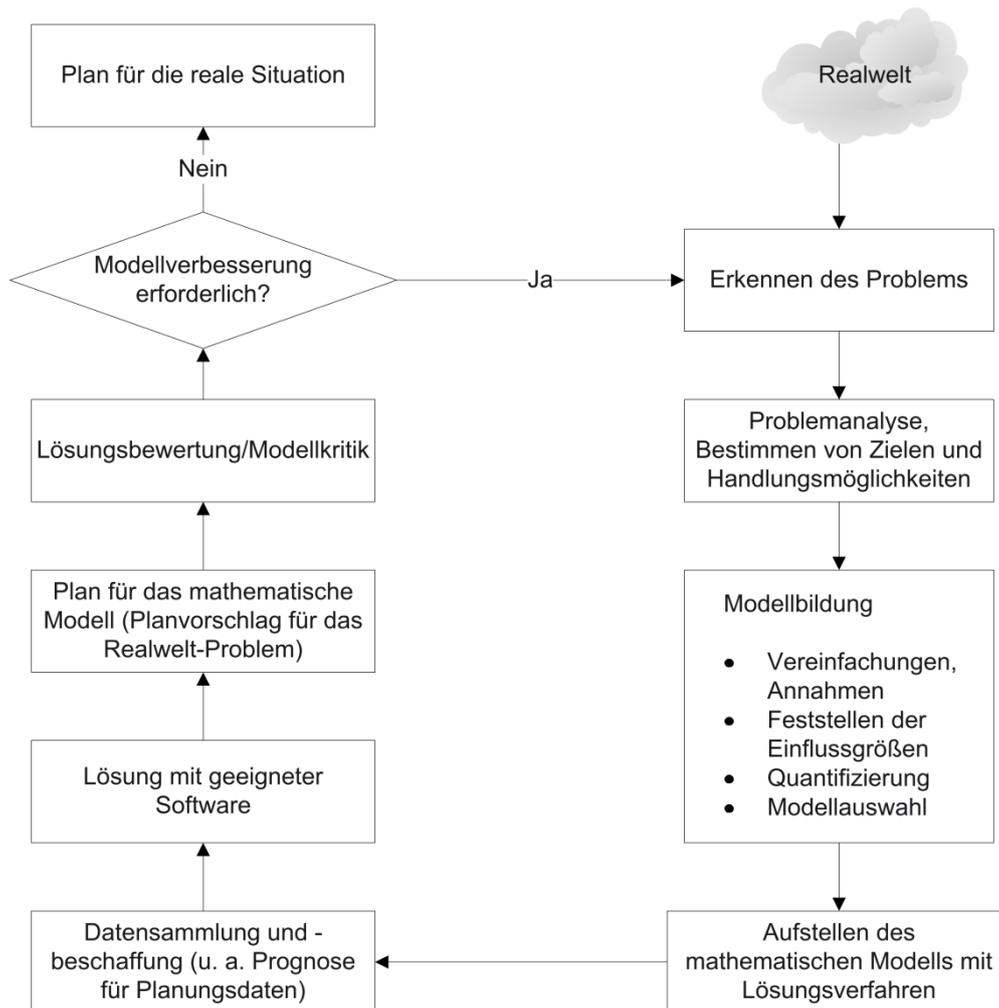


Abbildung 3: Typisches Vorgehensmodell des Operations Research [31].

Ganzzahlige Optimierung

Viele Optimierungsprobleme aus der Praxis lassen sich nur mit ganzzahligen Variablen sinnvoll lösen, da beispielsweise Ressourcen regelmäßig als nicht teilbar angesehen werden. Im Gegensatz zur linearen Optimierung besteht bei der ganzzahligen Optimierung grundsätzlich eine Ganzzahligkeitsbedingung der Variablen. Erfüllen nur

einige Variablen diese Bedingung, so spricht man von einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblem. Diese Optimierungsmodelle werden meist dann eingesetzt, wenn aus einer Menge diskreter Elemente eine Teilmenge zu bestimmen ist, die sowohl im Hinblick auf die Zielfunktion möglichst optimal ist, als auch gewisse Nebenbedingungen einhält.

Netzwerkoptimierung

Viele Systeme werden als Netzwerke konzipiert. Diese Netzwerke treten sowohl in physikalischer Form auf, wie beispielsweise Verkehrsnetze, Telekommunikationsnetze oder Versorgungsnetze, als auch in abstrakter Form, wie beispielsweise in der Projektplanung oder der Optimierung von Geschäftsprozessen. Aufgaben und Ziele der Netzwerkoptimierung sind beispielsweise die Optimierung des Gütertransports zwischen Produzent und Anwender oder die Bestimmung kürzester Wege innerhalb eines Netzes.

Nichtlineare Optimierung

Wenn zwei Zielgrößen im umgekehrten Verhältnis zueinander stehen und somit die Forderung nach Linearität der Restriktionen und Zielfunktion nicht erfüllt wird, kann das Problem nicht durch Methoden der linearen oder ganzzahligen Optimierung gelöst werden. In diesem Fall spricht man von einer nichtlinearen Optimierung, auch nichtlineare Programmierung (NLP) genannt.

Heuristische Verfahren

Heuristische Verfahren lassen sich auf ähnlich Problemstellungen anwenden, wie die zuvor aufgezeigten analytischen Optimierungsmethoden. Im Gegensatz zu den exakten Lösungsverfahren lässt sich für heuristische Lösungsverfahren weder garantieren, dass eine im mathematischen Sinn optimale Lösung gefunden wird, noch lässt sich bestimmen, wie weit eine gefundene Lösung vom Optimum entfernt ist. Heuristiken sind in der Regel problemspezifisch und nutzen Informationen über die Charakteristiken des zugrundeliegenden Problems, um die Suche nach einer Lösung zu optimieren.

Simulation

Im Operations Research versteht man unter Simulation ein Nachbilden realer Situationen durch die relevanten beteiligten Komponenten und deren Wirkzusammenhänge, zusammengefasst durch ein Modell. Ein solches Modell lässt sich auf dem Computer ausführen und analysieren. Im Gegensatz zu analytischen oder heuristischen Verfahren, lässt sich mit dem Konzept der Simulation eine Vielzahl von Szenarien und Systemkonfigurationen analysieren, um sich so einer optimalen Lösung zu nähern. Die Erkenntnisse aus der Simulationsdurchführung lassen Rückschlüsse auf das reale Ursprungssystem zu. Eine detaillierte Betrachtung der Simulation im Kontext der Produktion und Logistik erfolgt in Unterkapitel 2.6.

2.3.3 Optimierung im Kontext der Produktionsplanung

Ein Anwendungsgebiet der Optimierung ist die Produktionsplanung, in der regelmäßig komplexe Optimierungsprobleme zu lösen sind. Beispiele solcher Optimierungsprobleme treten sowohl im Bereich der Losgrößen-, Reihenfolge- und Maschinenbelegungsplanung auf, sowie bei der Personal- und Schichtplanung [27, 34, 35]. Ferner gilt es die durch den Transport der fertigen Produkte zum Abnehmer auftretenden Tourenplanungsprobleme zu lösen [31]. Die Anwendung von Optimierungsmethoden kann zu Verbesserungen in der Produktionsplanung führen, wie beispielsweise kürzere Durchlauf- und Lieferzeiten, geringere Lagerbestände und Transportkosten, sowie höhere Kapazitätsauslastungen [34].

2.4 Scheduling im Kontext von Produktion und Logistik

Im Kontext der Produktion und Logistik dient das Scheduling unter anderem als Methodik der Zuordnungsplanung von Aufträgen zu Arbeitsstationen, unter Beachtung des zeitlichen Zusammenhangs und etwaiger Randbedingungen [27]. Zunächst erfolgt im Abschnitt 2.4.1 eine Definition des Scheduling. Anschließend werden im Abschnitt 2.4.2 die Aufgaben und Ziele des Scheduling im Kontext der Produktionsplanung betrachtet. Um eine mathematische Untersuchung des Planungsvorgangs zu ermöglichen, bedarf es eines passenden Modells und grundlegender Überlegungen möglicher Problemklassen. Diesbezüglich werden zunächst allgemeine Annahmen und Grundlagen zu dem Modell vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.4.3), die, falls nicht anders

gekennzeichnet, inhaltlich von Georgi [34] übernommen wurden. Im Abschnitt 2.4.4 wird ein Überblick über unterschiedliche Varianten des Scheduling-Problems in der Produktion und Logistik vorgestellt. Anschließend werden im Abschnitt 2.4.5 die beiden Problemstellungen des Job-Shop-Scheduling und des Flexiblen-Job-Shop-Scheduling detailliert betrachtet.

2.4.1 Definition Scheduling

Das Scheduling, auch Ablaufplanung genannt, wird definiert als eine zeitliche Zuordnung durchzuführender Operationen, auch Aufgaben, Tasks, Prozesse oder Arbeitsgänge genannt, zu einer begrenzt vorhandenen Menge von Ressourcen [29, 36–39].

Die Methoden des Scheduling finden in den unterschiedlichsten Fachgebieten ihre Anwendung, wie beispielsweise in der Informatik, Logistik oder Betriebswirtschaftslehre. Im weiteren Verlauf der Ausarbeitung wird das Scheduling im Kontext der Produktion und Logistik betrachtet.

2.4.2 Aufgaben und Ziele des Scheduling in der Produktionsplanung

Das Scheduling wird als Basis für die Bestimmung von *Ablaufplänen* verwendet, mit dem Ziel vorgegebene Leistungsmerkmale, wie beispielsweise kurze Durchlaufzeiten, hohe Termintreue, Bestandsminimierung oder hohe Kapazitätsauslastungen, zu erfüllen. Durch die Bestimmung eines optimalen Ablaufplans können Verbesserungen in der Planung realisiert werden, was zu kürzeren Durchlauf- und Lieferzeiten führen kann. Außerdem hat ein optimaler Ablaufplan Einfluss auf eine höhere Liefertreue, einen geringeren Lagerbestand und eine höhere Auslastung der Betriebsmittel [34]. Infolgedessen nimmt die Berechnung eines passenden Ablaufplans einen hohen Stellenwert im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ein [26, 36]. Auf Grund des großen Lösungsraums der zugrundeliegenden Aufgabenstellung und der Einhaltung verschiedener Restriktionen stellt das Scheduling grundsätzlich einen komplexen Vorgang dar [40].

2.4.3 Modell eines Maschinenbelegungsproblems

Allgemein sind in der Produktion und Logistik Belegungsprobleme durch eine Menge an Arbeitsschritten $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ gekennzeichnet. Jedem Arbeitsschritt $O_k \in O$, $k = 1, \dots, n$ wird ein Zeitraum Z_k zugeordnet, der durch einen Startzeitpunkt t_k^s und einen Fertigstellungszeitpunkt t_k^e definiert wird:

$$Z_k = [t_k^s, t_k^e] \text{ mit } 0 \leq t_k^s \leq t_k^e \quad (2.1)$$

Eine Zuordnung von Zeiträumen zu Arbeitsschritten ist gegebenenfalls zusätzlich durch gewisse Restriktionen beschränkt, wie beispielsweise die Dauer p_k des möglichen Bearbeitungszeitraums oder durch den Bedarf einer Ressource, wie beispielsweise Maschinen, Arbeitsplätze oder Personal.

Eine vollständige Zuordnung eines Zeitraums und den gegebenenfalls benötigten Ressourcen zu den Arbeitsschritten eines Auftrags, unter Berücksichtigung aller einzuhaltenden Restriktionen, nennt man eine Lösung s , auch Belegungsplan (engl. Schedule) genannt, des zugrundeliegenden Problems [34]. Die Menge aller potentiellen Lösungen, der sogenannte Lösungsraum, wird durch das Symbol S dargestellt.

Lösungen werden auf ihre Eignung zu einer oder mehreren Zielfunktionen $f(s)$ hin beurteilt:

$$f: S \rightarrow R^1 \quad (2.2)$$

Übliche Zielfunktionen sind beispielsweise eine minimale Produktionsdauer, eine maximale Liefertreue oder eine bestmögliche Auslastung der Maschinen.

Aus der Menge der Lösungen ist eine Lösung auszuwählen, die die Zielfunktion optimal erfüllt. Diese Lösung wird Optimallösung s^{opt} genannt:

$$f(s^{opt}) \leq f(s), \quad \forall s \in S \quad (2.3)$$

In der Regel wird als bekannt angenommen, welche Arbeitsschritte zu erledigen sind und wie die Bearbeitungen der jeweiligen Arbeitsschritte durchzuführen sind. Die Aufgabe der Belegungsplanung umfasst somit lediglich die zeitliche Dimension der Zuordnungen. Somit unterscheidet sich die Ablaufplanung von reinen Reihenfolge-, Routen-, Zuordnungs-, Layout- oder Färbungsproblemen.

In dem Wort Belegungsplanung steckt implizit die Forderung, dass ein Arbeitsschritt für die Dauer der Bearbeitung einer Ressource zugeordnet wird und diese für den

zugewiesenen Zeitraum exklusiv belegt. Dieser Umstand führt zu grundlegenden Restriktionen, die im Folgenden beschrieben werden (vgl. Unterabschnitt 2.4.3.1). Anschließend werden die zentralen Komponenten des Belegungsproblems, die Aufträge (vgl. Unterabschnitt 2.4.3.2) und die Maschinen (vgl. Unterabschnitt 2.4.3.3), detaillierter betrachtet und formal definiert. Zum Abschluss des Abschnitts werden weiterführende Restriktionen, aufbauend auf den vorgestellten Prinzipien der Aufträge und Maschinen, aufgezeigt (vgl. Unterabschnitt 2.4.3.4).

2.4.3.1 Grundlegende Restriktionen

In diesem Abschnitt wird eine Auswahl der grundlegenden Restriktionen eines Belegungsproblems vorgestellt:

- Prozesszeit (processing time)
- Freigabezeitpunkt (ready time)
- Fälligkeitszeitpunkt (due date)
- Reihenfolgerestriktion
- Nichtgleichzeitigkeitsbedingung

Prozesszeit (processing time)

Jeder Arbeitsschritt O_k hat eine Prozesszeit p_k , die repräsentativ die benötigte Dauer der Bearbeitung darstellt. Die Prozesszeit kann von unterschiedlichen Faktoren abhängig sein und wird in der Regel als im Voraus gegeben angenommen:

$$t_k^e = t_k^s + p_k, \quad k = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

mit t_k^s als Start- und t_k^e als Fertigstellungszeitpunkt des Arbeitsschritts O_k .

Freigabezeitpunkt (ready time)

Weitere Restriktionen können durch den Freigabezeitpunkt r_k eines Arbeitsschritts entstehen, der den frühestmöglichen Zeitpunkt angibt, ab dem der Arbeitsschritt bearbeitet werden kann. Typischerweise wird ein allgemeiner Freigabezeitpunkt t_0 für alle Arbeitsschritte angegeben. Der Zeitraum eines Arbeitsschritts darf nicht vor dem entsprechenden Freigabezeitpunkt starten, so dass gilt:

$$t_k^s \geq r_k \wedge t_k^s \geq t_0, \quad k = 1, \dots, n \quad (2.5)$$

Fälligkeitszeitpunkt (due date)

Jedem Arbeitsschritt O_k kann vorab ein Fälligkeitszeitpunkt d_k zugeordnet sein. Der Zeitraum Z_k des Arbeitsschritts muss vor dem Fälligkeitszeitpunkt abgeschlossen werden, so dass gilt:

$$t_k^e \geq d_k, \quad k = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

Häufig werden Freigabe- und Fälligkeitszeitpunkte jedoch nur als Sollwerte betrachtet. Durch schlecht gewählte Freigabe- und Fälligkeitszeitpunkte könnte ansonsten ein zu enges Zeitfenster entstehen, so dass für das zugrundeliegende Belegungsproblem entweder keine Lösungen existieren oder diese, falls vorhanden, nur sehr aufwändig zu bestimmen wären.

Reihenfolgerestriktion

Zwischen zwei Arbeitsschritten O_k und O_l kann eine Reihenfolgerestriktion herrschen, so dass der Arbeitsschritt O_k spätestens zum Start des Arbeitsschritts O_l beendet sein muss:

$$t_k^e \leq t_l^s \quad \text{bzw.} \quad t_k^s + p_k \leq t_l^s \quad (2.7)$$

Vereinfachend wird im weiteren Verlauf der Arbeit eine solche Reihenfolgerestriktion durch $O_k \leq O_l$ gekennzeichnet.

Nichtgleichzeitigkeitsbedingung

Eine Nichtgleichzeitigkeitsbedingung kann für die Bearbeitung eines Arbeitsschritts eine weitere Restriktion darstellen, indem die Anzahl der gleichzeitig stattfindenden Arbeitsschritte beschränkt wird. Beispielsweise kann die Bedingung aufgestellt werden, dass immer nur ein Arbeitsschritt gleichzeitig bearbeitet werden darf, so dass sich zwei Zeiträume $Z_k = [t_k^s, t_k^e]$ und $Z_l = [t_l^s, t_l^e]$ zeitlich nicht überschneiden dürfen. Somit gilt:

$$t_k^s \geq t_l^e \wedge t_l^s \geq t_k^e, \quad l, k = 1, \dots, n \quad (2.8)$$

Ein Berühren zweier Zeiträume, also das Zusammenfallen des Startzeitpunkts t_k^s eines Arbeitsschritts O_k mit dem Beendigungszeitpunkt t_l^e des Arbeitsschritts O_l , wird nach dieser Definition explizit erlaubt und nicht als ein Verstoß gegen die Nichtgleichzeitigkeitsbedingungen angesehen. Der Arbeitsschritt O_l wird direkt im Anschluss an den Arbeitsschritt O_k bearbeitet.

2.4.3.2 Aufträge

Um eine Strukturierung der Reihenfolgerestriktionen unterschiedlicher Arbeitsschritte zu ermöglichen, werden die Aufträge (engl. jobs) eingeführt. Dazu wird die Menge der Arbeitsschritte O in Teilmengen untergliedert, innerhalb derer diese Reihenfolgerestriktionen auftreten. Jede dieser Teilmengen wird als Auftrag J_i bezeichnet, bei dem die Reihenfolge der einzelnen Arbeitsschritte fest vorgeschrieben ist:

$$J_i = \{O_x, O_y, \dots, O_z\}, \quad O_x < O_y < \dots < O_z \quad (2.9)$$

Somit gibt es zu jedem Arbeitsschritt, außer dem letzten, einen direkten Nachfolger und zu jedem Arbeitsschritt, außer dem ersten, einen direkten Vorgänger.

Ein Arbeitsschritt gehört in der Regel immer genau einem Auftrag an, so dass Reihenfolgerestriktionen nur innerhalb eines Auftrags auftreten. Somit sind Aufträge grundsätzlich voneinander unabhängig. Ein Auftrag J_i beinhaltet immer mindestens einen Arbeitsschritt, kann aber auch durch eine Vielzahl an Arbeitsschritten definiert werden. Die Anzahl der Arbeitsschritte o_i eines Auftrags J_i kann sich in der Regel von der Anzahl eines anderen Auftrags J_j unterscheiden, so dass sich Aufträge durch die genaue Zusammensetzung und Anzahl von Arbeitsschritten differenzieren lassen. Um eine Zuordnung zwischen Arbeitsschritten und Aufträgen zu ermöglichen, wird eine doppelte Indizierung der Arbeitsschritte eingeführt:

$$J_i = \{O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,o_i}\}, \quad O_{i,1} < O_{i,2} < \dots < O_{i,o_i} \quad (2.10)$$

Beendigungszeit eines Auftrags (completion time)

Um zu überprüfen, ob ein Auftrag fristgerecht fertig gestellt wurde, bedarf es einer Betrachtung der Beendigungszeit (completion time) C_i eines Auftrags J_i . Die

Beendigungszeit eines Auftrags wird definiert als der Beendigungszeitpunkt des letzten Arbeitsschritts des Auftrags:

$$C_i \equiv t_{o_i}^e \quad (2.11)$$

Anfangszeit eines Auftrags (start time)

Im Gegensatz zu Georgi wird an dieser Stelle zusätzlich die Anfangszeit eines Auftrags vorgestellt. Analog zur Beendigungszeit, wird die Anfangszeit St_i eines Auftrags J_i , durch den Startzeitpunkt des ersten Arbeitsschritts des Auftrags definiert:

$$St_i \equiv t_{o_1}^s \quad (2.12)$$

Freigabezeitpunkt eines Auftrags (ready time)

Des Weiteren wird angenommen, dass nur für den ersten Arbeitsschritt $O_{i,1}$ ein Freigabezeitpunkt $r_{i,1}$ vorgegeben ist. Die Freigabezeitpunkte aller folgenden Arbeitsschritte $O_{i,x}$, $1 < x \leq o_i$ hängen lediglich vom Beendigungszeitpunkt des jeweils vorherigen Arbeitsschritts ab. Der Freigabezeitpunkt $r_{i,1}$ gibt somit eine allgemeine Freigabezeit des Auftrags J_i an:

$$r_i = r_{i,1} \quad (2.13)$$

2.4.3.3 Maschinen

Um die Nichtgleichzeitigkeitsbedingung von Arbeitsschritten zu strukturieren, wird das Prinzip der Maschine, häufig auch als Ressource, Kapazitätseinheit, Betriebsmittel, Arbeitsstation oder Prozessor bezeichnet, eingeführt. Eine Maschine kann, je nach betrachteter Problemstellung, einen oder mehrere unterschiedliche Arbeitsschritte durchführen. Grundsätzlich wird jedem Arbeitsschritt $O_{i,k}$ genau eine Maschine $\mu(O_{i,k}) \in M$, mit M als Menge aller zur Verfügung stehenden Maschinen, auch Maschinenpark genannt, zugeordnet.

Die Menge der Arbeitsschritte, die auf ein und derselben Maschine bearbeitet werden, bilden eine Teilmenge. In der Regel beschränkt sich die Anzahl gleichzeitig durchführbarer Operationen auf einen Arbeitsschritt pro Maschine, sie überlappen sich

nicht. Es gilt somit eine Nichtgleichzeitigkeitsbedingung für Arbeitsschritte, die aus einer gleichen Teilmenge stammen:

$$[\mu(O_{i,k}) = \mu(O_{j,l})] \Rightarrow [(i = j) \wedge (k = l) \vee (t_{i,k}^e \leq t_{j,l}^s) \vee (t_{j,l}^e \leq t_{i,k}^s)] \text{ für alle } i, j \in [1, \dots, n], k \in [1, \dots, o_i] \text{ und } l \in [1, \dots, o_j] \quad (2.14)$$

Ein Arbeitsschritt O_k der auf einer Maschine durchgeführt wird, belegt diese für die Dauer der Prozesszeit p_k , so dass während der Bearbeitung kein anderer Arbeitsschritt der Maschine zugeordnet werden kann, woraus sich die Begrifflichkeit des Belegungsproblems ergibt.

Die Bezeichnung Maschine steht repräsentativ für eine Vielzahl an Objekten der Realität, wie beispielsweise Personen, Organisationen, Material oder Arbeitsstationen.

2.4.3.4 Weiterführende Restriktionen

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die grundlegenden Restriktionen, sowie das Prinzip der Aufträge und Maschinen beschrieben wurden, werden in diesem Unterkapitel weiterführende Randbedingungen vorgestellt, die je nach Problemstellung ihre Anwendung finden:

- Reihenfolgeabhängige Prozesszeiten
- Parallele Maschinen
- Maschinenabhängige Prozesszeiten
- Präemptive Arbeitsschritte
- Zeitlich begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen
- Zwischenlager
- Ununterbrechbare Aufträge

Reihenfolgeabhängige Prozesszeiten

Reihenfolgeabhängige Prozesszeiten treten immer dann auf, wenn an einer Maschine, zwischen zwei Arbeitsschritten, Rüstarbeiten notwendig werden. Von Rüstarbeiten spricht man, wenn der aktuelle Arbeitszustand einer Arbeitsstation in einen neuen Arbeitszustand geändert wird, so dass unterschiedliche Produktionsvorgänge auf derselben Arbeitsstation durchgeführt werden können [41]. Rüstarbeiten sind beispielsweise dann erforderlich, wenn das Werkzeug einer Maschine ausgetauscht wird

oder eine Arbeitsstation, vor der Bearbeitung des nächsten Arbeitsschritts, gesäubert werden muss. Die Dauer zur Durchführung der notwendigen Rüstarbeit wird als Rüstzeit der Maschine bezeichnet und steht in Relation zum aktuellen Rüstzustand und dem als nächstes durchzuführenden Arbeitsschritt.

Parallele Maschinen

Wenn ein Arbeitsschritt auf mindestens zwei verschiedenen Ressourcen bearbeitet werden kann, bezeichnet man diese Betriebsmittel als parallele Maschinen. Dies hat zur Folge, dass für entsprechende Arbeitsschritte eine Zuordnung von Arbeitsschritt zu Maschine durchgeführt werden muss.

Maschinenabhängige Prozesszeiten

In einem Maschinenpark mit parallelen Maschinen kann die Bearbeitungsdauer p_k einer Operation O_k von der jeweilig zugeordneten Maschine abhängen: $p_k = p_k(M)$.

Präemptive Arbeitsschritte

Präemptive Arbeitsschritte sind Arbeitsschritte, die während der Bearbeitung pausiert werden können, d.h. eine Operation O_k wird begonnen und zu einem Zeitpunkt t_1 unterbrochen. Die Pause kann beispielsweise für die Bearbeitung eines Arbeitsschritts O_l genutzt werden. Anschließend wird die Operation O_k zu einem Zeitpunkt t_2 mit $t_1 \neq t_2$ weitergeführt.

Zeitlich begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen

Die Verfügbarkeit von Ressourcen, beispielsweise von Maschinen oder Personal, kann zeitlich begrenzt sein. Bei Maschinen können beispielsweise Ausfälle oder Wartungsarbeiten auftreten, wodurch die Verfügbarkeit eingeschränkt wird. Beim Personal können Beschränkungen der Verfügbarkeit beispielsweise durch den Schichtbetrieb oder durch Krankheit und Urlaub entstehen.

Zwischenlager

Fallen bei einem Arbeitsschritt Materialien für das nachfolgende Zwischenlager an, so ist zu prüfen, ob die verbleibende Kapazität des Lagers für das anfallende Material ausreichend groß ist. Falls die Kapazität nicht genügt, kann die Ausführung des Arbeitsschritts beschränkt sein.

Ununterbrechbare Aufträge

Es kann gefordert werden, dass begonnene Aufträge nicht unterbrochen werden dürfen, sogenannte ununterbrechbare Aufträge, so dass aufeinanderfolgende Arbeitsschritte eines Auftrags ohne Unterbrechung hintereinander bearbeitet werden müssen:

$$t_{i,k}^e = t_{i,k+1}^s \quad \text{für alle } i = 1, 2, \dots, n \text{ und } k = 1, 2, \dots, (o_i - 1) \quad (2.15)$$

2.4.4 Varianten eines Scheduling-Problems

Je nach Spezifikation der zugrundeliegenden Aufgabenstellung werden unterschiedliche Scheduling-Methoden verwendet. Die verschiedenen Scheduling-Probleme unterscheiden sich zumeist durch gewisse Annahmen und Vereinfachungen oder anhand der Charakteristik des zugrundeliegenden Maschinenparks. Im Folgenden wird eine Auswahl der gängigsten Scheduling-Varianten vorgestellt.

Single-Machine-Scheduling

Bei einem Single-Machine-Scheduling-Problem (SMSP) existiert genau eine Arbeitsstation, auf der alle Arbeitsschritte durchgeführt werden [29]. Infolgedessen besteht die Aufgabe in einer Reihenfolgebildung (Sequenz) der Arbeitsschritte auf der Arbeitsstation.

Open-Shop-Scheduling

Bei einem Open-Shop-Scheduling-Problem (OSSP) liegen vorab keine Informationen über die Bearbeitungsreihenfolge, der sogenannten Route, der einzelnen Arbeitsschritte eines Auftrags an den jeweiligen Arbeitsstationen vor. Zudem muss ein Auftrag auf

jeder Arbeitsstation genau einmal bearbeitet werden [29]. Es gilt die Reihenfolge (Sequenz) der Arbeitsschritte einer Arbeitsstation zu bestimmen.

Flow-Shop-Scheduling

Bei einem Flow-Shop-Scheduling-Problem (FSSP) ist die Bearbeitungsreihenfolge für jeden Auftrag gleich und zu Beginn bereits vorgegeben [29, 34, 39]. Zur Lösung eines Flow-Shop-Scheduling-Problems gilt es die Bearbeitungsreihenfolge (Sequenz) der Aufträge einer jeden Maschine zu bestimmen.

Permutation-Flow-Shop-Scheduling

Die Charakteristiken eines Permutation-Flow-Shop-Scheduling-Problems (PFSSP) entsprechen grundsätzlich dem eines Flow-Shop-Scheduling-Problems. Der Unterschied liegt in der zusätzlichen Restriktion, dass die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge auf den Maschinen beibehalten wird, Aufträge dürfen sich nicht gegenseitig „überholen“ [34]. Somit gilt es, eine universelle Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge zu bestimmen, die auf allen Maschinen einzuhalten ist.

Parallel-Machine-Shop-Scheduling

Bei einem Parallel-Machine-Shop-Scheduling-Problem (PMSSP) besteht der Maschinenpark aus Anlagen, die alle über dieselben Qualifikationen verfügen, so dass ein Auftrag potentiell auf einer beliebigen Arbeitsstation bearbeitet werden kann. Die Bearbeitungszeit der einzelnen Arbeitsschritte ist abhängig von der jeweilig zugewiesenen Arbeitsstation [29, 42]. Somit ergeben sich bei einem PMSSP grundsätzlich zwei Teilaufgaben. Zunächst ist eine Zuordnung der Arbeitsschritte eines Auftrags zu den jeweiligen Arbeitsstationen (Scheduling) durchzuführen. Anschließend erfolgt eine Reihenfolgebestimmung der einzelnen Arbeitsschritte einer jeden Arbeitsstation (Sequenz).

Job-Shop-Scheduling

Ein Job-Shop-Scheduling-Problem (JSSP) ähnelt grundsätzlich dem Flow-Shop-Scheduling mit dem Unterschied, dass die Aufträge potentiell auf unterschiedlichen

Pfaden bearbeitet werden dürfen. Das Flow-Shop-Scheduling ist somit ein Spezialfall des Job-Shop-Scheduling. Bei einem JSSP entspricht die Anzahl an Arbeitsschritten eines Auftrags in der Regel der Menge an vorhandenen Arbeitsstationen, so dass jeder Auftrag genau einmal pro Arbeitsstation bearbeitet wird [34]. Zur Lösung eines Job-Shop-Scheduling-Problems ist die Bearbeitungsreihenfolge (Sequenz) der jeweiligen Arbeitsschritte für jede Maschine zu bestimmen.

Flexibles-Job-Shop-Scheduling

Das Flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem (FJSSP) stellt eine Verallgemeinerung des klassischen Job-Shop-Scheduling-Problems dar. Jeder Arbeitsschritt kann potentiell auf einer endlichen Teilmenge der zur Verfügung stehenden Arbeitsstationen ausgeführt werden [37, 43–45]. Bei einem Flexiblen-Job-Shop-Scheduling-Problem sind entsprechend zwei zentrale Aufgaben zu lösen. Zum einen ist die Zuordnung der Arbeitsschritte zu den jeweiligen Arbeitsstationen (Scheduling), sowie die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsschritte an der Arbeitsstationen (Sequenz) zu bestimmen [36, 37, 42–47].

2.4.5 (Flexibles-)Job-Shop-Scheduling

Ein (Flexibles-)Job-Shop-Scheduling-Problem beschränkt sich in der Regel auf einfache Restriktionen und Komponenten, wie beispielsweise Prozesszeiten, Freigabezeitpunkte, Aufträge und Maschinen. Des Weiteren werden die frühestmöglichen Startzeitpunkte t_0 bzw. r_i die, falls nicht anders definiert, regelmäßig als auf 0 gesetzt betrachtet [34].

Formal lässt sich ein (Flexibles-)Job-Shop-Scheduling-Problem als eine endliche Menge J von n Aufträgen $J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$, einen Maschinenpark M mit m Arbeitsstationen $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$ und eine endliche Menge von Arbeitsschritten O beschreiben. Jeder Auftrag J_i besteht aus o_i Arbeitsschritten mit $\{O_{i,1}, O_{i,2}, O_{i,3}, \dots, O_{i,o_i}\} = O_i \subset O$ für $\forall i \in [1, \dots, n]$. Jedem Arbeitsschritt $O_{i,k}$ wird eine Prozesszeit $p_{i,k}$ zugeordnet. Es ist ein frühester allgemeiner Startzeitpunkt t_0 , sowie optional für jeden Auftrag J_i ein individueller frühester Startzeitpunkt r_i gegeben [34, 48–50]. Im Gegensatz zu einem FJSSP, bei dem jeder Arbeitsschritt potentiell auf einer endlichen Teilmenge der zur Verfügung stehenden Arbeitsstationen ausgeführt werden kann, ist bei einem JSSP das Schedule vorab bekannt. Jede Arbeitsstation

$M_j \in M$ eines Job-Shop-Scheduling-Problems kann jeden Auftrag immer nur genau einmal bearbeiten [29, 34, 36, 37, 39, 42, 44], so dass eine Zuordnungsbestimmung eines Arbeitsschritts zu einer Maschine (Schedule) entfällt. Auf Grund der Definition ist dies bei einem Flexiblen-Job-Shop-Scheduling-Problem nicht der Fall. Hier ist das Scheduling eine Teilaufgabe zur Lösung des Problems. Für beide Problemklassen gilt es die Permutation der Aufträge auf einer Arbeitsstation zu bestimmen (Sequenz).

Zur Lösung eines (Flexiblen-)Job-Shop-Scheduling-Problems ist jedem Arbeitsschritt $O_{i,k} \in O$ ein Zeitraum $Z_{i,k} = [t_{i,k}^s, t_{i,k}^e]$ mit $t_{i,k}^s \geq t_0$ bzw. $t_{i,k}^s \geq r_i$ zuzuordnen, so dass gilt [34]:

- Die gegebene Prozesszeit $p_{i,k}$ eines Arbeitsschritts $O_{i,k}$ entspricht der Dauer des Zeitfensters: $t_{i,k}^e = t_{i,k}^s + p_{i,k}$.
- Die Reihenfolgerestriktionen der Arbeitsschritte innerhalb jedes Auftrags werden eingehalten: $t_{i,k}^e \leq t_{i,k+1}^s$ für alle $i = 1, \dots, n$ und $k = 1, \dots, (o_i - 1)$.
- Arbeitsschritte, die auf der gleichen Maschine bearbeitet werden, überlappen sich nicht: $[\mu(O_{i,k}) = \mu(O_{j,l})] \Rightarrow [((i = j) \wedge (k = l)) \vee (t_{i,k}^e \leq t_{j,l}^s) \vee (t_{j,l}^e \leq t_{i,k}^s)]$ für alle $i, j \in [1, \dots, n]$, $k \in [1, \dots, o_i]$ und $l \in [1, \dots, o_j]$

Job-Shop-Scheduling-Probleme sind in der Regel *NP-schwer* und gehören somit zu den schwierigsten kombinatorischen Optimierungsproblemen [48], so dass selbst bei kleinen Problemen die Bestimmung einer optimalen Lösung nicht garantiert werden kann [49]. Da das Job-Shop-Scheduling eine Verallgemeinerung des Flexiblen-Job-Shop-Scheduling darstellt, ergibt sich für ein FJSSP potentiell eine höhere Komplexität als bei einem JSSP, so dass Flexible-Job-Shop-Scheduling-Probleme ebenfalls *NP-schwer* sind [45–47, 50]. Mit analytischen oder deterministischen Methoden sind JSSP und FJSSP, in einer akzeptablen Zeit und mit einem realistischen Ressourcenaufwand, nicht zu lösen [36, 42].

Typische Zielkriterien von Lösungen für (Flexible-)Job-Shop-Scheduling-Probleme sind beispielsweise ein frühestmöglicher Fertigstellungszeitpunkt des letzten Auftrags, also einer minimalen Produktionsdauer, eine maximale Auslastung der Betriebsmittel oder eine allgemeine Kostenminimierung [48, 50].

2.5 Optimierungsmethoden im Kontext der Ablaufplanung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Optimierungsmethoden vorgestellt, die, je nach Anwendungsgebiet und Aufgabenstellung, zur Lösung unterschiedlicher Schedulingprobleme eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt in diesem Unterkapitel auf heuristischen Optimierungsmethoden zur Lösung von (Flexiblen-)Job-Shop-Scheduling-Problemen, da diese Problemklasse NP-schwer und durch analytische Ansätze in der Regel nicht effizient zu lösen ist (vgl. Abschnitt 2.4.5).

Im Folgenden werden zunächst die lokalen Suchverfahren Simulated Annealing (vgl. Abschnitt 2.5.1) und Tabu-Search (vgl. Abschnitt 2.5.2) betrachtet. Anschließend wird in Abschnitt 2.5.3 der Genetische Algorithmus dargestellt, der sich auf Grund seiner Flexibilität und Robustheit einer hohen Beliebtheit erfreut. Zum Schluss werden die Algorithmen betrachtet, deren grundsätzliche Funktionsweisen auf Basis von Vorgängen aus der Natur beruhen. Dies sind zum einen die Partikel-Schwärme (vgl. Abschnitt 2.5.4), sowie die Ameisen- und Bienenalgorithmen (vgl. Abschnitt 2.5.5 und Abschnitt 2.5.6).

2.5.1 Simulated Annealing

Das Simulated Annealing (SA) hat seinen Ursprung in dem Bereich der Materialforschung und der Physik [34]. Es wurde entwickelt, um den Abkühlungsvorgang von glühenden Materialien zu simulieren. Das SA ist ein lokaler Suchalgorithmus, der einen gegebenen Schedule optimiert.

Zu Beginn wird mit einem zufälligen oder zuvor ermittelten Schedule gestartet. Anschließend wird der Schedule optimiert, indem Lösungen aus der Nachbarschaft gesucht werden. Die Nachbarschaft einer Lösung ergibt sich beispielsweise durch das Vertauschen der Reihenfolge von zwei Aufträgen auf einer Maschine (Mutation). Diese so ermittelte Lösung wird mit dem ursprünglichen Schedule verglichen. Falls der neue Schedule im Hinblick auf die Zielfunktion besser ist, so ersetzt er den vorherigen und wird als neue Ausgangsbasis für den Optimierungsvorgang verwendet. Dieses Vorgehen wird solange durchgeführt, bis ein zuvor definiertes Abbruchkriterium erreicht wurde, wie beispielsweise eine maximale Anzahl an Iterationen oder eine minimal zu erreichende Qualität eines Schedule [39].

2.5.2 *Tabu-Search*

Das Tabu-Search (TS) hat ein ähnliches Verhalten wie das Simulated Annealing. TS ist ein lokaler Suchalgorithmus, der einen anfänglichen Schedule optimiert. Die Ermittlung eines initialen Schedule kann analog zur Methodik des SA durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.5.1). Beim Tabu-Search wird bei jedem Iterationsschritt eine Tabu-Liste mitgegeben, auf der verbotene Mutationen stehen. Mutationen auf der Tabu-Liste dürfen für die Bestimmung eines neuen Schedule nicht durchgeführt werden. Eine Tabu-Liste hat eine feste Anzahl an Einträgen und ist zu Beginn des Algorithmus leer. Im weiteren Verlauf wird immer die zuletzt durchgeführte Mutation an den Anfang der Liste hinzugefügt und bei Bedarf der älteste Eintrag entfernt. Somit werden Wiederholungen von kürzlich bereits durchgeführten Mutationen unterdrückt [39].

2.5.3 *Genetische Algorithmen*

Genetische Algorithmen (GA) lassen sich, aufgrund ihrer Flexibilität, durch individuelle Anpassung der Komponenten an das zugrundeliegende Problem, vielseitig einsetzen [42] und finden in der Forschung hohe Beachtung, so dass Verfahren für viele Anwendungsgebiete und Problemstellungen existieren [45, 47, 50, 51].

Ein Genetischer Algorithmus gehört zu der Klasse der Evolutionären Algorithmen (EA) die, inspiriert durch die Evolution in der Natur, zur Bestimmung von Lösungen für Optimierungsprobleme verwendet werden [47]. Ein GA imitiert den Vorgang der Evolution eines biologischen Organismus und besteht aus einer Menge (Population) von Lösungen. Jede Lösung einer Population wird als Chromosom bezeichnet. Zu Anfang eines Genetischen Algorithmus wird eine initiale Population, beispielsweise durch eine Auswahl zufälliger Chromosomen, generiert. Die Struktur eines Chromosoms lässt sich individuell gestalten und ist abhängig von der jeweiligen Problemstellung. Jedes Chromosom erhält eine Menge an Genen, in denen Informationen, wie beispielsweise die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsschritte eines Betriebsmittels (Sequenz) oder die Zuordnung eines Arbeitsschritts zu einer Arbeitsstation (Schedule), stehen. Ein Chromosom repräsentiert somit eine Lösung des zugrundeliegenden Optimierungsproblems und erhält einen Wert für seine Eignung im Hinblick auf die Zielfunktion (Eignung oder Qualität). Nachdem die initiale Population generiert wurde, beispielsweise durch eine zufällige Ermittlung, wird das Schedule mit der besten Eignung als Vergleichsmöglichkeit zwischengespeichert. In jeder Iteration (Generation)

des Algorithmus werden die besten Chromosomen der aktuellen Generation ausgewählt (Eltern). Die Eltern-Chromosomen werden anschließend als Grundlage für die neue Generation verwendet. Eine neue Generation besteht, basierend auf den ausgewählten Eltern-Chromosomen, aus neuen Chromosomen (Kinder oder Nachwuchs). Die Kinder werden beispielsweise durch das Verändern von Genen innerhalb eines Chromosoms (Mutation), also beispielsweise das Verändern der Reihenfolge von zwei Aufträgen auf einer Maschine, oder durch die Kombination von Teilen unterschiedlicher Eltern-Chromosomen (Kreuzung) generiert. Die Auswahl eines Chromosoms für die Mutation oder Kreuzung steht somit in Abhängigkeit zur Eignung der Lösung [52]. Die Größe einer Population, also die Anzahl der Chromosomen innerhalb einer Generation, bleibt konstant. In jeder Iteration des Genetischen Algorithmus werden mehrere Chromosomen (Lösungen) erstellt und analysiert, so dass von einer Art Parallelität gesprochen werden kann. Am Ende einer jeden Iteration wird die aktuell beste Lösung mit den Eignungen der aktuellen Chromosomen verglichen und gegebenenfalls ersetzt. Der Algorithmus wird solange durchgeführt, bis eine bestimmte Qualität eines Schedule oder eine zuvor definierte Anzahl an Iterationsschritten erreicht wurde [26, 39, 42, 47, 51].

SA und TS sind Spezialfälle von Genetischen Algorithmen mit einer Populationsgröße von eins [39].

Genetische Algorithmen eignen sich auf Grund ihrer flexiblen Anwendungsmöglichkeiten für die Lösung von komplexen kombinatorischen Optimierungsproblemen. Sie zeichnen sich durch ihre Parallelität und Robustheit aus [45], bleiben jedoch häufig in lokalen optimalen Lösungen hängen [26], so dass regelmäßig hybride Ansätze verfolgt werden, die dieser Problematik Rechnung tragen [45, 47, 50, 51].

2.5.4 Partikel-Schwarm-Optimierung

Eine weitere Methodik zur Lösung von Scheduling-Problemen sind die von Dr. Eberhart und Dr. Kennedy entwickelten Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO) [45]. PSO wurden in Anlehnung an das Schwarmverhalten von Vögeln oder Fischen entwickelt und überzeugen durch ihren simplen Aufbau [53]. PSO gehören zu der Klasse der natürlichen Algorithmen und bieten eine effektive Möglichkeit für ein breites Anwendungsgebiet von Optimierungsproblemen.

In einem Partikel-Schwarm-Optimierer wird der Lösungsraum durch eine Population an Partikeln durchsucht. Die jeweilige Position eines Partikels repräsentiert eine potentielle Lösung des zugrundeliegenden Optimierungsproblems. Die gefundenen Lösungen werden auf ihre Eignung im Kontext des zu optimierenden Sachverhalts hin geprüft. Die aktuell beste Lösung wird als Optimum zwischengespeichert. Einzelne Partikel bewegen sich mit einer zur Qualität einer Lösung korrelierenden Wahrscheinlichkeit in diese Richtung, um anschließend den benachbarten Lösungsraum zu durchsuchen. Das Optimum gilt als Richtwert, so dass insbesondere dessen Umgebung nach besseren Lösungen durchsucht wird [53].

Partikel-Schwarm-Algorithmen und Genetische Algorithmen zeigen sowohl Ähnlichkeiten in den Lösungsstrategien, als auch in der Qualität der Lösungen, PSO skalieren jedoch regelmäßig besser als GA [45].

2.5.5 Ameisenalgorithmus

Der Ameisenalgorithmus (ACO – ant colony optimization algorithm) ist eine schwarmbasierte Heuristik. Er hat seinen Ursprung in der Natur und gehört somit zu den naturanalogen Algorithmen [22]. Der ACO basiert auf dem Bewegungsverhalten von Ameisen entlang eines Pfades zu einer Futterquelle. Auf ihrem Weg hinterlassen die Ameisen einen Duftstoff (Pheromon), der als Information für folgende Ameisen dient, der mit der Zeit jedoch an Intensität verliert. Ameisen werden von den Duftstoffen angezogen. Je höher die Intensität der hinterlegten Pheromone auf einem Weg ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Ameisen diesem Pfad zur Futterquelle folgen. Ein attraktiver Pfad wird von Ameisen häufiger besucht und ist somit mit mehr Pheromonen behaftet [39].

Das Verhalten der Ameisen lässt sich entsprechend auf die Bestimmung eines passenden Ablaufplans übertragen. Dazu werden künstliche Ameisen entlang eines Graphen geschickt, der die Problemstellung repräsentiert. Die Qualität einer Route (Schedule) ergibt sich aus der Intensität der hinterlegten Duftstoffe.

2.5.6 Bienenalgorithmus

Der Bienenalgorithmus (ABC – artificial bee colony algorithm) gehört wie der ACO und der PSO zu der Klasse der natürlichen Algorithmen und ist eine schwarmbasierte

Heuristik, die ihren Ursprung in der Natur hat [46, 52]. Das Konzept des Algorithmus entstand in Anlehnung an das Verhalten von Honigbienen bei der Nahrungssuche [46, 53].

Ein ABC-Algorithmus besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten, den Futterquellen und den Bienen. Die Position einer Futterquelle repräsentiert eine potentielle Lösung des betrachteten Optimierungsproblems. Die Menge an Nektar stellt die Qualität bzw. Eignung der mit der Futterquelle assoziierten Lösung dar. Eine Lösung besteht aus einem D-dimensionalen Vektor reeller Zahlen, bei dem D die Anzahl an Parameter des Optimierungsproblems ist [52–54].

Die künstlichen Honigbienen werden in drei unterschiedliche Gruppen unterteilt. Die Arbeiter-Bienen haben die Aufgabe Futterquellen aufzusuchen und diese auf ihre Eignung hin zu untersuchen. Falls die Eignung der Nahrungsquelle als gut erachtet wird, merkt sich die Biene die Position, kehrt zum Stock zurück und führt dort einen Tanz auf. Die Dauer des Tanzes steht in Relation zur Qualität der Nahrungsquelle und somit zur Eignung der repräsentierten Lösung für das zugrundeliegende Optimierungsproblem. Anschließend kehren die Arbeiter-Bienen in den Bereich der ursprünglichen Lösung zurück und durchsuchen den umliegenden Lösungsraum nach weiteren Lösungen. Eine Arbeiter-Biene, die auf eine schlechte Lösung stößt, oder sich in einem erschöpften Bereich befindet, weil beispielsweise keine neuen Nahrungsquellen in diesem Gebiet zu finden sind, wird zu einer Erkundungs-Biene. Beobachter-Bienen schauen sich die Tänze der Arbeiter-Bienen an und wählen anschließend mit einer der jeweiligen Dauer des Tanzes korrelierenden Wahrscheinlichkeit die zur Lösung dazugehörige Umgebung aus. Sie werden im Zuge dieser Aktion selbst zu Arbeiter-Bienen, suchen sich eine neue Lösung aus dem umliegenden Lösungsbereich aus und untersuchen diese. Die dritte Gruppe der Bienen, die Erkundungs-Bienen, durchsuchen den Lösungsraum nach neuen Lösungen. Sobald eine potentiell geeignete Lösung gefunden wurde, untersuchen sie diese, werden im Zuge dessen zu Arbeiter-Bienen und teilen anschließend die Informationen mit den Beobachter-Bienen [49, 52–54].

Der ABC-Algorithmus nutzt die kollektive „Intelligenz“ eines Honigbienenschwarms und erfreut sich zur Lösung von Optimierungsproblemen einer großen Beliebtheit, so dass in der Literatur zahlreiche Anwendungen des Algorithmus zu finden sind [44, 46, 49, 54].

2.6 Simulation als Planungsunterstützung in der Produktion und Logistik

In diesem Unterkapitel wird die Simulation als Planungsunterstützung für Problemstellungen der Produktion und Logistik detailliert betrachtet. Zunächst werden in den Abschnitten 2.6.1 und 2.6.2 das System und das Modell definiert, die als Grundlage für die Betrachtung der Simulation benötigt werden. Anschließend erfolgt im Abschnitt 2.6.3 die Definition der Simulation. Um das Konzept der Simulation detailliert untersuchen zu können, werden im Abschnitt 2.6.4 die wichtigsten Begrifflichkeiten dargestellt. Abschließend wird im Abschnitt 2.6.5 eine Klassifikation der unterschiedlichen Systeme und Simulationsmethoden vorgenommen.

2.6.1 Definition System

Ein System ist eine Menge von Elementen, die über Relationen miteinander verbunden sind [32, 55, 56]. Durch seine sogenannte Systemgrenze grenzt sich das System von seiner Umwelt ab. Informationen, Materie oder Energie werden über Systemein- und -ausgangsgrößen mit der Umwelt ausgetauscht. Neben den bereits genannten Elementen, auch Systemelemente genannt, kann ein System aus Subsystemen bestehen und bestimmt dadurch seine Aufbaustruktur [32]. Eine grafische Darstellung der Strukturelemente eines Systems wird in Abbildung 4 dargestellt.

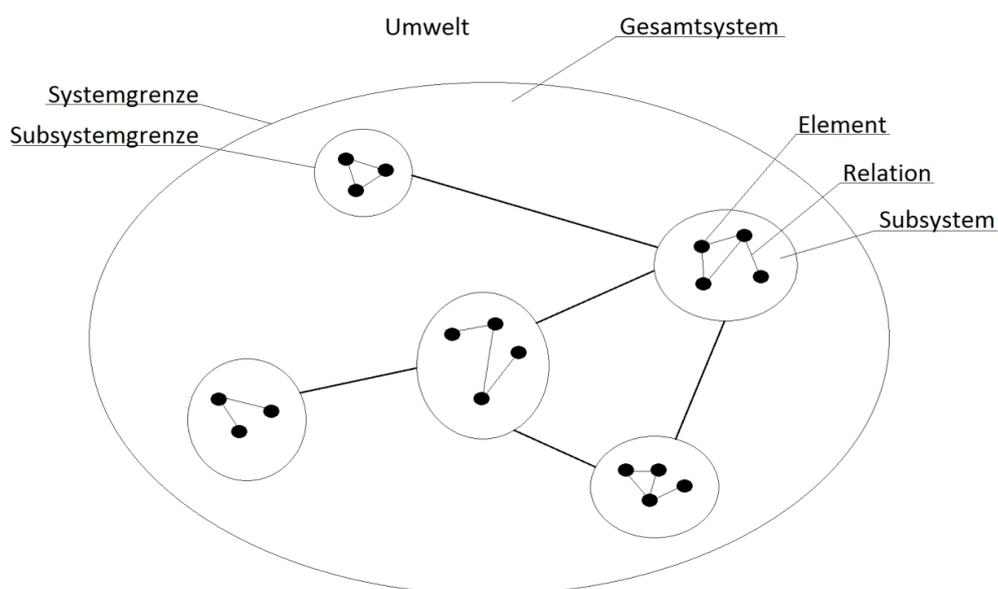


Abbildung 4: Grafische Darstellung der Grundbegriffe zur Systemdefinition

Über die sogenannte Ablaufstruktur, den Wirkzusammenhängen zwischen den Elementen und Subsystemen, wird das Verhalten des Systems definiert. Der Systemzustand, die Beschreibung des Systems zu einem festen Zeitpunkt, kann sich durch im System ablaufende Prozesse ändern, sogenannte Zustandsänderungen [32].

2.6.2 Definition Modellierung

Die Modellierung bezeichnet den Prozess der Abstraktion eines real existierenden oder geplanten Systems samt seiner Systemstruktur und seinem Verhalten [32, 55]. Ergebnis dieses Prozesses ist das Modell, eine vereinfachte Darstellung des Originals, bei dem ausgewählte Aspekte des abzubildenden Systems wegfallen oder explizit hervorgehoben werden können [57]. Der Verwendungszweck des Modells bestimmt die Abstraktion und somit die zu modellierenden Charakteristiken des Ursprungssystems, so dass regelmäßig nur bestimmte Aspekte des Originals abgebildet werden [58].

Ziel der Modellierung ist die Erstellung eines Modells zu Untersuchungszwecken oder als Kommunikationsgrundlage. Mit Hilfe des Modells lassen sich Situationen des Originals darstellen, die auf dem Original nicht betrachtet werden können [58].

2.6.3 Definition Simulation

Die Simulation umfasst die Modellierung eines realen Systems durch ein experimentierbares Modell, dessen Ausführung und Analyse, sowie die Auswertung der Simulationsergebnisse und die anschließende Übertragung der daraus resultierenden Erkenntnisse auf das Ursprungssystem [32].

Die Hauptaufgabe der Simulation im Kontext der Produktion und Logistik besteht in der Planungsunterstützung [22] und bildet ein allgemein anerkanntes Hilfsmittel zur Planung, Realisierung und Betrieb technischer Systeme [59].

Eine Simulation komplexer Systeme wird häufig dann angewendet, wenn Tests auf dem Original nicht möglich oder sinnvoll sind, mathematische und analytische Verfahren zu keinem Ergebnis führen oder der Nachbau des Ursprungssystems zu teuer ist. Außerdem lassen sich die Auswirkungen häufiger Parameteränderungen so besser analysieren, als auf dem realen System [59, 60].

Die Schwierigkeiten bei der Simulation liegen in der Erstellung eines passenden Modells, im Hinblick auf die zu untersuchende Problemstellung, sowie in einer effizienten Versuchsplanung, um aussagekräftige Resultate zu erhalten [22].

2.6.4 Begrifflichkeiten der Simulation

Die folgenden Definitionen und Beschreibungen der wichtigsten Begrifflichkeiten der Simulation basieren, falls nicht explizit anders angegeben, auf Informationen der VDI-Richtlinie 3633 [32]:

Ablaufstruktur

Die logischen Zusammenhänge der einzelnen Modellelemente und somit das Verhalten des Modells werden als Ablaufstruktur bezeichnet.

Aktivität

Eine Aktivität beschreibt einen zeitverbrauchenden Ablauf, der zu einer Zustandsänderung des Modells führt. Die Aktivität wird von einem Anfangsereignis ausgelöst und resultiert in einem Endereignis.

Attribut

Als Attribut wird die Eigenschaft eines Modellelements beschrieben.

Aufbaustruktur

Die Aufbaustruktur gibt den Aufbau des konkreten Modells wieder, indem auf die einzelnen Modellelemente und deren Beziehungen untereinander eingegangen wird.

Ausgangsgröße

Die Ausgangsgröße (*Output*) eines Systems wird durch die Eingangsgröße (*Input*) und das Übertragungsverhalten des Systems bestimmt und nach Ablauf ausgegeben.

Baustein

Ein Baustein ist ein Modellelement zur Beschreibung eines Systems, welches über eine eigene interne Ablauflogik verfügt. Bausteine können sowohl physische Komponenten (Abbildung physischer Gegenstände oder Lebewesen), als auch logische Vorgänge (bspw. Steuerung) des betrachteten Systems repräsentieren. Weiterhin können Bausteine vordefiniert oder vom Anwender definiert werden.

Daten

Daten können in zwei Kategorien unterteilt werden. Zum einen die Systemdaten, die Informationen über das zugrundeliegende System, wie beispielsweise Systemlastdaten, organisatorische Daten oder technische Daten beinhalten. Zum anderen die Modelldaten, die für die Beschreibung des Modells und der Simulation benötigt werden, wie beispielsweise Eingabedaten, Experimentdaten oder interne Modelldaten. Darüber hinaus beinhalten die Modelldaten auch Informationen aus der Simulationdurchführung, wie beispielsweise Simulationsergebnisse.

Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung beinhaltet die Verarbeitung der Modelleingangsdaten und der Simulationsergebnisdaten, wie beispielsweise das Selektieren, Sortieren oder Formatieren.

Diskrete Simulation

Die diskrete Simulation ist eine Methodik, bei der Systemänderungen durch das Eintreten von Ereignissen zu diskreten Zeitpunkten stattfinden (vgl. Abschnitt 2.6.5).

Einflussgröße

Unter dem Begriff der Einflussgröße werden all die Daten zusammengefasst, deren Wert die Zielgröße(n) beeinflussen.

Eingabedaten

Die Eingabedaten beinhalten all die Daten, die sowohl für den Aufbau des Modells, als auch für die Simulationsdurchführung notwendig sind.

Entscheidungstabelle

In der Entscheidungstabelle werden die Zustandsübergänge des Systems, sowie deren Vor- und Nachbedingungen, angegeben. Über die Entscheidungstabelle lässt sich das Verhalten des Systems ablesen.

Ereignis

Ein Ereignis ist eine atomare Begebenheit des Systems. Das Ereignis löst eine Zustandsänderung des Systems aus, die ohne Zeitkosten verbunden ist.

Initialisierung

Als Initialisierung eines Modells wird das Setzen des Anfangszustands einzelner Modellgrößen zu Beginn eines Simulationslaufs bezeichnet.

Modellelement

Ein Modellelement ist eine Komponente des Modells und kann, abhängig von ihrer Dynamik in zwei Kategorien, Bausteine oder Objekte, unterteilt werden.

Objekt

Ein Modellelement ohne eigene interne Ablauflogik wird als Objekt bezeichnet.

Parameter

Ein Parameter ist ein Attribut, das zu Beginn eines Simulationslaufs gesetzt wird und in diesem nicht weiter verändert wird.

Prozess

Ein Prozess bildet die Gesamtheit des Systemverhaltens wieder, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder gespeichert werden.

Puffer

Ein Puffer ist ein (Zwischen-)Speicher für bewegliche Elemente.

Quelle

Die Quelle bildet eine Systemgrenze, über die Objekte in ein (Teil-)System gelangen können.

Randbedingung

Durch Randbedingungen, auch Restriktionen genannt, werden Einschränkungen für das System abgebildet.

Schnittstelle

Schnittstellen bilden Verbindungen zwischen zwei Systemen ab, über die Informationen, Material oder Energie ausgetauscht werden kann.

Senke

Die Senke ist eine Systemgrenze, über die Objekte aus einem (Teil-)System gelangen können.

Simulationslauf

Abbildung des Systemverhaltens über einen definierten Zeitraum.

Simulationsmodell

Nachbildung eines realen oder geplanten Systems mit dem Ziel dieses zu simulieren.

Simulationszeit

Die Simulationszeit ist eine Modellgröße, mit der die voranschreitende Zeit des repräsentierten Systems abgebildet wird. Die Simulationszeit wird durch den Simulator erhöht.

Simulator

Ein Simulator ist ein Softwareprogramm, mit dessen Hilfe das dynamische Verhalten eines Systems und dessen Prozesse abgebildet werden.

Struktur

Die Struktur eines Systems bezeichnet die Wirkzusammenhänge zwischen den Systemelementen.

Systemdaten

Die Systemdaten beinhalten Sollwerte und alle Daten zur Beschreibung der Realität, wie beispielsweise technische oder organisatorische Daten, sowie Systemlasten.

Systemlast

Die Systemlast beinhaltet alle abzuarbeitenden Aufträge eines Systems.

Validierung

Die Validierung ist ein kontinuierlicher Prozess zur Überprüfung des korrekten Verhaltens eines Modells, im Hinblick auf das abgebildete Ursprungssystem.

Verifikation

Die Verifikation ist ein Vorgang bei dem geprüft wird, ob die Transformation eines Ausgangssystems in ein Zielsystem korrekt durchgeführt wurde [61]. Somit wird beispielsweise mit Hilfe der Verifikation ein formaler Nachweis über die Korrektheit einer Transformation gegeben.

Zielfunktion

Die Zielfunktion gibt den zu optimierenden Sachverhalt wieder.

Zielgröße

Als Zielgröße werden die Werte eines Simulationsergebnisses bezeichnet, die es zu optimieren gilt. Zielgrößen lassen sich durch Variation von Parametern beeinflussen.

Zustand

Der Zustand eines Systems beschreibt die genaue Situation des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt.

2.6.5 Klassifikation von Systemen und Simulationsmethoden

Systeme lassen sich, je nach zugrundeliegender Charakteristik, in unterschiedliche Klassen einordnen. Analog lassen sich die Simulationsmethoden, in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Systems, klassifizieren. Die folgende Einordnung der Systeme basiert auf der Klassifikation von Cassandras und Lafortune [55] und den VDI-Richtlinien 3633 [32] und ist in Abbildung 5 grafisch dargestellt.

Dynamische Systeme vs. statische Systeme

In einem statischen System ist die Ausgabe des Systems zu einem Zeitpunkt t unabhängig von den Eingaben zu vorherigen Zeitpunkten t' mit $t' < t$. Ein dynamisches System zeichnet sich grundsätzlich durch die Eigenschaft aus, dass vorherige Eingaben die aktuelle Ausgabe beeinflussen.

Zeitbehaftete Systeme vs. zeitinvariante Systeme

Ein zeitinvariantes System ist ein System bei dem die Ausgabe, zu einem beliebigen Zeitpunkt t , ausschließlich von der Eingabe abhängt. Dem gegenüber steht das zeitbehaftete System, dessen Ausgabe sowohl von der Eingabe, als auch vom Zeitpunkt abhängig ist.

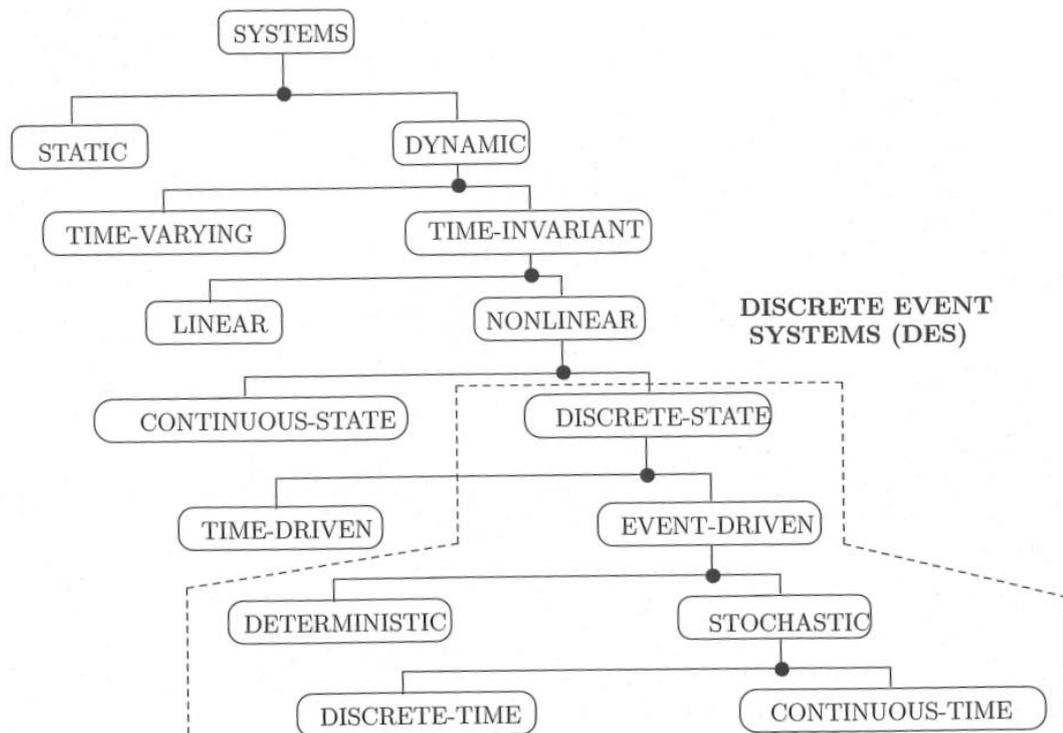


Abbildung 5: Übersicht über die Systemklassifikationen nach Cassandras und Lafortune [55].

Lineare Systeme vs. nichtlineare Systeme

In einem linearen System führt eine beliebige Summe von Eingaben zu einer dazu proportionalen Summe an Ausgaben, so dass ein lineares System das sogenannte Überlagerungs- bzw. Superpositionsprinzip erfüllt. In einem nichtlinearen System gilt dieses Prinzip nicht.

Zustandskontinuierliche Systeme vs. zustandsdiskrete Systeme

In einem zustandskontinuierlichen System ändern sich die Systemzustände kontinuierlich über die Zeit und können dabei beliebige reelle Werte annehmen, wohingegen sich die Zustände eines zustandsdiskreten Systems nur zu diskreten Zeitpunkten ändern und auf Werte eines diskreten Zustandsraums beschränken.

Zeitgesteuerte Systeme vs. ereignisgesteuerte Systeme

In einem zeitgesteuerten System werden die Ereignisse (auch „Dummy-Ereignisse“ möglich) periodisch zu jedem definierten Zeitpunkt gestartet. Dies ist beispielsweise in

zustandskontinuierlichen Systemen grundsätzlich der Fall. In zustandsdiskreten Systemen treten Zustandsänderungen nur zu diskreten Zeitpunkten auf, die beispielsweise durch Ereignisse abgebildet werden. In einem solchen Fall nennt man das System ereignisgesteuert, da das Systemverhalten auf Grund eintretender Ereignisse definiert wird.

Deterministische Systeme vs. stochastische Systeme

In einem deterministischem System lässt sich der Systemzustand für eine gegebene Eingabe X zu einem beliebigen Zeitpunkt t bestimmen. In einem stochastischen System lässt sich nur die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Systemzustands für eine Eingabe X zu einem Zeitpunkt t angeben, da der Systemzustand, trotz derselben Eingabe und Zeit, potentiell unterschiedliche Werte annehmen kann.

Zeitdiskrete Systeme vs. zeitkontinuierliche Systeme

Wird der Verlauf der Zeit als eine kontinuierliche Variable betrachtet, so dass jedem beliebigen Zeitpunkt ein Systemzustand zugewiesen werden kann, so handelt es sich um ein zeitkontinuierliches System. Demgegenüber sind in einem zeitdiskreten System die Systemzustände nur für diskrete Zeitpunkte definiert.

3 Simulationsgestützte Optimierung zur Ablaufplanbestimmung einer Werkstattfertigung

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über das Vorgehen zur Bestimmung optimaler Ablaufpläne für wandlungsfähige Produktionssysteme durch simulationsgestützte Optimierung gegeben. Im Unterkapitel 3.1 erfolgt eine Einführung in die Thematik. Anschließend werden die Ausgangssituation und Zielsetzung vorgestellt (vgl. Unterkapitel 3.2). Die die Aufgabenstellung eingrenzenden Vereinfachungen und Annahmen werden in Unterkapitel 3.3 aufgezeigt. Eine detaillierte Betrachtung der Optimierungsaufgabe und des Optimierungsansatzes zur Lösung des Problems werden in den Unterabschnitten 3.4 und 3.5 dargestellt. Die Vorgehensweise der Lösung wird in Unterabschnitt 3.6 betrachtet. In Unterabschnitt 3.7 erfolgt eine Darstellung der Systemarchitektur und –abgrenzung. Abschließend werden in Unterkapitel 3.8

Möglichkeiten zur Einbindung des simulationsgestützten Optimierungssystems aufgezeigt.

3.1 Einleitung

Im weiteren Verlauf der Ausarbeitung wird die Entwicklung und Umsetzung eines simulationsgestützten Optimierungssystems für die operative Produktionsplanung eines wandlungsfähigen Produktionssystems dargestellt. Das zu betrachtende Produktionssystem zeichnet sich durch ein breites Spektrum verschiedener Produkte, aus unterschiedlichen Produktlebenszyklen, aus. Aufgrund der Marktdynamik ist die Nachfrage einzelner Produkte einer hohen zeitlichen Dynamik ausgesetzt, so dass zum Teil hohe Stückzahlschwankungen auftreten. Infolgedessen treten zunehmend Änderungen der Systemlast auf, die zu einem häufigen Änderungsbedarf des Ablaufplans führen können. Um die Auswirkungen einer solchen Änderung zu analysieren und eine bestmögliche Anpassung der Produktion zu gewährleisten, ist ein Höchstmaß an (Ablauf-)Flexibilität gefordert. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird ein simulationsgestütztes Optimierungssystem eingeführt, das im Gegensatz zu einer auf starren Regeln basierenden Ablaufsteuerung, einen auf die jeweilige Situation zugeschnittenen Ablaufplan individuell und flexibel bestimmen kann.

3.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines simulationsbasierten Planungs- und Optimierungssystems, auf Basis der Methodik zur Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells nach Rabe und Deininger [12] (vgl. Abbildung 6), zur dynamischen Bestimmung von Ablaufplänen. Das System bietet theoretisch die Möglichkeit, den aktuellen Stand eines Produktionssystems in Echtzeit zu erfassen, um so einen hohen Grad an Aktualität und Detailtreue zu gewährleisten. Infolgedessen wird angenommen, dass das Originalsystem und die Systemlast dem Optimierungssystem bekannt sind, so dass der Freiheitsgrad ausschließlich in einer zeitlichen Zuordnung der Aufträge zu den zur Verfügung stehenden Betriebsmitteln, sowie in einer Zuordnung des Personals zu den Aufträgen liegt. Die Komponenten Betriebsmittel, Auftrag und Personal des Produktionssystems werden abgebildet und deren Wirkzusammenhänge

basierend auf zeitlichen Zuordnungen simuliert. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge variieren kann und eine Parallelfertigung nicht ausgeschlossen wird, so dass ein Flexibles-Job-Shop-Scheduling-Problem zu lösen ist. Aufgabe des Optimierungssystems ist die Analyse und Bewertung kurzfristiger Änderungen des Produktionsprogramms und die Bestimmung nahezu optimaler Ablaufpläne, im Hinblick auf das Zielkriterium einer hohen Liefertreue, für den Einsatz in der operativen Planung. Die wesentlichen Informationen einer Auswahl potentieller Ablaufpläne werden dem Anwender in Form von Microsoft Excel-Dateien zur Verfügung gestellt, die als Entscheidungsunterstützung für die Planungsaufgabe dienen. Zudem wird der mit dem jeweiligen Ablaufplan einhergehende Schichtplan ausgegeben. Die das reale Produktionssystem definierenden Informationen befinden sich in einer Datenbank, die als Grundlagen der Modellierung dienen. Dieses Vorgehen stellt ein hohes Maß an Flexibilität sicher, da so potentiell der aktuelle Stand der Produktion betrachtet werden kann.

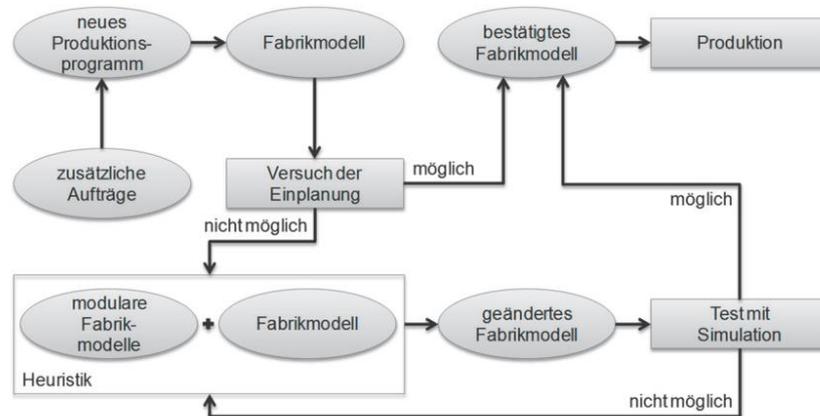


Abbildung 6: Graphischer Ansatz zur Einplanung zusätzlicher Aufträge nach Rabe und Deininger [12]

3.3 Annahmen und Vereinfachungen

Betrachtet wird eine Werkstattfertigung, die durch einen ungerichteten Materialfluss und einer Vielzahl verschiedenartiger Betriebsmittel und Produktvarianten charakterisiert wird. Typisch für eine Werkstattfertigung ist das unterschiedlich qualifizierte Personal und die vielfältigen Aufträge und Auftraggeber [9]. Es werden nur die Mitarbeiter eines Produktionssystems betrachtet, die Arbeiten an den

Betriebsmitteln oder Produkten verrichten und somit der Werkstattebene zugehörig sind. Das Personal kann sich potentiell durch unterschiedliche Qualifikationen auszeichnen, so dass ein Mitarbeiter gegebenenfalls verschiedene Aufgaben in der Produktion übernehmen kann. Ähnliches gilt für die Betriebsmittel, die grundsätzlich die Möglichkeit haben unterschiedliche Fertigungsschritte durchzuführen (Multifunktions-anlagen). Der derzeit durchführbare Fertigungsschritt einer Anlage wird durch den aktuellen Rüstzustand definiert. Eine Änderung des Istrüstzustands eines Betriebsmittels (Umrüstung) ist mit etwaigen Rüstkosten (Zeit) verbunden und wird gegebenenfalls durch speziell geschultes Personal durchgeführt, so dass bei einer Umrüstung sowohl Rüstkosten, als auch Personalkosten anfallen können. Die anfallenden Rüstkosten können reihenfolgeabhängig sein und werden durch eine Rüstmatrix angegeben. Jedes Betriebsmittel kann maximal einen Arbeitsschritt gleichzeitig durchführen (Kapazität = 1), dessen Durchführung eventuell mit Personalkosten verbunden ist. Es liegt keine Reihenfolgebeziehung zwischen den einzelnen Aufträgen vor, die einzelnen Arbeitsschritte eines Auftrags sind jedoch der Reihe nach durchzuführen. Die Bearbeitung eines Auftrags darf ausschließlich zwischen zwei abgeschlossenen Arbeitsschritten unterbrochen werden. Es wird angenommen, dass zwischen den einzelnen Arbeitsstationen ausreichend große Lager für die Halbzeuge zur Verfügung stehen, so dass diese nicht weiter betrachtet werden. Transportkosten werden grundsätzlich nicht berücksichtigt. Ferner wird der allgemeine Freigabezeitpunkt t_0 als auf 0 gesetzt betrachtet. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die zur Fertigung notwendigen Informationen, Materialien und Energien in ausreichendem Maße gegeben sind, so dass diese im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet werden.

3.4 Optimierungsaufgabe

In diesem Unterkapitel wird die Bestimmung eines Ablaufplans als Ziel der Optimierung in Abschnitt 3.4.1 detailliert betrachtet. Ferner werden die Zusammenhänge zwischen den Eingangs-, Stell- und Zielgrößen vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.4.2).

3.4.1 Optimierungsziel

Ziel des Optimierungssystems ist die Bestimmung eines möglichst optimalen Ablaufplans, der direkt in der Produktion umgesetzt werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Im Detail bedeutet das:

- Eine auftragsfeine Berechnung von Startzeiten für die Produktion
- Eine auftragsfeine Berechnung von Bearbeitungszeiten auf den einzelnen Anlagen
- Eine Maximierung der Liefertreue
- Die Erstellung möglichst optimaler Schichtpläne

Das Optimierungspotential besteht insbesondere in:

- Einer Minimierung der Umrüstvorgänge
- Einer optimalen Zuordnung von Aufträgen zu den Betriebsmitteln (Schedule)
- Einer optimalen Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge auf einer Anlage (Sequenz)
- Einer optimalen Zuordnung des benötigten Personals zu den jeweiligen Arbeitsschritten (Schedule)

3.4.2 Zusammenhänge

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.1), den Stellgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.2) und den Zielgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.3) betrachtet. Eine grafische Einordnung dieser Größen in das simulationsgestützte Optimierungssystem ist in Abbildung 8 dargestellt.

3.4.2.1 Eingangsgrößen

Als Eingangsgrößen bezeichnet man die Parameter, die einem Optimierungssystem, von außerhalb der Systemgrenzen, hinzugefügt werden. Im Kontext der betrachteten Problemstellung sind dies insbesondere die wesentlichen Informationen, die den aktuellen Zustand des Produktionssystems beschreiben:

Auftragsdaten

Die Auftragsdaten beinhalten für jeden Auftrag eine ID zur eindeutigen Identifizierung

des Auftrags, eine späteste Fertigstellungsfrist, sowie eine Liste von Arbeitsschritten, die den jeweiligen Auftrag charakterisieren. Jeder Arbeitsschritt besitzt eine ID und Informationen über den benötigten Personalaufwand zur Durchführung der Bearbeitung. Die benötigte Qualifikation des Arbeitsschritts definiert die Menge der Betriebsmittel und des Personals, die der Bearbeitung potentiell zugewiesen werden kann. Ferner hat jeder Arbeitsschritt einen Zeitfaktor, der in Kombination mit dem Zeitfaktor der zugewiesenen Anlage, die Bearbeitungsdauer definiert.

Maschinendaten

Die Maschinendaten beinhalten die Menge und Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Anlagen. Neben einer ID ist jeder Anlage der Istrüztzustand zugewiesen. Die mit der Menge an möglichen Rüstzuständen einer Anlage einhergehenden Qualifikationen werden in Relation zu den jeweiligen Rüstzuständen angegeben. Die Qualifikationen klassifizieren die Menge an durchführbaren Fertigungsschritten der Arbeitsstation. Zudem besitzt jedes Betriebsmittel eine Umrüstmatrix, über die sich in Abhängigkeit des Ist- und Sollrüztzustands der jeweilige Umrütvorgang charakterisieren lässt. Jedem potentiellen Umrütvorgang werden die damit einhergehenden Zeitkosten, der Personalaufwand und die benötigte Qualifikation zur Durchführung zugewiesen. Ferner hat jede Anlage einen Zeitfaktor, der zusammen mit dem Zeitfaktor eines Arbeitsschritts die Dauer der Bearbeitung festlegt.

Personaldaten

Das Personal der Werkstattebene wird durch die Personaldaten deklariert. Sie beinhalten für jeden Mitarbeiter Parameter zur eindeutigen Identifikation, wie Name, Vorname und ID. Zudem hat jedes Personal eine Liste an Qualifikationen, die die durchführbaren Aufgaben des Personals an den Betriebsmitteln und den Produkten definiert.

3.4.2.2 Stellgrößen

Als Stellgrößen, auch Einflussgrößen genannt, bezeichnet man die Parameter, die einen direkten Einfluss auf die Bestimmung der Zielgrößen haben. Infolgedessen werden die Stellgrößen in Abhängigkeit der betrachteten Zielgrößen definiert. Ein entscheidender

Faktor für die Charakteristik eines Optimierungsproblems sind Art und Umfang der zugrundeliegenden Einflussgrößen [22].

Stellgrößen im Kontext der vorliegenden Problemstellung sind zum einen die Zuordnung der Aufträge zu den Betriebsmitteln (Schedule), sowie die Permutation der Bearbeitungsreihenfolge auf den Anlagen (Sequenz), wodurch der Entscheidungsspielraum des Planers bei der Bestimmung eines Ablaufplans abgebildet wird. Als weitere Stellgröße ergibt sich die Zuordnung des Personals zu den jeweiligen Fertigungsschritten oder Umrüstungsvorgängen. Die Stellgrößen werden durch die Optimierung bestimmt und wirken sich auf das Simulationsmodell aus.

3.4.2.3 Zielgrößen

Die Zielgrößen eines Optimierungssystems definieren den zu optimierenden Sachverhalt und stehen in einem direkten Zusammenhang mit den Einflussgrößen [22]. Die von der Optimierung bestimmten Stellgrößen dienen als Startwerte für die angeschlossene Simulation. Die Simulation prüft die Machbarkeit der Optimierungsergebnisse und weist ihnen im positiven Fall einen Zielfunktionswert zu (vgl. Abbildung 7).

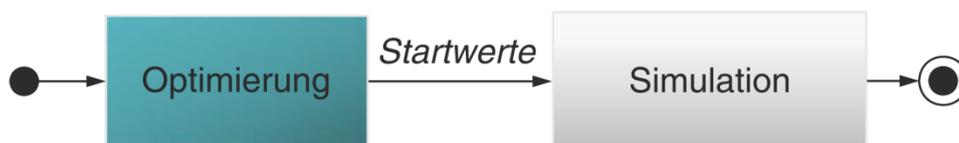


Abbildung 7: Simulation zur Überprüfung und Bewertung der Optimierungsergebnisse [22]

Somit stellt die Simulation eine Bewertung der Optimierungsergebnisse dar. Als einzige Zielgröße des vorliegenden Optimierungssystems wird die Einhaltung einer hohen Liefertreue definiert.

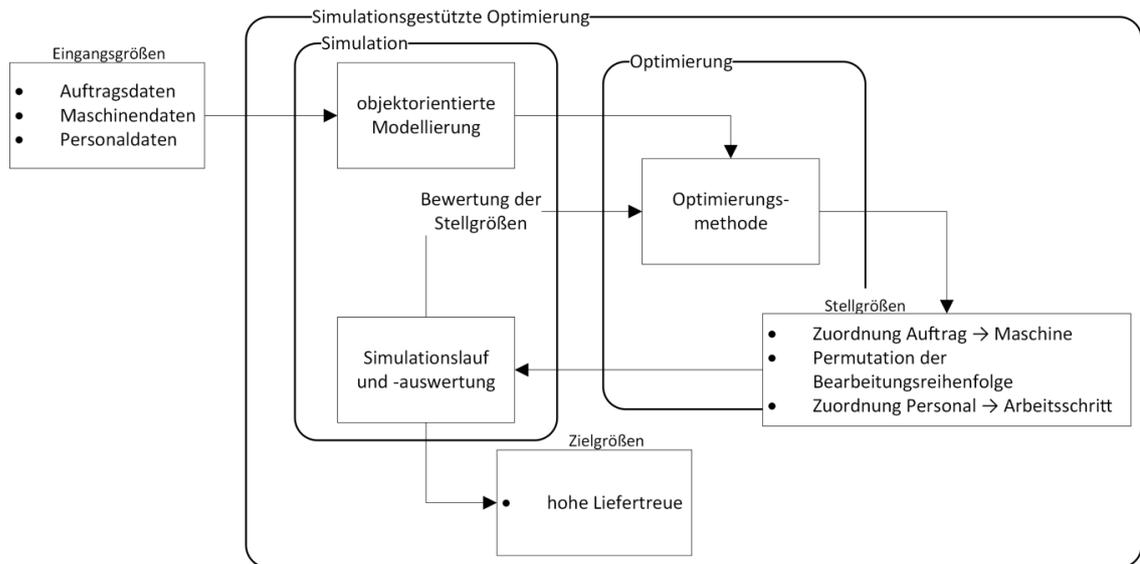


Abbildung 8: Einordnung der Eingangs-, Stell- und Zielgrößen in das simulationsgestützte Optimierungssystem

3.5 Optimierungsansatz

Ein ausgewählter heuristischer Suchalgorithmus generiert einen sogenannten Stellgrößenvektor $x := (x_k)_{k=1}^m$, der direkt in das zugrundeliegende Simulationsmodell integriert wird. Die Komponente x_k enthält alle m Stellgrößen, die zuvor als wesentlich deklariert wurden (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.2). Das Simulationsmodell bildet alle für die betrachtete Optimierungsaufgabe relevanten Komponenten und Ablaufregeln des Produktionssystems ab. Anschließend wird das um die Stellgrößen erweiterte Simulationsmodell durch einen kompletten Simulationslauf simuliert. Die Simulation ermittelt einen Zielfunktionswert $C(x)$ über alle n Zielgrößen des Zielfunktionsvektors $C_j(x)_{j=1}^n$, der die Eignung der Optimierungsergebnisse repräsentiert. In Abhängigkeit zum Simulationsergebnis werden auf Basis der qualitativ besten Stellgrößen neue potentielle Lösungen bestimmt und der Vorgang iterativ durchlaufen. Alternativ wird das Optimierungssystem durch eine geeignete Abbruchbedingung verlassen. Als Abbruchbedingung kann beispielsweise eine minimale Qualität der gefundenen Lösung oder eine maximale Anzahl an Iterationsschritten definiert werden. Somit lassen sich zwei zentrale Komponenten des Optimierungssystems ermitteln. Zum einen der Suchalgorithmus, der die Berechnung einer passenden Lösung der zugrundeliegenden Optimierungsaufgabe realisiert und zum anderen die Modellsimulation, die das zugrundeliegende Produktionssystem mit seinen Komponenten und Wirkzusammenhängen abbildet und das Optimierungsergebnis auswertet. Die

Kommunikation der Komponenten untereinander erfolgt über das Simulationsmodell, indem die Stellgrößen bzw. der Zielfunktionswert entsprechend integriert werden. Das hier verwendete Simulationssystem wurde eigens für die Aufgabenstellung konstruiert und basiert auf dem Konzept der objektorientierten Modellierung (vgl. Kapitel 4) und der ereignisdiskreten Simulation (vgl. Kapitel 6). Da sich die Simulation im Allgemeinen als der ressourcen- und zeitintensivere Teil eines Optimierungssystems herausstellt [22], wird grundsätzlich auf Animationen jeglicher Art verzichtet. Als Optimierungsmethode wurde ein heuristisches Suchverfahren auf Basis der lokalen Suche entwickelt, das ausgehend von einer initialen Lösung, den unmittelbaren Teillösungsraum (Nachbarschaft) der aktuell besten Lösung nach weiteren (besseren) Lösungen durchsucht und iterativ durchlaufen wird (vgl. Kapitel 5). Eine grafische Übersicht über die Zusammenhänge aller Komponenten der vorliegenden simulationsgestützten Optimierung wird in Abbildung 9 dargestellt.

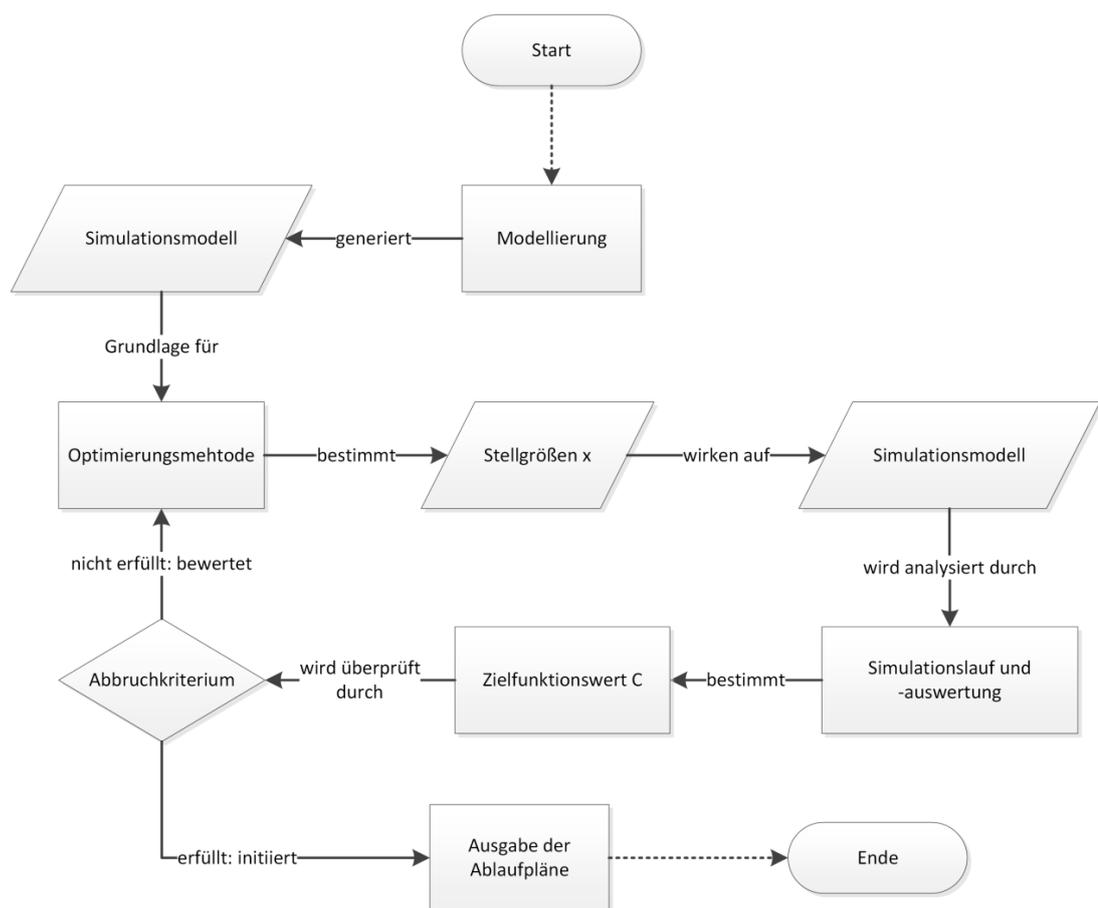


Abbildung 9: Übersicht über den Optimierungsansatz der simulationsgestützten Optimierung

3.6 Vorgehensweise

Beim Start eines Planungslaufs wird der Simulator aufgerufen, der die Generierung eines Simulationsmodells initiiert. Für die Modellierung werden alle wesentlichen Informationen aus einer Datenbank geladen und dem Simulator als Eingangsgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.1) zur Erstellung des Simulationsmodells zugeführt. Die Daten repräsentieren den realen Zustand des betrachteten Produktionssystems zu einem fixen Zeitpunkt. Durch dieses Vorgehen wird die Aktualität des Simulationsmodells gewährleistet. Der so abgebildete Zustand des Produktionssystems bleibt für die Dauer der Simulation und Optimierung unverändert und dient dem System als Ausgangspunkt für weitere Berechnungen. Die sich an die Modellierung anschließende Optimierung wird mit einer durch den Anwender zuvor bestimmten Häufigkeit iterativ durchlaufen. Die Optimierung lädt das Simulationsmodell und generiert auf Basis der Eingangsgrößen eine Zuordnung und Reihenfolge von Aufträgen zu Betriebsmitteln, sowie eine Zuordnung von Personal zu den durchzuführenden Arbeitsschritten, die anschließend als Stellgrößen im Simulationsmodell hinterlegt werden (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.2). Die aktuellen Stellgrößen werden in der Optimierung zwischengespeichert und das mit den Stellgrößen erweiterte Simulationsmodell an die Simulation weitergeleitet. Die Simulation führt einen kompletten Simulationslauf auf dem Simulationsmodell aus und bewertet die im Simulationsmodell integrierten Stellgrößen im Hinblick auf das gegebene Zielkriterium. Die Qualität wird in Form eines Zielfunktionswerts, der die Eignung der Optimierungsergebnisse in Hinblick auf den zu optimierenden Sachverhalt wiedergibt, im jeweiligen Simulationsmodell gespeichert. Das bewertete Simulationsmodell wird anschließend an die Optimierung zurückgegeben. Alle so ermittelten passenden Optimierungsergebnisse werden im System zwischengespeichert, so dass der Ablauf der Optimierung und Simulation für die entsprechenden Durchläufe einsehbar und nachvollziehbar ist. Dem Nutzer wird nach Ablauf der zuvor bestimmten Anzahl an Iterationen die Anzahl gefundener Lösungen angezeigt, aus denen die besten Abläufe ausgewählt werden können. Die wesentlichen Informationen der ausgewählten Abläufe werden abschließend in einer Excel-Datei hinterlegt, so dass diese im Anschluss vom Nutzer detailliert betrachtet und ausgewertet werden können

3.7 Systemarchitektur und –abgrenzung

Die wesentlichen Informationen des Produktionssystems zur Bestimmung eines passenden Ablaufplans wie:

- Betriebsmitteldaten (Qualifikationen, Zeitfaktoren, Umrüstzeiten, ...)
- Personaldaten (Namen, Vornamen, Qualifikationen, ...)
- Auftragsdaten (Arbeitsschritte, Zeitfaktoren, benötigte Qualifikationen, Fertigstellungszeitpunkte, ...)

liegen in Form einer Datenbank vor (vgl. Abbildung 10). Durch eine intelligente Kopplung an die Originaldaten des Produktionssystems lassen sich die Informationen der Datenbank grundsätzlich auf einem aktuellen Stand halten, was an dieser Stelle jedoch nicht näher betrachtet wird. Auf der Grundlage dieser Daten wird automatisch ein (aktuelles) objektorientiertes Simulationsmodell erstellt. Als Simulationssystem wird ein selbsterstellter, ereignisdiskreter Simulator verwendet. Im Anschluss an die automatische Modellerstellung erfolgt eine heuristische Optimierung des Simulationsmodells durch ein lokales Suchverfahren, welches iterativ durchlaufen wird. Die Simulationsergebnisse werden dem Anwender in Form von Microsoft Excel Dateien zur Verfügung gestellt.

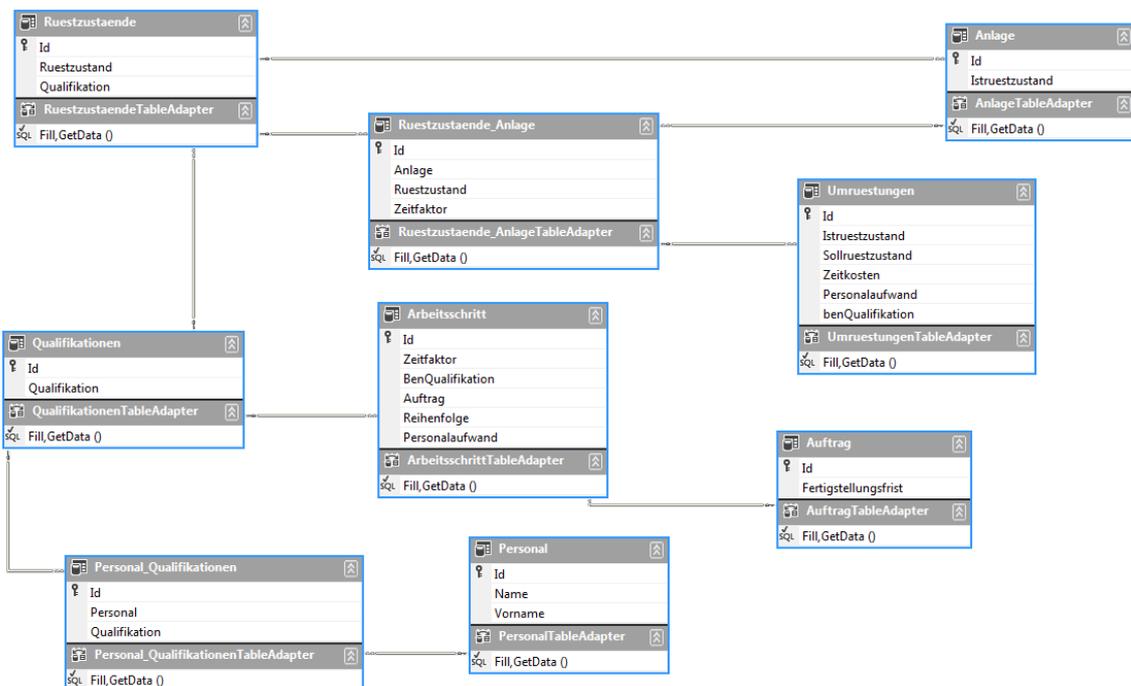


Abbildung 10: Abbildung des zugrundeliegenden relationalen Datenbankmodells

Das Optimierungssystem wurde mit Hilfe der integrierten Entwicklungsumgebung (IDE) Visual Studio 2013 – Ultimate in Form einer Microsoft .NET-Applikation entwickelt. Eine grafische Darstellung der Systemarchitektur und –abgrenzung erfolgt durch Abbildung 11.

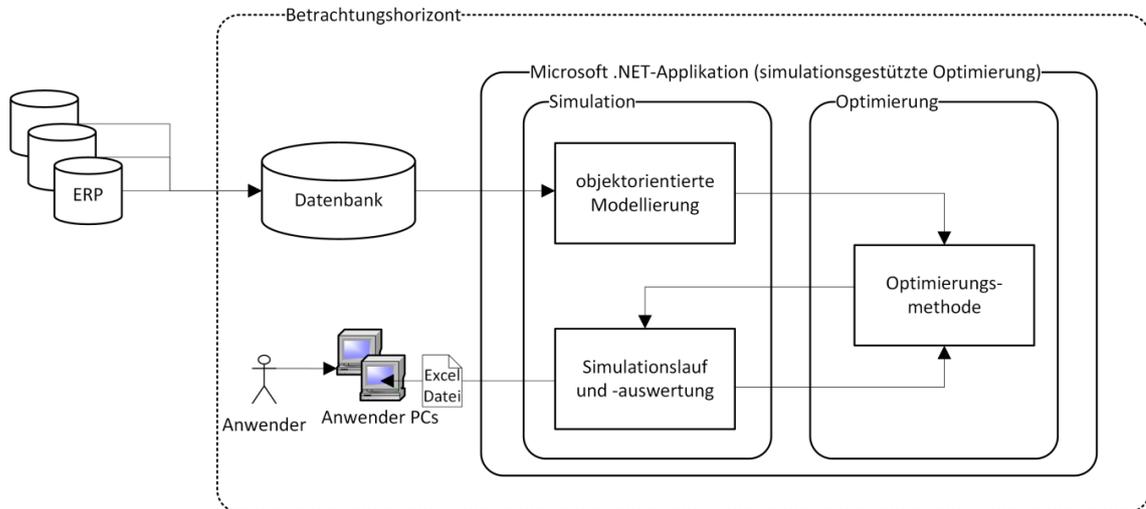


Abbildung 11: Systemarchitektur und -abgrenzung

3.8 Einbindung der simulationsgestützten Optimierung

In diesem Unterkapitel wird die mögliche Einbindung des vorgestellten Systems in den laufenden Planungsprozess (vgl. Abschnitt 3.8.1) betrachtet. Zudem wird die Einordnung des simulationsgestützten Optimierungssystems in die von Rabe und Deininger entwickelte Methodik zur Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells [12] betrachtet (vgl. Abschnitt 3.8.2).

3.8.1 Einbindung des simulationsbasierten Optimierungssystems in den operativen Planungsprozess

Das Optimierungssystem stellt wesentliche Informationen für die operative Produktionsplanung und –steuerung zur Verfügung. Das System liefert Ablaufdaten über die Auftragsauswahl und –reihenfolge, sowie über die Startzeitpunkte der einzelnen Aufträge an den jeweiligen Maschinen. Zudem beinhaltet der ausgegebene Ablaufplan Informationen über alle Umrüstungen, die für den Produktionsablauf notwendig sind. Diese Informationen dienen dem Dispatcher als

Entscheidungsunterstützung für die Zuweisung von Aufträgen zu Anlagen und den Bearbeitungsreihenfolgen auf den Maschinen, sowie zur Verteilung der Personalkapazitäten. Ferner bietet das System Informationen über die geplanten Fertigstellungszeitpunkte der einzelnen Aufträge, aus denen sich die Liefertreue bestimmen lässt. Diese kann mit den Vorgaben abgeglichen werden und stellt ein wichtiges Indiz für den Gesamtzusammenhang her.

3.8.2 Methode zur Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells

Die von Rabe und Deininger vorgestellte Methodik zur Einplanung eines zusätzlichen Auftrags durch Veränderung des Fabrikmodells (vgl. Abbildung 6) prüft für ein durch den zusätzlichen Auftrag verändertes Produktionsprogramm, ob eine Anpassung des zugrundeliegenden Fabrikmodells notwendig ist. Ist eine Einplanung des zusätzlichen Auftrags unter Einhaltung der gegebenen Zielkriterien möglich, wird das Fabrikmodell bestätigt und an die Produktion übergeben. Falls eine Einplanung des zusätzlichen Auftrags in das aktuelle Fabrikmodell nicht gelingt, generiert eine Heuristik ein neues Fabrikmodell auf Basis von modularen Fabrikmodellen. Das neue Fabrikmodell wird anschließend an das vorgestellte Optimierungssystem übermittelt und validiert. Das Optimierungssystem prüft, ob passende Ablaufpläne auf Basis des veränderten Fabrikmodells und der zugrundeliegenden Systemlast bestimmt werden können. Die Generierung neuer Fabrikmodelle und die anschließende Bewertung durch Optimierung und Simulation werden iterativ durchlaufen, bis ein passendes Fabrikmodell bestimmt wurde. Das ermittelte Fabrikmodell wird anschließend bestätigt und an die Produktion übermittelt. Eine grafische Einordnung der simulationsgestützten Optimierung in die Methodik von Rabe und Deininger erfolgt in Abbildung 12.

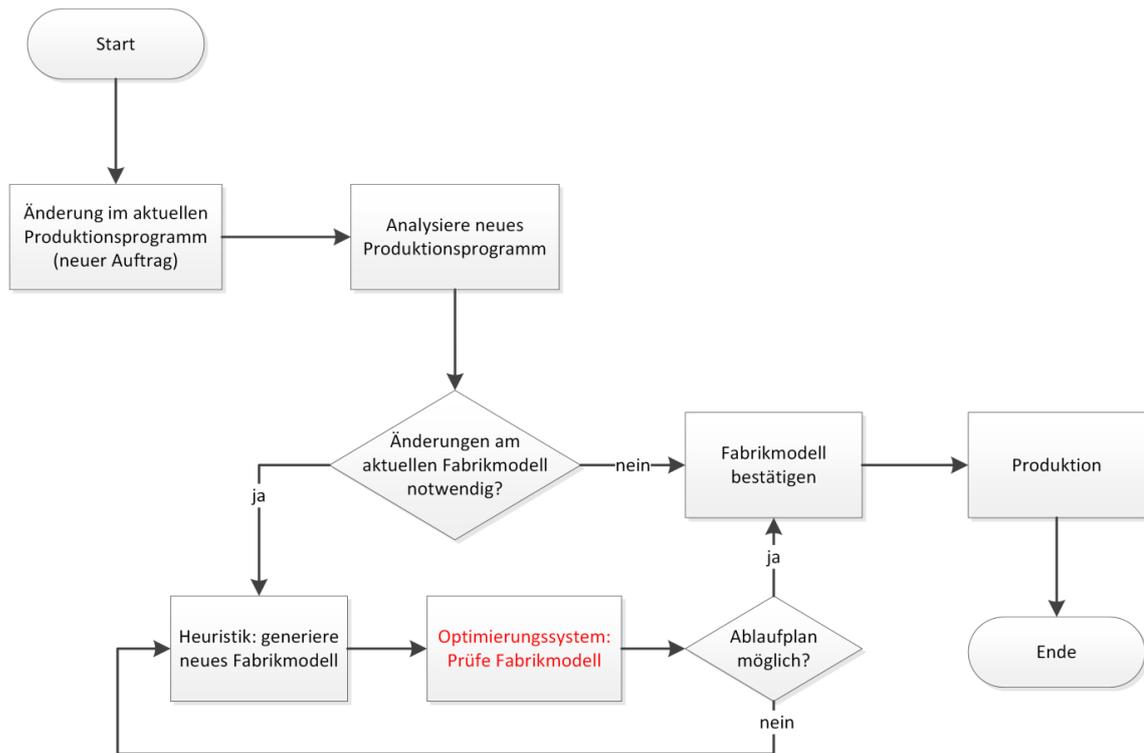


Abbildung 12: Einordnung der simulationsgestützten Optimierung in die Methodik von Rabe und Deininger [12].

4 Entwicklung der Struktur des Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Modellstruktur vorgestellt. Die Modellstruktur wird durch die Aufbaustruktur (vgl. Unterkapitel 4.1) und die Ablaufstruktur (vgl. Unterkapitel 4.2) definiert. Bei der Modellierung wurde ein objektorientierter Ansatz verfolgt. Für jede übergeordnete Kategorie der wesentlichen Komponenten des zugrundeliegenden Produktionssystems wurde eine Klasse definiert, die der Modellierung als computergestützte Fabrikmodule zur Verfügung stehen. Auf Basis der zugrundeliegenden Informationen aus der Datenbank, lässt sich für jedes betrachtete Element des Produktionssystems (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.1) ein Objekt erstellen, welches die zugrundeliegende reale Komponente repräsentiert. Eine grafische Darstellung des Modells wird in Abbildung 19 dargestellt.

4.1 Aufbaustruktur des Modells

Im Hinblick auf die Modellentwicklung wird das zu betrachtende Produktionssystem auf die im Kontext der Aufgabenstellung wesentlichen Komponenten reduziert. Die

Modellierung der einzelnen Elemente basiert grundsätzlich auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.4.3. Im Folgenden sind das die physischen Komponenten Betriebsmittel (vgl. Abschnitt 4.1.1) und Personal (vgl. Abschnitt 4.1.2), sowie die logistischen Größen Arbeitsschritt (vgl. Abschnitt 4.1.3) und Auftrag (vgl. Abschnitt 4.1.4). Diese physischen und logistischen Modellelemente werden durch die Komponente Fabrikmodell zusammen gefasst (vgl. Abschnitt 4.1.5). Die Parametrierung der Modellelemente erfolgt auf Basis der Eingangsgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.1). Die betrachteten Elemente verfügen über keine eigene interne Ablauflogik, so dass diese als Objekte klassifiziert werden. Die durch ein Klassendiagramm repräsentierte grafische Darstellung der Aufbaustruktur wird in Abbildung 13 dargestellt.

4.1.1 Betriebsmittel

Das Element Betriebsmittel (vgl. Unterabschnitt 2.4.3.3) umfasst alle technischen Arbeitsmittel, die zur Durchführung eines Bearbeitungsschritts benötigt werden. Jedes dieser Modellelemente besitzt Parameter zur eindeutigen Identifikation und Zuordnung zu einer realen Anlage. Betriebsmittel, sogenannte Multifunktionsanlagen, können potentiell unterschiedliche Produktionsvorgänge durchführen, die als Qualifikationen der Maschine definiert werden. Jeder Qualifikation wird die Menge an Rüstzustände zugeordnet, die die jeweiligen Materialausstattungen des technischen Arbeitsmittels definieren, die eine Bearbeitung eines Fertigungsschritts mit entsprechend benötigter Qualifikation potentiell ermöglichen [41]. Ferner wird jedem Betriebsmittelobjekt ein initialer Istrüstzustand zugewiesen, der die technische Ausstattung der Anlage zu Beginn eines Planungslaufs angibt. Die bei einem Umrüstvorgang anfallenden Rüstkosten (Zeit), sowie der erforderliche Personalaufwand und die benötigte Qualifikation des Personals sind sowohl vom aktuellen Rüstzustand, als auch vom Sollrüstzustand abhängig und werden in einer zweidimensionalen Umrüstmatrix hinterlegt. Jeder möglichen Qualifikation der Maschine wird ein Zeitfaktor zugeordnet, der zusammen mit dem Zeitfaktor eines Arbeitsschritts die Bearbeitungsdauer des Arbeitsschritts auf der Anlage bestimmt. Ferner sind dem Betriebsmittelobjekt zwei Puffer zugewiesen, in denen die für eine Bearbeitung zur Verfügung stehenden Personal- und Auftragsobjekte zwischengespeichert werden. Desweiteren werden die dem Betriebsmittel zugehörigen Stellgrößen im entsprechenden Objekt hinterlegt. Dazu gehört neben der Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge eine Personalliste, in der das

einer Bearbeitung zugewiesene Personal gespeichert wird. Zusätzlich werden dem Element Informationen über die für die Bearbeitung der Aufträge nötigen Reihenfolge der Rüstzustände zugewiesen. Über einen Bearbeitungsindex lassen sich sowohl der aktuell zu bearbeitende Arbeitsschritt, als auch das zur Durchführung zugewiesene Personal und der benötigte Rüstzustand der Anlage ermitteln. Der Zustand der Anlage gibt an, ob derzeit ein Auftrag bearbeitet wird oder das Betriebsmittel potentiell bereit ist.

4.1.2 Personal

Das Element Personal repräsentiert einen Mitarbeiter mit seinen Eigenschaften und Kompetenzen. Durch den (Vor-)Namen und einer ID lässt sich das Element eindeutig identifizieren und einer realen Person zuordnen. Da ein Mitarbeiter potentiell verschiedene Produktions- und Umrüstschritte betreuen oder durchführen kann, werden die damit einhergehenden Qualifikationen im Personalobjekt gespeichert. Diese definieren die Menge der Handlungen, die das entsprechende Personal durchführen darf. Auf Grundlage der einfließenden Stellgrößen wird jedem Personalelement eine Liste mit Betriebsmitteln zugewiesen. Über die Liste lässt sich die Reihenfolge der Betriebsmittel bestimmen, an denen das Personal einen Fertigungs- oder Umrüstschritt durchzuführen hat. Über einen Index lässt sich das aktuell zugewiesene Betriebsmittel bestimmen.

4.1.3 Arbeitsschritt

Das Modellelement Arbeitsschritt lässt sich über eine ID eindeutig identifizieren und einem Arbeitsschritt aus der realen Welt zuordnen. Jedem Arbeitsschritt ist ein Zeitfaktor zugeordnet, der im Zusammenhang mit dem Zeitfaktor eines Betriebsmittels die Bearbeitungsdauer des Arbeitsschritts auf dem entsprechenden Betriebsmittel definiert. Die benötigte Qualifikation zur Bearbeitung des Arbeitsschritts wird im Modellelement gespeichert. Ferner wird die Bearbeitungsdauer durch die Optimierungsmethode im Arbeitsschrittobjekt hinterlegt. Die Bearbeitungsdauer wird auf Basis der Zuordnung von Arbeitsschritt zu Betriebsmittel und dem zugewiesenen Rüstzustand der Anlage definiert.

4.1.4 Auftrag

Über eine ID lässt sich das Auftragsobjekt eindeutig identifizieren und einem realen Auftrag zuordnen. Ein Auftrag repräsentiert mehrere zusammengehörige Arbeitsschritte, die innerhalb des Elements in einer sortierten Liste gespeichert werden. Über einen Index lässt sich der aktuelle Arbeitsschritt eines Auftrags bestimmen. Außerdem besitzt ein Auftrag Informationen über die Bearbeitungsreihenfolge und Zuordnung der einzelnen Arbeitsschritte zu den Betriebsmitteln, die als Stellgrößen in das Simulationsmodell einfließen. Ferner wird jedem Auftragsobjekt eine späteste Fertigstellungsfrist zugewiesen. Der durch die Simulationsdurchführung bestimmte Fertigstellungszeitpunkt wird im Objekt hinterlegt und gibt in Relation zur Fertigstellungsfrist an, ob ein Auftrag fristgerecht fertiggestellt wurde. Aufträge lassen sich über den Parameter Typ bspw. in Fertigungs- und Umrüstaufträge klassifizieren

4.1.5 Fabrikmodell

Das Element Fabrikmodell bildet die relevante Grundstruktur eines zu betrachtenden Produktionssystems ab und wird auf Basis der Eingangsgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.1) generiert. Das Fabrikmodell wird aus Fabrikmodulen erstellt, die mit den zugrundeliegenden Informationen aus der Datenbank initialisiert werden. Das Modellelement fasst die wesentlichen Komponenten des betrachteten Produktionssystems Betriebsmittel, Personal und Aufträge zusammen, die jeweils in einer Liste gespeichert werden. Zudem besitzt das Fabrikmodell eine Variable Bewertung, in der im weiteren Verlauf der Simulation die Eignung im Hinblick auf die Zielfunktion hinterlegt wird. Zusätzlich hat jedes Fabrikmodell eine Quelle und Senke, die als systemübergreifende Schnittstellen dienen. Nach der Durchführung des heuristischen Suchverfahrens werden dem Fabrikmodell die Stellgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2.2) bereitgestellt, die wie beschrieben, an die Elemente Betriebsmittel, Personal und Auftrag bzw. Arbeitsschritt übergeben werden. Die im Anschluss erfolgende Simulationsvorbereitung initialisiert das Fabrikmodell, indem die Elemente Personal und Auftrag der Quelle hinzugefügt werden. Anschließend steht das Fabrikmodell als vollständige Aufbaustruktur der Simulation zur Verfügung. Die im Verlauf der Simulationsdurchführung eintretenden Wirkzusammenhänge werden in einer Variable gespeichert, so dass der Ablauf des Simulationslaufs rekonstruierbar ist.

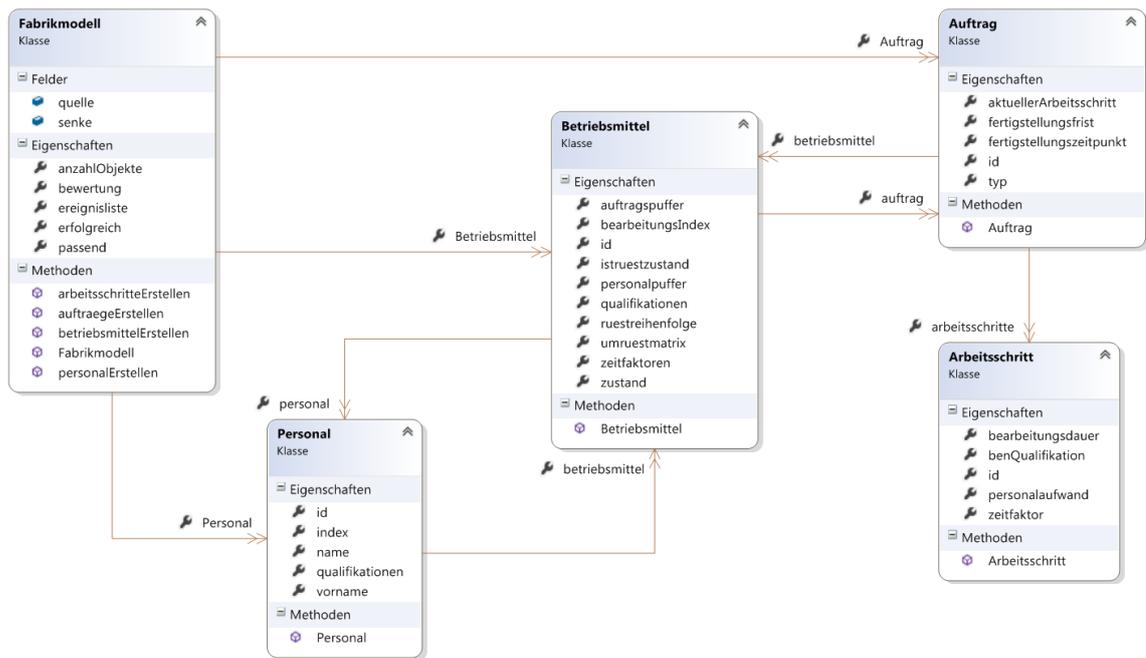


Abbildung 13: Klassendiagramm im Kontext der Aufbaustruktur des Fabrikmodells

4.2 Ablaufstruktur des Modells

In diesem Unterkapitel werden die logischen Wirkzusammenhänge der einzelnen Modellelemente betrachtet. Da die wesentlichen Zustandsänderungen des zugrundeliegenden Systems zu diskreten Zeitpunkten in Form von Ereignissen eintreten, beispielsweise die Fertigstellung eines Arbeitsschritts oder die Ankunft eines Auftrags an einem Betriebsmittel, handelt es sich um ein ereignisgesteuertes System. Infolgedessen wird eine ereignisdiskrete Simulation realisiert, bei der Zustandsänderungen des Modells auf Grund von Ereignissen zu diskreten Zeitpunkten eintreten (vgl. Kapitel 6). Entsprechend werden die Wirkzusammenhänge des Modells auf Basis von Ereignissen und Aktivitäten realisiert (vgl. Abschnitt 4.2.2). Ein Sonderfall stellen die Quelle und Senke, als Schnittstelle für eingehende bzw. ausgehende Informationen dar (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.2.3). Eine grafische Darstellung der Ablaufstruktur in Verbindung mit der Aufbaustruktur aus Unterkapitel 4.1 wird in Abbildung 19 aufgezeigt.

4.2.1 Quelle

Die Quelle dient als Schnittstelle für einen einseitigen Informationsaustausch über die Grenzen des Systems hinaus. Die Simulationsvorbereitung (vgl. Unterkapitel 6.1) fügt

alle für den aktuellen Simulationslauf wesentlichen Personal- und Auftragsobjekte über die Quelle dem System hinzu. Anschließend werden die Objekte entsprechend den Wirkzusammenhängen des Modells bearbeitet.

4.2.2 Ereignisse & Aktivitäten

In diesem Abschnitt werden die Wirkzusammenhänge des Modells, in Form von Ereignissen und Aktivitäten vorgestellt. In Unterabschnitt 4.2.2.1 wird das *Verteile*-Ereignis vorgestellt, das zu Beginn eines Simulationslaufs die einzelnen Objekte an die entsprechenden Arbeitsstationen verteilt. Die Ankunft eines Objekts an einer Anlage wird in Unterabschnitt 4.2.2.2 betrachtet. Eine Überprüfung aller Voraussetzungen zur Bearbeitung eines Auftrags wird in Unterabschnitt 4.2.2.3 dargestellt. Die eigentliche Durchführung eines Arbeitsschritts wird über die Aktivität *Bearbeitung* realisiert (vgl. Unterabschnitt 4.2.2.4). Zum Schluss wird in Unterabschnitt 4.2.2.5 das Ereignis *Entlade* betrachtet, mit dem die Weiterleitung der an der Bearbeitung beteiligten Objekte dargestellt wird.

4.2.2.1 Verteile-Ereignis

Eingabe

Eintrittszeit, Klassifikation

Aufgabe

Nach der Simulationsvorbereitung (vgl. Unterkapitel 6.1) befinden sich alle Auftrags- und Personalobjekte in der Quelle. Das Ereignis *Verteile* transferiert diese Objekte an das ihnen als nächstes zugewiesene Betriebsmittel.

Ablauf

Zunächst wird geprüft, ob der Quelle mindestens ein Objekt zugewiesen ist. Falls sich keine Objekte in der Quelle befinden und somit bereits alle Objekte verteilt wurden, wird das Ereignis beendet. Ist der Quelle mindestens ein Objekt zugeordnet, wird das erste Objekt aus der Quelle ausgewählt und die nächste Arbeitsstation des entsprechenden Objekts ermittelt. Anschließend wird ein Ereignis *Ankunft* (vgl. Unterabschnitt 4.2.2.2) mit dem ausgewählten Objekt und dem ermittelten Betriebsmittel erstellt und der Ereignisliste hinzugefügt. Infolgedessen wird das ausgewählte Objekt aus der Quelle entfernt. Ferner wird ein neues Ereignis *Verteile*

erstellt und ebenfalls in die Ereignisliste übernommen. Der Zeitpunkt der neu erstellten Ereignisse entspricht dem aktuellen Zeitpunkt der Simulation. Anschließend wird das aktuelle Ereignis *Verteile* beendet. Eine grafische Darstellung des Ablaufs ist in Abbildung 14 dargestellt.

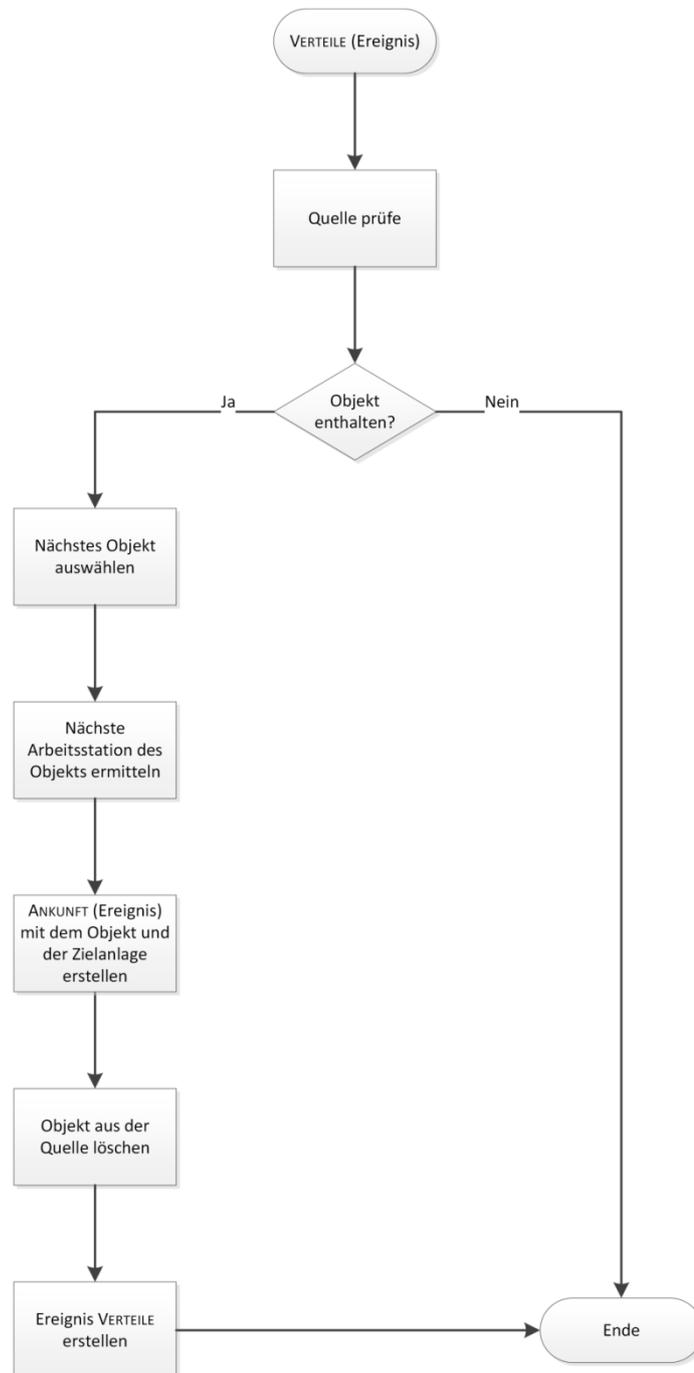


Abbildung 14: Programmablaufplan des Ereignisses *Verteile*

4.2.2.2 Ankunft-Ereignis

Eingabe

Eintrittszeit, Klassifikation, Personal- oder Auftragsobjekt, Betriebsmittel

Aufgabe

Das Ereignis *Ankunft* (vgl. Abbildung 15) wird immer dann ausgelöst, wenn ein Personal- oder Auftragsobjekt einem Betriebsmittel neu zugewiesen wird. Das Ereignis verwaltet das ankommende Objekt an der jeweiligen Anlage.

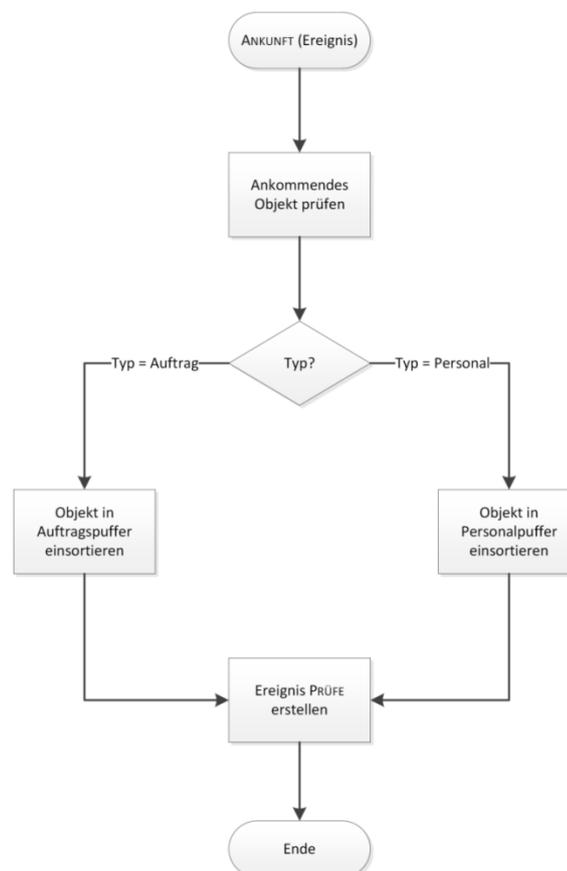


Abbildung 15: Programmablaufplan des Ereignisses *Ankunft*

Ablauf

Zunächst wird das ankommende Objekt überprüft und der Objekttyp (Auftrag oder Personal) ermittelt. Anschließend wird das Objekt dem jeweiligen Puffer der Anlage hinzugefügt, Aufträge werden dem Auftragspuffer und Personal dem Personalpuffer zugewiesen. Objekte innerhalb des Puffers stehen dem Betriebsmittel für eine Bearbeitung zur Verfügung. Nachdem das ankommende Objekt verwaltet wurde, wird

ein Ereignis *Prüfe* (vgl. Unterabschnitt 4.2.2.3) mit der aktuellen Arbeitsstation und der derzeitigen Simulationszeit erstellt und der Ereignisliste hinzugefügt. Das Ereignis *Ankunft* wird anschließend beendet.

4.2.2.3 *Prüfe-Ereignis*

Eingabe

Eintrittszeit, Klassifikation, Betriebsmittel

Aufgabe

Das Ereignis *Prüfe* wird immer dann ausgelöst, wenn ein Ereignis *Ankunft* durchgeführt wurde (vgl. Unterabschnitt 4.2.2.2) oder die Bearbeitung eines Arbeitsschritts abgeschlossen ist (vgl. Unterabschnitt 4.2.2.5). Es wird geprüft, ob alle Voraussetzungen zur Durchführung des nächsten Arbeitsschritts an der jeweiligen Arbeitsstation erfüllt sind und gegebenenfalls wird ein Bearbeitungsvorgang initiiert.

Ablauf

Zunächst wird der Zustand der Arbeitsstation überprüft. Befindet sich die Arbeitsstation im Zustand ‚Beschäftigt‘, weil beispielsweise zurzeit eine Bearbeitung durchgeführt wird, wird das Ereignis beendet, so dass eine Nichtgleichzeitigkeit sichergestellt wird. Ist der Zustand der Anlage auf ‚Bereit‘ gesetzt, wird als nächstes ermittelt, ob sich die zur Bearbeitung des nächsten Arbeitsschritts benötigten Objekte (Personal und Auftrag) bereits in den jeweiligen Puffern der Anlage befinden. Wenn dies nicht der Fall ist, ist das Ereignis abgeschlossen, da die Voraussetzungen zur Durchführung des nächsten Bearbeitungsschritts nicht erfüllt sind. Stehen alle benötigten Objekte zur Verfügung, wird der Zustand der Anlage auf ‚Beschäftigt‘ gesetzt und die Bearbeitung des nächsten Auftrags initiiert. Dazu wird eine Aktivität *Bearbeitung* mit der derzeitigen Arbeitsstation und den an der Bearbeitung beteiligten Objekten zum aktuellen Simulationszeitpunkt erstellt und der Ereignisliste hinzugefügt. Anschließend werden die zur Durchführung benötigten Objekte aus den jeweiligen Puffern entfernt und das Ereignis *Prüfe* beendet.

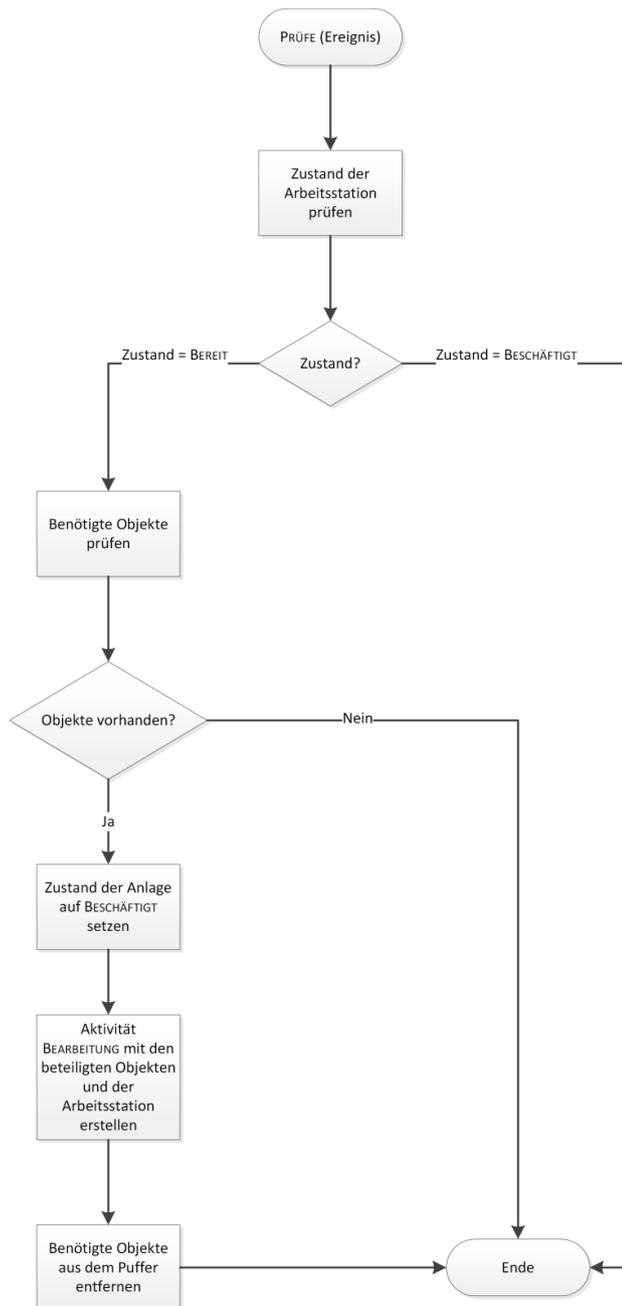


Abbildung 16: Programmablaufplan des Ereignisses *Prüfe*

4.2.2.4 Bearbeitung

Eingabe

Eintrittszeit, Klassifikation, gegebenenfalls eine Liste an Personal, Auftrag, Betriebsmittel

Aufgabe

Die *Bearbeitung* (vgl. Abbildung 17) repräsentiert die Durchführung eines Arbeitsschritts mit den beteiligten Objekten auf der zugehörigen Arbeitsstation,

inklusive der dazu benötigten Bearbeitungsdauer. Entsprechend handelt es sich bei der Bearbeitung per Definition um eine Aktivität. Diese wird immer dann ausgeführt, wenn alle Voraussetzungen an einer Arbeitsstation zur Bearbeitung eines Auftrags erfüllt sind.

Ablauf

Zunächst wird die im Auftrag hinterlegte Bearbeitungsdauer des derzeitigen Arbeitsschrittes ausgelesen und zwischengespeichert. Die Indizes der beteiligten Objekte werden um 1 erhöht. Anschließend gibt der Index des Auftrags sowohl den nächsten Arbeitsschritt, als auch die als nächstes zugewiesene Anlage an. Die Indizes des etwaig beteiligten Personals zeigen jeweils auf das ihnen als nächstes zugewiesene Betriebsmittel. Nachdem die Objekte für den nächsten Arbeitsschritt vorbereitet wurden, wird ein Ereignis *Entlade* mit allen beteiligten Objekten (Auftrag und etwaiges Personal), der aktuellen Arbeitsstation und der Eintrittszeit t' erstellt und der Ereignisliste hinzugefügt. Der Zeitpunkt t' , zu dem das Ereignis *Entlade* eintritt, ergibt sich aus der Summe der aktuellen Simulationszeit und der zuvor ausgelesenen Bearbeitungsdauer zur Durchführung des aktuellen Arbeitsschrittes. Abschließend wird der Bearbeitungs-Index der Anlage um 1 erhöht und das aktuelle Ereignis beendet.

4.2.2.5 Entlade-Ereignis

Eingabe

Eintrittszeit, Klassifikation, gegebenenfalls eine Liste an Personal, Auftrag, Betriebsmittel

Aufgabe

Das Ereignis *Entlade* wird immer dann ausgeführt, wenn die Bearbeitung eines Auftrags an einer Arbeitsstation durchgeführt wurde. Die Aufgabe des Entlade-Ereignisses ist das Weiterleiten der beteiligten Objekte an die nächste Arbeitsstation bzw. Senke.

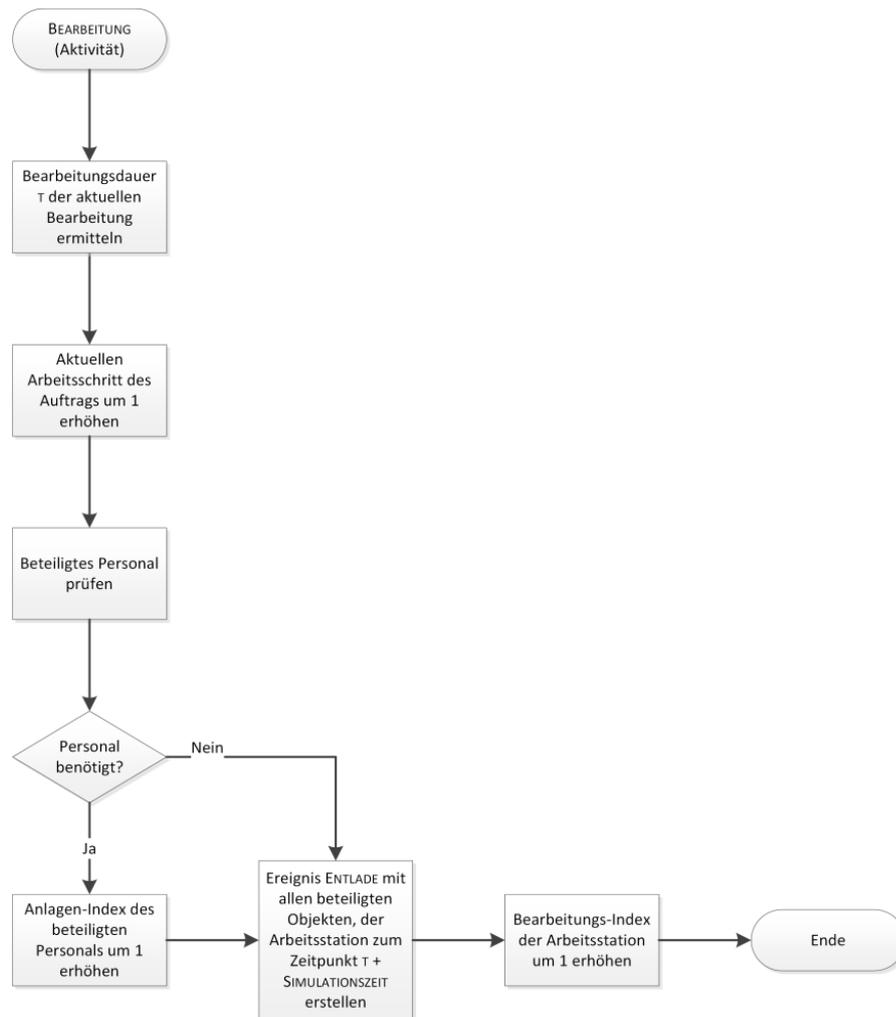


Abbildung 17: Programmablaufplan der Aktivität *Bearbeitung*

Ablauf

Zunächst wird der bearbeitete Auftrag geprüft. Ist dieser abgeschlossen, wird der Fertigstellungszeitpunkt auf die aktuelle Simulationszeit gesetzt und der Auftrag an die Senke weitergeleitet. Falls weitere Arbeitsschritte zur Fertigstellung des Auftrags notwendig sind, wird dieser an die ihm als nächstes zugewiesene Arbeitsstation übermittelt. Infolgedessen wird ein *Ankunft*-Ereignis mit dem Auftrag, der entsprechenden Zielanlage und dem aktuellen Simulationszeitpunkt erstellt und der Ereignisliste hinzugefügt. Anschließend wird geprüft, ob dem *Entlade*-Ereignis eine Liste an Personalobjekten übergeben wurde. Falls dem nicht so ist und für die im direkten Zusammenhang mit dem *Entlade*-Ereignis durchgeführte Bearbeitung kein Personal benötigt wurde, wird der Zustand der Anlage auf ‚Bereit‘ gesetzt. Zudem wird ein Ereignis *Prüfe* mit der aktuellen Arbeitsstation und der derzeitigen Simulationszeit erstellt und in die Ereignisliste einsortiert, sowie das aktuelle Ereignis beendet. Falls

Personalobjekte an der Bearbeitung des Arbeitsschrittes beteiligt waren, wird für jedes dieser Objekte geprüft, ob das jeweilige Personal zur Durchführung weiterer Arbeitsschritte eingeteilt wurde oder für den aktuellen Simulationslauf nicht weiter benötigt wird. Personal, dem für die Dauer des Simulationslaufs keine weitere Bearbeitung zugewiesen wurde, wird an die Senke weitergeleitet. Das weiterhin benötigte Personal wird an das nächste Betriebsmittel transferiert, indem ein Ereignis *Ankunft* mit dem entsprechenden Personal, der Zielanlage und der aktuellen Simulationszeit erstellt und der Ereignisliste hinzugefügt wird. Abschließend wird der Zustand der aktuellen Arbeitsstation auf ‚Bereit‘ gesetzt, ein *Prüfe*-Ereignis mit der derzeitigen Anlage erstellt und das derzeitige Ereignis beendet.

4.2.3 Senke

Die Senke dient ähnlich wie die Quelle (vgl. Abschnitt 4.2.1) zum einseitigen Austausch von Informationen über die Systemgrenze hinaus. Sobald keine weiteren Ereignisse durchgeführt werden, greift die Simulationsauswertung auf Informationen der Senke zu. Geprüft wird beispielsweise, ob sich alle Fertigungsaufträge in der Senke befinden und somit fertiggestellt wurden.

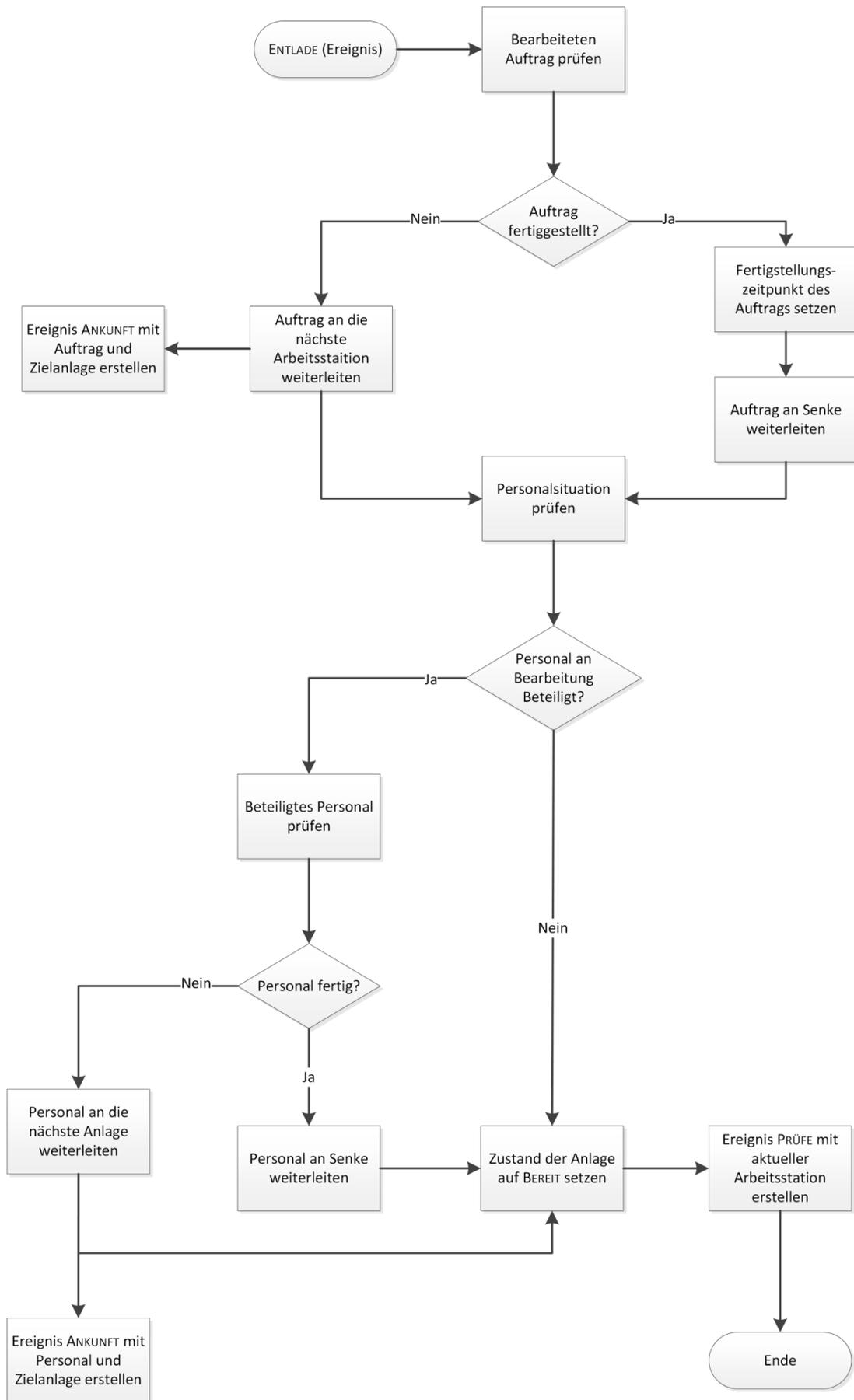


Abbildung 18: Programmablaufplan des Ereignisses *Entlade*

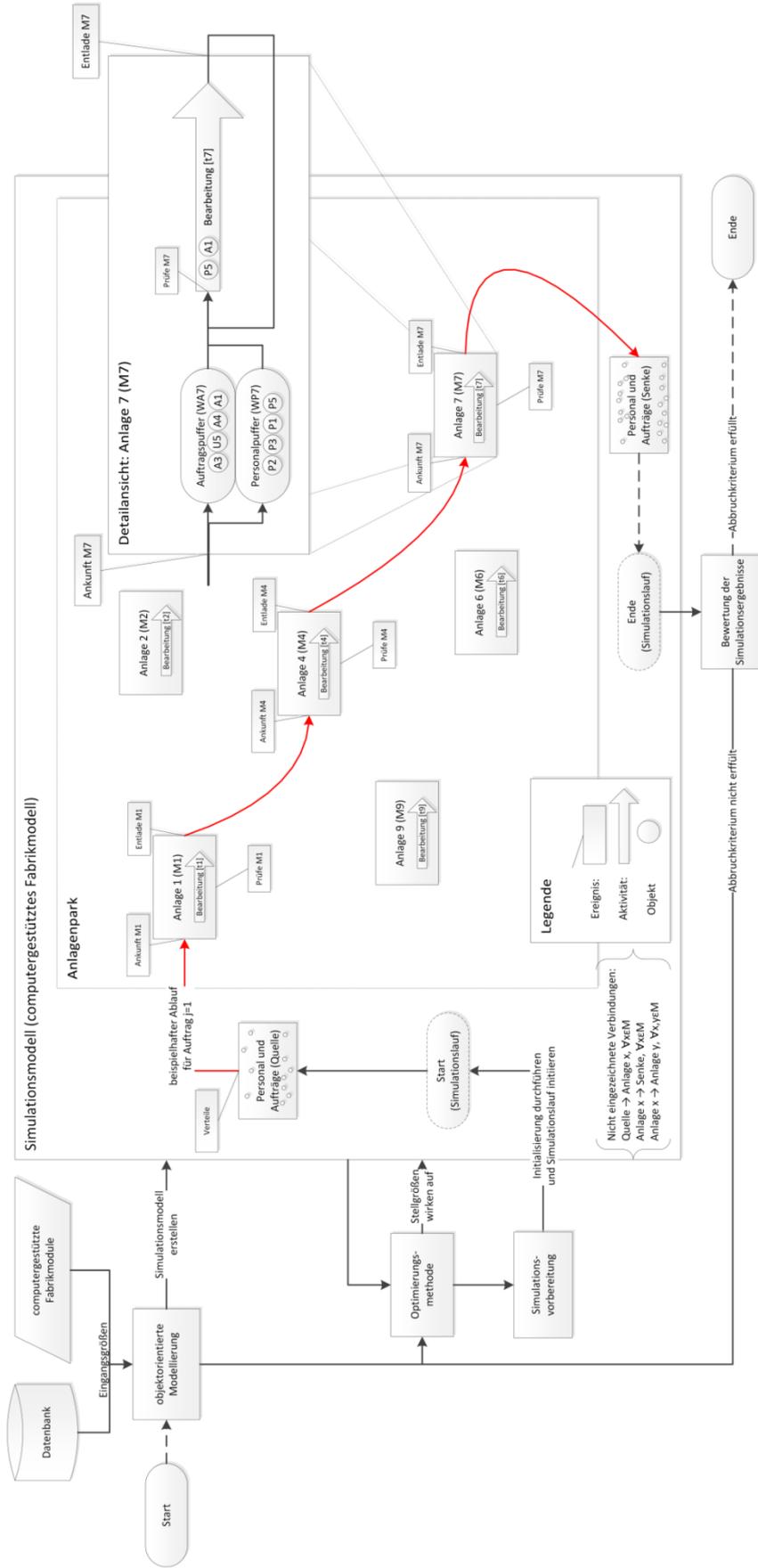


Abbildung 19: Aufbau- und Ablaufstruktur des Simulationsmodells

5 Heuristischer Suchalgorithmus zur Lösung des Flexiblen-Job-Shop-Scheduling-Problems

Die Optimierung dient im Wesentlichen der Generierung passender Stellgrößen in Form einer Zuordnung und Reihenfolge von Aufträgen zu Betriebsmitteln und einer Zuordnung von Personal zu Bearbeitungsschritten (vgl. Unterkapitel 5.1). Die damit einhergehenden Anforderungen an einen Optimierungsalgorithmus, eine Bewertung der state-of-the-art Algorithmen und eine anschließende Auswahl der zugrundeliegenden Optimierungsmethodik werden in Unterkapitel 5.2 analysiert. Der Aufbau und Ablauf der verwendeten Optimierungsmethode wird in Unterkapitel 5.3 detailliert betrachtet.

5.1 Aufgabe der Optimierung

Die zentrale Aufgabe des Optimierungsalgorithmus ist das Generieren einer passenden Zuordnung von Arbeitsschritten zu den zur Verfügung stehenden Betriebsmitteln. Aufbauend auf dieser Zuordnung ist für jedes Betriebsmittel die Permutation der zugewiesenen Arbeitsschritte zu bestimmen. Infolge der Reihenfolgebestimmung treten gegebenenfalls Umrüstvorgänge auf, die ebenfalls zu ermitteln und den entsprechenden Betriebsmitteln zuzuweisen sind. Die Durchführung von Fertigungs- oder Umrüstaufträgen kann mit Personalaufwand verbunden sein, so dass eine Zuordnung von Personal zu den entsprechenden Bearbeitungsschritten zu generieren ist. Anschließend gilt es auf Basis der Zuordnung von Auftrag zu Betriebsmittel die Bearbeitungsdauer aller Arbeitsschritte zu bestimmen und im jeweiligen Arbeitsschritt zu speichern.

5.2 Anforderungen, Bewertung und Auswahl einer Optimierungsmethode

Das zugrundeliegende Flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem gehört zur Klasse der NP-schweren Probleme, so dass ausschließlich heuristische Verfahren betrachtet werden (vgl. Abschnitt 2.4.5). Um für große Problemstellungen mit mehreren hundert Betriebsmitteln, Personal und Aufträgen mit ebenso vielen Arbeitsschritten zeitnahe Ergebnisse zu bestimmen, sind nur vergleichsweise wenige Iterationsschritte möglich. Um eine ausreichende Qualität der bestimmten Lösungen zu gewährleisten, muss eine passende Optimierungsmethode ein entsprechend gutes Konvergenzverhalten

aufweisen. In Anbetracht dessen, ist die Verwendung von Algorithmen, die pro Iterationsschritt mehrere Teilgebiete des zugrundeliegenden Suchraums betrachten, wie beispielsweise Genetische Algorithmen oder diverse Schwarmalgorithmen (vgl. Unterkapitel 2.5), nicht sinnvoll [22]. Eine darüberhinausgehende Aussage über die Eignung einzelner Ansätze der heuristischen Suchverfahren ist, wenn überhaupt, nur schwer möglich. Heuristiken werden in der Regel problemspezifisch angepasst, so dass nicht direkt zu ermitteln ist, ob beispielsweise ein Genetischer Algorithmus immer die beste Wahl zur Lösung eines FJSS-Problems ist (vgl. Unterkapitel 2.5).

Als Optimierungsmethode wird ein heuristisches Suchverfahren basierend auf dem Prinzip der lokalen Suche realisiert (vgl. Abschnitt 2.5.1 und Abschnitt 2.5.2). Ausgehend von einer initialen Lösung, beschränkt sich die weitere Lösungssuche lediglich auf einen lokalen Bereich des Gesamtlösungsraums, der durch die initiale Lösung und die maximale Anzahl an Iterationsschritten definiert wird.

5.3 Ablauf der Optimierungsmethode

In diesem Unterkapitel wird der Ablauf der Optimierungsmethode vorgestellt. Zunächst erfolgt die Generierung einer initialen Lösung des Flexiblen-Job-Shop-Scheduling-Problems (vgl. Abschnitt 5.3.1). Dieser Vorgang wird solange durchgeführt, bis eine passende Lösung gefunden wurde. Eine Lösung wird als passend bezeichnet, wenn diese die Anforderung an eine hohe Liefertreue erfüllt, d.h. alle Aufträge fristgerecht fertiggestellt wurden. Potentielle Lösungen werden an die Simulation übergeben und dort bewertet. In den weiteren Iterationsschritten werden, aufbauend auf der derzeitigen besten gefundenen Lösung, weitere Lösungen durch ein heuristisches Suchverfahren generiert (vgl. Abschnitt 5.3.2). Passende Lösungen werden ihrer Eignung entsprechend sortiert und stehen dem Nutzer nach Ablauf des Planungslaufs zur Verfügung. Eine Übersicht über die Einordnung und den Ablauf der Optimierungsmethode, im Kontext der simulationsgestützten Optimierung, erfolgt in Abbildung 20.

5.3.1 Ablauf zur Generierung einer initialen Lösung des Flexiblen-Job-shop-Scheduling-Problems

Zunächst wird das von dem Simulator generierte Simulationsmodell in die Optimierung geladen. Für die Generierung der initialen Lösung wird zunächst die Liste der Aufträge

den Fertigstellungsfristen entsprechend aufsteigend sortiert. Beginnend mit dem Auftrag mit dem frühesten Fertigstellungszeitpunkt, wird für jeden dem Auftrag zugewiesenen Arbeitsschritt die Qualifikationsanforderung bestimmt. Diese gibt die benötigte Qualifikation des Betriebsmittels an, um den entsprechenden Arbeitsschritt zu bearbeiten. Anschließend werden alle Betriebsmittel bestimmt, die für eine Bearbeitung des aktuellen Arbeitsschritts potentiell qualifiziert sind. Aus dieser Menge wird ein Betriebsmittel zufällig ermittelt und für die Durchführung des Fertigungsschritts ausgewählt. Infolgedessen wird der Auftragsreihenfolge des Betriebsmittelobjekts der aktuelle Auftrag und der Betriebsmittelreihenfolge des Auftragsobjekts die ausgewählte Anlage hinzugefügt. Anschließend wird ein mit der zur Durchführung des jeweiligen Arbeitsschritts benötigten Qualifikation einhergehende Rüstzustand der Anlage bestimmt. Falls mehr als eine technische Konfiguration der Anlage für die Durchführung des Arbeitsschritts möglich ist, wird zufällig ein entsprechender Rüstzustand ermittelt und der Rüstreihenfolge des Betriebsmittelobjekts hinzugefügt. Die Bearbeitungsdauer wird aus dem Zeitfaktor des aktuellen Arbeitsschritts und dem vom Rüstzustand abhängigen Zeitfaktor des ausgewählten Betriebsmittels bestimmt und dem Arbeitsschrittobjekt zugewiesen. Anschließend wird passend qualifiziertes Personal für die Durchführung der Bearbeitung bestimmt und mit dem Personalaufwand abgeglichen. Falls mehr Personal als notwendig zur Verfügung steht, wird dem Personalaufwand entsprechend viel Personal zufällig bestimmt und der Personalliste des Betriebsmittelobjekts hinzugefügt. Entsprechend wird die Anlage in der Betriebsmittelliste der etwaigen Personalobjekte hinterlegt. Das so modifizierte Simulationsmodell wird für weitere Berechnungen in der Optimierung zwischengespeichert. Eine tabellarische Darstellung der Zuordnungen und Reihenfolgen von Aufträgen zu Betriebsmitteln und Personal zu Arbeitsschritten eines möglichen zugrundeliegenden Simulationsmodells ist in Tabelle 1 dargestellt. In dieser Darstellung werden ebenfalls die Rüstreihenfolgen der jeweiligen Betriebsmittel aufgezeigt.

Auftrag:	J1	Betriebsmittelreihenfolge:	M1 - M2 - M1
	J2	Betriebsmittelreihenfolge:	M2 - M1
Personal:	P1	Betriebsmittelreihenfolge:	M1
	P2	Betriebsmittelreihenfolge:	M1 - M2
	P3	Betriebsmittelreihenfolge:	M2 - M1
Betriebsmittel:	M1	Auftragsreihenfolge:	J1 - J1 - J2
		Personalreihenfolge:	P1 - P2 - P3
		Rüstreihenfolge:	R1 - R2 - R2
		Initialer Istrüztzustand	R1
	M2	Auftragsreihenfolge:	J2 - J1
		Personalreihenfolge:	P3 - P2
		Rüstreihenfolge:	R2 - R1
		Initialer Istrüztzustand	R1

Tabelle 1: Beispielhafte Zuordnung und Reihenfolge von Aufträgen zu Betriebsmitteln und Personal zu Arbeitsschritten (inkl. Rüstreihenfolge der Betriebsmittel)

Ferner wird anhand der Rüstreihenfolge bestimmt, ob zwischen zwei dem Betriebsmittel zugewiesenen Arbeitsschritten eine Umrüstung der Anlage notwendig ist. Dies ist immer dann der Fall, wenn sich die initiale technische Konfiguration des Betriebsmittels von dem ersten Eintrag der Rüstreihenfolge unterscheidet, oder wenn zwei nebeneinanderliegenden Einträgen der Rüstreihenfolge (Istrüztzustand und Sollrüztzustand) unterschiedliche Werte zugewiesen wurden. Für jeden dieser Umrüstvorgänge wird ein repräsentatives Auftragsobjekt vom Typ Umrüstauftrag (U_k) erstellt. Die so erstellten Auftragsobjekte beinhalten als einzigen Arbeitsschritt den Umrüstvorgang an der jeweiligen Anlage, so dass der Betriebsmittelreihenfolge die entsprechende Anlage zugewiesen wird. Über eine zweidimensionale Umrüstmatrix des Betriebsmittelobjekts lassen sich für den entsprechenden Ist- und Sollrüztzustand die Rüstkosten, der Personalaufwand und die benötigte Qualifikation zur Durchführung des Umrüstvorgangs bestimmen. Die so ermittelten Informationen werden dem Arbeitsschrittobjekt des Umrüstauftrags zugewiesen. Anschließend wird im Betriebsmittelobjekt der Umrüstauftrag der Auftragsreihenfolge, sowie der Sollrüztzustand der Rüstreihenfolge an den entsprechenden Positionen hinzugefügt. Falls der Umrüstvorgang mit Personalkosten verbunden ist, wird eine Zuordnung zwischen Personal und Umrüstauftrag durchgeführt und die entsprechenden Parameter in dem Betriebsmittelobjekt bzw. Personalobjekt(en) gesetzt. Ferner wird der Umrüstauftrag der Auftragsliste des Simulationsmodells hinzugefügt. Abschließend wird das so erweiterte Simulationsmodell zur Simulationsdurchführung an den

Simulator übermittelt (vgl. Kapitel 6) und die Durchführung eines Simulationslaufs initiiert. In Tabelle 2 ist eine erweiterte tabellarische Darstellung der Tabelle 1 dargestellt. Diese beinhaltet für alle notwendigen Umrüstungen einen Umrüstauftrag ($U1, U2, U3$), sowie das zur Durchführung der Umrüstung zusätzlich benötigte Personal ($P4, P5$). Ferner wurde die Auftrags-, Personal- und Rüstreihenfolge der betroffenen Betriebsmittel ($M1, M2$) aktualisiert. Zudem wurde die Betriebsmittelreihenfolge des Personal $P1$ um den Rüstvorgang an Betriebsmittel $M2$ erweitert.

Auftrag:	J1	Betriebsmittelreihenfolge:	M1 - M2 - M1
	J2	Betriebsmittelreihenfolge:	M2 - M1
	U1	Betriebsmittelreihenfolge:	M1
	U2	Betriebsmittelreihenfolge:	M2
	U3	Betriebsmittelreihenfolge:	M2
Personal:	P1	Betriebsmittelreihenfolge:	M1 - M2
	P2	Betriebsmittelreihenfolge:	M1 - M2
	P3	Betriebsmittelreihenfolge:	M2 - M1
	P4	Betriebsmittelreihenfolge:	M2
	P5	Betriebsmittelreihenfolge:	M1
Betriebsmittel:	M1	Auftragsreihenfolge:	J1 - U1 - J1 - J2
		Personalreihenfolge:	P1 - P5 - P2 - P3
		Rüstreihenfolge:	R1 - R2 - R2 - R2
		Initialer Istrüstzustand	R1
	M2	Auftragsreihenfolge:	U2 - J2 - U3 - J1
		Personalreihenfolge:	P1 - P3 - P4 - P2
		Rüstreihenfolge:	R2 - R2 - R1 - R1
		Initialer Istrüstzustand	R1

Tabelle 2: Beispielhafte Zuordnung und Reihenfolge von Aufträgen zu Betriebsmitteln und Personal zu Arbeitsschritten (inkl. Rüstreihenfolge und Umrüstungen)

5.3.2 Heuristische Suche

Die Bestimmung neuer Stellgrößen wird immer dann durchgeführt, wenn zuvor mindestens eine passende Lösung generiert wurde. Als Basis des heuristischen Suchverfahrens dient das Simulationsmodell, das die bislang geeignetste Lösung darstellt. Betrachtet wird der Zustand, an dem noch keine etwaigen Rüstaufträge dem Modell hinzugefügt wurden (vgl. Abschnitt 5.3.1 Absatz 1). Aufbauend auf der besten Lösung (Greedy-Ansatz) werden neue Stellgrößen durch ein heuristisches Suchverfahren ermittelt. Das Suchverfahren basiert auf dem Konzept der lokalen Sucher, d.h. neue Lösungen werden aus der Nachbarschaft der zugrundeliegenden

Lösung generiert. Das heuristische Verfahren wird durch ein stochastisches Vorgehen realisiert, bei dem die Bearbeitungsreihenfolge zufälliger Arbeitsschritte eines Betriebsmittels getauscht werden. Potentielle Arbeitsschritte sind die, die nicht demselben Auftrag zugewiesen sind. Beim Reihenfolgetausch zweier Arbeitsschritte, erfolgt eine entsprechende Anpassung der Auftrags- und Rüstreihenfolge des Betriebsmittels. Die Veränderung der Bearbeitungsreihenfolge kann Auswirkungen auf die Anzahl benötigter Umrüstschritte haben, so dass mittelfristig die Menge der Umrüstungen im System minimiert wird. Anschließend wird das so manipulierte Simulationsmodell zwischengespeichert. Der auf das heuristische Suchverfahren folgende Ablauf zur Ermittlung der benötigten Umrüstungen und Zuordnung des Personals zu den Umrüstschritten, sowie die anschließende Simulationsdurchführung und Bewertung des zugrundeliegenden Simulationsmodells erfolgt analog zu Absatz 2 des Abschnitts 5.3.1.

6 Simulation

Wesentliche Aufgabe der Simulation ist die Modellbildung (vgl. Kapitel 4), Simulationsdurchführung (vgl. Unterkapitel 6.1) und Analyse der Simulationsergebnisse (vgl. Unterkapitel 6.2) durch einen Simulator. Der vorliegende Simulator wurde nach [60] implementiert und ermöglicht eine ereignisdiskrete Simulation, bei der Zustandsänderungen durch Ereignisse zu diskreten Zeitpunkten ausgelöst werden.

6.1 Durchführung eines Simulationslaufs

Im Wesentlichen besteht der implementierte Simulator aus zwei Komponenten, der Ereignisliste und der Simulationszeit. Die Simulationszeit repräsentiert die im System voranschreitende Zeit und wird durch den Simulator erhöht. Ereignisse werden durch die Initialisierung oder aufgrund der Wirkzusammenhänge des Modells generiert und anhand ihrer Eintrittszeit chronologisch in einer Ereignisliste gespeichert. Entsprechend steht das als nächstes durchzuführende Ereignis (jüngste) an erster Stelle der Ereignisliste, falls diese nicht leer ist.

Zu Beginn des Simulationslaufs wird die Simulationszeit auf 0 gesetzt und das Simulationsmodell initialisiert. Die Initialisierung fügt der Quelle alle Personalobjekte mit mindestens einer Bearbeitung, sowie alle Auftragsobjekte mit mindestens einem Arbeitsschritt hinzu. Die Anzahl der an dem Simulationslauf beteiligten Auftrags- und Personalobjekte wird in einer Variablen zwischengespeichert und für eine spätere Auswertung zur Verfügung gestellt. Ferner wird ein Verteile-Ereignis (vgl. Abschnitt 4.2.2) der Ereignisliste hinzugefügt und der eigentliche Simulationslauf gestartet.

Ist die Ereignisliste nicht leer, wird das an erster Stelle stehende Ereignis der Ereignisliste entnommen und die Simulationszeit auf die Eintrittszeit des ausgewählten Ereignisses gesetzt. Anschließend wird das Ereignis den Wirkzusammenhängen des Modells entsprechend durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.2.2). Der Ablauf der Ereignisse wird für die spätere Auswertung zwischengespeichert. Infolge der Ereignisdurchführung können weitere Ereignisse generiert werden, die entsprechend ihrer Eintrittszeit der Ereignisliste hinzugefügt werden. Nach Ablauf des aktuellen Ereignisses, wird mit dem nächsten Ereignis fortgefahren. Dieser Vorgang wird solange durchgeführt, bis sich kein Ereignis in der Ereignisliste befindet. Anschließend wird der Simulationslauf

beendet und die Simulationsauswertung initiiert. Der Ablauf einer ereignisdiskreten Simulationsdurchführung wird in Abbildung 21 grafisch dargestellt.

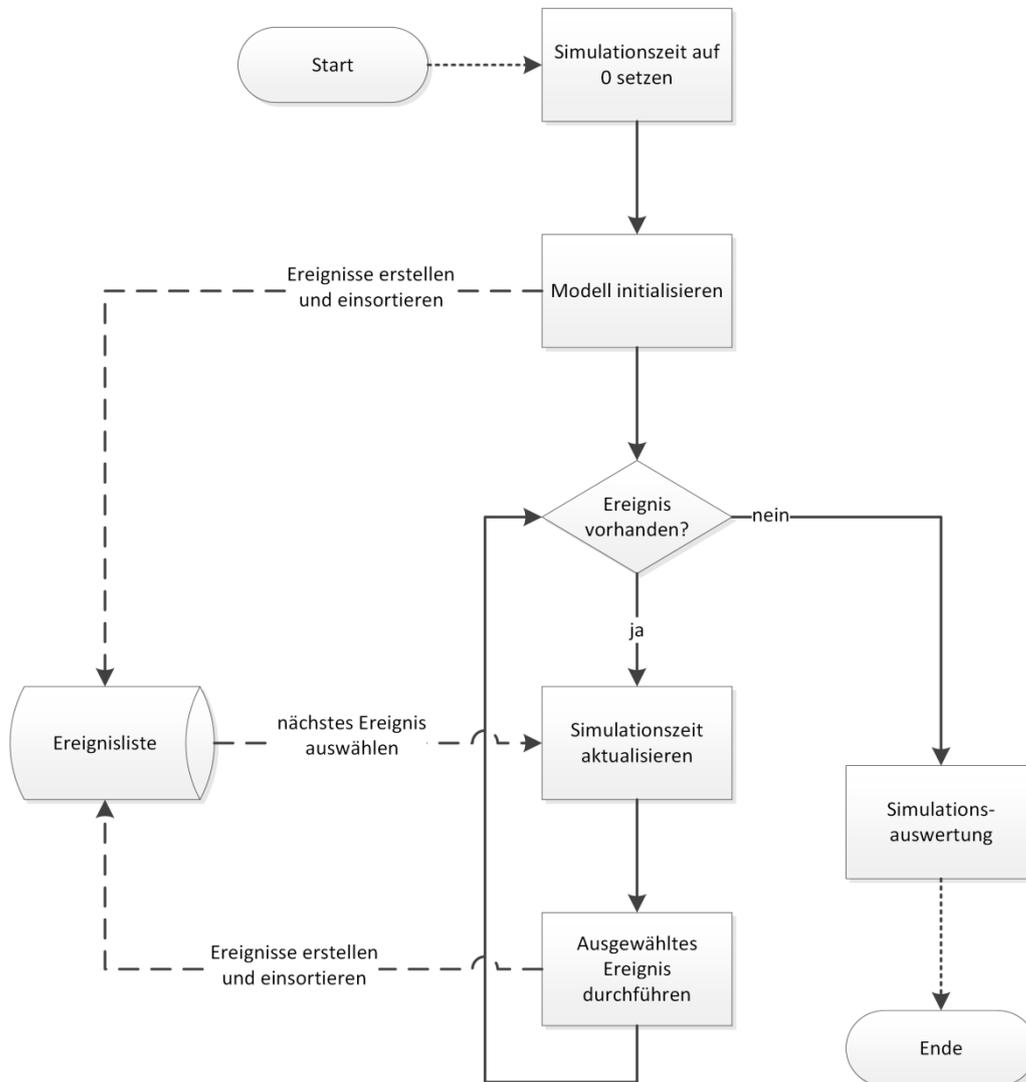


Abbildung 21: Konzept der ereignisdiskreten Simulationsdurchführung

6.2 Simulationsauswertung und Ausgabe

Eine Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt, sobald kein aktives Ereignis vorhanden und die Ereignisliste leer ist. Zunächst wird die Menge der sich in der Senke befindlichen Objekte geprüft und mit der zuvor ermittelten Anzahl der an der Simulation beteiligten Objekte verglichen. Befinden sich am Ende eines Simulationslaufs alle Personal- und Auftragsobjekte in der Senke, wird der Simulationslauf als erfolgreich klassifiziert, da alle Fertigungsaufträge vollständig bearbeitet wurden. Anschließend wird anhand der Fertigstellungszeitpunkten und –

fristen bestimmt, ob eine fristgerechte Fertigstellung aller Fertigungsaufträge erreicht wurde. Ist dies der Fall, wird das zugrundeliegende Simulationsmodell als passend definiert. Der Zielfunktionswert, also die Bewertung der von der Optimierung ermittelten Stellgrößen, ergibt sich aus der Summe der Differenz zwischen Fertigstellungsfrist und Fertigstellungszeitpunkt über alle Fertigungsaufträge und wird im Simulationsmodell hinterlegt. Anschließend wird das Simulationsmodell an die Optimierung übergeben und das Abbruchkriterium überprüft.

Solange wie das Abbruchkriterium, in Form einer zuvor vom Nutzer definierten Anzahl von Iterationsschritten, nicht erreicht wurde, wird das simulationsgestützte Optimierungssystem iterativ durchlaufen. Nach Durchführung des letzten Iterationsschritts erfolgt eine Ausgabe der Anzahl gefundener passender Lösungen. Der Anwender hat anschließend die Möglichkeit, eine beliebige Anzahl der besten Simulationsläufe detailliert zu betrachten. Für jede zu betrachtende Lösung wird eine Excel-Datei erstellt, in der die wesentlichen Informationen des jeweiligen Simulationslaufs hinterlegt werden.

Aus einer entsprechenden Excel-Datei lässt sich der zeitliche Ablauf eines jeden beteiligten Auftrags (Fertigungs- und Umrüstaufträge) und Personals über die Betriebsmittel ablesen. Auf Grundlage dieser Informationen lässt sich sowohl eine auftragsfeine Ablaufplanung, als auch ein entsprechender Schichtplan realisieren.

7 Durchführung und Analyse eines exemplarischen Planungslaufs

Der betrachtete Planungslauf basiert auf dem im Anhang vorgestellten Datensatz, der die wesentlichen Informationen eines beispielhaften Produktionssystems beinhaltet und dieses definiert. Das zugrundeliegende Produktionssystem besteht aus 7 Betriebsmitteln, 14 Aufträgen, insgesamt 70 Arbeitsschritten und 50 Mitarbeitern.

Für einen Referenzwert von 1.000 Iterationsschritten wurden durchschnittlich 125 potentielle Lösungen des zugrundeliegenden Problems gefunden. Abhängig von der initialen Lösung, schwankt die Anzahl gefundener, passender Ablaufpläne erheblich. So sind Ausreißer in beide Richtungen keine Seltenheit (das Minimum lag bei 45 und das Maximum bei 210 gefundener Lösungen). In Abbildung 22 ist der Verlauf der Eignung

von Ablaufplänen in Relation zur Anzahl gefundener Lösungen für einen exemplarischen Planungslauf aufgezeigt.

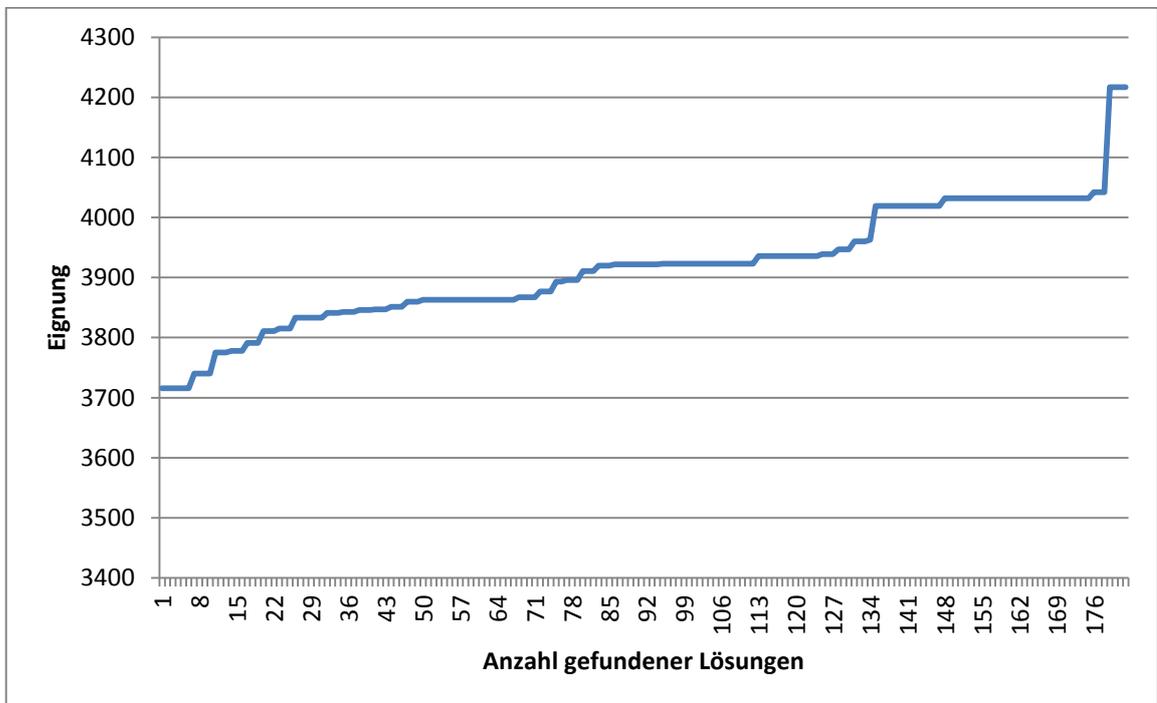


Abbildung 22: Exemplarischer Verlauf der Eignung über die Anzahl gefundener Lösungen

Auf Basis dieses Planungslaufs folgt eine beispielhafte Ergebnisdarstellung der geeignetsten, gefundenen Lösung. Abbildung 23 stellt eine Übersicht über die wichtigsten Größen der betrachteten Lösung in Form einer Excel Datei dar.

Auftrag	Freigabezeitpunkt	Fertigstellungszeitpunkt	Fertigstellungsfrist
10	0	43	158
4	0	55	306
1	0	78	345
2	0	92	247
5	0	108	280
11	0	136	359
14	0	158	369
12	0	208	486
3	0	266	500
7	0	345	516
13	0	391	780
9	0	459	1000
6	0	464	1053
8	0	591	1235

Abbildung 23: Übersicht über die Fertigstellungszeitpunkte und eingehaltenen -fristen einer exemplarischen Lösung

In Abbildung 24 wird eine auftragsfeine Ablaufplanung des Fertigungsauftrags 8 dargestellt, anhand dessen eine zeitliche Zuordnung zu den entsprechenden Betriebsmitteln möglich ist. Analog erfolgt die Ausgabe für jedes beteiligte Personal, bei der zusätzlich für jeden Bearbeitungsschritt der entsprechende Auftrag aufgezeigt wird (vgl. Abbildung 25).

Anlage	Startzeit	Dauer
3	464	7
4	471	16
4	489	14
2	503	11
3	514	11
7	525	15
6	540	3
5	543	19
7	562	11
5	573	18

Abbildung 24: Auftragsfeine Ablaufplanung für Auftrag 8 eines beispielhaften Planungslaufs

Auftrag	Anlage	Startzeit	Dauer
10	1	36	7
1	1	71	7
3	1	263	3
13	1	380	11

Abbildung 25: Auftragsfeine Ablaufplanung für Personal 5 eines beispielhaften Planungslaufs

8 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass mit dem vorgestellten System eine dynamische, computergestützte Abbildung wandlungsfähiger Produktionssysteme der Werkstattfertigung möglich ist. Grundsätzlich lassen sich mit der erarbeiteten Methode komplexe Produktionssysteme mit mehreren hundert Objekten abbilden und simulieren. Da sowohl eine Parallelfertigung, als auch eine unterschiedliche Route der einzelnen Aufträge über den Maschinenpark möglich ist, liegt im konkreten Fall ein Flexibles-Job-Shop-Scheduling-Problem (FJSSP) vor, welches durch das vorgestellte simulationsgestützte Optimierungssystem gelöst wird. Ein heuristisches Suchverfahren, basierend auf dem Prinzip der lokalen Suche, ermittelt potentielle Lösungen für das zugrundeliegende FJSSP. Die so ermittelten Lösungen werden durch anschließende Simulationsläufe in einen zeitlichen Kontext gebracht der eine Analyse und Bewertung, im Hinblick auf das Zielkriterium einer hohen Liefertreue ermöglicht. Die so ermittelten Ablaufpläne werden dem Anwender zur Verfügung gestellt und stellen eine konkrete Entscheidungsunterstützung für die operative Produktionsplanung und -steuerung dar. Anhand der Eignung der ermittelten Ablaufpläne lassen sich Rückschlüsse auf das reale Produktionssystem ziehen und gegebenenfalls Anpassungen durchführen. Auf Grund der Komplexität der zugrundeliegenden Problemstellung (NP-schwer), lassen sich keine direkten Aussagen über die Effizienz des vorgestellten Optimierungssystems geben.

Weiterer Forschungsbedarf besteht beispielsweise in der Identifizierung und Realisierung weiterer Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Objekten. So ist es denkbar, mögliche Transportkosten von Aufträgen zwischen zwei Betriebsmitteln zu berücksichtigen. Zudem können Ereignisse zu vordefinierten Zeiten an einzelnen Maschinen eintreten, wie beispielsweise Wartungsaufträge oder Experimente und Fertigungsversuche, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Im Bereich der Optimierung lässt sich die Suchheuristik erweitern, indem zusätzlich neue Zuordnungen von Aufträgen zu Betriebsmitteln berücksichtigt werden. Dadurch können zusätzliche

Lösungen des lokalen Suchraums betrachtet werden. Im aufgezeigten System wird eine auftragsfeine Planung durchgeführt. Eine Zusammenfassung einzelner Fertigungsaufträge zu Losen und eine anschließende losfeine Planung könnten zu einer Performanceverbesserung, insbesondere bei großen Planungsprojekten, führen.

9 Literatur

- 1 *Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg.* Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008
- 2 *Wiendahl H.* Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 2 Tabellen. 7. Aufl. München: Hanser; 2010
- 3 *Fronia P.* Logistische Gesichtspunkte der Wandlungsfähigkeit. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008: 70 – 74
- 4 *Windt K, Jeken O, Gebhardt N.* Nutzung und Erweiterung von Flexibilitätspotenzialen in Fertigung und Montage durch Selbststeuerung und Konstruktion. In: Nyhuis P, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2010: 65 – 83
- 5 *Kompa S, Schmidt C, Hering N, Brandenburg U, Christoph Meier.* WInD - Einleitung. In: Schuh G, Altgott M, Hrsg. WInD - Wandlungsfähige Produktionssysteme durch integrierte IT-Strukturen und dezentrale Produktionsplanung und -regelung. Aachen: FIR e.V. an der RWTH Aachen; 2013: 9 – 20
- 6 *Heinen T, Rimpau C, Wörn A.* Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008: 19 – 32
- 7 *Nyhuis P, Fronia P, Pachow-Frauenhofer J et al.* Wandlungsfähige Produktionssysteme. Ergebnisse der BMBF-Vorstudie "Wandlungsfähige Produktionssysteme". wt Werkstattstechnik online 2009; 99: 205 – 210
- 8 *Klemke T, Mersmann T, Nyhuis P.* Wandlungsfähige Produktionssysteme. Methodik zur Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit. wt Werkstattstechnik online 2012; 102: 222 – 227

- 9 *Schenk M, Wirth S, Müller E.* Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014
- 10 *Wenzel S, Bockel B, Deist F.* Die Integration der Produktions- und Logistiksimulation in die Digitale Fabrik - Herausforderungen und Entwicklungstrends. In: Schenk M, Hrsg. Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2009: 317 – 339
- 11 *Meyer M, Walber B, Schmidt C.* Verbesserte Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau. Ansatzpunkte zur Optimierung der PPS aus einer aktuellen Studie. Unternehmen der Zukunft. FIR-Zeitschrift für Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung. Aachen: FIR; 2006: 23 – 26
- 12 *Rabe M, Deininger M.* Fabrikmodelle für Job-Shop-Scheduling-Algorithmen in Changing-Steady-State-Systemen. In: Dangelmaier W, Laroque C, Klaas A, Hrsg. Simulation in Produktion und Logistik 2013. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe; 2013: 579 – 589
- 13 *Statistisches Bundesamt.* Inlandsproduktsberechnung (23.05.2014). Im Internet: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/Inlandsprodukt/Tabellen/Gesamtwirtschaft.html>; Stand: 26.06.2014
- 14 *Statistisches Bundesamt.* Basistabelle - Bruttowertschöpfung: Produzierendes Gewerbe; 22.04.2014
- 15 *Statistisches Bundesamt.* Statistiken zum Außenhandel
- 16 *Statistisches Bundesamt.* Produzierendes Gewerbe. Beschäftigung und Umsatz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden
- 17 *Gerst D.* Organisatorische und personelle Gesichtspunkte der Wandlungsfähigkeit. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2008: 53 – 70
- 18 *Wenzel S, Abel D, Bockel B.* Die Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für den digitalen Logistikplanungsprozess. In: Nyhuis P, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2010: 157 – 174

- 19 *Dahms M.* Modellierung und Steuerung ereignisdiskreter Fertigungssysteme mittels farbiger, zeitbehafteter Petri-Netze. Aachen: Shaker; 2008
- 20 *Lödding H.* Wandlungsfähige Produktionsplanung und -steuerung - Anforderungen aus schwankenden Auftragseingängen. In: Nyhuis P, Hrsg. Wandlungsfähige Produktionssysteme. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2010: 45 – 62
- 21 *Luczak H, Eversheim W, Schotten M, Hrsg.* Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. Aufl. Berlin: Springer; 1999
- 22 *März L, Krug W, Rose O, Weigert G.* Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2011
- 23 *Schneider H.* Operative Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen. 1. Aufl. München: Oldenbourg; 2005
- 24 *Hackstein R.* Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. Düsseldorf: VDI-Verl; 1984
- 25 *Kompa S, Meier Christoph.* WInD - Voruntersuchung "Produktion am Standort Deutschland". In: Schuh G, Altgott M, Hrsg. WInD - Wandlungsfähige Produktionssysteme durch integrierte IT-Strukturen und dezentrale Produktionsplanung und -regelung. Aachen: FIR e.V. an der RWTH Aachen; 2013: 21 – 29
- 26 *Qing-dao-er-ji R, Wang Y.* A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem. Computers & Operations Research 2012; 39: 2291 – 2299
- 27 *Witt A.* Produktionsplanung und -steuerung in der Stahlindustrie. Ressourceneinsatzplanung mit Berücksichtigung von Fälligkeitsterminen und beschränkten Zwischenlagerkapazitäten. Berlin: Tenea; 2004
- 28 *Fritzsche A.* Heuristische Suche in komplexen Strukturen. Zur Verwendung Genetischer Algorithmen bei der Auftragseinplanung in der Automobilindustrie. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden; 2009
- 29 *Eiselt HA, Sandblom C.* Operations research. A model based approach. 2. Aufl. Heidelberg: Springer; 2012
- 30 *Domschke W, Drexl A.* Einführung in Operations-Research. 8. Aufl. Heidelberg: Springer; 2011

- 31 *Suhl L, Mellouli T.* Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013
- 32 *Verein Deutscher Ingenieure.* Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. 01. Aufl. (Dezember 2013); Dezember 2013
- 33 *Nickel S, Stein O, Waldmann K.* Operations Research. Berlin: Springer; 2011
- 34 *Georgi G.* Job-Shop-Scheduling in der Produktion. Einsatzorientierte Lösungen für ein Kernproblem der Produktionsplanung und -steuerung bei mittleren Auftragszahlen und variierenden Einsatzbedingungen. Heidelberg: Physica-Verl; 1995
- 35 *Rainer Hackl.* Optimierung von Reihenfolgeproblemen mit Hilfe genetischer Algorithmen
- 36 *Bagheri A, Zandieh M, Mahdavi I et al.* An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. Future Generation Computer Systems 2010; 26: 533 – 541
- 37 *Demir Y, Kürşat İşleyen S.* Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems. Applied Mathematical Modelling 2013: 977 – 988
- 38 *Naderi B, Fatemi Ghomi S, Aminnayeri M et al.* Scheduling open shops with parallel machines to minimize total completion time. Journal of Computational and Applied Mathematics 2011; 235: 1275 – 1287
- 39 *Pinedo M.* Scheduling. Theory, algorithms, and systems. 4. Aufl. New York: Springer; 2012
- 40 *Dangelmaier W, Aufenanger M, Lipka N.* Eine wissensbasierte Rescheduling-Heuristik für Job-Shops. In: Schenk M, Hrsg. Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. Berlin: GITO mbH Verlag; 2009: 219 – 236
- 41 *Zahn E, Schmid U.* Produktionswirtschaft. Grundlagen und operatives Produktionsmanagement; 1996
- 42 *Ak B, Koc E.* A guide for genetic algorithm based on parallel machine scheduling and flexible job-shop scheduling. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2012: 817 – 823
- 43 *Ben Hmida A, Haouari M, Huguet M et al.* Discrepancy search for the flexible job shop scheduling problem. Computers & Operations Research 2010: 2192 – 2201

- 44 *Li J, Pan Q, Tasgetiren MF.* A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. *Applied Mathematical Modelling* 2013; 1 – 22
- 45 *Tang J, Zhang G, Lin B et al.* A Hybrid Algorithm for Flexible Job-shop Scheduling Problem. *Procedia Engineering* 2011: 3678 – 3683
- 46 *Thammano A, Phu-ang A.* A Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm with Local Search for Flexible Job-Shop Scheduling Problem. *Procedia Computer Science* 2013: 96 – 101
- 47 *Zhang Q, Manier H, Manier M.* A genetic algorithm with tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times. *Computers & Operations Research* 2012: 1713 – 1723
- 48 *Ponsich A, Coello Coello, Carlos A.* A hybrid Differential Evolution - Tabu Search algorithm for the solution of Job-Shop Scheduling Problems. *Applied Soft Computing* 2013: 462 – 474
- 49 *Zhang R.* An Artificial Bee Colony Algorithm Based on Problem Data Properties for Scheduling Job Shops. *Procedia Engineering* 2011: 131 – 136
- 50 *Shahsavari-Pour N, Ghasemishabankareh B.* A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling. *Journal of Manufacturing Systems* 2013; 32: 771 – 780
- 51 *Teekeng W, Thammano A.* Modified Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling Problems. *Procedia Computer Science* 2012: 122 – 128
- 52 *Karaboga D, Basturk B.* On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing* 2008; 8: 687 – 697
- 53 *Karaboga D, Akay B.* A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation* 2009; 214: 108 – 132
- 54 *Pan Q, Fatih Tasgetiren M, Suganthan PN et al.* A discrete artificial bee colony algorithm for the lot-streaming flow shop scheduling problem. *Information Sciences* 2011; 181: 2455 – 2468
- 55 *Cassandras CG, Lafortune S.* Introduction to discrete event systems. 2. Aufl. New York, NY: Springer; 2010
- 56 *Gudehus T, Kotzab H.* Comprehensive logistics. 2. Aufl. Berlin: Springer; 2012
- 57 *Verein Deutscher Ingenieure.* Simulation von Logistik-, Materialfluss und Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen. 03. Aufl. (Dezember 2010); Dezember 2010

- 58 *Kastens U, Kleine Büning H.* Modellierung. Grundlagen und formale Methoden ;
[für Bachelor geeignet]. 2. Aufl. München: Hanser; 2008
- 59 *Rabe M.* Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. Ein Leitfaden
mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. Erlangen: SCS European
Publ. House; 2001
- 60 *Choi BK, Kang D.* Modeling and simulation of discrete-event systems. Hoboken,
NJ: Wiley; 2013
- 61 *Rabe M, Spiekermann S, Wenzel S.* Verifikation und Validierung für die Simulation
in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg:
Springer-Verlag; 2008

Anhang

Anleitung Programm

Abbildung 26 zeigt die Bedienoberfläche des simulationsgestützten Optimierungssystems. Zunächst ist die Anzahl der durchzuführenden Iterationsschritte anzugeben (1). Anschließend lässt sich der Planungslauf starten (2). Nach Ablauf der angegebenen Iterationen, wird die Anzahl gefundener Lösungen ausgegeben (3). Diese lassen sich für weitere Untersuchungen ausgeben. Der Nutzer gibt die Anzahl auszugebender Ablaufpläne an (4) und bestätigt anschließend die Auswahl (5). Nach Ablauf des Programms kann dieses verlassen werden (6).

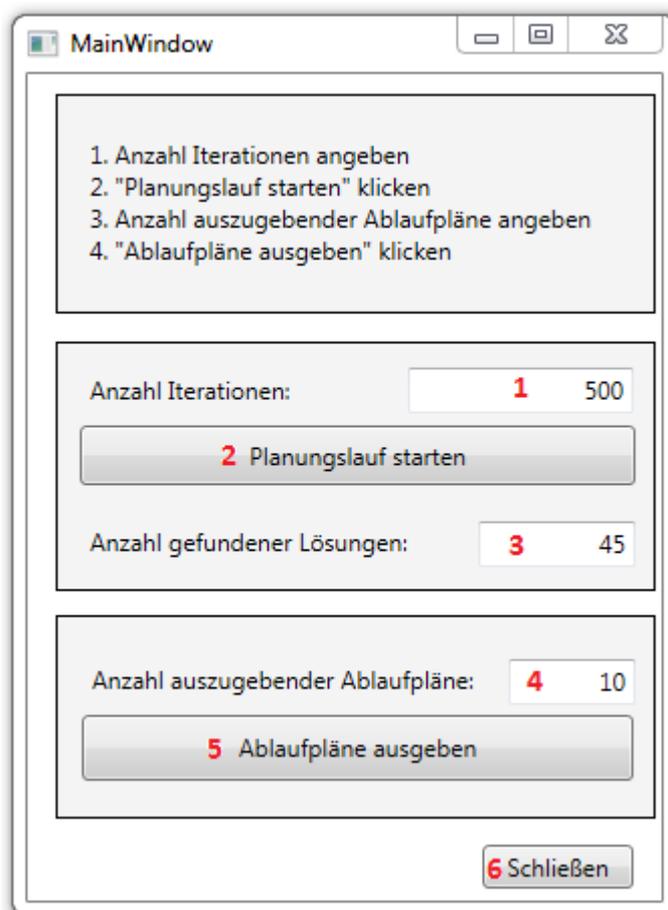


Abbildung 26: Bedienoberfläche des simulationsbasiertenn Optimierungssystems

Für das Experiment verwendeter Datensatz

An dieser Stelle werden die zugrundeliegenden Informationen zur Durchführung des Experiments aus Kapitel 7 vorgestellt. Die Daten repräsentieren exemplarisch ein Produktionssystem, welches durch das in dieser Arbeit vorgestellte simulationsgestützte Optimierungssystem analysiert wird. Der verwendete Datensatz beschränkt sich auf die wesentlichen Parameter des Produktionssystems.

Die Anlagentabelle (vgl. Abbildung 27) gibt die ID und den initialen Istrüszustand aller zur Verfügung stehenden Anlagen des Produktionssystems an.

	id	Istruezustand
	1	8
	2	1
	3	3
	4	6
	5	9
	6	11
	7	12

Abbildung 27: Anlagentabelle

Die Tabelle in Abbildung 28 gibt die Relation zwischen Anlage und Rüstzustand an und definiert so alle möglichen Rüstzustände der jeweiligen Anlage. Außerdem werden die Zeitfaktoren der Anlage in Relation zum jeweiligen Rüstzustand definiert.

	Id	Anlage	Ruezustand	Zeitfaktor
	1	1	8	1
	2	1	9	4
	3	2	1	5
	4	2	2	6
	5	2	3	3
	6	3	3	2
	7	3	4	5
	8	4	6	7
	9	4	7	5
	10	4	5	10
	11	5	9	9
	12	6	11	1
	13	6	12	2
	14	7	12	8

Abbildung 28: Relation zwischen Anlage und Rüstzustand

Die Rüstzustandstabelle (vgl. Abbildung 29) gibt die Relation zwischen Rüstzustand und Qualifikation an. Inhalt der Tabelle ist die jeweilige ID und Bezeichnung des Rüstzustands, sowie die mit der technischen Ausstattung einhergehende Qualifikation.

	Id	Ruestzustand	Qualifikation
	1	Bohrkopf 17d	5
	2	Bohrkopf 17e	5
	3	Bohrkopf 19a	6
	4	Bohrkopf 19e	6
	5	Schleifpapier Körnung 16	1
	6	Polieraufsatz 1	2
	7	Polieraufsatz 2	2
	8	Werkzeugsatz 7a	3
	9	Werkzeugsatz 16c	3
	11	Fraeskopf 4b	4
	12	Spanaufsatz 12.1s	13

Abbildung 29: Rüstzustandstabelle

Die Umrüsttabelle (vgl. Abbildung 30) definiert alle möglichen Umrüstungsvorgänge des zugrundeliegenden Produktionssystems. Der Inhalt der Tabelle bestimmt sowohl die Zeit- und Personalkosten, als auch die benötigte Qualifikation zur Änderung der technischen Konfiguration einer Anlage.

	Id	Istruestzustand	Sollruestzustand	Zeitkosten	Personalaufwand	benQualifikation
	1	1	2	5	1	7
	2	2	1	12	1	8
	3	3	4	2	0	9
	4	4	3	6	0	10
	5	6	7	10	0	11
	6	7	6	4	0	12
	7	8	9	7	1	14
	8	9	8	8	1	15
	9	1	3	4	0	16
	10	3	1	6	1	17
	11	2	3	6	1	18
	12	3	2	1	0	19
	13	5	6	3	1	20
	14	5	7	2	0	21
	15	6	5	10	0	22
	16	7	5	4	1	23
	17	11	12	9	0	24
	19	12	11	3	0	25

Abbildung 30: Umrüsttabelle

Die in Abbildung 31 dargestellte Qualifikationstabelle definiert die dem System bekannten Qualifikationen. Die Tabelle beinhaltet sowohl Qualifikationen zur Bearbeitung eines Fertigungsauftrags, als auch jene zur Durchführung eines Umrüstvorgangs.

Id	Qualifikation
1	Schleifen
2	Polieren
3	Verpacken
4	Fraesen
5	Bohren1
6	Bohren2
7	UR: Bohrkopf 17d auf Bohrkopf 17e
8	UR: Bohrkopf 17e auf Bohrkopf 17d
9	UR: Bohrkopf 19a auf Bohrkopf 19e
10	UR: Bohrkopf 19e auf Bohrkopf 19a
11	UR: Polieraufsatz 1 auf Polieraufsatz 2
12	UR: Polieraufsatz 2 auf Polieraufsatz 1
13	Spanen
14	UR: Werkzeugsatz 7a auf Werkzeugsatz 16c
15	UR: Werkzeugsatz 16c auf Werkzeugsatz 7a
16	UR: Bohrkopf 17d auf Bohrkopf 19a
17	UR: Bohrkopf 19a auf Bohrkopf 17d
18	UR: Bohrkopf 17e auf Bohrkopf 19a
19	UR: Bohrkopf 19e auf Bohrkopf 17d
20	UR: Schleifpapier Körnung 16 auf Polieraufsatz 1
21	UR: Schleifpapier Körnung 16 auf Polieraufsatz 2
22	UR: Polieraufsatz 1 auf Schleifpapier Körnung 16
23	UR: Polieraufsatz 2 auf Schleifpapier Körnung 16
24	UR: Fraeskopf 4b auf Spanaufsatz 12.1s
26	UR: Spanaufsatz 12.1s auf Spanaufsatz 12.1s

Abbildung 31: Qualifikationstabelle

Die zu fertigenden Aufträge des Produktionssystems werden durch die Informationen der Auftrags- (vgl. Abbildung 32) und Arbeitsschritttabelle (vgl. Abbildung 33) charakterisiert. In der Auftrags-tabelle werden die Fertigungsfristen der Aufträge definiert. Die Zuordnung zu einem Auftrag, sowie die Charakterisierung der Arbeitsschritte erfolgt durch die in Abbildung 33 dargestellten Informationen. Diese beinhaltet sowohl den Personalaufwand und die benötigte Qualifikation, als auch den Zeitfaktor zur Bestimmung der Bearbeitungsdauer.

	Id	Fertigstellungsfrist
	1	345
	2	247
	3	500
	4	306
	5	280
	6	1053
	7	516
	8	1235
	9	1000
	10	158
	11	359
	12	486
	13	780
	14	369

Abbildung 32: Auftragstabelle

	Id	Zeitfaktor	BenQualifikation	Auftrag	Reihenfolge	Personalaufwand	Id	Zeitfaktor	BenQualifikation	Auftrag	Reihenfolge	Personalaufwand
	1	7	4	1	1	0	36	9	2	8	3	0
	2	5	5	1	2	0	37	5	5	8	4	0
	3	2	6	1	3	1	38	6	6	8	5	1
	4	4	1	1	4	0	39	7	13	8	6	0
	5	6	3	1	5	1	40	2	4	8	7	0
	6	1	6	2	1	1	41	10	3	8	8	0
	7	3	5	2	2	2	42	3	13	8	9	1
	8	4	13	2	3	0	43	9	3	8	10	0
	9	2	1	2	4	1	44	7	2	9	1	0
	10	5	2	2	5	0	45	9	1	9	2	0
	11	2	3	2	6	0	46	11	6	9	3	1
	12	5	13	3	1	1	47	6	4	9	4	0
	13	6	2	3	2	2	48	4	13	9	5	1
	14	12	5	3	3	2	49	7	1	10	1	0
	15	3	1	3	4	1	50	4	5	10	2	1
	16	4	2	3	5	0	51	6	3	10	3	1
	17	2	3	3	6	1	52	8	1	11	1	0
	18	5	4	4	1	2	53	9	13	11	2	0
	19	6	13	4	2	1	54	3	6	11	3	0
	20	11	3	4	3	0	55	5	4	11	4	1
	21	3	4	5	1	0	56	1	3	11	5	0
	22	3	2	5	2	0	57	7	2	12	1	0
	23	6	3	5	3	1	58	3	4	12	2	0
	24	16	2	6	1	0	59	2	6	12	3	1
	25	2	5	6	2	2	60	12	1	12	4	0
	26	3	6	6	3	1	61	4	13	12	5	0
	27	5	1	7	1	0	62	7	4	13	1	0
	28	3	5	7	2	1	63	2	1	13	2	1
	29	12	13	7	3	0	64	8	13	13	3	0
	30	4	2	7	4	1	65	3	5	13	4	0
	31	9	4	7	5	0	66	4	2	13	5	0
	32	3	3	7	6	0	67	10	3	13	6	1
	33	7	6	7	7	1	68	11	4	14	1	0
	34	2	6	8	1	1	69	3	2	14	2	1
	35	6	1	8	2	0	70	1	3	14	3	0

Abbildung 33: Arbeitsschritttabelle

Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Informationen definieren das Personal des Produktionssystems. In der Personaltabelle (vgl. Abbildung 34) befinden sich Informationen zur Identifikation eines Mitarbeiters. Durch die in Abbildung 35 abgebildeten Daten wird dem Personal jeweils eine Teilmenge der bekannten Qualifikationen zugeordnet.

	Id	Name	Vorname	Id	Name	Vorname	Id	Name	Vorname
	1	Pfeifer	Ulrich	19	Hunt	Maurice	35	Burger	Marcel
	2	Fruehauf	Manuela	20	Papst	Christin	36	Mahler	Michelle
	3	Bergmann	Markus	21	Faerber	Susanne	37	Ehrlichmann	Anke
	4	Freeh	Alexander	22	Furst	Sabrina	38	Eggers	Torsten
	5	Freeh	Jan	23	Wechsler	Vanessa	39	Lehrer	Peter
	6	Huber	Gabriele	24	Eberhart	Tim	40	Rothstein	Steffen
	7	König	Philipp	25	Braun	Markus	41	Propst	Max
	8	Faust	Maximilian	26	Loewe	Nadine	42	Eiffel	Uwe
	9	Decker	Johanna	27	Schroeder	Jonas	43	Schmidt	Uta
	10	Gerber	Alexander	28	Fuchs	Stephan	44	Beyer	Andrea
	11	Baecker	Sebastian	29	Foerster	Ulrich	45	Vogel	Janina
	12	Bosch	Kathrin	30	Schweizer	Ralph	46	Mayer	Maria
	13	Frueh	Yvonne	31	Gaertner	Dennis	47	Abend	Marie
	14	Schmitz	Christin	32	Mueller	Laura	48	Seiler	Ulrich
	15	Kruger	Ursula	33	Schwab	Ute	49	Engel	Lena
	16	Mahler	Jennifer	34	Weber	Franziska	50	Kunze	Tobias
	17	Amsel	Patrick	35	Burger	Marcel			

Abbildung 34: Personaltabelle

	Id	Personal	Qualifikation	Id	Personal	Qualifikation	Id	Personal	Qualifikation
	1	1	1	18	18	9	35	35	18
	2	2	1	19	19	10	36	36	18
	3	3	2	20	20	10	37	37	19
	4	4	2	21	21	11	38	38	19
	5	5	3	22	22	11	39	39	20
	6	6	3	23	23	12	40	40	20
	7	7	4	24	24	12	41	41	21
	8	8	4	25	25	13	42	42	21
	9	9	5	26	26	13	43	43	22
	10	10	5	27	27	14	44	44	22
	11	11	6	28	28	14	45	45	23
	12	12	6	29	29	15	46	46	23
	13	13	7	30	30	15	47	47	24
	14	14	7	31	31	16	48	48	24
	15	15	8	32	32	16	49	49	26
	16	16	8	33	33	17	50	50	26
	17	17	9	34	34	17			

Abbildung 35: Qualifikationstabelle des Personals