

Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Robert Wandt

aus
Rostock

2014

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

2. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Katja Windt

Tag der mündlichen Prüfung: 15.09.2014

Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödning

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg-Harburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 21:

Robert Wandt

Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus

1. Auflage

Hamburg 2014

ISSN 1613-8244

Copyright Robert Wandt 2014

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, für die außergewöhnliche Unterstützung und die sehr gute Betreuung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Katja Windt für die Erstellung des Zweitgutachtens. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß, dem ehemaligen Leiter des Instituts, für das entgegengebrachte Vertrauen und den guten Start. Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke des Weiteren meinen ehemaligen Kollegen, Projektpartnern und Studenten für die zahlreichen und intensiven fachlichen Diskussionen. Das durch sie geschaffene sehr gute Arbeitsumfeld hat mir in der Promotionszeit sehr geholfen. An dieser Stelle sei Herr Dr. Axel Friedewald im Besonderen herausgestellt, der als Oberingenieur des Instituts für die wissenschaftlichen Mitarbeiter ein sicheres und frei gestaltbares Umfeld schafft und unserer Arbeit immer mit großem Interesse folgt.

Insbesondere danke ich Herrn Dr. Lars Arne Wagner, Herrn Dr. Christoph Schäfer und Herrn M. Sc. Dexter Hauschildt. Ohne die Vorarbeiten von Dr. Wagner wäre mir die Implementierung der Simulationsumgebung wesentlich schwerer gefallen. Die Motivation durch und der fachliche Austausch mit Herrn Dr. Schäfer leisteten einen wesentlichen Beitrag für die Realisierung der Arbeit. Herrn M. Sc. Dexter Hauschildt hat während seine studentischen Tätigkeit und als Studienarbeiter wesentlich zum Aufbau der Simulationsumgebung beigetragen.

Herrn Dipl.-Ing. Dirk Steinhauer sei stellvertretend für die Projektpartner von der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft gedankt. Ohne ihre unbürokratische und schnelle Hilfe in vielen Simulationsfragen sowie ohne die Bereitstellung wichtiger Informationen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus König und Dipl.-Ing. Michael Hübler sei gedankt für die intensiven Diskussionen zum Thema Simulation und Produktionsplanung und -steuerung in der Unikatfertigung.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die meine Promotionszeit mit Interesse verfolgten und mich immer wieder motivierten. Im Besonderen sei an dieser Stelle Jannika Dickmann erwähnt, die wesentlich zur Verbesserung der Qualität des Manuskripts beigetragen hat.

Meinem Vater Dieter danke ich für sein großes Interesse sowie die Willenskraft und Disziplin, die er mich lehrte. Diskussionen mit ihm sind nie bequem, aber immer zielgerichtet und produktiv. Abschließend möchte ich meiner Mutter Regina danken, die in so vieler Hinsicht die Grundlagen für diese Arbeit gelegt hat und meinen Lebensweg immer schützend begleitete.

Ich widme diese Arbeit meinen Großeltern Magda und Wolfgang Wandt, die leider beide den Abschluss meiner Promotion nicht mehr erleben konnten.

München, im September 2014

Robert Wandt

Zusammenfassung

Titel der Arbeit: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am
Beispiel des Schiffbaus
Name des Kandidaten: Robert Wandt

Die vorgelegte Arbeit beschreibt den Forschungsbedarf, um eine zielgerichtete Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung auf Baustellen (Kapitel 2) zu erreichen. Hierfür wird im ersten Schritt das *Modell der Fertigungssteuerung* untersucht. Ziel der Arbeit ist es, diese Modellvorstellung in die Unikatfertigung auf Baustellen zu übertragen. Ausgehend von dieser Untersuchung werden anschließend die Besonderheiten der Baustellenfertigung und der Planung von Produktionsabläufen auf ihr analysiert.

Hierauf aufbauend überführt Kapitel 3 das *Modell der Fertigungssteuerung* in die Baustellenfertigung, indem es das Arbeitssystem Baustelle zunächst in die Teilarbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche zerlegt. Auf diese Teilsysteme wird das Hannoveraner Trichtermodell übertragen und es werden logistische Kennzahlen sowie das Durchlaufdiagramm eingeführt. Die theoretische Modellierung wird durch die Vereinigung beider Teilarbeitssysteme im Gesamtarbeitssystem Baustelle abgeschlossen.

Ausgehend vom Stand der Technik und der theoretischen Modellierung des Arbeitssystems werden Anforderungen für die Implementierung der Fertigungssteuerung in der schiffbaulichen Baustellenfertigung abgeleitet (Kapitel 4). Unterteilt werden diese in Anforderungen an die Produktionsplanung, die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung sowie die Reihenfolgebildung. Den Fokus legt die Arbeit hierbei auf die Freigabe- und die Kapazitätssteuerung.

Kapitel 5 beschreibt, mit welchen Teilkonzepten die zuvor erarbeiteten Anforderungen erfüllt werden. Auch hierbei orientiert sich die Arbeit an den Aufgaben der Fertigungssteuerung und gliedert nach den Bereichen Produktionsplanung, Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung. Zielstellung des Konzepts ist es, einen Ansatz für die reale Umsetzung der Fertigungssteuerung auf Baustellen zu finden und diese anschließend in einem Simulationsmodell nachzubilden. Wichtige Ansatzpunkte hierfür sind die Detaillierung und Gestaltung der Planung, die Messung der Auftragsabarbeitung für die Teilarbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche sowie die Gestaltung der Kapazitätsanpassung.

Kapitel 6 beschreibt zunächst das Simulationsmodell sowie die Validierung des Simulationsmodells. Die Validierung fokussiert auf die neu implementierten Steuerungsfunktionen. Das Simulationsmodell basiert auf Planungsdaten, Fertigungsinformationen und Strukturbeschreibungen einer realen Werft. Als nächstes beschreibt das Kapitel zwei Störungsszenarien und die Evaluierung der Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung anhand dieser Szenarien. Die Evaluierung untersucht zunächst die Steuerungen zur Auftragsfreigabe und zur Kapazitätssteuerung getrennt. Danach werden die Steuerungsverfahren gemeinsam in den Störungsszenarien verwendet. Im Verlauf der Evaluation zeigen die Verfahren der Fertigungssteuerung ihre Wirksamkeit sehr deutlich.

Abstract

Titel der Arbeit: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am
Beispiel des Schiffbaus
Name des Kandidaten: Robert Wandt

Der wirtschaftliche Erfolg von Werften in Europa hängt davon ab, ob sie auch in Zukunft in der Lage sind ihre Produkte mit hoher Termintreue zu Produzieren. Hierfür liegen große Potenziale in der Optimierung der Durchlaufzeiten mit Hilfe einer zielgerichteten Fertigungssteuerung. Der vorgestellte Ansatz beschreibt wie diese zielgerichtete Fertigungssteuerung in der schiffbaulichen Unikatfertigung auf Baustellen zu realisieren ist.

Schlagwörter:
Unikatfertigung, Fertigungssteuerung, Modell der Fertigungssteuerung, Schiffbau, Bauplatz, Simulation

The economical success of ship yards in Europe depends strongly on their capability to deliver their products on time. Big potentials in optimization exist in decreasing the through put time, using production methods in a more systematical way. The manufacturing control model describes a suitable way. This work shows the capability of this approach and describes a suiting way of implementing the method into a real production.

Keywords:
One-of-a-kind production, production control, manufacturing control model, ship building, assembly site, simulation

Inhaltsverzeichnis

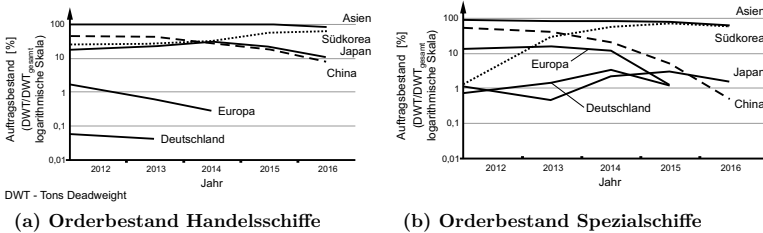
1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung der Arbeit	2
1.2	Lösungsweg	2
2	Stand der Technik	5
2.1	Ein Modell der Fertigungssteuerung	5
2.2	Fertigungsprinzipien der Unikatfertigung	8
2.2.1	Das Fließprinzip in der Unikatfertigung	10
2.2.2	Das Werkstattprinzip in der Unikatfertigung	10
2.2.3	Das Baustellenprinzip in der Unikatfertigung	11
2.2.4	Verbesserungen der Produktionsabläufe der Unikatfertigung	12
2.3	Eigenschaften von Ressourcen des Baustellenprinzips	13
2.3.1	Eigenschaften von Flächen	14
2.3.2	Eigenschaften von Mitarbeitern	15
2.3.3	Eigenschaften der Transportressourcen	15
2.4	Modellierung der logistischen Zielgrößen	16
2.4.1	Trichterformel	17
2.4.2	Durchlaufelement	18
2.4.3	Bestand	18
2.4.4	Durchlaufdiagramm	19
2.5	Produktionsplanung in der Unikatfertigung	20
2.6	Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung	22
2.6.1	Auftragsfreigabe	23
2.6.2	Kapazitätssteuerung	25
2.6.3	Reihenfolgebildung	27
2.6.4	Zusammenfassung	28
3	Grundlagen der Modellierung	29
3.1	Formalisierung des Arbeitssystems Mitarbeiter	30
3.1.1	Auftrags- und Durchführungszeiten für das Arbeitssystem Mitarbeiter	30
3.1.2	Das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Mitarbeiter	34
3.1.3	Das Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Mitarbeiter	37
3.1.4	Die Kapazität für das Arbeitssystem Mitarbeiter	38
3.2	Formalisierung des Arbeitssystems Fläche	38
3.2.1	Auftrags-, Durchführungs- und Belegungszeit für das Arbeitssystem Fläche	39
3.2.2	Das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Fläche	40
3.2.3	Das Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Fläche	45
3.2.4	Definition des Kapazitätsbegriffs für das Arbeitssystem Fläche	47
3.3	Kopplung der Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter	49
3.3.1	Die Anordnungsvarianten des Arbeitssystems	50

3.3.2	Das Durchlaufelement des gekoppelten Arbeitssystems	51
3.3.3	Das Durchlaufdiagramm des gekoppelten Arbeitssystems	51
3.3.4	Nutzen der Durchlaufdiagramme	53
3.3.5	Zusammenfassung zur Kopplung der Arbeitssysteme	54
4	Anforderungen an die Implementierung der Fertigungssteuerung	55
4.1	Defizite der Produktionsplanung	55
4.1.1	Einfluss des Detaillierungsgrads	56
4.1.2	Einfluss der gestuften Detaillierung	57
4.1.3	Absicherung der Bereitstellung passender Plan-Daten	58
4.1.4	Anforderungen an die Implementierung der Produktionsplanung	59
4.2	Defizite der Auftragsfreigabe	60
4.2.1	Einfluss der Arbeitssystemstruktur	60
4.2.2	Ableitung des bestehenden Informationsdefizits	61
4.2.3	Anforderungen an die Implementierung der Auftragsfreigabe	62
4.3	Defizite der Kapazitätssteuerung	62
4.3.1	Einfluss des Kapazitätsanpassungskriteriums	63
4.3.2	Einfluss des Detaillierungsgrads auf die Kapazitätssteuerung	63
4.3.3	Einfluss des Umfangs der Kapazitätsanpassung	63
4.3.4	Einfluss von Planungszeitpuffern	64
4.3.5	Anforderungen an die Implementierung der Kapazitätssteuerung	64
4.4	Defizite der Reihenfolgebildung	65
4.4.1	Bestimmung einer sinnvollen Reihenfolgeregel	66
4.4.2	Informationsdefizit der Steuerungsinformationen	66
4.4.3	Notwendigkeit für verschiedene Reihenfolgeregeln	67
4.4.4	Anforderungen an die Reihenfolgebildung	68
5	Gestaltung der Fertigungssteuerung	69
5.1	Gestaltung der Produktionsplanung	69
5.1.1	Erzeugung von Produktionsplänen für das Simulationsmodell	69
5.1.2	Festlegung eines Detaillierungsgrads für die Planung	71
5.1.3	Konzept für eine systematisch gestufte Detaillierung	72
5.1.4	Anforderungen an die Erfüllung der Modellierung	75
5.1.5	Erfüllung der Anforderungen an die Produktionsplanung	75
5.2	Gestaltung der Auftragsfreigabe	76
5.2.1	Auflösen der arbeitssystemstrukturbedingten Defizite	76
5.2.2	Auflösen der informationsbezogenen Defizite	82
5.2.3	Erfüllung der Anforderungen an die Auftragsfreigabe	88
5.3	Gestaltung der Kapazitätssteuerung	88
5.3.1	Arten der anpassbaren Kapazitäten	89
5.3.2	Das Kriterium der Kapazitätsanpassung	89
5.3.3	Konzepte zur Anpassung der Kapazitäten	92
5.3.4	Konfiguration der Kapazitätssteuerung	94
5.3.5	Zeitpuffer in Auftragszeiten	95
5.3.6	Erfüllung der Anforderungen an die Kapazitätssteuerung	97
5.4	Gestaltung der Reihenfolgebildung	98
5.4.1	Unterschiede in der Reihenfolgebildung für die Baustellenfertigung	98
5.4.2	Definition einer sinnvollen Reihenfolgeregel für die Baustellenfertigung	99

5.4.3	Informationsbedarf der Reihenfolgeregelung	101
5.4.4	Nutzen unterschiedlicher Reihenfolgeregeln für die Baustellenfertigung . . .	102
5.4.5	Erfüllung der Anforderungen an die Reihenfolgebildung	103
6	Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung	105
6.1	Aufbau der Versuchsumgebung	105
6.1.1	Modellierung der logistischen Struktur einer Werft	105
6.1.2	Modellierung eines Werft-Bauplatzes	108
6.1.3	Validierung des Simulationsmodells	110
6.2	Evaluierung der modellgestützten Fertigungssteuerung	116
6.2.1	Beschreibung des verwendeten Produktionsplans	116
6.2.2	Durchführung der Evaluierung	122
6.2.3	Evaluierung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe	123
6.2.4	Evaluierung der Kapazitätssteuerung	129
6.2.5	Evaluierung der Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung	132
6.2.6	Beurteilung der Wirksamkeit von Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung in der Baustellenfertigung	137
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
7.1	Zusammenfassung	139
7.2	Ausblick	140
	Literaturverzeichnis	143
	Abbildungsverzeichnis	149
	Tabellenverzeichnis	153
	Anhang	155
A	Datenstrukturen des Simulationsmodells	155
A.1	Informationen für die Simulation der Produktionsprozesse	155
A.2	Hierarchie der Prozessmuster	159
B	Validierung der Modellkomponenten	163
B.1	Validierung der Prozesszeiten	163
B.2	Szenarien zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine	165
C	Randbedingungen für die Evaluierung der Fertigungssteuerung	167
C.1	Logistische Kennzahlen für die Produktmuster	167
C.2	Der Produktionsplan	168
C.3	Eigenschaften der Evaluationsszenarien	170
C.3.1	Störungsszenario: <i>verringerte Kapazität</i>	170
C.3.2	Störungsszenario: <i>verspätete Teilelieferung</i>	171

1 Einleitung

Der Schiffbau in Deutschland behauptet sich gegenüber dem weltweiten Wettbewerb vor allem durch sehr innovative, komplexe und qualitativ hochwertige Produkte. Kunden bezahlen diese Merkmale jedoch nur für prestigeträchtige Produkte wie Yachten, Spezial- oder Marineschiffe. Für technisch einfachere Produkte sind Kunden nicht bereit, höhere Kosten zu tragen. Dies äußert sich beispielsweise in der Verdrängung deutscher bzw. europäischer Werften bei der Produktion von Handelsschiffen. So gelingt es europäischen Werften im Bereich der Containerschiffe, Tanker und Bulker schon seit vielen Jahren nicht mehr, einen nennenswerten Marktanteil einzuwerben [Row13, CES13][OEC13, S. 24]. Die Folge ist ein beständig sinkender Auftragsbestand an Handelsschiffen in den Orderbüchern deutscher Werften (vgl. Abbildung 1.1a).



12433

Abbildung 1.1: Orderbestand der Werften - Daten aus [Cla12]

Aufgrund dieser Entwicklungen sehen sich deutsche Werften seit Langem einem hohen Kostendruck ausgesetzt. Diesem stellen sie sich vor allem mit zwei Ansätzen. Zum einen setzen sie auf ihre hohe Innovationskraft in der Produktionstechnik und im Produktionsmanagement. Erfolgreiche Ansätze zielen beispielsweise auf die Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung durch Simulationswerkzeuge [Ste06, Sen10, Wag11]. Zum anderen erfolgt eine Spezialisierung auf Nischenmärkte (vgl. Abbildung 1.1b).

Die Konzentration auf Nischenmärkte wird deutsche Werften in Zukunft allerdings nicht vor der Marktmacht der asiatischen Werften schützen, da einerseits die Nachfrage nach Schiffneubaukapazitäten rückläufig ist. Andererseits wächst die Anzahl der asiatischen Werften und neue Kapazitäten stehen ungenutzt zur Verfügung [Rex12, S. 11 ff.]. Asiatische Werften werden deshalb auch in die Nischenbereiche der europäischen bzw. deutschen Werften vordringen, um auch diese Märkte mit ihren Kapazitäten zu bedienen [The13, S. 33 f.]. Die deutschen Werften sind somit gezwungen, ihre Kosten weiter zu reduzieren.

Ein Ansatz hierfür ist die Optimierung der Produktionsabläufe durch eine effektive Steuerung. Die bislang vorhandene projektbasierte Steuerung ist hierfür jedoch kaum geeignet, unter anderem weil es ihr nicht gelingt, die Komplexität über klar definierte Steuer- und Regelgrößen zu verringern.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Die Steuerung der schiffbaulichen Produktion muss mit hoher Komplexität sowohl in Bezug auf das Produkt als auch auf die Prozesse umgehen. Bisher lösen Werften diese Aufgabenstellung, indem sie den gesamten Produktentstehungsprozess mit Projektplanungswerkzeugen begleiten. So erfolgt die Planung der Schifferstellung zunächst sehr grob. Im weiteren Projektfortschritt detaillieren die Planungsabteilungen diese Abläufe bis zu einem gewissen Grad weiter. Sowohl zur Dokumentation als auch zur Entscheidungsfindung nutzt die Werft Projektpläne. Die Planung der detaillierten Abläufe und die Steuerung der Produktion erfolgen anschließend operativ, nutzen jedoch immer noch den Projektplan als zentrales Planungs- und Steuerungswerkzeug.

Aufgrund dieses Vorgehens besteht häufig kein klares Verständnis über die Wechselwirkungen und Einflussgrößen im gesamten Produktionsablauf. Im Fall einer Störung ist man häufig nur in der Lage, dieser durch Neuplanung zu begegnen, da der Einfluss der Störung auf Folgeprozesse meist schwer abzuschätzen ist. Verstärkt wird der Störungseinfluss durch die vor allem koordinierende Aufgabe der Werft. Auf die Abläufe und Ressourcen der Unterauftragnehmer kann sie nur bedingt Einfluss nehmen.

Es stellt sich somit die Frage, wie es möglich ist, zu besseren Steuerungsentscheidungen im Schiffbau zu gelangen und welche Zusammenhänge zwischen den beeinflussbaren Stellgrößen der Fertigungssteuerung und den logistischen Zielgrößen der Werft bestehen. Letztendlich lässt sich die Fragestellung somit darauf reduzieren, wie sich die Fertigungssteuerung auf Baustellen modellieren lässt, um so die Planung und Steuerung von der reinen projektbezogenen Betrachtung zu lösen.

Im ersten Schritt ist es somit notwendig, ein geeignetes Modell für diese komplexen Produktionsabläufe zu finden. Dieses übergeordnete Modell muss Stellgrößen für die Fertigungssteuerung definieren und eine Beschreibung für die beteiligten Ressourcen und deren Wechselwirkung mit den Stellgrößen finden. Im zweiten Schritt sind geeignete Analysewerkzeuge zur Beurteilung der Produktionsabläufe zu finden. Erst hierdurch ist es der Planung und Steuerung möglich, Steuerungsentscheidungen für den Produktionsablauf zu treffen. Im letzten Schritt ist diese theoretische Modellierung zu evaluieren. Nur so kann sichergestellt werden, dass die theoretische Modellierung eine valide Abbildung der realen Fertigung ist und sich Aussagen der Arbeit auch in die Realität übertragen lassen. Hierfür ist ein passendes Vorgehen zu bestimmen.

1.2 Lösungsweg

Die Arbeit wählt einen zweiseitigen Ansatz, bestehend aus einer theoretischen Modellierung und einer anschließenden simulationsbasierten Evaluierung. Die Evaluierung erfordert es, die Modellierung in einem Simulationswerkzeug umzusetzen, sodass sich die Zusammenhänge in einem realistischen Beispiel überprüfen lassen. Eine Übersicht zum Vorgehen gibt Abbildung 1.2.

Die theoretische Modellierung fußt auf der Analyse des aktuellen Stands der Technik (Kapitel 2). Zunächst ist das Fertigungsprinzip Baustelle zu untersuchen. Hierzu gehört der Aufbau des Fertigungsprinzips, seine Anwendungsbereiche sowie typische verwendete Verfahren der Fertigungssteuerung in diesem Prinzip.

Der zweite Teil ist die Analyse des Modells der Fertigungssteuerung [Löd08]. Dieses Modell findet bereits Anwendung in den anderen Fertigungsprinzipien. Ziel ist es, die Übertragbarkeit des Modells der Fertigungssteuerung in das Baustellenprinzip zu beurteilen und die notwendigen Anpassungen festzulegen.

Basierend auf dieser Grundlage widmet sich Kapitel 3 der Modellierung der Abläufe auf einer Baustelle. Hierfür ist die Baustelle in ihre Hauptbestandteile Fläche und Mitarbeiter zu zerlegen. Für



12425

Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

jeden Bestandteil ist eine Beschreibung der Komponenten und Abläufe zu entwickeln. Anschließend ist zu beschreiben, wie die Kopplung der Teilarbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter erfolgen kann. Erst hierdurch entsteht eine vollständige Abbildung des Fertigungsprinzips Baustelle. Mit der Modellierung ist die theoretische Arbeit abgeschlossen und der Teil der simulationsbasierten Evaluation beginnt.

Ausgehend von der theoretischen Modellierung und dem Stand der Technik sind Anforderungen an die Implementierung des *Modells der Fertigungssteuerung* in der Baustellenfertigung abzuleiten. Dieser Ableitung widmet sich das Kapitel 4, indem es Anforderungen in vier Defizitbereichen bestimmt. Die vier Bereiche orientieren sich an den Aufgaben des *Modells der Fertigungssteuerung*: Produktionsplanung, Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung sowie Reihenfolgebildung.

Auf Basis dieser Randbedingungen entwickelt Kapitel 5 das Konzept für die Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung. Auch der Aufbau des Konzepts orientiert sich an den vier Aufgaben.

Kapitel 6 beschreibt anschließend, wie die Evaluation durchzuführen ist. Im ersten Schritt sind hierfür die logistische Struktur, die Modellparametrierung sowie die Modellvalidierung vorzustellen. Der zweite Schritt untersucht die Auftragsfreigabe in der Baustellenfertigung. Hierfür

nutzt der Schritt das erstellte Simulationsmodell und betrachtet die Auftragsfreigabe in unterschiedlichen Szenarien. Der dritte Schritt untersucht die Kapazitätssteuerung anhand desselben Simulationsmodells und derselben Szenarien. Der vierte Schritt untersucht, wie Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung in Kombination auf die Szenarien einwirken.

Die Arbeit endet mit dem Ausblick. Dieser beschreibt einerseits Entwicklungspotenziale für die Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung und für das Simulationsmodell. Andererseits werden Untersuchungsaspekte vorgestellt, deren Analyse das theoretische Modell und die Simulationsumgebung ermöglicht.

2 Stand der Technik

Ziel der Literaturanalyse ist es, die theoretische Grundlage für die Modellierung des Arbeitssystems Baustelle (Kapitel 3) sowie für die Gestaltung der Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung (Kapitel 5) zu schaffen.

Der erste Abschnitt beschreibt das *Modell der Fertigungssteuerung* nach Lödding [Löd08], welches der Ausgangspunkt für die Gestaltung der Fertigungssteuerung ist. Abschnitt 2.2 stellt die schiffbauliche Unikatfertigung vor. Hierfür wird der Schiffbauprozess mit den Phasen Design, Planung und Produktion beschrieben. Anschließend stellt der Abschnitt die im Schiffbau eingesetzten Fertigungsprinzipien vor und ordnet sie in den Produktionsablauf ein. Ziel des Abschnittes ist es, den Produktionsablauf einer Werft zu beschreiben und die Baustellenfertigung in diesen Produktionsablauf einzuordnen.

Der folgende Abschnitt 2.3 untersucht die Eigenschaften und Ressourcen des Baustellenprinzips. Während die Eigenschaften vor allem die spätere theoretische Modellierung beeinflussen, müssen die Ressourcen sowohl bei der theoretischen Modellierung als auch bei der Erstellung des Simulationsmodells Berücksichtigung finden.

Der vierte Abschnitt analysiert die Modellierung logistischer Zielgrößen, wie sie das *Modell der Fertigungssteuerung* verwendet. Dies schafft die Grundlage für die Modellierung logistischer Zielgrößen für das Baustellenprinzip.

Die letzten zwei Abschnitte konzentrieren sich auf den Bereich Produktionsplanung und -steuerung. Während Abschnitt 2.5 das aktuelle Vorgehen zur Produktionsplanung in der Unikatfertigung vorstellt, beschreibt Abschnitt 2.6 die Fertigungssteuerung. Beide Abschnitte konzentrieren sich hierbei nicht nur auf den Schiffbau, sondern betrachten auch den Baubetrieb, in dem das Fertigungsprinzip Baustelle ebenfalls zum Einsatz kommt.

2.1 Ein Modell der Fertigungssteuerung

Modelle haben verschiedene Aufgaben. Sie vereinfachen und beschreiben reale Systeme und können diese aus unterschiedlichen Blickwinkeln darstellen. Hierdurch sind sie in der Lage, Abhängigkeiten transparent zu machen und helfen somit bei der Entwicklung von Konzepten und Entscheidungen [Sch06, S. 12]. Außerdem bilden sie die Grundlage für die Untersuchung realer Systeme, die sich aufgrund von Struktur und Dynamik der gedanklichen Analyse verschließen oder eine Untersuchung nur mit großem Aufwand in der Realität durchführen lassen [Rei93, S. 309].

Ein sehr anerkanntes Modell zur Beschreibung von Unternehmen sowie deren Prozessen und Aufgaben ist das Aachener PPS-Modell [Sch06, S. 21]. In verschiedenen Referenzsichten zerlegt dieses Modell die gesamte Produktionsplanung und -steuerung und schafft so die notwendige Transparenz und Beschreibungsmethodik. Das Modell zielt jedoch nicht auf die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Arbeitssystems ab. Gerade diese Beschreibung ist jedoch elementar, um in der Fertigungssteuerung zielgerichtete Aussagen zur Beeinflussung eines Arbeitssystems zu treffen.

Hierfür ist jedoch das *Modell der Fertigungssteuerung* nach Lödding geeignet. Dieses Modell beschreibt die Zusammenhänge zwischen den am Arbeitssystem beeinflussbaren Stellgrößen und

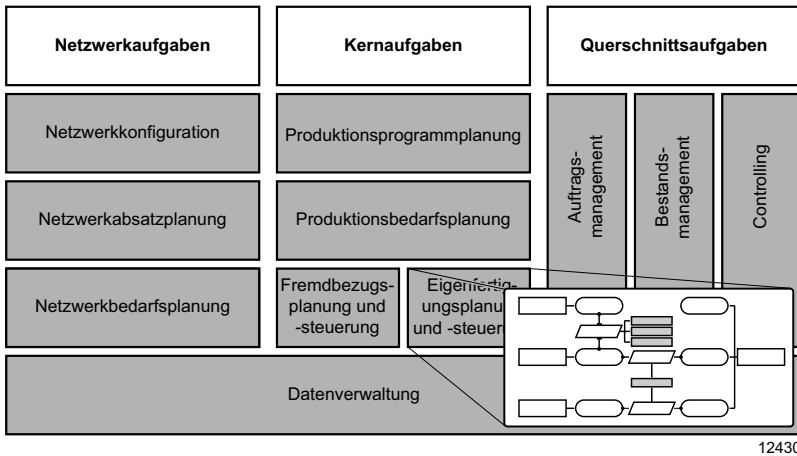


Abbildung 2.1: Einordnung des *Modells der Fertigungssteuerung* nach Lödning [Löd08, S. 7] in die Aachener Aufgabenreferenzsicht [Sch06, S. 21]

den logistischen Zielgrößen des Unternehmens. Es ist der Eigenfertigungsplanung und -steuerung im Aachener Modell zuzuordnen (vgl. Abbildung 2.1).

Da das *Modell der Fertigungssteuerung* jedoch nur qualitativ die starken Wirkzusammenhänge in einem Arbeitssystem beschreibt und somit nicht die quantitativen Zusammenhänge darstellen kann, ergänzt Lödning sein Modell um das *Hannoveraner Trichtermodell*, wie es insbesondere Wiendahl [Wie10, S. 265 ff.] und Nyhuis [Nyh12, S. 17 ff.] beschreiben.

Das *Modell der Fertigungssteuerung* wird bisher nicht in der schiffbaulichen Unikatfertigung angewendet. Aufgrund von Struktur und Komplexität einer Werft und seiner Arbeitssysteme besteht aber ein großer Bedarf nach einem geeigneten Modell für die Fertigungssteuerung. Dieses muss die Wirkzusammenhänge zwischen den operativ beeinflussbaren Stellgrößen und den logistischen Zielgrößen des Unternehmens beschreiben. Da dies für andere Fertigungsprinzipien mit dem *Modell der Fertigungssteuerung* erfolgreich gelungen ist, liegt es nahe, das Modell für die Baustellenfertigung anzupassen. Außerdem entsteht hierdurch die Basis, weitere quantitative Modelle und Analysewerkzeuge zu übertragen.

Hierbei stellt sich die Frage, welche Unterschiede zwischen den Fertigungsprinzipien und insbesondere ihren Arbeitssystemen bestehen und welchen Einfluss diese auf die Übertragbarkeit der Modelle haben. Außerdem ist unklar, ob die Wirkzusammenhänge in gleicher Weise bestehen oder ob neue Wirkzusammenhänge zwischen den Stell- und Zielgrößen der Arbeitssysteme einer Werft existieren. Es ist somit notwendig, die Unterschiede zwischen den Arbeitssystemen einer Werft und einer konventionellen Werkstattfertigung herauszuarbeiten (vgl. Abschnitt 2.2 und folgende). Anschließend sind die bestehenden logistischen Modelle anhand von Werftdaten zu evaluieren, um ihre Leistungsfähigkeit für die Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung zu bewerten (vgl. Kapitel 6).

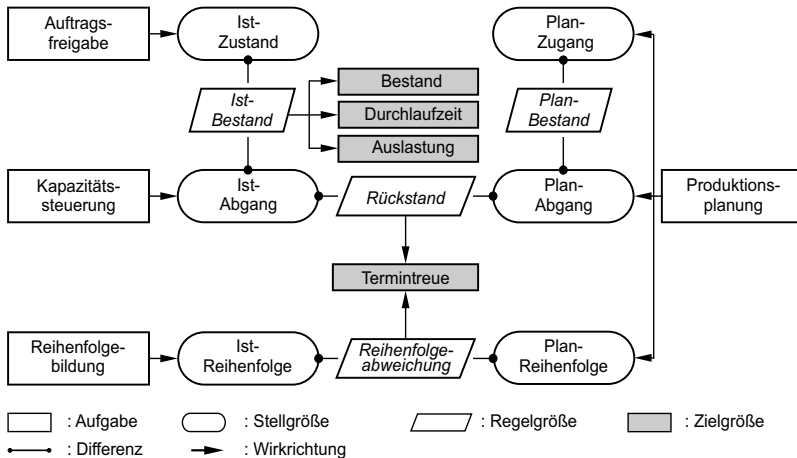


Abbildung 2.2: Das Modell der Fertigungssteuerung nach Lödging [Löd08, S. 7]

Zentrales Modell für diese Fragestellungen ist das *Modell der Fertigungssteuerung*, wie es in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Es beschreibt, welche Entscheidungen für ein Arbeitssystem zu treffen sind (Aufgaben), über welche Größen das Arbeitssystem und die Aufträge zu beeinflussen sind (Stellgrößen), wie gut die Umsetzung der Entscheidungen gelingt (Regelgrößen) sowie zu welchen Ergebnissen die Beeinflussung führt (Zielgrößen).

Hierbei konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf den Steuerungsaspekt des Modells und damit auf die Aufgaben

- ☐ Auftragsfreigabe,
- ☐ Kapazitätssteuerung sowie
- ☐ Reihenfolgebildung.

Die vierte Aufgabe (Produktionsplanung) ist nicht im Fokus der Arbeit. Einerseits besteht in der Unikatfertigung bereits eine Vielzahl an Ansätzen für diese Aufgabe (vgl. Abschnitt 2.5). Andererseits ist es das Ziel dieser Arbeit, die Steuerung im Fertigungsprinzip Baustelle zu verbessern und nicht, eine neue Planungsmethode zu entwickeln.

Die Qualität und Struktur des resultierenden Produktionsplans haben jedoch Einfluss auf die Anwendbarkeit des *Modells der Fertigungssteuerung*. Die Arbeit schlägt aus diesem Grund in Abschnitt 5.1 einen Ansatz für die Plan-Ermittlung vor. Konzept und Implementierung können aber auch mit Plänen aus anderen Konzepten oder Methoden arbeiten, solange diese die Anforderungen erfüllen, die sich aus der Fertigungssteuerung ergeben.

Für die Übertragung des Modells und für die Gestaltung einer geeigneten Fertigungssteuerung ist es zunächst notwendig, ein breiteres Verständnis des Produktionsablaufs einer Werft zu erarbeiten.

Aus diesem Grund stellen die folgenden Abschnitte das Produktionssystem Werft vor, beschreiben den Produktentstehungsprozess und ordnen die verschiedenen Fertigungsprinzipien in die zeitliche Abfolge der Produktentstehung ein.

Um das Konzept auch auf andere Anwendungsfelder des Baustellenprinzips übertragen zu können, sind außerdem die Eigenschaften des Prinzips im Anlagenbau und im Baubetrieb zu untersuchen.

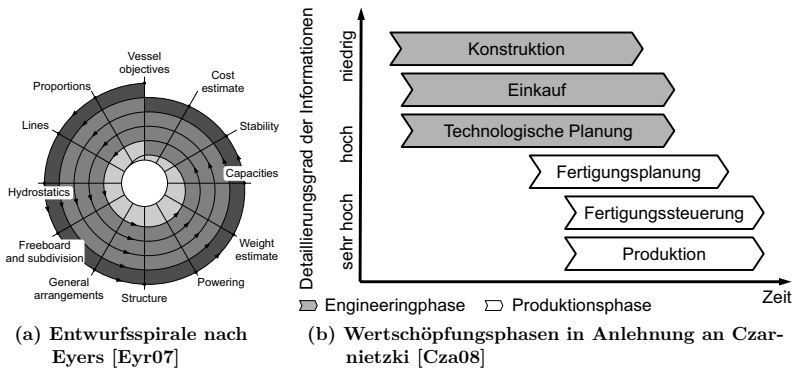
2.2 Fertigungsprinzipien der Unikatfertigung

Eine Werft nutzt verschiedene Fertigungsprinzipien für die Produkterstellung. Um ein Verständnis für den Einsatz der Prinzipien zu erreichen, ist es zunächst notwendig, den Produktionsablauf aus der organisatorischen Sicht zu betrachten.

Die organisatorische Sicht ist in zwei Perspektiven zu unterteilen (vgl. Abbildung 2.3). Im Fokus der ersten Perspektive steht der Entwurfs- und Konstruktionsprozess und dessen iterativer Charakter. Die zweite Perspektive ergibt sich aus dem zeitlichen Ablauf der Produktentstehung, beginnend mit der Projektierung.

Da das Produkt in immer neuen und detaillierteren Schleifen [Eyr07, S. 4] definiert wird (Abbildung 2.3a) und hieraus immer wieder Änderungen von Arbeitsinhalten entstehen, ist die Datenbasis der Planung nur selten final. Planungsaussagen, die auf einer vorherigen Iterationsschleife basieren, sind somit immer zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Diese Datenbasis [VDI10, S. 23] ist die Grundlage für die Planung der Produktionsschritte und die Plan-Daten sind die Grundlage für Entscheidungen der Fertigungssteuerung. Es ist somit notwendig, Planungs- und Steuerungsinformationen zu verschiedenen Phasen und in unterschiedlichen Detaillierungsstufen erheben, erzeugen und bewerten zu können. Hierbei ist die Planung derart zu gestalten, dass bei Plan-Änderungen der Aufwand für manuelle Neuplanungen minimiert wird. Aus der Entwurfsspirale resultiert somit die Anforderung, in der Fertigungssteuerung auf eine sich



12431

Abbildung 2.3: Zwei Perspektiven auf den Entstehungsprozess eines Schiffes

ständig ändernde Datenbasis reagieren zu können.

Die zweite Perspektive der Produktentstehung ist der Blick auf die verschiedenen Wertschöpfungsphasen (Abbildung 2.3b). Hier besteht für lange Phasen eine starke Überlappung [Cza08, S. 5]. Ursprung dieser Überlappung ist einerseits der iterative Charakter des Schiffsentwurfs und andererseits die Parallelisierung von Engineering- und Produktionsphase.

Die starke Parallelisierung der Engineering- und Produktionsphase ist für die Werften ein wichtiger Ansatz zur Reduzierung der Durchlaufzeiten. Jedoch resultiert hieraus auch die Notwendigkeit, mit einer zielgerichteten Steuerung Planabweichungen entgegenzuwirken. Aufgrund der Komplexität der Werft und der Vielzahl an Abhängigkeiten gelingt die Steuerung bisher nur unzureichend. Stattdessen ist es betriebliche Praxis, die Planung an die neue Situation anzupassen.

Die bisher beschriebene organisatorische Sicht zeigt, vor welche Herausforderungen Planung und Steuerung einer Werft gestellt sind. Diese Herausforderung wächst zusätzlich durch die räumliche Struktur der Teilarbeitssysteme. Als Teilarbeitssystem werden an dieser Stelle Fertigungsbereiche verstanden, die sich in ihrer räumlichen Struktur und im Produktionsergebnis unterscheiden.

Wiendahl gliedert die Produktionsprinzipien in fünf Typen, unterteilt nach ihrem Ordnungskriterium und ihrer räumlichen Struktur [Wie10, S. 30]. Sehr typisch für die schiffbauliche Produktion ist die Nutzung von Fließ-, Werkstatt- und Baustellenprinzip. Der Schiffbau kombiniert die einzelnen Prinzipien innerhalb der Werft, wobei der Materialfluss über das Fließ- und Werkstattprinzip hin zum Baustellenprinzip konvergiert.

Der Wertschöpfungsprozess beginnt mit der Erstellung der Stahlstruktur [Wor97, S. 144 ff.]. Czarnietzki definiert fünf Produktstufen: Teile, Paneele, Sektionen, Module und das Schiff [Cza08, S. 6]. Gliedert man diese Produktstufen in den Produktionsablauf ein (vgl. Abbildung 2.4), so werden Teile und Paneele nach dem Fließprinzip gefertigt [Wan10, S. 191 ff.]. Hieran schließt sich die Sektionsfertigung an, in der zum ersten Mal das Baustellenprinzip Anwendung findet. In den folgenden Schritten Konservierung, Sektions-/Modulausrüstung sowie Endmontage kommt ebenfalls das Baustellenprinzip zum Einsatz [Kot10, S. 206 f.]. Häufig schließt sich an die Montage auf der Baustelle noch eine weitere Ausrüstungsphase an. In dieser Phase ist das Schiff jedoch schwimmfähig und liegt an einer Kaianlage.

Das Werkstattprinzip findet Anwendung bei der Fertigung von Ausrüstungskomponenten. Diese sind anschließend in Sektionen und Module einzubauen. Beispiele für Ausrüstungskomponenten sind Fundamente, Treppen und Rohrleitungen. Das Werkstattprinzip übernimmt dementsprechend wie die Fließfertigung eine zuliefernde Rolle für das Baustellenprinzip. Die folgenden Abschnitte umreißen die Merkmale und Eigenheiten einzelner Fertigungsprinzipien beim Einsatz in den Branchen Schiffbau und Baubetrieb.

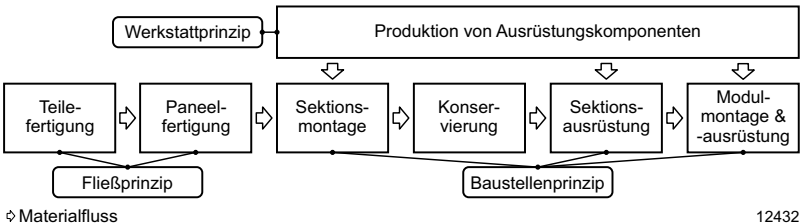


Abbildung 2.4: Einordnung der Fertigungsprinzipien in den Schifferstellungsprozess

2.2.1 Das Fließprinzip in der Unikatfertigung

Die Fließfertigung setzt voraus, dass „die Fertigung nach den Erfordernissen des Erzeugnisses aufgebaut“ ist [Wie10, S. 30]. Handelt es sich bei diesem Erzeugnis um ein Unikat, ist diese Forderung nur für Teilaspekte zu realisieren. Die Werften haben hierfür Erzeugnisbestandteile identifiziert, deren Unikatcharakter noch gering ist.

Für viele Schiffstypen liegt dieser niedrige Unikatcharakter in der Paneel-, Sektions- und Modulproduktion vor, weswegen Werften gerade in diesen Bereichen in der Lage sind, das Fließprinzip oder einen One-Piece-Flow einzuführen [Kol12]. Einige Werften weiten die Anwendung des Prinzips auch auf die Kabinenfertigung im Passagierschiffbau aus [Mey10, S. 5]. Für alle Anwendungsfälle ist jedoch ersichtlich, dass Aspekte einer Wiederholfertigung vorliegen.

Im Bereich des Baubetriebs findet die Fließfertigung seit vielen Jahren Anwendung [Bau07, S. 565 ff.], jedoch bestehen zwei Betrachtungsweisen. In der ersten fließt nicht das Produkt, sondern die Ressource Mitarbeiter, was nicht der üblichen Definition nach Wiendahl entspricht.

Die zweite Betrachtungsweise identifiziert Bauprodukte mit Seriencharakter. Für diese ist es anschließend möglich, eine Fließfertigung zu realisieren. Auch hier nimmt die Fließfertigung somit eine zuliefernde Rolle für das Baustellenprinzip ein.

Typisch für diesen Anwendungsfall ist wie im Schiffbau die Herausforderung, Abweichungen vom Plan-Zustand zu handhaben. Aufgrund vielseitiger äußerer Einflüsse und einer Vielzahl an beteiligten Partnern treten diese auf und sind in Auftreten und Auswirkung nur schwer vorauszusagen [Bau07, S. 753 ff.].

Für die Fertigungssteuerung sind hieraus wichtige zu berücksichtigende Randparameter abzuleiten, mit deren Hilfe sich die Handhabung solcher Störungen absichern lässt. Ein einfach durchzusetzender Ansatz besteht hier beispielsweise in der Bestandsbegrenzung wie sie Verfahren der Auftragsfreigabe in der Fließ- und Werkstattfertigung ermöglichen. Untersucht wurde der Ansatz im Schiffbau noch nicht, obwohl er gerade in Wechselwirkung mit den sich anschließenden Baustellen sehr sinnvoll erscheint.

Aus dem Prinzip der Fließfertigung lassen sich keine spezifischen Randbedingungen für die Anwendung des *Modells der Fertigungssteuerung* ableiten. Jedoch besteht aufgrund der Lieferbeziehung eine enge Verknüpfung zwischen dem Fließ- und dem Baustellenprinzip, die bei der Steuerung zu beachten ist. Außerdem ist der Einfluss von Störungen auf das Fließprinzip bei der Planung und Steuerung der Baustelle zu beachten.

Die Anwender in der Unikatfertigung begegnen diesen Unsicherheiten beispielsweise über Zeitpuffer [Bau07, S. 576][Rii92]. Hieraus ergeben sich für die vorgeschalteten Produktionsschritte verschiedene Nachteile. So werden häufig Zeitreserven aufgebaut, die unnötig sind. Außerdem verdecken Zeitpuffer auftretende Störungen, sodass es kaum möglich ist, Verbesserungspotenziale zu erkennen [Gru10, S. 160]. Eine höhere Transparenz und besser prognostizierbare Durchlaufzeiten in der Baustellenmontage können somit dazu beitragen, Zeitpuffer zu reduzieren und so auch die Produktivität des Fließprinzips zu erhöhen.

2.2.2 Das Werkstattprinzip in der Unikatfertigung

Ebenso wie das Fließprinzip übernimmt das Werkstattprinzip einen zuliefernden Charakter in der Unikatfertigung. So werden Baugruppen oder Komponenten in den Werkstätten montiert oder produziert und anschließend auf dem Bauplatz verbaut. Das Werkstattprinzip zeichnet sich hierbei durch seine hohe Flexibilität aus. Als nachteilig stellt sich hierbei jedoch die hohe Durchlaufzeit dar, die aus dem losweisen Transport zwischen den einzelnen Arbeitssystemen resultiert [Wie10, S. 31].

Einen Überblick zu typischen Charakteristika von Fertigungsprinzipien gibt bereits Schomburg [Sch80, S. 130 ff.]. Los stellt diese für den Schiffbau zusammen [Los93, S. 2]. Eine sehr aktuelle Kategorisierung gibt Schuh [Sch06, S. 136 ff.] für Auftragsfertiger. All diesen Beschreibungen ist gemein, dass sie das Werkstattprinzip als ein Fertigungsprinzip der Unikatfertigung zuordnen. Jedoch ist hier darauf hinzuweisen, dass diese Kategorisierung für die Unikatfertigung im Schiffbau nicht vollständig ist. So fehlt beispielsweise die Fließfertigung, die verschiedene Werften bereits in ihr Produktionsablauf integriert haben.

Das Werkstattprinzip hat eine wichtige zuliefernde Rolle für das Baustellenprinzip. In dieser Rolle steht es in Wechselwirkung mit den Montageabläufen auf den Baustellen, weshalb Störungen in einem der beiden Prinzipien zu Wechselwirkungen mit dem anderen führen. Eine Darstellung typischer Störungen im Fertigungsablauf der Werkstattfertigung gibt [Los93, S. 64 f.].

Da die Komplexität dieser Wechselwirkungen sich bisher einer vollständigen Beurteilung verschließt, muss es Ziel sein, den vorliegenden Produktionsplan möglichst gut zu erfüllen. Nur so ist abzusichern, dass die gegenseitige Beeinflussung der Fertigungsprinzipien klein ausfällt.

Dies zeigt die Notwendigkeit für eine systematische Fertigungssteuerung in der Baustellenmontage.

2.2.3 Das Baustellenprinzip in der Unikatfertigung

Wiendahl beschreibt das Baustellenprinzip als ein Verrichtungsprinzip, bei dem die Ressourcen um das zu erstellende Objekt gruppiert werden. Die Errichtung vollzieht sich somit stationär. Grundlegend ist diese Beschreibung für Baustellen im Schiffbau, im Baubetrieb sowie im Anlagenbau gültig. Betrachtet man die einzelnen Anwendungsfelder näher, ergeben sich jedoch Unterschiede zwischen diesen.

So sind Baustellen in der schiffbaulichen Unikatfertigung produktunabhängig. Ihr Ordnungskriterium ist der Nutzungszeitpunkt im Produktionsablauf. Vereinfacht ist zu sagen, dass später genutzte Baustellen größer sind und über größere Transportkapazitäten verfügen. Dies ist notwendig, da die erstellten Produkte, abhängig von der Produktstufe, in Größe und Gewicht zunehmen. Aufgrund dieser Produktunabhängigkeit ist es einfacher, den grundlegenden Ablauf in der schiffbaulichen Fertigung zu modellieren, da Baustellen für neue Schiffe nicht neu zu erstellen sind.

Der Schiffbau verwendet für die verschiedenen Produktstufen Begriffe wie z. B. Sektion, Modul, Großmodul oder Block. Die Verwendung dieser Begriffe ist jedoch werftspezifisch. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Baustufen unter dem Begriff Block zusammengefasst.

Für den Baubetrieb sowie den Anlagenbau sind neben den Arbeitsinhalten auch die Baustellen mit jedem Produkt andere. Dies erschwert einerseits die Modellbildung, andererseits resultiert hieraus eine Vielfalt verschiedener Randbedingungen, die Steuerungsentscheidungen beeinflussen können. Bei einer Übertragung des *Modells der Fertigungssteuerung* ist somit eine größere Anzahl an Randbedingungen zu beachten.

Gemeinsam haben jedoch alle Branchen den Betrachtungsfokus in der Planung und Steuerung: Hier steht der Mitarbeiter im Vordergrund, der das Arbeitssystem bildet. Dies hat für das *Modell der Fertigungssteuerung* zur Folge, dass sich der Blickwinkel auf das Arbeitssystem verschiebt und somit andere Ressourcen zu steuern sind. Der Abschnitt 2.3 stellt die Ressourcen detailliert vor.

Für die Fertigungssteuerung resultiert hieraus einerseits eine größere Flexibilität beim Ressourceneinsatz. Andererseits gestaltet sich die Planungs- und Steuerungsaufgabe jedoch komplizierter, da eine größere Varianz bei z. B. den Arbeitsinhalten und der Reihenfolgebildung vorliegt.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Steuerung in diesem Produktionsprinzip aufwendig. Der Schiffbau begegnet dieser Herausforderung mit EDV-Werkzeugen [Bra11, S. 329 ff.][Gün11, S. 172 ff.]. Auch das Bauwesen stellt sich der Herausforderung über diesen Ansatz [Gün11, S. 175 ff.]. All diesen Ansätzen ist gemein, dass sie dazu neigen, eine Anpassung im Plan vorzunehmen, sobald

Störungen auftreten. Dies setzt jedoch voraus, dass man entweder in der Lage ist, die Auswirkungen einer Änderung für den gesamten Produktionsplan zu überblicken oder es akzeptiert, dass aus dieser Änderung neue Engpässe resultieren.

Aufgrund der Komplexität der Produktionsabläufe ist man heutzutage nur mit aufwendigen Simulationsmodellen in der Lage, Auswirkungen auf den gesamten Produktionsablauf zu überblicken.

Diese Simulationen sind zeitaufwendig, zudem lässt sich nie ausschließen, dass Randbedingungen unvollständig modelliert wurden. Vor allem wenn die Beurteilungen häufiger durchgeführt werden sollen, ist eine detaillierte Analyse der Simulationsergebnisse ausgeschlossen. Stattdessen lassen sich nur wenige aggregierte Kennzahlen beurteilen.

Die Wirksamkeit der simulationsbasierten Planung und Steuerung soll an dieser Stelle nicht angezweifelt werden. Jedoch ist sie noch nicht so leistungsfähig, dass sie täglich und für die Beurteilung jeder Störung im Produktionsablauf eingesetzt werden kann. Hier ist es zielführender, einfache Methoden zur Umsetzung der aufwendig ermittelten Pläne zu nutzen. Hierfür bieten sich beispielsweise *Verfahren der Fertigungssteuerung* an.

2.2.4 Verbesserungen der Produktionsabläufe der Unikatfertigung

Die Verbesserung der Produktionsabläufe in den beschriebenen drei Produktionsprinzipien realisiert man gegenwärtig vor allem über zwei Ansätze: die schlanke Produktion und Verbesserungen in der Produktionsplanung und -steuerung.

Forschung und Industrie beschäftigen sich bereits seit vielen Jahren [Elo92, Sto99, Gru10, Kol12] mit der Umsetzung der schlanken Produktion und der positive Effekt auf die Produktivität ist gut zu erkennen. So zeigen beispielsweise japanische Werften (vgl. Abbildung 2.5), die diese Prinzipien sehr gut verinnerlicht haben, über die letzten zwei Jahrzehnte einen deutlichen Zuwachs in der Produktivität [OEC13, S. 32].

Das Ziel der schlanken Produktion ist es, den Schiffbau in seinen Abläufen so effizient zu gestalten, dass es auch in Hochlohnländern möglich bleibt, Schiffe zu wettbewerbsfähigen Kosten zu erstellen. Ein positiver Zusatzeffekt dieser Bestrebungen ist die hieraus resultierende Transparenz in den Produktionsprozessen. Diese stärkt die Wissensbasis, auf der Steuerentscheidungen getroffen werden.

Dennoch fehlen gerade für die Montage auf Baustellen Konzepte und Methoden zur einfachen

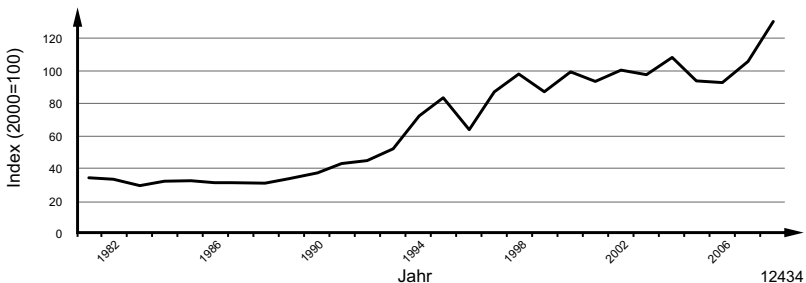


Abbildung 2.5: Entwicklung der Produktivität japanischer Werften gemessen als Index des realen Wertzuwachses je Mitarbeiter [OEC13, S. 32]

Entscheidungsfindung. Digitale Werkzeuge, wie beispielsweise die Simulation, helfen hier zwar sowohl beim Planen als auch bei operativen Entscheidungen. Jedoch sind sie noch nicht in der Lage, diese so zeitnah zu realisieren, dass Entscheidungen über Überstunden oder Freigaben auf einer täglichen Basis zu treffen sind. Hierfür fehlen einfache und standardisierte Methoden zur Fertigungssteuerung, wie sie beispielsweise Lödning vorstellt [Löd08].

2.3 Eigenschaften von Ressourcen des Baustellenprinzips

Die vorangegangenen Absätze beschreiben die drei Fertigungsprinzipien Fließ-, Werkstatt- und Baustellenprinzip am Beispiel des Schiffbaus und des Baubetriebs. Der folgende Abschnitt geht nun detailliert auf die Eigenschaften und Ressourcen des Baustellenprinzips ein. Hierbei liegt der Fokus auf dem Schiffbau. Im Vergleich werden jedoch auch Besonderheiten der Bauindustrie herausgestellt. Dies soll die Übertragung der *Verfahren der Fertigungssteuerung* auch in diese Branche erleichtern. Ausgangspunkt für die folgenden Beschreibungen ist das Arbeitssystem.

Nach REFA ist ein Arbeitssystem die Gruppierung von Mensch und Betriebs- und Arbeitsmitteln [REF93, S. 83]. Bei der Produktionsplanung und -steuerung konzentriert man sich in den Fertigungsprinzipien Werkstatt- und Fließfertigung jedoch vor allem auf die Betriebs- und Arbeitsmittel. Typischerweise sind dies Maschinen oder Anlagen. Im Unterschied zu diesen Fertigungsprinzipien steht in der Baustellenfertigung die Verteilung der Aufgaben auf Mitarbeiter bzw. Mitarbeitergruppen (Gewerke) im Vordergrund [REF93, S. 193 f.]. Innerhalb dieser Arbeit soll die Definition nach Wormuth et al. für Baustellen im Baubetrieb gelten:

Eine Baustelle ist der räumliche Bereich, an dem ein „Bauwerk errichtet, umgebaut oder abgebrochen wird, ... einschließlich der bauzeitlich genutzten Flächen. Hierzu zählen insbesondere Arbeits- und Lagerflächen ... sowie Fahrwege und Wendeplätze.“ [Wor00, S. 83]

Für die schiffbauliche Perspektive in dieser Arbeit sei das Arbeitssystem mit den folgenden Leitsätzen beschrieben:

In einer Werft bilden die Hauptressourcen Mitarbeiter und Montageflächen das Arbeitssystem Baustelle. Montageflächen werden für die Produktion genutzt und sind in ihrer Verwendung und Aufteilung flexibel. Ergänzt werden beide Hauptressourcen durch Ressourcen wie Maschinen, Werkzeuge und Transportkapazitäten.

Größter Unterschied zwischen den Arbeitssystemen im Baubetrieb und im Schiffbau ist die stationäre Verwendung von Baustellen im Schiffbau. Während Baustellen im Baubetrieb z. B. wandern (Straßenbau) [Kir08, S. 52] oder zeitlich begrenzt sind, werden Baustellen im Schiffbau immer wieder verwendet. Hierbei erfolgt jedoch häufig eine passende Einteilung der zur Verfügung stehenden Flächen. Dieser Unterschied hat vor allem Auswirkung auf die Konzepte zur Einteilung der Flächen und wird in Abschnitt 2.3.1 näher erläutert.

Klassische *Verfahren der Fertigungssteuerung* auf das Baustellenprinzip zu übertragen, scheitert bisher an verschiedenen Einflüssen. Beispielfhaft seien hier die folgenden Punkte genannt:

- Für Bestandteile der Baustelle ist bisher keine Modellierung mit dem *Hannoveraner Trichtermodell* entwickelt worden. Lediglich Schmidt modelliert Montageprozesse [Sch10], erfasst aufgrund des Arbeitsfokus jedoch nicht den Einfluss von Montageflächen.
- Werkzeuge zur Analyse der Abläufe, wie sie beispielsweise in der Serien- und Fließfertigung etabliert sind, existieren nicht in der Baustellenfertigung.

- Das Projektmanagement für Baustellen erfolgt primär reaktiv [Kir08, S. 26]. Grund hierfür sind die hohe Komplexität der Projektabwicklung und Interdependenzen zwischen Einzelspekten des Projekts.

Die Grundidee, standardisierte Methoden in der Baustellenfertigung zu nutzen, besteht bereits. So vergleicht z. B. Ott die Stückgüter- und Baustellenfertigung [Ott07, S. 15 f.] mit dem Ziel, übertragbare Methoden zu identifizieren. Gruß stellt Ansätze für eine *schlanke Unikatfertigung* vor [Gru10], und Kirsch entwickelt eine Systematik, um die Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme zu organisieren [Kir08].

Die Betrachtung der Eigenschaften des Baustellenprinzips hat die beiden Hauptressourcen Mitarbeiter und Fläche benannt. Die folgenden Absätze betrachten diese Ressourcen nun detailliert und stellen außerdem Transportressourcen vor. Der Schiffbau nutzt diese einerseits, um die Belegung der Fläche zu realisieren. Andererseits sind Transportressourcen nötig, um die erstellten Objekte zu drehen und zu positionieren. Dies ist von Bedeutung, da sich Montage- und Einbaulage häufig unterscheiden.

2.3.1 Eigenschaften von Flächen

Die Belegung der Hauptressource Fläche ist ein Problem, dem sich Wissenschaft und Industrie seit Langem widmen [Lee97, Maß00], [Eve06, S. 461], [Bra11, S. 331]. Die Herausforderung entsteht hierbei aus mehreren Faktoren:

Der primäre Faktor ist die Flächeneinteilung. Objekte belegen auf der Baustelle immer einen bestimmten Anteil der Fläche für eine bestimmte Zeit. Hieraus resultiert für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) die Frage, auf welchem Teil der Fläche das Objekt gefertigt werden soll. Wenn der Flächenbedarf und die Belegungsdauer für jedes zu montierende Objekt bekannt sind, lässt sich die Verschachtelung auf eine Optimierungsaufgabe reduzieren. Hierbei vernachlässigt man jedoch häufig Einflüsse wie die Zugänglichkeit der Objekte oder Verzögerungen im Produktionsablauf. Aufgrund dieser Faktoren kann eine theoretisch weniger optimale Verschachtelung der Objekte zu einem robusteren Produktionsablauf führen.

Ein weiterer Faktor ist die Eigenschaft der Fläche, sowohl Montage- als auch Lagerfläche zu sein. Im Fall einer Planabweichung muss die Steuerung somit über das Verwendungsszenario entscheiden. Hieraus folgt, ob das Objekt ausgelagert wird oder bis zur Behebung der Störung auf der Fläche verbleibt. Verbleibt es auf der Fläche, wird aus der Montagefläche eine Lagerfläche und die Flächenkapazität der Baustelle wird in diesem Fall reduziert. Hinzu kommt, dass Veränderungen in der Nutzung häufig an die Aufwendung weiterer Ressourcen gekoppelt sind. Zu nennen sind hier beispielsweise die Transportressourcen. Soll die Fläche nicht für die Lagerung eines Objekts genutzt werden, bedingt dies eine Auslagerung. Hierbei entstehen dann Fragen wie: Stehen Transportressourcen hierfür zur Verfügung und stört deren Nutzung den geplanten Ablauf eines anderen Produktionsschritts?

Um diese Einflüsse beurteilen zu können, untersucht man Flächenbelegungen heute mit Hilfe von Simulationsmodellen. Diese sind in der Lage, große Mengen an Randbedingungen zu berücksichtigen. Wagner [Ned07] und Czarnietzki [Cza08, S. 352 ff.] beschreiben im deutschen Schiffbau etablierte Simulationsansätze. Eine Vielzahl an Ansätzen beschäftigt sich außerdem mit Verfahren, um eine möglichst robuste Flächeneinteilung zu erreichen [Lee97, Sch90].

Alle genannten Verfahren beschäftigen sich mit der Planung der Flächen. Es fehlen bislang Methoden, um die tatsächliche Flächennutzung einfach beschreiben zu können. Ein Ansatz hierfür bietet das *Hannoveraner Trichtermodell* (vgl. Abschnitt 2.4).

2.3.2 Eigenschaften von Mitarbeitern

Die zweite Hauptressource der Baustellenfertigung ist der Mitarbeiter. Im Unterschied zu den anderen Fertigungsprinzipien, die in der Regel die Kapazität des Betriebsmittels planen, betrachtet die Baustellenfertigung meist direkt die Ressource Mitarbeiter. Da die Mitarbeiterqualifikation bestimmt, welche Tätigkeiten ein Mitarbeiter ausüben kann, bietet es sich an, die Kapazitätsplanung für Qualifikationsgruppen (z. B. Schweißen, Rohrbau oder Konservierung) durchzuführen. Aufgrund der direkten Planung und Steuerung der Mitarbeiter und deren direktem Bezug zur Qualifikation resultiert für das Teilarbeitssystem Mitarbeiter eine große Flexibilität in den Einsatzmöglichkeiten.

Ergänzt wird diese Flexibilität durch die Ortsunabhängigkeit der Mitarbeiter, da sich diese auf beliebigen Baustellen einsetzen lassen. Hierbei sind jedoch Randbedingungen zu beachten:

- ☐ mögliche Blockaden durch andere Mitarbeiter (Arbeitsraumüberschneidungen),
- ☐ keine Störung der Arbeiten anderer Mitarbeiter (z. B. Verblitzen beim Schweißen) und
- ☐ Witterungs- und Temperaturbedingungen.

Die hohe Flexibilität bezüglich Arbeitsinhalt und Örtlichkeit macht das Teilarbeitssystem Mitarbeiter sehr flexibel einsetzbar, ist bei der Planung und Steuerung jedoch zu berücksichtigen. Für die Planung ist eine große Menge an Randbedingungen zu beachten und für die Steuerung sind nur Steuerungsentscheidungen innerhalb dieser Randbedingungen möglich.

Ergänzt werden die bisher beschriebenen Effekte durch die Tatsache, dass das Teilarbeitssystem Mitarbeiter nur schwer standardisiert abbildbar ist. So unterscheiden sich Mitarbeiter nicht nur in ihrer Qualifikation, sondern auch in ihrer Erfahrung, Arbeitsgeschwindigkeit und zeitlichen Flexibilität.

Um die Pläneinhaltung in der Fertigungssteuerung unterstützen zu können, ist es notwendig, die Arbeitsabläufe der Mitarbeiter bezüglich Dauer und Termin detailliert zu beschreiben.

In anderen Fertigungsprinzipien nutzt man das Durchlaufdiagramm, um die logistischen Abläufe am Arbeitssystem systematisch zu beschreiben. Für das Teilarbeitssystem Mitarbeiter im Baustellenprinzip fehlt diese Systematisierung bisher. Auch besteht bisher kein Ansatz, eine solche Modellierung mit einer passenden Modellierung für die Flächenbeschreibung zu verknüpfen.

Um *Verfahren der Fertigungssteuerung* auch auf Baustellen einsetzen zu können, ist es daher notwendig, einerseits das Teilarbeitssystem Mitarbeiter mit Hilfe von Durchlaufdiagrammen zu modellieren. Andererseits ist eine äquivalente Modellierung für das Teilarbeitssystem Fläche zu entwickeln (vgl. 2.3.1). Anschließend sind diese Modellierungen miteinander zu verknüpfen, sodass sich das Gesamtarbeitssystem abbilden lässt.

Eine Differenzierung zwischen Baubetrieb und Schiffbau ist an dieser Stelle nicht notwendig. Zwar unterscheidet sich die Qualifikation der Mitarbeiter zwischen den Branchen. Dies hat jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Fertigungssteuerung.

2.3.3 Eigenschaften der Transportressourcen

Neben den vorgestellten Hauptressourcen haben Transportressourcen auf den Produktionsablauf einen großen Einfluss. Für Baustellen seien hier Transportwege, Schwerlastzüge und Baufahrzeuge sowie Kräne genannt [Fl97, S. 68 ff.]. Für den Schiffbau sind hier ebenfalls Krananlagen (meist Portalkräne) und Schwerlasttransporter zu nennen (vgl. Abbildung 2.6). Schwerlasttransporte (Abbildung 2.6b) übernehmen hierbei den Transport zwischen den Baustellen. Krananlagen lagern Blöcke in die Baustellen ein und aus und drehen die Blöcke in die gewünschte Position.

Schwerlasttransporte sind notwendig, um einen Block von einer Baustelle auf die folgende zu transportieren, wenn beide Baustellen nicht über Kransysteme miteinander verbunden sind. Eine Verzögerung bei der Bereitstellung der Ressource führt somit zur Verzögerung des Produktionsablaufs. Jedoch sind diese Abläufe relativ gut planbar und führen meist nicht zu Engpässen.

Für die Ressource Kran ist die Situation jedoch kritischer. Einerseits werden Krananlagen für das Ein- und Auslagern der Blöcke benötigt. Hierbei nimmt vor allem das Drehen der Blöcke viel Zeit in Anspruch und ist bei der Modellierung der Vorgänge auf der Fläche abzubilden. Andererseits sind die Krananlagen auch für das Bereitstellen von Material auf den Baustellen bzw. den Blöcken zuständig. Ein Modell, das Abläufe auf Baustellen simuliert, muss somit diese Kranoperationen abbilden können.



(a) Krananlage Meyer Werft [FK14]



(b) Schwerlasttransporter von Kamag [Kam14]

12435

Abbildung 2.6: Transportressourcen im Schiffbau

Mit den dargestellten Betrachtungen ist die Beschreibung der Baustelle in der Unikatfertigung abgeschlossen. Die folgenden Abschnitte beschreiben, wie Stell-, Regel- und Zielgrößen in klassischen Arbeitssystemen modelliert werden. Zusammen mit den Betrachtungen zum Aufbau des Baustellenprinzips bildet dies die Voraussetzung für die Übertragung der Größen in das Arbeitssystem Baustelle.

2.4 Modellierung der logistischen Zielgrößen

Die Modellierung der logistischen Zielgrößen ist die Grundlage einer systematischen Beschreibung der Produktionsabläufe und ist somit die Voraussetzung für eine zielgerichtete Beeinflussung der Fertigungssteuerung. Wiendahl unterteilt die Zielgrößen nach ihrem Einfluss auf die Leistung und die Kosten (Abbildung 2.7).

Für die Fertigungssteuerung von Montageabläufen auf Baustellen fehlt diese Modellierung bisher. Zwar beschreibt Nickel die Modellierung der Materialbereitstellung für die Montage [Nic08, S. 83 ff.] und Schmidt die Modellierung logistischer Prozesse in der Montage [Sch10, S. 35 ff.]. Beide Arbeiten betrachten jedoch nicht Montageabläufe auf Montageflächen, wie sie im Schiffbau und Baubetrieb typisch sind. Die folgenden Abschnitte stellen deshalb die bestehenden Definitionen der logistischen Zielgrößen vor, um so die Basis für ihre Übertragung in die Baustellenfertigung zu schaffen. Außerdem werden die bestehenden Defizite herausgearbeitet.

		Logistikleistung	Logistikkosten
extern	Auftragsfertigung Lieferzeit Lieferterminabweichung Liefertreue		Preis
	Lagerfertigung Servicegrad		
intern	Durchlaufzeit		Bestand
	Terminabweichung		Auslastung
	Terminstreue		Verzugskosten

IFA 10.650

Abbildung 2.7: Zielgrößen der Logistikleistung und Logistikkosten [Löd08, S. 19]

2.4.1 Trichterformel

Little definierte bereits 1961 das Verhalten von Warteschlangen als das Verhältnis von mittlerem Bestand zu mittlerer Ankunftsrate und mittlerer Verweildauer eines Teils an einem System [Lit61]. *Little's Law* formuliert lediglich Bedingungen bezüglich des Systemverhaltens, schränkt jedoch nicht die Art des Systems ein.

$$L = \lambda W$$

(2.1)

- mit
- L

1/λ

W
- durchschnittliche Anzahl von Teilen in der Warteschlange [Stk]

durchschnittliche Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilen [Std]

durchschnittliche Verweildauer eines Teils [Std]

Im deutschsprachigen Raum beschreibt die Trichterformel ebenso wie *Little's Law* die Zusammenhänge in einem System. Hier wird das Verhältnis zwischen der mittleren Reichweite sowie mittlerem Bestand und mittlerer Leistung gebildet.

$$R_m = \frac{B_m}{L_m}$$

(2.2)

- mit
- R_m

B_m

L_m
- mittlere Reichweite [BKT]

mittlerer Bestand [Std]

mittlere Leistung [Std/BKT]

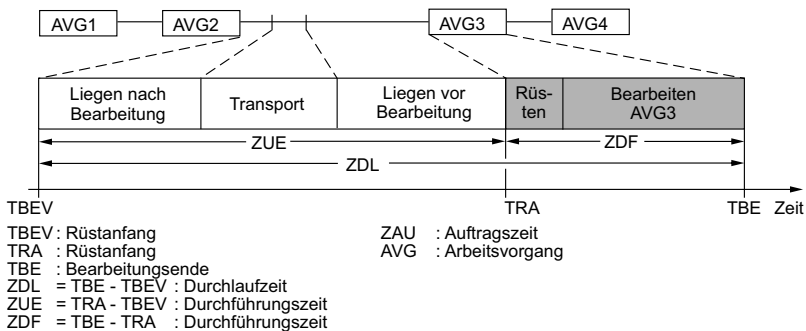
Auch hier bestehen grundsätzlich keine Einschränkungen bezüglich der Art des Arbeitssystems. Um die Trichterformel auf Baustellen anwenden zu können, ist es somit nur nötig, die drei Größen Bestand, Leistung sowie Reichweite für die Baustelle zu definieren.

Alle bestandsregelnden Auftragsfreigabeverfahren nutzen diesen Zusammenhang aus, um die Reichweite (und damit die Durchlaufzeit) der Fertigung über die Regelung des Bestands zu

steuern [Bec80, S. 36 ff.]. Derartige Freigabeverfahren sind in der Baustellenfertigung bislang unüblich; häufig wird nicht einmal die Durchlaufzeit von Aufträgen gemessen. Dies ist mit Hilfe des Durchlaufelements möglich.

2.4.2 Durchlaufelement

Das von Heinemeyer eingeführte Durchlaufelement beschreibt, aus welchen Zeitanteilen sich die Bearbeitung eines Auftrags zusammensetzt [Hei74, S. 4]. Dieser Durchlauf ist unterteilt in die Übergangszeit und die Durchführungszeit. In der Übergangszeit wartet der Auftrag auf seine Bearbeitung. Dieser Zeitanteil ist somit stark abhängig vom Bestand am Arbeitssystem. Die Durchführungszeit definiert den Zeitanteil, in dem Rüsten und Bearbeitung stattfinden [Nyh12, S. 22 f.].



© IFA D1878Nyp

Abbildung 2.8: Durchlaufzeitanteile von Losen [Nyh12, S. 22, Bildteil b]

Für die Baustelle ist diese Beschreibung nicht direkt übertragbar, da sich die Definition des Arbeitssystems in der Baustellenfertigung von Heinemeyers Ansatz unterscheidet. So liegen auf einer Baustelle mehrere Blöcke eines Schiffes und sind zu bearbeiten. Außerdem sind die Blöcke häufig so groß, dass an mehreren Stellen gleichzeitig gearbeitet werden kann. Es liegt somit eine Parallelisierung innerhalb der Baustelle und innerhalb der Blöcke vor. Aufgrund der Verschiedenheit der Arbeiten, sowohl in Bezug auf die Dauer und den Ressourcenbedarf als auch in Bezug auf die Tätigkeiten, ist die Zusammenfassung nicht sinnvoll. Hierdurch ginge jegliche Transparenz bei der Beurteilung verloren.

Des Weiteren sind die Zeitanteile für den Übergang (Übergangszeiten) deutlich umfangreicher und weichen in ihrer Abfolge und ihren Eigenschaften von Heinemeyers Definitionen ab. Dies führt dazu, dass sich Zugang und Abgang nicht in gleicher Weise definieren lassen wie in den klassischen Arbeitssystemen.

2.4.3 Bestand

Der Bestand als Zielgröße stellt die PPS vor ein Dilemma. Einerseits strebt sie möglichst niedrige Bestände an, da dies eine Vielzahl an Vorteilen hat [Löd08, S. 32 f.]:

- Reduktion der Kapitalbindungskosten,
- Reduktion der Zinskosten aus Kapitalbindung sowie
- geringerer Platzbedarf in der Fertigung.

Andererseits bedeuten niedrige Bestände die Gefahr von Auslastungsverlusten am Arbeitssystem. Die Positionierung innerhalb dieses Dilemmas bezeichnet man als logistische Positionierung und ist eine vielfach untersuchte Fragestellung [Nyh12, Wie97, Sch08].

Für die Steuerung der Abläufe auf Baustellen steht die PPS vor der Herausforderung, den Bestand zunächst systematisch zu definieren. Lödding unterscheidet hier den Lager- und Fertigungsbestand [Löd08, S. 32], wobei vor allem der Fertigungsbestand für die Baustelle zunächst wichtig ist.

In klassischen Arbeitssystembetrachtungen bildet sich dieser aus den Aufträgen, die bereits freigegeben, aber noch nicht fertiggestellt sind. Häufig wird in diesem Zusammenhang von den Aufträgen der Warteschlange gesprochen. Hier besteht das Problem für die Modellierung einer Baustelle, da sich vor dieser meist keine physischen Warteschlangen bilden. Begründet liegt dies in der Größe der Objekte und dem üblicherweise bestehenden Platzmangel.

Ein weiteres Problem entsteht daraus, dass Montageflächen sowohl die Funktion einer Montage- als auch einer Lagerfläche übernehmen. Wie in diesem Fall mit dem Bestand umzugehen ist, ist bisher unklar.

Ein weiterer, bisher nicht detailliert abgebildeter Aspekt ist der Mitarbeiter auf der Baustelle. Dieser ist, im Unterschied zu klassischen Arbeitssystemen, deutlich flexibler in Bezug auf die auszuführenden Arbeitsinhalte. Außerdem ist der Mitarbeiter nicht örtlich gebunden. Somit ist auch hier wiederum die Bestimmung einer physischen Warteschlange schwierig. Speziell für die Baustellenfertigung resultiert hieraus auch das Problem intransparenter Produktionsabläufe: Es ist schwierig nachzuvollziehen, welche Aufträge abgearbeitet und welche noch zu bearbeiten sind. Somit ist nicht nur die Bestandsdefinition ein Problem, sondern auch die Bestandsmessung.

2.4.4 Durchlaufdiagramm

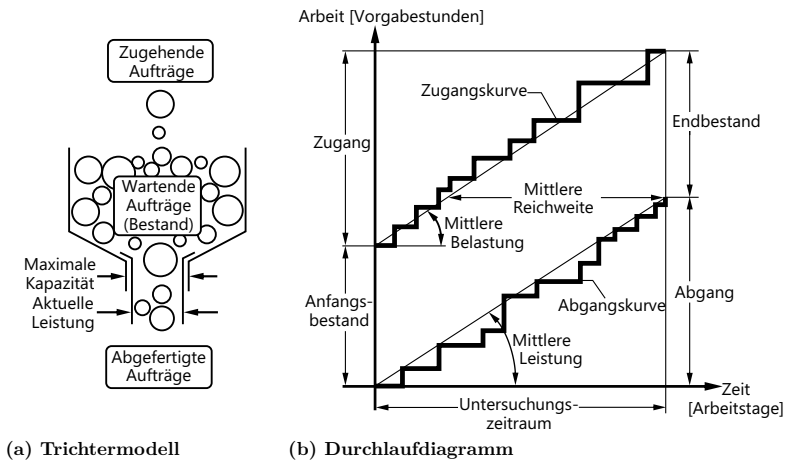
Ziel des Durchlaufdiagramms ist es, den Produktionsablauf am Arbeitssystem zu visualisieren [Wie97, S. 79] und so der Analyse zugänglich zu machen (vgl. Abbildung 2.9). Dies gelingt, indem sowohl der Zugang als auch der Abgang kumuliert über der Zeit aufgetragen werden. Damit stellt sich die Frage, wie der Zugangs- und Abgangszeitpunkt in der Baustellenfertigung zu definieren sind. Ohne diese Definitionen ist es nicht möglich, ein Durchlaufdiagramm für die Baustelle zu erzeugen.

Da das Arbeitssystem Baustelle große Arbeitsumfänge mit einer Vielzahl an Mitarbeitern realisiert, wird ein nur baustellenbezogenes Durchlaufdiagramm nicht ausreichen, um präzise Aussagen über das Arbeitssystem zu treffen. Somit reicht es nicht, Zugang und Abgang lediglich an den Baustellengrenzen zu messen.

Stattdessen ist es nötig, sowohl eine aggregierte als auch eine detaillierte Messung zu entwickeln. Auf Basis welcher Bestandteile die detaillierte Messung zu erfolgen hat, ist unklar. Ebenso ist es unklar, wie die detaillierte Messung aggregiert werden kann.

Für ein Baustellendurchlaufdiagramm fehlen somit sowohl grundlegende Definitionen als auch Methoden zur Handhabung der Informationen, sowohl für das Durchlaufdiagramm selbst als auch für die Aggregation mehrerer Durchlaufdiagramme zu einem Gesamtanalysewerkzeug für die Baustelle.

Mit der Betrachtung des Durchlaufdiagramms ist die Analyse der klassischen Modellierung von Arbeitssystemen abgeschlossen. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Produktionsplanung



© IFA C0476

Abbildung 2.9: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm [Wie97, S. 84]

(Abschnitt 2.5) und die Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung und arbeiten die jeweils bestehenden Defizite heraus.

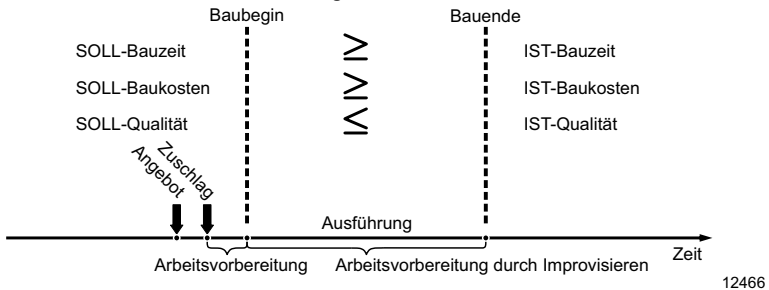
2.5 Produktionsplanung in der Unikatfertigung

Die Entwicklung von Planungssystemen für die Unikatfertigung im Allgemeinen [Ber93, Hof07, Tu11] und dem Schiffbau im Speziellen [Tu95, Cho98, Wan09] ist schon seit Langem Gegenstand wissenschaftlicher und industrieller Forschung und Entwicklung. Aufgrund der Komplexität der Abläufe und Produkte entsteht eine Vielzahl an Werkzeugen und Methoden. Jedoch betont schon Wortmann, dass komplizierte Entscheidungswerkzeuge hier nicht zielführend sind [Wor92, S. 83].

Die Modellierung des Arbeitssystems Baustelle mit seinen Besonderheiten steht in der Literatur nicht im Vordergrund. Diese Modellierung ist jedoch notwendig, um zu einer systematischen Beschreibung zu gelangen und so die Wirkzusammenhänge zwischen den beeinflussbaren Stellgrößen und den logistischen Zielgrößen herzustellen.

Der Baubetrieb steht aufgrund der Ähnlichkeit der Arbeitssysteme vor ähnlichen Problemen. Grundlegende Betrachtungen zur Bauablaufplanung findet man in [Fle97, S. 4]. Detailliert gehen Hofstadler sowie Bertrand & Muntslag auf Planungsverfahren ein [Hof07, Ber08]. Hervorzuheben ist hier das Dilemma der Arbeitsvorbereitung [Hof07, S. 37], das in selber Weise auch für den Schiffbau besteht (Abbildung 2.10):

Die Arbeitsvorbereitung soll einen Planungsstand erreichen, der sicherstellt, dass Ist-Bauzeit < Soll-Bauzeit, Ist-Baukosten < Soll-Baukosten sowie Ist-Qualität > Soll-Qualität ist. Hierfür wird

Welche Ziele sind in der Arbeitsvorbereitung anzustreben?**Abbildung 2.10:** Dilemma der Arbeitsvorbereitung nach [Hof07, S. 37]

jedoch nur ein Bruchteil der Projektzeit und der Projektressourcen zur Verfügung gestellt, obwohl bekannt ist, dass mit diesem Vorgehen nur eine sehr grobe Planung möglich ist.

Dieses ist typisch für die Produktion von Unikaten wie Gebäuden, Anlagen oder Schiffen. Trotz des großen Umfangs an Aufträgen und Auftragszeiten sowie einer Vielzahl an zu koordinierenden ausführenden Stellen wird die Planung möglichst grob ausgeführt. Dieses Vorgehen ist prinzipiell richtig [Fle97, S. 31], jedoch ist es üblich, aufgrund der Unsicherheit und des großen Aufwands eine detailliertere Planung häufig ganz zu vermeiden. Hier vergeben die Unikatfertiger viel Potenzial für eine effiziente Gestaltung von Produktionsabläufen.

Aufgrund der starken Parallelisierung aller Engineering- und Produktionsprozesse (vgl. Abbildung 2.3) müssen Unikatfertiger bereits sehr früh Aussagen über Produktionsabläufe treffen. Diese Planungen sind häufig trotz des bestehenden Informationsdefizits auszuführen und stellen die Planer vor Probleme. Aus diesem Grund erfolgt die Planung häufig in mehreren Schritten.

Im Verlauf dieser Zeit entstehen so unterschiedliche Detaillierungsgrade. Für die frühen Phasen verwendet der Schiffbau, ebenso wie die Baubranche [Fle97, S. 37 f.], Netzpläne. Diese Planungsform bildet auch für die späteren detaillierten Planungsstufen den Rahmen des Vorgehens. Ihre Eignung für die Grob- und Feinplanung im Baubetrieb ist bereits mehrfach diskutiert worden [Drä94, S. 37][Ber08]. Schwierig an ihr ist, dass sie nur bedingt in der Lage ist, die Flexibilität in der Abarbeitung von Aufträgen auf Baustellen abzubilden. Ihre starre Struktur erschwert das Zerlegen in Unteraufgaben. Randbedingungen, die hierdurch implizit formuliert werden, können vor allem bei Änderungen verloren gehen. Weitere typische Planungsmethoden sind:

- ☐ Listen,
- ☐ Balkenpläne und
- ☐ Zeit-Weg-Diagramme.

Eine gut nachvollziehbare Beurteilung dieser Planungsansätze geben Berner et al. [Ber08, S. 28]. Die Autoren stellen heraus, dass vor allem die Balkenplan-Technik gut geeignet ist, um detaillierte Pläne zu erzeugen. Jedoch stößt auch diese Technik bei umfangreicher Detaillierung an ihre Grenzen. Gegenstand der aktuellen Forschung sind simulationsbasierte Werkzeuge wie der constraintbasierte Ansatz. Sowohl im Baubetrieb [Bei07][Bor11, S. 178 f.] als auch im Schiffbau [Kön07] konnte die prinzipielle Eignung des Ansatzes erfolgreich nachgewiesen werden.

Ziel der Planung muss es einerseits sein, den Detaillierungsgrad bei verringertem Planungsaufwand zu steigern sowie den Aufwand für Planänderungen zu reduzieren. Andererseits braucht die Planung Methoden und Werkzeuge, um den Detaillierungsgrad stetig nachzuvollziehen und an die gegebene Informationslage und den Bedarf anzupassen.

2.6 Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung

Entsprechend dem *Modell der Fertigungssteuerung* ist die Fertigungssteuerung in die drei Aufgaben Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung zu unterteilen (vgl. Abbildung 2.2). Die folgenden Absätze widmen sich der Beschreibung von Defiziten, die bei der Umsetzung dieser Aufgaben in der Unikatfertigung auftreten. Vorab werden die Besonderheiten in der Auftragsabwicklung von Unikatfertigern zusammengetragen.

Ein grundlegendes Merkmalschema für die Beschreibung der Auftragsabwicklung bietet Schuh an (Abbildung 2.11). Bewertet man die verschiedenen Einzelaspekte nach diesem Schema, ergibt sich das folgende Bild: Die Auftragsauslösung erfolgt in der Unikatfertigung nur auf Bestellung und typischerweise in Form von Einzelaufträgen. Das Erzeugnisspektrum ist beschränkt auf Produkte nach Kundenspezifikationen und die Erzeugnisstruktur ist komplex bei mehrteiligen Erzeugnissen. Die Ermittlung des Erzeugnis- und Komponentenbedarfs erfolgt bedarfsorientiert, der Sekundärbedarf wird auftragsorientiert aufgelöst und zu einem großen Teil fremdbezogen. Die Bevorratung erfolgt typischerweise nicht. Bedarfspositionen werden auftragsbezogen beschafft und zu einem geringeren Teil auf den unteren Strukturebenen bevorratet (Normteile und Halbzeuge). Die Fertigungsart ist die Einmal- oder Unikatfertigung, die Teilefertigung erfolgt meist in Form

Merkmale zur Beschreibung von Auftragsabwicklungsstrukturen	Initialmerkmal	Auftragsauslösungsart
	Erzeugnismerkmale	Erzeugnisspektrum
		Erzeugnisstruktur
	Dispositionsmerkmale	Ermittlung des Erzeugnis-/Komponentenbedarfs
		Auslösung des Sekundärbedarfs
		Beschaffungsart
		Bevorratung
	Fertigungsmerkmale	Fertigungsart
		Ablaufart in der Teilefertigung
		Ablaufart in der Montage
		Fertigungsstruktur
		Kundenänderungseinflüsse während der Fertigung

12467

Abbildung 2.11: Merkmalsstrukturen der Auftragsabwicklung [Sch06, S. 121]

der Fließ- oder Werkstattfertigung und die Ablaufart der Montage ist die Baustellenmontage. Der Kundeneinfluss ist groß, da der Kunde auf die Produktstruktur großen Einfluss nehmen kann. Der Schiffbau ist somit in die Gruppe der Auftragsfertiger einzuordnen [Sch06, S. 137].

Für die Werft ergibt sich hieraus die Notwendigkeit, die Steuerung der Eigen- und Fremdfertigung an diesen Gegebenheiten auszurichten. Da hierbei einerseits logistische und andererseits geometrische und technologische Randbedingungen zu beachten sind, steht die Steuerung vor einem mehrdimensionalen Entscheidungsproblem. Hierbei ist zu beachten, dass Planänderungen aufgrund von Störungen oder durch Änderungswünsche des Kunden häufig vorkommen. Die Steuerung muss somit fähig sein, diese Änderungen sichtbar zu machen und auszugleichen.

Die Abläufe am Arbeitssystem sind somit durch Stellgrößen zu steuern und werden ihrerseits von Störungen beeinflusst. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Stell-, Stör- und Regelgrößen am Arbeitssystem entsteht der Charakter eines Regelkreises. Versuche, das zu steuernde Arbeitssystem deshalb mit einem Regelkreis nachzubilden, bestehen sowohl in der Baustellenmontage [Hof07, S. 432 ff.][Bor11, S. 161] als auch für klassische Arbeitssysteme in der Werkstattfertigung [Pet96]. Letztgenannte sind jedoch deutlich weiter entwickelt, als dies in der Baustellenmontage der Fall ist. Grund hierfür ist einerseits das Fehlen einer systematischen Modellierung der Abläufe auf der Baustelle und andererseits die Komplexität des Arbeitssystems. Die folgenden Absätze gehen auf die zu Beginn genannten Aufgaben der Steuerung ein.

2.6.1 Auftragsfreigabe

Stand der Wissenschaft

Nach Lödding bestimmt die Auftragsfreigabe den Zeitpunkt, „ab dem die Fertigung einen Auftrag bearbeiten darf. Sie löst in der Regel direkt die Bereitstellung des erforderlichen Materials aus.“ [Löd08, S. 297]. Für die Baustellenfertigung bedeutet dies, dass Blöcke, ihre Vorstufen und Material für die nächsten Montageschritte auf dem Bauplatz bereitzustellen sind.

Da die Wissenschaft eine Vielzahl an Verfahren zur Steuerung dieses Zeitpunkts kennt, ist eine Klassifizierung der Verfahren sinnvoll. Lödding schlägt hierfür drei Merkmale vor: das *Kriterium* der Auftragsfreigabe, den *Detaillierungsgrad* sowie die *Auslösungslogik*. Das Kriterium legt das Merkmal fest, nach dem über die Freigabe entschieden wird. Lödding definiert hier vier mögliche Kriterien:

- ☐ kein Kriterium,
- ☐ den Plan-Starttermin,
- ☐ den Bestand der Fertigung bzw. des Arbeitssystems sowie
- ☐ die Belastung des Arbeitssystems.

Mit dem Merkmal *Detaillierungsgrad* beschreibt Lödding, ob ein Auftrag als Ganzes oder in Teilen freigegeben wird [Löd08, S. 306]. Der Detaillierungsgrad beeinflusst somit den Steuerungsaufwand und die Einflussmöglichkeiten auf Aufträge. Während ein niedriger Detaillierungsgrad einfach zu realisieren ist, jedoch die Einflussmöglichkeiten auf Aufträge eingeschränkt sind, ist ein hoher Detaillierungsgrad aufwendiger zu realisieren, dafür sind die Aufträge direkter zu beeinflussen. Lödding beschreibt diese Eigenschaften anhand der zentralen und dezentralen Bestandsregelung.

Das dritte Merkmal bestimmt die *Auslösungslogik*. Die *Auslösungslogik* legt fest, ob Aufträge periodisch oder ereignisorientiert freigegeben werden [Löd08, S. 309]. Anhand dieser drei Merkmale untersucht der folgende Abschnitt das Vorgehen in der Praxis.

Vorgehen in der Praxis

Für die Auftragsfreigabe in der Unikatfertigung ist es üblich, den Plan-Termin als Kriterium zu verwenden. Der Schiffbau nutzt Netzpläne, um diese Termine zu ermitteln. Hier besteht somit zunächst kein Hindernis, Verfahren, die auf diesem Merkmal aufsetzen, anzuwenden.

Häufig verwendet die Praxis jedoch eine sehr grobe Detaillierung und dazu Aufträge mit sehr hohen Arbeitsinhalten. Meister und Vorarbeiter teilen diese, meist in einer manuellen Planung, auf mehrere kleinere Teilaufträge auf. Um den nächsten freizugebenden Auftrag zu bestimmen, nutzen sie folgende Kriterien:

- ☐ Materialverfügbarkeit,
- ☐ Mitarbeiterverfügbarkeit,
- ☐ Mitarbeiterqualifikation bzw. -befähigung sowie
- ☐ geometrische und sonstige Zwangsbedingungen.

Von einer klassischen Freigabe nach Termin kann man somit nicht sprechen, da die Freigabeentscheidung von Meister und Vorarbeiter lokal getroffen wird. Der Steuerung fehlt somit einerseits das Wissen, um eine detailliertere Freigabe zu gestalten. Andererseits erhält sie kaum Rückmeldung über den Fertigungsfortschritt. Die Steuerung erfolgt somit nicht klar definiert und meist manuell.

Der Detaillierungsgrad in der Praxis wurde bereits angesprochen. Die Steuerung gestaltet ihn typischerweise grob und die operative Ebene erhöht ihn anschließend. Aus Steuerungssicht sind die Arbeitspakete deshalb deutlich inhomogener als in der Serien- oder Werkstattfertigung. Ursprung dieses Vorgehens ist ein Informationsdefizit der Planung. Über das Wissen, wie der Detaillierungsgrad zu erhöhen ist, verfügt nur die operativen Ebene.

Als *Auslösungslogik* verwendet der Schiffbau sowohl die periodische als auch die ereignisorientierte Freigabe. Üblicherweise kommt die periodische Freigabe zum Einsatz. Treten jedoch besondere Ereignisse wie beispielsweise Störungen auf, werden die Freigabeentscheidungen ereignisorientiert durchgeführt.

Hindernisse für die systematische Auftragsfreigabe

Aus dem beschriebenen Vorgehen in der Praxis lassen sich mehrere Hindernisse für die Anwendung einer systematischen Auftragsfreigabe ableiten. An erster Stelle steht hier das Vorgehen zur Detaillierung der Aufträge. Der Informationsmangel bei den steuernden Stellen verhindert bisher die freie Wahl einer Detaillierung durch die Steuerung. Deshalb ist es nicht möglich, homogene Auftragszeiten zu realisieren.

Da der Detaillierungsgrad sich nicht erhöhen lässt und es an zuverlässigen Rückmeldeinformationen aus der Produktion fehlt, ist bisher keine Bestandsregelung für die Bauplatzfertigung etabliert. Es ist bisher auch nicht gelungen, bestandsregelnde Verfahren der Auftragsfreigabe zu evaluieren. Ihren Nutzen beurteilt die Praxis deshalb skeptisch.

Ein geringer Detaillierungsgrad und mangelhafte Rückmeldungen über den Produktionsfortschritt erzeugen einen Teufelskreis des Informationsmangels zwischen der operativen Ebene und Steuerung. Die Steuerung plant grob, die operative Ebene detailliert, meldet das Vorgehen aber nicht zurück. Die Nachteile des geringen Detaillierungsgrads sind den Unternehmen kaum bewusst und die operative Ebene arrangiert sich mit den Unzulänglichkeiten. Für Folgeprojekte ist die operative Ebene deshalb daran interessiert, möglichst viel Gestaltungsspielraum zu erhalten und versucht, wieder möglichst grobe Auftragspakete zu erhalten, was den Teufelskreis schließt.

Aufgrund der Hindernisse sind die folgenden Defizite abzuleiten:

- Informationen fließen meist nur auf der operativen Ebene und fehlen somit in der Produktionsplanung.
- Freigabeentscheidungen fallen auf der operativen Ebene und lassen sich nicht unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zielkriterien treffen.
- Der große Arbeitsinhalt der Aufträge verhindert die Einflussnahme der Steuerung bzw. verzögert diese.

Die Voraussetzung für eine systematische Auftragsfreigabe in der Baustellenfertigung ist die Beseitigung der beschriebenen Defizite. Der folgende Abschnitt bestimmt die notwendigen Voraussetzungen für die Realisierung einer systematischen Kapazitätssteuerung.

2.6.2 Kapazitätssteuerung

Die Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es, die bestehenden Kapazitäten im Rahmen ihrer Flexibilität auf den bestehenden Bedarf anzupassen. Hierdurch ist es der Fertigungssteuerung möglich, Plan-Abweichungen auszugleichen.

Stand der Wissenschaft

Auch die Kapazitätssteuerung klassifiziert Lödding nach den drei Merkmalen *Kriterium*, *Detaillierungsgrad* sowie *Auslösungslogik* [Löd08, S. 462 ff.]. Das Kriterium definiert, anhand welchen Merkmals ein Unternehmen über eine Anpassung der Kapazität entscheidet. Lödding nennt hier als mögliche Kriterien die Merkmale *Erfüllung des Kundenbedarfs*, *Lagerbestand*, *Rückstand*, *Abweichung von der Plan-Kapazität*, *voraussichtliche Terminabweichung von Aufträgen*, *Bestand vor oder nach einem Arbeitssystem* sowie *aktive und passive Blockaden*. Abhängig vom anwendbaren Kriterium bieten sich verschieden Kapazitätssteuerungsverfahren an. Tabelle 2.1 verknüpft die verschiedenen Kriterien und Kapazitätssteuerungsverfahren.

Der Detaillierungsgrad beschreibt, wie die Kapazitätssteuerung aufgelöst wird: gültig für die gesamte Fertigung oder für ein Arbeitssystem. Hierbei ist zu beachten, dass das Kriterium und der Detaillierungsgrad miteinander verknüpft sind. Tabelle 2.1 stellt diese Beziehung dar.

Das dritte und letzte Merkmal ist die *Auslösungslogik*. Lödding unterscheidet hier wieder nach einem periodischen oder ereignisorientierten Vorgehen. Die periodische Kapazitätssteuerung führt Anpassungen nach zuvor festgelegten Intervallen durch, hat jedoch den Nachteil, verspätet auf veränderte Kapazitätsbedarfe zu reagieren. Demgegenüber reagiert die ereignisorientierte Kapazitätssteuerung früher auf Änderungen des Kapazitätsbedarfs, weil sie zu definierten Ereignissen die

Tabelle 2.1: Verknüpfung von Kapazitätssteuerungsverfahren mit Kriterium und Detaillierungsgrad nach Lödding

Kriterium	Kapazitätssteuerungsverfahren	Detaillierung
Rückstand	Rückstandsregelung	fein/ grob
Abweichung von der Plan-Kapazität	Planorientierte Kapazitätssteuerung	fein
Voraussichtliche Terminabweichung	Terminorientierte Kapazitätssteuerung	fein
abhängig vom Engpassstatus des Arbeitssystems	Leistungsmaximierende Kapazitätssteuerung	fein
Lagerbestand	Bestandsregelnde Kapazitätssteuerung	grob

Anpassung vornimmt. Lödöding schlägt eine Kombination von periodischer und ereignisorientierter Kapazitätssteuerung vor.

Vorgehen in der Praxis

Der Schiffbau und damit die Baustellen als Arbeitssystem der Werft orientieren sich am Kundewunschtermin. Für die Kapazitätssteuerung sind hieraus jedoch kaum Kriterien abzuleiten: Dies liegt vor allem an zwei Faktoren. Faktor eins ist die Produktionsdauer. Diese ist lang, weshalb sich hieraus zunächst nur grobe Terminaussagen abzuleiten sind. Die Kapazitätssteuerung muss jedoch kurzfristig reagieren. Faktor zwei ist die geringe Anzahl der Meilensteine, die mit dem Kunden vereinbart werden. Es ist üblich, lediglich die drei folgenden Termine festzulegen:

- ☐ Brennstart: Zu diesem Zeitpunkt werden die ersten Bleche für das Schiff gefertigt,
- ☐ Einbautermin der Hauptmaschine,
- ☐ Liefertermin.

Zwischen diesen Meilensteinen kann die Werft die Kapazitäten und den Arbeitsfortschritt frei gestalten. Es ist ersichtlich, dass sich aus den Kundenvorgaben nur indirekt ein Kriterium zur Kapazitätssteuerung ableiten lässt. Hierfür ist es notwendig, die Arbeitsinhalte zur Realisierung der drei Meilensteine genau zu kennen und ihre Fertigstellung genau nachzuvollziehen.

Dies bedeutet jedoch, dass ein detailliertes Verständnis über die Arbeitsinhalte sowie den Arbeitsfortschritt notwendig ist, damit die verschiedenen Arbeitssysteme der Werft sich direkt beeinflussen lassen. Der geringe Detaillierungsgrad der Planung, die mangelhafte Rückmeldung des Arbeitsfortschritts auf den Baustellen sowie die Herausforderung, die Kapazitäten zielgerichtet beeinflussen zu müssen, verhindern jedoch den Einsatz einer systematischen und tagesgenauen Kapazitätssteuerung.

Einige Werften verwenden die Simulation, um detaillierte Plan-Termine zu bestimmen oder um die Auswirkungen von Rückständen beurteilen zu können [Ste11]. Hieraus leiten sie anschließend Bedarfe für Kapazitätsanpassungen ab. Dieses Vorgehen ist eine Verbesserung zum typischen Vorgehen der Werften.

Bisher verhindern der geringe Detaillierungsgrad der Planung, die mangelhafte Rückmeldung des Produktionsfortschritts und die Steuerung der Aufträge auf operativer Ebene eine zielgerichtete Kapazitätssteuerung in der Baustellenfertigung. Der folgende Abschnitt beschreibt die hieraus abgeleiteten Defizite, die eine zielgerichtete Kapazitätssteuerung in der Baustellenfertigung verhindern.

Defizite der aktuellen Praxis

Werften sind typischerweise nur begrenzt in der Lage, den Arbeitsfortschritt zu beurteilen und damit den Rückstand zu messen. Für die Anwendung der Kapazitätssteuerung ergeben sich hieraus die folgenden Nachteile:

- ☐ Rückstände lassen sich nur auf der operativen Ebene und meist erst spät bestimmen.
- ☐ Kapazitätsanpassungen müssen in einem größeren Umfang realisiert werden, um Rückstände aufzuarbeiten.
- ☐ Bedingt durch die notwendigen umfangreicheren Kapazitätsanpassungen ist es nötig, eine größere Kapazitätsflexibilität vorzuhalten.

- Viele Werften planen bei Rückständen Termine um, sodass sich der Plan-Abgang reduziert und die Rückstände sich scheinbar auflösen. Dies führt zu einem intransparenten Arbeitsfortschritt.

Als *Auslösungslogik* wird in der Baustellenfertigung eine Kombination von periodischem und ereignisorientiertem Vorgehen verwendet. Hier besteht somit kein Unterschied gegenüber der Werkstattfertigung. Jedoch ist man in der Baustellenfertigung bisher nicht in der Lage, diese Beurteilung tagesgenau durchzuführen. Begründet liegt dies einerseits im geringen Detaillierungsgrad der Planung und andererseits in der mangelhaften Rückmeldung. Ein weiterer Faktor ist die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Baustelle. Aufgrund dieser fällt es bei Steuerungsentscheidungen schwer, die Auswirkung einer Plan-Abweichung zu beurteilen. Die Werften setzen an dieser Stelle häufig nicht durch, dass auch kleinere Abweichungen direkt abzubauen sind.

2.6.3 Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung ist die dritte und somit letzte Aufgabe der Fertigungssteuerung [Löd08, S. 441 ff.]. Sie legt fest, welcher Auftrag in der Warteschlange als nächstes zu bearbeiten ist.

Stand der Wissenschaft

Die Reihenfolgebildung beeinflusst insbesondere die Termintreue (vgl. Abbildung 2.2, S. 7). Die Wissenschaft diskutiert diesen Einfluss umfangreich und untersucht eine Vielzahl unterschiedlicher Reihenfoleregeln. Den Effekt dieser Verfahren bewertet Lödding als zweifelhaft und schlägt stattdessen vor, das Augenmerk auf die Anwendung einer spezifischen, möglichst leicht durchzusetzenden Reihenfoleregeln zu legen. Hierfür wählt er die folgenden vier Reihenfoleregeln aus:

- First-in-First-out (FIFO),
- frühester Plan-Starttermin,
- frühester Plan-Endtermin und
- geringster Restschlupf.

Allgemein sei darauf hingewiesen, dass der Einfluss der Reihenfoleregeln mit der Länge der Warteschlange vor einem Arbeitssystem wächst. Das Arbeitssystem Baustelle weist eine Besonderheit in Bezug auf die Warteschlange gegenüber einem klassischen Arbeitssystem auf, weshalb dieser Punkt von besonderer Bedeutung ist. Diese Arbeit geht detailliert in Kapitel 3 auf diesen Sachverhalt ein.

Um den Einfluss der Reihenfoleregeln zu beurteilen, ist es nötig, ihren Einfluss auf die Termintreue zu messen. Kuyumcu schlägt hierfür die Zerlegung in die Bestandteile *Terminabweichung aus Rückstand* und *Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung* vor [Kuy13, S. 46 f.]. Lödding trifft außerdem die Aussage, dass es besser ist, eine willkürliche Reihenfolgebildung zu verhindern, als eine für ein spezifisches Zielkriterium optimale Regel zu finden [Löd08, S. 443 f.].

Die Vorteilhaftigkeit einer Reihenfoleregeln nach Termin erscheint aufgrund dieser Aussagen auch für die Baustellenfertigung als unstrittig. Daher wurde der Schwerpunkt der Simulation auf die Frage gerichtet, ob eine bestandsregelnde Auftragsfreigabe möglich und sinnvoll ist.

Vorgehen in der Praxis

Der Schiffbau verwendet typischerweise kein systematisches Vorgehen zur Reihenfolgeregelung. Zwar wird eine Plan-Reihenfolge für die Belegung der Baustellen festgelegt. Aufgrund des geringen Detaillierungsgrads der Planung liegen jedoch keine Reihenfolgen für die Aufträge innerhalb der Blöcke vor. Zusätzlich bestehen nur wenige Zwangsbedingungen, die die Einhaltung der bestehenden Reihenfolgen erzwingen.

So ist es typisch, dass Belegungsreihenfolgen auf den Baustellen verändert werden. Grund hierfür ist die lokale Optimierung durch Meister und Vorarbeiter. Hier fehlt es an Transparenz, sodass die Auswirkungen dieser Reihenfolgevertauschungen nur schwer zu beurteilen sind. Es fehlt somit der Anreiz, eine hohe Reihenfolgetreue durchzusetzen.

Neben diesen organisatorischen Aspekten ist eine weitere Besonderheit, dass Warteschlangen in der Baustellenfertigung kaum zu erkennen sind. Vor einer Baustelle sammeln sich üblicherweise keine Blöcke, da hierfür der Platz fehlt. Innerhalb eines Blocks wiederum sind die verschiedenen Aufträge so verteilt, dass es nicht zu einer lokalen Sammlung von Material kommt. Hier besteht somit ein deutlicher Unterschied gegenüber anderen Fertigungsprinzipien. In der Praxis fehlt es deshalb an Transparenz und die Plan-Reihenfolge ist nur schwer durchzusetzen.

Defizite der aktuellen Praxis

Für die Baustellenfertigung besteht zunächst das Defizit, dass Warteschlangen vor Baustellen meist nicht zu erkennen sind. Blöcke und Material sind über Lagerflächen und vorangehende Baustellen verteilt. Eine Reihenfolgebildung ist somit vor der Baustelle nicht in gleicher Weise möglich wie in der Werkstatt- oder Serienfertigung.

Betrachtet man die verfügbaren Aufträge innerhalb eines Blocks, lässt sich eine Warteschlange bestimmen. Diese verteilt sich jedoch über den gesamten Block und ist ebenfalls nicht sichtbar. Hieraus folgen, im Vergleich zur Werkstattfertigung, höhere Anforderungen an die Visualisierung der Warteschlange. Reihenfolgevertauschungen zu vermeiden, ist somit eine größere Herausforderung. Die Logik der Reihenfolgebildung, Aufträge unter logistischen Aspekten zu priorisieren, kann jedoch für die Baustellenfertigung übernommen werden.

Auswirkungen auf die Steuerung lassen sich gegenwärtig kaum beurteilen, da bisher keine Modelle für die Reihenfolgebildung in der Baustellenfertigung bestehen. Es fehlt somit sowohl eine theoretische Modellierung als auch eine Simulationsumgebung, um die Zusammenhänge systematisch zu untersuchen.

2.6.4 Zusammenfassung

Die Analyse der Aufgaben der Fertigungssteuerung zeigt zwei Hauptprobleme bei der Etablierung der *Verfahren der Fertigungssteuerung* auf. Einerseits ist der Planungsstand in der Unikatfertigung nicht hinreichend detailliert für eine präzise Steuerung. Andererseits bestehen deutliche Defizite bei der Erfassung der logistischen Stell-, Regel- und Zielgrößen. Aus diesem Grund gehen die folgenden Absätze auf die Modellierung dieser Größen in klassischen Arbeitssystemen ein. Dies bildet die Voraussetzung für deren Übertragung in das Arbeitssystem Baustelle.

Das folgende Kapitel 3 stellt die notwendigen Anpassungen an den beschriebenen Modellierungen der logistischen Stell-, Regel- und Zielgrößen vor und überträgt so die theoretischen Grundlagen in die Baustellenfertigung.

3 Grundlagen der Modellierung

Lödning führt mit dem *Modell der Fertigungssteuerung* ein systematisches Modell für die Fertigungssteuerung von Werkstattfertigungen ein [Löd08, S. 7]. Ziel der Fertigungssteuerung ist es, ein Arbeitssystem bzw. eine Fertigung oder eine Montage über Stellgrößen so zu beeinflussen, dass gewünschte logistische Ziele erreicht werden.

Ein grundlegender Gedanke ist es hierbei, Arbeitssysteme als Trichter zu modellieren. In diesem Modell stehen dem Anwender drei Stellgrößen zur Beeinflussung zur Verfügung: Zugang, Kapazität und Bearbeitungsreihenfolge. An einem Arbeitssystem ist der Zugang über die Auftragsfreigabe, der Abgang über die Kapazität und die Reihenfolge über die Reihenfolgebildung beeinflussbar. Überträgt man diese Logik auf das Baustellenprinzip in der Unikutfertigung, lassen sich zwei Äquivalente zu einem Arbeitssystem in der Werkstattfertigung bestimmen: der Mitarbeiter und die Baustelle.

Für die Übertragung auf den Mitarbeiter lehnt sich die Arbeitssystembetrachtung an das Werkstattprinzip an. Für den Betrieb eines Arbeitssystems sind ebenfalls Mitarbeiter notwendig. Im Baustellenprinzip wird lediglich die Verknüpfung von Mitarbeiter und Maschine aufgelöst und die Mitarbeiter direkt als eigenständige Arbeitssysteme betrachtet. Maßgeblich sind die Fähigkeiten der Mitarbeiter. Der Zugang entspricht in diesem Fall dem Zeitpunkt, zu dem der Mitarbeiter einen Auftrag zur Bearbeitung auswählt. Die Kapazität entspricht der Arbeitszeit in Stunden pro Betriebskalendertag (BKT).

Da sich für die grundlegenden Größen des Trichtermodells im Arbeitssystem Mitarbeiter Größen finden lassen, steht einer Übertragung des Prinzips nichts im Weg. Jedoch ist es nötig, das Modell detaillierter auf seine Anwendbarkeit hin zu überprüfen. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 3.1 die folgenden Elemente für das Arbeitssystem Mitarbeiter vorgestellt, die die Notwendigkeit zur Anpassung an das Baustellenprinzip diskutiert und die notwendigen Anpassungen definiert:

- ☐ Auftrags- und Durchführungszeit (Abschnitt 3.1.1),
- ☐ Durchlaufelement (Abschnitt 3.1.2),
- ☐ Bestand und Kapazität (Abschnitt 3.1.3).

Auch für die Baustelle lassen sich ähnliche Stellgrößen wie bei einem Arbeitssystem in der Werkstattfertigung finden. So ist der Zugang an Aufträgen für die Baustelle über die Auftragsfreigabe beeinflussbar.

Die Kapazität der Baustelle entspricht ihrer Ausdehnung und beeinflusst über ihre Größe den Abgang des Arbeitssystems. Die Grundidee des Trichtermodells ist somit auch auf die Baustelle übertragbar. Es bestehen jedoch Unterschiede, die ebenfalls einer genaueren Analyse bedürfen. Diese Unterschiede werden in Abschnitt 3.2 anhand der folgenden Elemente untersucht:

- ☐ Auftrags- und Durchführungszeit (Abschnitt 3.2.1),
- ☐ Durchlaufelement (Abschnitt 3.2.2),
- ☐ Bestand (Abschnitt 3.2.3) und

□ Kapazität (Abschnitt 3.2.4).

Mitarbeiter und Baustelle sind eng miteinander verknüpft. Dennoch lassen sich beide Ressourcen zunächst unabhängig voneinander betrachten. Hierdurch vereinfacht sich die Untersuchung und Beschreibung. Abschnitt 3.3 hebt die Trennung wieder auf und beschreibt ihre Kopplung.

3.1 Formalisierung des Arbeitssystems Mitarbeiter

Der Mitarbeiter ist das erste Arbeitssystem des Gesamtsystems Baustelle, das es zu formalisieren gilt. Mitarbeiter verrichten auf Baustellen, entsprechend ihrer Qualifikation, verschiedene Einzeltätigkeiten (Montagen). Unter logistischen Gesichtspunkten sind diese Einzeltätigkeiten über ihre Auftrags- und Durchführungszeit präzise zu erfassen. Aufbauend auf diesen lässt sich eine Einzeltätigkeit über das Durchlaufelement vollständig beschreiben. Mit dem Durchlaufdiagramm nach Bechte lassen sich die vorgestellten logistischen Größen quantitativ erfassen und visualisieren [Bec80, S. 36 ff.].

3.1.1 Auftrags- und Durchführungszeiten für das Arbeitssystem Mitarbeiter

Um das Arbeitssystem Mitarbeiter (ASM) mit dem Trichtermodell zu beschreiben, sind Auftrags- und Durchführungszeit zu definieren.

Auftragszeit für Mitarbeiter

Die Auftragszeit für das ASM ist die Zeit, die für die Durchführung einer Einzeltätigkeit aufzuwenden ist. Für ein klassisches Arbeitssystem wie eine Werkzeugmaschine entspricht dies der Plan-Zeit bzw. Vorgabezeit für den auszuführenden Auftrag. Wiendahl definiert die Auftragszeit als abhängige Größe von Losgröße, Einzelzeit sowie Rüstzeit [Wie97, S. 39].

$$ZAU = \frac{LG \cdot t_e + t_r}{60} \quad (3.1)$$

mit	ZAU	Auftragszeit [Std]
	LG	Losgröße [ME]
	t_e	Einzelzeit [min/ME]
	t_r	Rüstzeit [min]

Für eine Einzeltätigkeit des ASM entspricht dies ebenfalls der Plan-Zeit, jedoch ist die Gleichung anzupassen. Die Losgröße ist für die meisten Montagetätigkeiten gleich eins. Die Einzelzeit ist unverändert. Abweichend von der klassischen Definition ist es sinnvoll, die Rüstzeit um eine Orientierungszeit und eine Vorbereitungszeit zu ergänzen.

$$ZAU_{ASM} = \frac{LG \cdot t_e + t_o + t_v + t_r}{60} \quad (3.2)$$

mit	ZAU_{ASM}	Auftragszeit des Arbeitssystems Mitarbeiter [Std]
	LG	Losgröße [ME]
	t_e	Einzelzeit [min/ME]
	t_o	Orientierungszeit [min]
	t_v	Vorbereitungszeit [min]
	t_r	Rüstzeit [min]

Dies legt die Grundlage für die Berechnung der mittleren Auftragszeit, der Standardabweichung, der Auftragszeit, sowie des Variationskoeffizienten der Auftragszeit entsprechend den Definitionen nach Nyhuis [Nyh12, S. 18 f.].

Durchführungszeit für Mitarbeiter

Nach Nyhuis ist die Durchführungszeit durch folgende Gleichung zu ermitteln [Nyh12, S. 20]:

$$ZDF = \frac{ZAU}{L_{max}} \quad (3.3)$$

mit	ZDF	Durchführungszeit [BKT]
	ZAU	Auftragszeit [Std]
	L_{max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Eine Anpassung an das Arbeitssystem Mitarbeiter ist nicht nötig. Aufgrund der im Schiffbau üblichen Definition der Auftragszeiten ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den verwendeten Auftragszeiten um Einzeltätigkeiten handelt, für die eine konstante maximale Leistung festgelegt ist. Diese Gleichung ist nicht auf die Auftragszeit der Baustelle übertragbar (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Aufgrund der Eigenschaften des ASM ist es häufig schwierig und aufwendig, die Plan-Auftragszeiten differenziert festzulegen. Außerdem erfolgt für die Steuerung die Datenrückmeldung häufig nicht mit dem notwendigen Detaillierungsgrad. Dieser Problemstellung im Baustellenprinzip begegnet die Hierarchie der Auftrags- und Durchführungszeiten.

Hierarchie der Auftrags- und Durchführungszeit

Die hier vorgestellten Definitionen für Auftrags- und Durchführungszeit sind vollständig und präzise. Da jedoch eine große Anzahl verschiedener Bauteile mit einer großen Anzahl an Prozessschritten zu bearbeiten ist und typischerweise die notwendigen Planungsinformationen erst spät verfügbar sind und zusätzlich häufig geändert werden, resultiert für die Planung hieraus ein großer Aufwand.

Im Schiffbau, als einer Ausprägung der Baustellenfertigung, wird dieser Herausforderung durch einen sich über den Projektverlauf steigenden Detaillierungsgrad der Planung begegnet. Dies versetzt die Planung in die Lage, Einzeltätigkeiten nur so genau wie nötig zu planen. Hierdurch entsteht eine Detaillierungshierarchie für Auftragszeiten (vgl. Abbildung 3.1).

Eine solche Hierarchie muss in ihrem Detaillierungsgrad von jedem Unternehmen an den vorliegenden Datenbestand angepasst werden. Gleichzeitig versetzt sie das Unternehmen aber auch in die Lage, die Detaillierung der Auftragszeitenplanung an die jeweiligen Gegebenheiten anzupassen.

Abbildung 3.1a zeigt die höchste Ebene der Hierarchie, die Blockebene. Als Block wird die Baugruppe bezeichnet, die nach einer Montage eine Baustelle verlässt [Sti96, Lee97]. In dieser Hierarchiestufe ist zu definieren, welche Mitarbeiterqualifikationen Q die Einzeltätigkeiten ausführen, welche Auftrags- und Durchführungszeit voraussichtlich zur Verfügung stehen werden und welche Bauteile zu montieren sind.

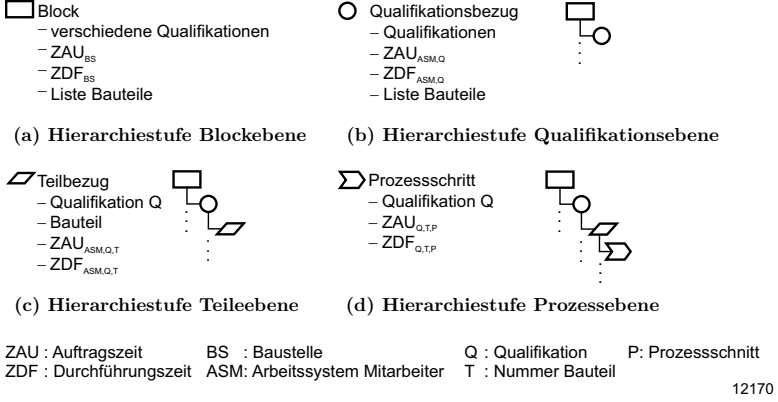


Abbildung 3.1: Hierarchiestufen der Auftrags- und Durchführungszeiten

Bei der hier definierten Auftragszeit handelt es sich nicht um die Auftragszeit des Arbeitssystems Mitarbeiter (ZAU_{ASM}), sondern um die gesamte Auftragszeit der Baustelle (ZAU_{BS}), die sich in der Regel aus mehreren Gewerken und Mitarbeitergruppen zusammensetzt. Auch die Durchführungszeit bezieht sich auf das Arbeitssystem Baustelle (ZDF_{BS}). Auf die Definition dieser Zeiten geht Abschnitt 3.2.1 detailliert ein.

In der zweite Hierarchiestufe (Abbildung 3.1b), der Qualifikationsebene, ist die ausführende Mitarbeiterqualifikation mit der Auftrags- und Durchführungszeit bezogen auf das Arbeitssystem Mitarbeiter (ASM) zu definieren, also für ein Gewerk bzw. eine Mitarbeitergruppe. Außerdem ist festzulegen, welche Bauteile zu bearbeiten sind.

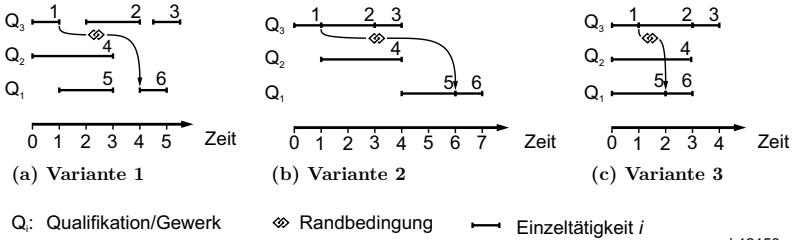
Die Auftragszeit $ZAU_{ASM,Q}$ ist hier die Summe aller Einzeltätigkeiten einer Qualifikation, die in dem spezifischen Block zu realisieren sind. Die verschiedenen Qualifikationen sind über den Index i indiziert. Typischerweise wird diese Zeit auf Basis von Erfahrungswerten bestimmt oder geschätzt. Die Durchführungszeit $ZDF_{ASM,Q}$ ergibt sich aus dem Starttermin der ersten und dem Endtermin der letzten Einzeltätigkeiten dieser Qualifikation.

Die Auftragszeit für die übergeordnete Hierarchieebene des Blocks bzw. der Baustelle (ZAU_{BS}) ist durch Addieren aller Auftragszeiten ZAU_{ASM,Q_i} zu bestimmen. Gleichung 3.4 zeigt außerdem, wie die Auftragszeit ZAU_{BS} aus den Auftragszeiten der Teile- (ZAU_{ASM,Q_i,T_j}) bzw. der Prozessebene (ZAU_{ASM,Q_i,T_j,P_k}) zu berechnen ist.

$$\begin{aligned}
 ZAU_{BS} &= \sum_{i=1}^n ZAU_{ASM,Q_i} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ZAU_{ASM,Q_i,T_j} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l ZAU_{ASM,Q_i,T_j,P_k}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

mit	ZAU_{BS}	Auftragszeit der Baustelle [Std]
	$ZAU_{ASM,Q}$	Auftragszeit mit Qualifikationsbezug [Std]
	$ZAU_{ASM,Q,T}$	Auftragszeit mit Bauteil- und Qualifikationsbezug [Std]
	$ZAU_{ASM,Q,T,P}$	Auftragszeit mit Prozess-, Bauteil- und Qualifikationsbezug [Std]

Die Durchführungszeit ist jedoch NICHT mit Gleichung 3.3 zu bestimmen. Dies würde voraussetzen, dass sich über verschiedene Einzeltätigkeiten eine maximale Leistung bestimmen ließe, die für alle Einzeltätigkeiten Gültigkeit hat. Außerdem ließen sich parallel bearbeitete Einzeltätigkeiten nicht korrekt verrechnen. Hierfür wäre es notwendig, die gewählte Anordnungsvariante der Einzeltätigkeiten bei der Berechnung zu berücksichtigen.



b12158

Abbildung 3.2: Varianten der Auftragsabwicklung auf der Baustelle

Abbildung 3.2 zeigt drei Anordnungsvarianten für eine Gruppe von Einzeltätigkeiten. Zwischen den Einzeltätigkeiten 1 und 6 besteht eine Vorgänger-Nachfolger-Randbedingung, das heißt Tätigkeit 6 kann erst nach Abschluss von Tätigkeit 1 beginnen. Abhängig von der Variante ergeben sich verschiedene Dauern. In Variante 1 (Abb. 3.2a) beträgt die Dauer vom Beginn der ersten Einzeltätigkeit bis zum Abschluss der letzten Einzeltätigkeit 5,5 BKT. In diesem Zeitraum arbeiten Mitarbeiter aus drei verschiedenen Qualifikationsbereichen an sechs Einzeltätigkeiten. In Variante 2 (Abb. 3.2b) beträgt die Dauer 7 BKT. In diesem Fall arbeiten die Mitarbeiter mit den Qualifikationen Q_1 und Q_2 nicht gleichzeitig. Die dritte Variante (Abb. 3.2c) hat eine Dauer von 4 BKT und ist die kompakteste Variante. Alle drei Varianten beachten die Randbedingung zwischen den Einzeltätigkeiten 1 und 6 und sind somit valide.

Die verschiedenen Varianten zeigen, welchen Einfluss die Randbedingungen und die Flexibilität in der Anordnung der Einzeltätigkeiten auf die Dauer der Durchführungszeit haben. Ohne eine Anordnungshierarchie ist die Durchführungszeit nicht berechenbar.

Auf Teile- und Prozessebene (Abbildung 3.1c) sind neben den Auftragszeiten auch die Durchführungszeiten definiert. Die Durchführungszeit lässt sich somit durch Addition der Durchführungszeiten der einzelnen Hierarchiestufen entlang der Anordnungsvariante berechnen:

$$\begin{aligned}
 ZDF_{BS} &= \sum_{i=1}^n ZDF_{ASM,Q_i} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ZDF_{ASM,Q_i,T_j} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l ZDF_{ASM,Q_i,T_j,P_k}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

mit ZDF_{BS}	Durchführungszeit der Baustelle [BKT]
$ZDF_{ASM,Q}$	Durchführungszeit mit Qualifikationsbezug [BKT]
$ZDF_{ASM,Q,T}$	Durchführungszeit mit Bauteil- und Qualifikationsbezug [BKT]
$ZDF_{ASM,Q,T,P}$	Durchführungszeit mit Prozess-, Bauteil- und Qualifikationsbezug [BKT]

Der hierbei entstehende Fehler ist klein und wird vernachlässigt. Aufgrund dieses Fehlers sollte jedoch Gleichung 3.3 nicht herangezogen werden, um die Leistung zu berechnen. Eine leistungsbezogene Berechnung ist auf Prozessebene durchzuführen und gestaltet sich aufwendig. Außerdem würde es auch bei diesem Ansatz zu Fehlern kommen. Grund hierfür sind Überlappung von verschiedenen gleichzeitig bearbeiteten Teilen. In Abbildung 3.2a liegt eine solche Überlappung der Einzeltätigkeiten 2 und 4 sowie 3 und 6 vor. Die Einzeltätigkeiten 4, 2, 6 und 3 bilden den kritischen Pfad. Die Berechnung würde somit eine Genauigkeit aufzeigen, die nicht besteht. Aus diesem Grund ist die einfache Addition zu bevorzugen.

Mit der Festlegung von Auftrags- und Durchführungszeit ist die Grundlage für die Einführung des Durchlaufelements für das ASM geschaffen. Im folgenden Abschnitt wird das Durchlaufelement vorgestellt.

3.1.2 Das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Mitarbeiter

Das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Mitarbeiter (ASM) orientiert sich an dem klassischen Durchlaufelement der Fertigung nach Heinemeyer [Hei74, S. 4] und berücksichtigt teilweise die Definitionen für Montagen nach Schmidt [Sch10, S. 41].

Im Unterschied zum Arbeitssystem in der Werkstattfertigung ist das ASM nicht ortsfest. Dies verändert den Material- und Informationsfluss und somit die Modellierung des Durchlaufs. Vereinfacht ist der Durchlauf wie folgt zu beschreiben: Dem Mitarbeiter wird ein Montageauftrag und gegebenenfalls Material übergeben. Mit diesem und notwendigen weiteren Ressourcen begibt er sich zum Montageort und führt die Montage aus. Anschließend beginnt dieser Durchlauf erneut.

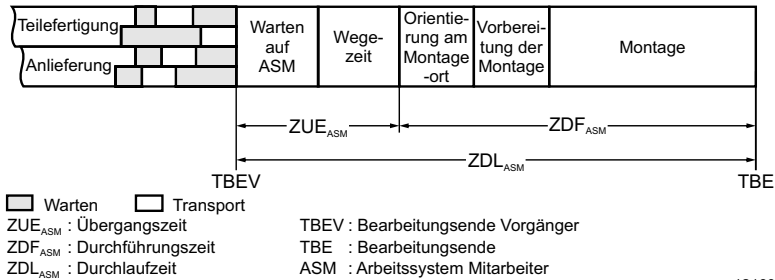
Trotz dieses Unterschieds zu einem klassischen ortsfesten Arbeitssystem ist es möglich, den Durchlauf über das Arbeitssystem Mitarbeiter mit dem Durchlaufelement zu beschreiben. Hierfür wird zunächst der Durchlauf detailliert beschrieben und anschließend über das vereinfachte Durchlaufelement in das zweidimensionale Durchlaufelement für den Mitarbeiter überführt.

Montageaufträge bestehen üblicherweise aus mehreren, meist verschiedenen Komponenten. Hierzu zählen im Unternehmen gefertigte Komponenten oder Halbzeuge, Standardkomponenten, die ohne Bezug zum Montageauftrag bezogen werden, sowie spezifische, für einen Montageauftrag bezogene Komponenten. All diese Komponenten sind für den Montageauftrag zur Verfügung zu stellen.

Entsprechend der klassischen Definition des Durchlaufelements beginnt mit der Beendigung der *Teilefertigung* bzw. der *Anlieferung* aller Zulieferteile, unabhängig davon, ob es sich um spezifisch oder auftragsneutral bezogene Komponenten handelt, die Durchlaufzeit für das Arbeitssystem. Für das ASM beginnt der Durchlauf jedoch erst mit Beendigung der Bereitstellung (vgl. Abbildung 3.3).

Aufgrund der meist nicht synchronen Bereitstellung der einzelnen Komponenten beginnt die Bereitstellung mit dem Bestandteil *Warten*. Der Umfang an Wartezeit kann für jede Komponente unterschiedlich sein. Der Bestandteil *Warten* synchronisiert die verschiedenen Fertig- oder Bereitstellungszeitpunkte der Komponenten. Anschließend erfolgt der *Transport* der jeweiligen Komponenten. Der letzte Bestandteil der Bereitstellung ist *Warten* nach Transport. Dieser Bestandteil synchronisiert die Bereitstellung der verschiedenen Komponenten.

Schwierig in dieser Definition ist die Festlegung des Zeitpunkts *Termin Bearbeitungsende Vorgänger* (TBEV), da eine Vielzahl an Komponenten zu teilweise sehr unterschiedlichen Zeitpunkten



12160

Abbildung 3.3: Vollständiges Durchlaufelement des Arbeitssystems Mitarbeiter

fertig- bzw. bereitgestellt wird. Abweichend von der Definition nach Schmidt [Sch10, S. 53] ist TBEV für das ASM gleich dem Zeitpunkt, zu dem die letzte Komponente bereitgestellt wurde.

Es ist ersichtlich, dass es immer das Ziel der Produktion sein muss, Komponenten möglichst zeitnah zum Montagetermin bereitzustellen bzw. zu fertigen. Dies hat eine positive Wirkung auf Kapitalbindung und Termintreue [Nyh06, S. 325]. Für die Einsparungspotenziale, die sich in der Bereitstellung realisieren lassen, sei auf die Dissertation von Schmidt verwiesen [Sch10].

Das Durchlaufelement für das ASM beginnt mit dem Bestandteil *Warten auf ASM*. In dieser Phase warten die Komponenten auf einen freien Mitarbeiter. Es ist nicht immer sicherzustellen, dass Komponenten und Mitarbeiter zum selben Zeitpunkt und an der selben Stelle zur Verfügung stehen.

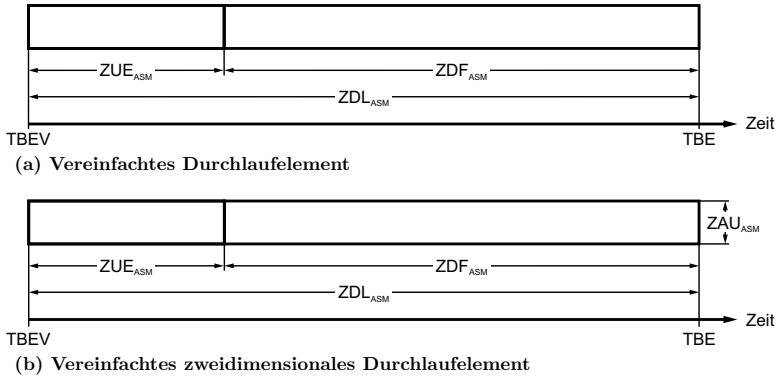
Anschließend erfolgt der finale Transport aller Komponenten zum Einbauort (*Wegezeit*). Im Unterschied zu klassischen Arbeitssystemen führt der Mitarbeiter, der anschließend die Montage durchführt, auch teilweise den Transport aus. So transportiert er üblicherweise sein Werkzeug und Kleinteile zum Montageort. Die Kapazität des Arbeitssystems ist somit früher belastet, als es in der klassischen Definition der Fall ist.

An die *Wegezeit* schließt sich der Zeitabschnitt *Orientierung am Montageort* an. In diesem Schritt bestimmt der Mitarbeiter den genauen Montageort, kontrolliert, ob die Montage möglich ist oder ob noch weitere Komponenten oder Ressourcen notwendig sind. Abhängig von der Montagetätigkeit schließt sich ein Schritt zur Vorbereitung der Montage an. Dieser Schritt bündelt alle Tätigkeiten der Vorbereitung, wie beispielsweise die Installation von Montagehilfen oder die Vorbereitung der Montageflächen.

Der letzte Bestandteil des Durchlaufelements ist die *Montage*. Im Verlauf dieses Schritts führt der Mitarbeiter alle Montagetätigkeiten aus. In der klassischen Definition des Durchlaufelements entspricht dies beispielsweise der mechanischen Bearbeitung von Rohteilen auf einer Werkzeugmaschine. Mit dem Abschluss dieses Bestandteils endet die Belegung des Arbeitssystems Mitarbeiter durch diesen Auftrag (*TBE*).

Der beschriebene Durchlauf stellt einen idealen Ablauf dar. Aufgrund der Komplexität der Montagen und der Vielzahl der notwendigen Komponenten ist eine lineare Abfolge der Schritte nicht immer sicherzustellen. Teilweise kommt es vor, dass die vorbereitenden Tätigkeiten oder die Montage durch weitere Transport- und Vorbereitungstätigkeiten unterbrochen werden. Auf diese Elemente wird in der Modellierung jedoch nicht zusätzlich eingegangen. Stattdessen werden alle

auftretenden Elemente im jeweiligen Zeitabschnitt des Durchlaufelements zusammengefasst. Es sei darauf hingewiesen, dass ein Abweichen vom idealen Durchlauf zu einer Verlängerung der einzelnen Durchlaufelemente führt.



ZDF_{ASM} : Durchführungszeit TBEV : Bearbeitungsende Vorgängerbaustelle
 ZDL_{ASM} : Durchlaufzeit TBE : Bearbeitungsende Baustelle
 ZUE_{ASM} : Übergangszeit ASM : Arbeitssystem Mitarbeiter
 ZAU_{ASM} : Auftragszeit

12166

Abbildung 3.4: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente für das Arbeitssystem Mitarbeiter

Abbildung 3.4a zeigt das vereinfachte eindimensionale Durchlaufelement. Der erste Bestandteil des Durchlaufelements ist die Übergangszeit ZUE_{ASM} . Dieser Bestandteil fasst die Bestandteile *Warten auf ASM* und die *Wegezeit* zusammen.

Mit Abschluss der Übergangszeit beginnt der Bestandteil Durchführungszeit (ZDF_{ASM}). Dieser fasst die *Orientierung am Montageort*, die *Vorbereitung der Montage* und die *Montage* zusammen. Dieser Ablauf ähnelt der Durchlaufelementdefinition nach Wiendahl [Wie97, S. 38]. Es erscheint jedoch sinnvoll, den Bestandteil Rüsten in die Bestandteile *Orientieren am Montageort* und *Vorbereitung der Montage* aufzuteilen. Im Vergleich zur klassischen Definition muss in der Baustellenfertigung häufig mehr Zeit für diese zwei Bestandteile aufgewendet werden, als dies für das Rüsten typischerweise der Fall ist.

Die Addition von Übergangszeit und Durchführungszeit ergibt die Durchlaufzeit (ZDL_{ASM}). Mit diesem Schritt ist das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Mitarbeiter gebildet. Der beschriebene Durchlauf ist in der Lage, die Montage von Komponenten (eine Einzeltätigkeit) zu beschreiben. Mehrere solcher Einzeltätigkeiten bilden den Arbeitsinhalt, der im Verlauf des Durchlaufs eines Blocks durch eine Baustelle zu realisieren ist.

Die Überführung des vereinfachten eindimensionalen Durchlaufelements in das zweidimensionale Durchlaufelement (Abb. 3.4b) erfolgt durch die Kombination mit der Auftragszeit (ZAU_{ASM}). Die Modellierung des Durchlaufelements für das Arbeitssystem Mitarbeiter ist hiermit abgeschlossen. Der folgende Abschnitt beschreibt das hierauf aufbauende Durchlaufdiagramm für das ASM.

3.1.3 Das Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Mitarbeiter

Das Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Mitarbeiter (ASM) trägt den Zugang und Abgang der Auftragszeit am Arbeitssystem kumuliert über der Zeit auf. Der Zugangszeitpunkt entspricht dem Moment, zu dem ein Auftrag für einen Mitarbeiter verfügbar wird. Der Abgangszeitpunkt tritt ein, wenn der Mitarbeiter den Auftrag fertigstellt.

Dieser Ablauf entspricht dem Zugang und Abgang an einem klassischen Arbeitssystem, z. B. einer Werkzeugmaschine, und damit auch der Definition nach Bechte [Bec79, S. 13]. Der Zugang beginnt vertikal versetzt vom Nullpunkt und ist gleich dem Anfangsbestand an Auftragszeit im ASM. Die Kurve des idealisierten Zugangs beschreibt mit ihrer Steigung (zumindest näherungsweise) die mittlere Belastung des ASM, während die Steigung der idealisierten Abgangskurve die mittlere Leistung des ASM abbildet.

Der horizontale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve entspricht der Reichweite des Arbeitssystems. Der vertikale Abstand der Kurven entspricht zu jedem Zeitpunkt dem Bestand an Auftragszeit für das Arbeitssystem. Der Bestand an Auftragszeit ist auch rechnerisch zu ermitteln [Löd08, S. 54]:

$$B(T_n) = \sum_{T=T_1}^{T_n} ZU(T) - \sum_{T=T_1}^{T_n} AB(T) + B_{Anf}(T_1) \quad (3.6)$$

mit	$B(T_n)$	Bestand an Auftragszeit [Std]
	$ZU(T)$	zugehende Auftragszeit am Betriebskalendertag T [Std]
	$AB(T)$	abgehende Auftragszeit am Betriebskalendertag T [Std]
	B_{Anf}	Anfangsbestand an Auftragszeit am Betriebskalendertag T_1 [Std]
	T_1	erster Tag des Untersuchungszeitraums [BKT]
	T_n	Tag, für den der Bestand berechnet wird [BKT]

Die Beziehung aus Leistung, Bestand und Reichweite wird auch als Trichterformel bezeichnet. Auf die Besonderheiten der Leistung für das ASM geht der folgende Abschnitt detaillierter ein.

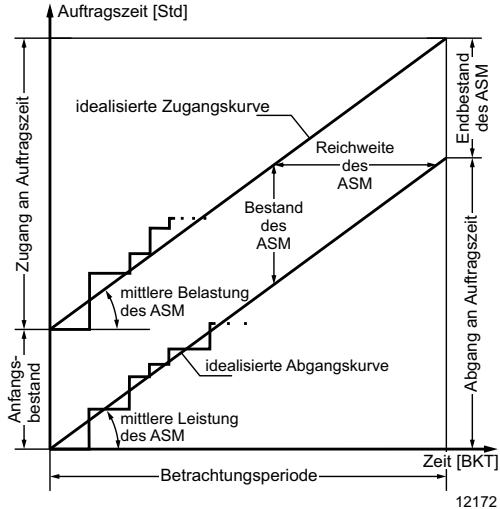


Abbildung 3.5: Idealisiertes Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Mitarbeiter

3.1.4 Die Kapazität für das Arbeitssystem Mitarbeiter

Die Kapazität ist eine elementare Stellgröße für das System und definiert die maximal mögliche Anzahl an Arbeitsstunden je Betriebskalendertag. Die tatsächlich fertiggestellte Anzahl an Stunden je Betriebskalendertag wird als Ist-Leistung ($L_{m,Ist}$) des Arbeitssystems Mitarbeiter bezeichnet.

Arbeiten mehrere Mitarbeiter in einer Gruppe, erhöht sich die Kapazität des ASM entsprechend. Ebenso verändert sich die Kapazität, wenn Mitarbeiter Überstunden machen.

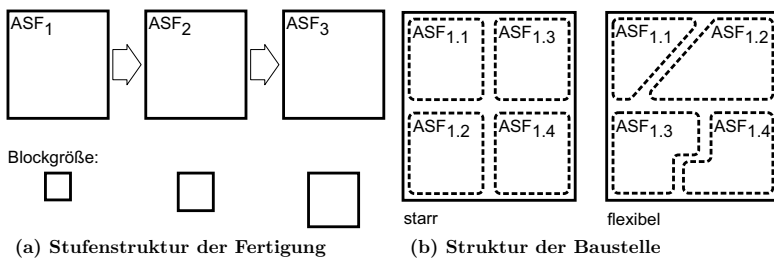
Mit der Einführung des Durchlaufdiagramms und der Definition des Kapazitätsbegriffs für das ASM ist die Modellierung des Teilarbeitssystems Mitarbeiter im Gesamtsystem Baustelle abgeschlossen. Die folgenden Abschnitte beschreiben nun das zweite Teilarbeitssystem: die Fläche.

3.2 Formalisierung des Arbeitssystems Fläche

Das Arbeitssystem Fläche (ASF) ist das zweite zu formalisierende Teilarbeitssystem. In den nächsten Abschnitten werden deshalb die folgenden Elemente untersucht:

- Auftrags- und Durchführungszeit (Abschnitt 3.2.1),
- Durchlaufelement (Abschnitt 3.2.2),
- Bestand (Abschnitt 3.2.3) und
- Kapazität (Abschnitt 3.2.4).

Das Arbeitssystem Fläche umschreibt einen abgegrenzten Bereich, der für eine definierte Montageaufgabe genutzt wird. In der Einzel- und Kleinserienfertigung ist diese Fläche häufig eine Engpassressource [Bra11, S. 331][Eve06, S. 461], weswegen eine flexible Aufteilung der Fläche angestrebt wird [Sch90, S. 19]. Im Schiffbau sind Flächen ebenfalls eine Engpassressource und seit vielen Jahren ein von Wissenschaft [Kuh94, S. 100] und Praxis [Lee97, Maß00] umfangreich untersuchtes Thema. In Bild 3.6a ist die Struktur einer schiffbaulichen Fertigung dargestellt. Es ist typisch, dass die Blockgröße von Stufe zu Stufe zunimmt. Jedes Arbeitssystem Fläche einer Stufe ist hierbei in mehrere Teilflächen unterteilt. Zu identifizieren ist eine Teilfläche über ihre Indizes.



ASF: Arbeitssystem Fläche

12151

Abbildung 3.6: Struktur von Fertigung und Baustelle im Schiffbau

Der Index i definiert das Arbeitssystem Fläche, während der Index j die spezifische Teilfläche im Arbeitssystem Fläche definiert.

Diese Einteilung ist starr oder flexibel realisiert (Abbildung 3.6b). Häufig ist die Einteilung starr ausgeführt, da sich der Planungsaufwand hierdurch verringern lässt. Jedoch zeigt bereits Schlauch [Sch90], dass sich durch eine flexible Einteilung der Flächen ein umfangreiches Potenzial erschließen lässt. Für den Schiffbau präsentieren Lee et al. und Czarnietzki verschiedene Ansätze für die flexible Planung der Fläche [Lee97, Cza08].

3.2.1 Auftrags-, Durchführungs- und Belegungszeit für das Arbeitssystem Fläche

Ausgehend von einem Verständnis der Flächenstruktur ist es notwendig, den Durchlauf über das Arbeitssystem Fläche quantitativ zu beschreiben. Hierfür bieten sich die grundlegenden Größen des Trichtermodells an: Auftrags- und Durchführungszeit. Diese Größen sind durch die Belegungszeit, eine flächenspezifische Größe, zu ergänzen.

Auftragszeit

Für die Modellierung des Arbeitssystems Mitarbeiter wurde Wiendahls Definition [Wie97, S. 39] der Auftragszeit bereits eingeführt (Gleichung 3.1) und an die Anforderungen des Arbeitssystems Mitarbeiter angepasst (Gleichung 3.2).

Da das Arbeitssystem Mitarbeiter die Einzeltätigkeiten im Arbeitssystem Fläche ausführt, ergibt sich die Auftragszeit des ASF (ZAU_{ASF}) aus diesen Einzeltätigkeiten. Diesen Zusammenhang berücksichtigt Gleichung 3.4 bereits. Die Auftragszeit, die für die Fertigstellung eines Blocks im Arbeitssystem Fläche notwendig ist, ergibt sich somit durch die Addition aller Einzeltätigkeiten. Definiert ist die Einzeltätigkeit durch:

- ☐ den Prozess, der auszuführen ist,
- ☐ das Teil, das zu montieren ist, sowie
- ☐ die Qualifikation für die Montage.

Eine Einzeltätigkeit kann somit sowohl die Montage einer einzelnen Komponente oder einer Gruppe von Komponenten beschreiben. Abhängig ist dies vom Detaillierungsgrad der Planung.

Durchführungszeit

Die Durchführungszeit des Arbeitssystems Fläche (ZDF_{ASF}) ist festgelegt durch die Einzeltätigkeiten der Mitarbeiter, die auf dem kritischen Pfad liegen, da sich die Einzeltätigkeiten häufig parallel ausführen lassen. Es ist somit schwierig, die Durchführungszeit ohne eine konkrete Anordnungsvariante der Einzeltätigkeiten zu bestimmen. Der Abschnitt 3.1.1 beschreibt die Entstehung einer solchen Anordnungsvariante. Eine starre Anordnung verringert jedoch die Flexibilität im Arbeitssystem Fläche und ist typischerweise nicht erwünscht. Unter Berücksichtigung von:

- ☐ Anordnungsvariante,
- ☐ kritischem Pfad sowie den
- ☐ Gleichungen 3.5

ist die Durchführungszeit auf Qualifikationsebene zu berechnen. Dies ist jedoch sehr aufwendig und bei einer flexiblen Montagereihenfolge meist auch nicht sinnvoll. Ein einfacher Weg, die Durchführungszeit der Baustelle zu bestimmen, ist, sie über den Starttermin der ersten und den Endtermin der letzten Einzeltätigkeit zu berechnen.

$$ZDF_{ASF} = TBE_{ASM_n} - TBA_{ASM_1} \quad (3.7)$$

mit	ZDF_{ASF}	Durchführungszeit des Arbeitssystems Fläche [BKT]
	TBE_{ASM_n}	Endtermin der letzten Einzeltätigkeit [BKT]
	TBA_{ASM_1}	Starttermin der ersten Einzeltätigkeit [BKT]

Dieser Ansatz setzt voraus, dass im Datenbestand des Unternehmens nachvollziehbar ist, welche Tätigkeiten zu welchem Block gehören und dass sich diese nach Start- und Endtermin sortieren lassen.

Belegungszeit

Die Belegungszeit des Arbeitssystems Fläche setzt sich aus sechs Bestandteilen zusammen, und zwar aus der *Vorbereitung des Arbeitssystems Fläche*, der *Nachbereitung des Transports*, dem *Warten*, der *Bearbeitung des Blocks*, der *Vorbereitung des Blocks für den Transport* sowie aus dem *Warten auf Transport* nach der Bearbeitung. Diese Zeiteile definieren das Durchlaufelement der Baustelle in Abbildung 3.7. Der Bestandteil *Bearbeitung des Blocks* (ZBB) hat häufig den Haupteinfluss.

$$ZBF = ZVB + ZNT + ZWB + ZBB + ZVT + ZWT \quad (3.8)$$

mit	ZBF	Belegungszeit des Arbeitssystems Fläche [BKT]
	ZVF	Vorbereitung des Arbeitssystems Fläche [BKT]
	ZNT	Nachbereiten des Transports [BKT]
	ZWB	Warten vor der Bearbeitung [BKT]
	ZBB	Bearbeitung des Blocks [BKT]
	ZVT	Vorbereitung des Blocks für den Transport [BKT]
	ZWT	Warten auf Transport

Die *Bearbeitung des Blocks* hat einen großen Einfluss auf die Dauer der Belegungszeit des Arbeitssystems Fläche und ist gleich der Durchführungszeit für das Arbeitssystem Fläche. Somit gelten hier dieselben Betrachtungen wie bei der Durchführungszeit. Abschnitt 3.1.1 führt die hierfür nötigen Grundlagen detailliert ein.

Trotz der Tatsache, dass der Bestandteil *Bearbeitung des Blocks* den Haupteinfluss auf die Belegungszeit hat, bieten die anderen Bestandteile ein Verbesserungspotenzial. Ziel ist eine Verkürzung der Zeitauern und eine bessere Synchronisation mit anderen Blöcken.

3.2.2 Das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Fläche

Das Durchlaufelement beschreibt die Schritte, die ein Auftrag an einem Arbeitssystem durchläuft [Hei74, S. 4]. Im Baustellenprinzip weicht das Durchlaufelement von der klassischen Definition nach Heinemeyer ab. Deshalb ist es notwendig, das Durchlaufelement für das Arbeitssystem Fläche anzupassen.

Das allgemeine Durchlaufelement für das ASF beschreibt die Schritte, die ein Block an einem spezifischen ASF durchläuft. Ein solches ASF ist eingegliedert in ein Netz, welches aus mehreren Stufen besteht. In Abbildung 3.7 ist ein solches Netz und das vollständige arbeitsvorgangsbezogene Durchlaufelement des ASF dargestellt. Dieses beschreibt den Durchlauf des betrachteten Blocks durch das Arbeitssystem Fläche (ASF_i). Der typische Durchlauf ist geprägt von verschiedenen häufig parallel ablaufenden Schritten, für die eine klare terminliche Abgrenzung schwierig ist.

Der erste Schritt des Durchlaufs ist die *Vorbereitung des Blocks für den Transport*. Die für den Transport notwendigen Transportvorrichtungen sind zu montieren und teilweise ist die Orientierung des Blocks zu ändern. Der Beginn dieses Schritts legt den TBEV, also den *Termin Bearbeitungsende Vorgänger*, fest. Zu diesem Zeitpunkt beginnt somit die Durchlaufzeit des Blocks durch das betrachtete Arbeitssystem Fläche (AF_i).

Schritt zwei ist das *Warten auf Transport*. Die Phase resultiert aus der nicht 100%igen Synchronisierung der Einzelschritte oder aus Verzögerungen im Plan-Ablauf. Der dritte Schritt ist der *Transport*. Im Verlauf dieses Schrittes endet die Belegung des Arbeitssystems Fläche (ASF_{i-1}). Das Vorgängerarbeitssystem Fläche steht somit dem Produktionsprozess wieder zur Verfügung. Parallel zu den Schritten *Warten auf Transport* und *Transport* erfolgt die *Vorbereitung des Arbeitssystems Fläche*. In dieser Phase ist das betrachtete ASF von allen störenden Objekten zu befreien und für die Aufnahme des neuen Blocks vorzubereiten. Ziel dieses Schrittes ist es, Verzögerungen bei der Belegung des ASF zu minimieren. Mit dem Start dieses Schrittes beginnt auch die Belegungszeit im betrachteten Arbeitssystem Fläche. Die für den Block geplante Fläche gilt somit als belegt und steht dem Produktionsprozess nicht mehr zur Verfügung. Verzögerungen im Schritt *Vorbereitung des Arbeitssystems Fläche* führen somit zu Verzögerungen im Transportprozess. Der hieraus resultierende Einfluss auf Bestand und Kapazität des Arbeitssystems Fläche wird in den Abschnitten 3.2.3 und 3.2.4 erläutert.

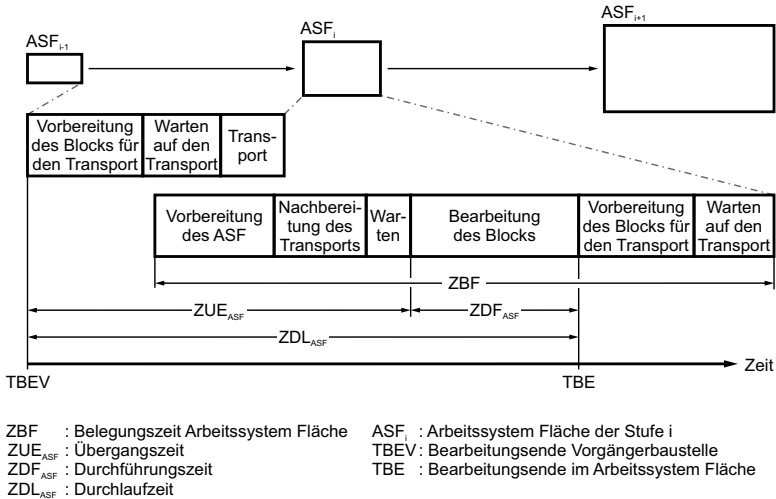
Der fünfte Schritt des Durchlaufs ist die *Nachbereitung des Transports*. In diesem Schritt sind die Transportvorrichtungen zu entfernen und Vorrichtungen für eine sichere Positionierung anzubringen. Abhängig von der Größe des Blocks sind Stellagen (Gerüste) aufzubauen, um den Mitarbeitern den Zugang zum Block zu ermöglichen. Vor dem Arbeitsbeginn am Block entsteht häufig noch eine Wartezeit (Schritt: *Warten*). Typischerweise ist es nicht möglich, die Arbeiten im ASF so zu synchronisieren, dass keine Wartezeiten für einen Block entstehen.

Nach dem *Warten* erfolgt dann die *Bearbeitung des Blocks*. Diese Phase entspricht der Durchführungszeit in einem klassischen Arbeitssystem. Das Ende dieser Phase legt außerdem den *Termin Bearbeitungsende* (TBE) und somit das Ende der Durchlaufzeit des Blocks fest. Die letzten Schritte im betrachteten ASF sind die *Vorbereitung des Blocks für den Transport* und das *Warten auf Transport*. Mit dem Ende des Schrittes *Warten auf Transport* endet auch die Belegungszeit (ZBF) des Arbeitssystems Fläche ASF_i .

Diese Schritte beschreiben den realen Ablauf im Arbeitssystem Fläche vollständig. Jedoch besteht einerseits die Schwierigkeit, jede der Phasen durch messbare Größen zu erfassen. Die Betriebsdatenerfassung in Unternehmen ist hierfür häufig nicht genau genug. Andererseits besteht die Herausforderung, die Schritte klar gegeneinander abzugrenzen.

Aus diesem Grund führen die nachfolgenden Abschnitte ein vereinfachtes Durchlaufelement des ASF ein. Dieses fasst Schritte zusammen und bildet ein eindimensionales vereinfachtes Durchlaufelement ab, das den in realen Unternehmen erhebbaren Größen entspricht. Hierdurch lässt sich der Erfassungsaufwand verringern. Anschließend wird das vereinfachte eindimensionale Durchlaufelement in das vereinfachte zweidimensionale Durchlaufelement des ASF überführt.

Das vereinfachte eindimensionale Durchlaufelement (vgl. Abb. 3.8a) besteht aus fünf Bestandteilen. Der erste Bestandteil ist die *Vorbereitung des Blocks für den Transport zum Arbeitssystem Fläche* ASF_i . An diesen Bestandteil schließt sich der *Transport* an. Der Transport umfasst alle



12150

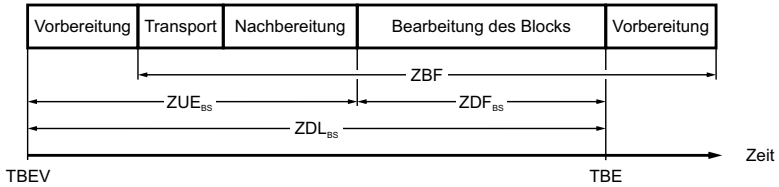
Abbildung 3.7: Vollständiges arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement des ASF

Tätigkeiten, um den Block vom Arbeitssystem Fläche ASF_{i-1} nach ASF_i zu transportieren. Dieser Bestandteil bündelt somit die Schritte *Warten auf den Transport*, *Transport* und *Vorbereitung des ASF*. An den *Transport* schließt sich der dritte Bestandteil, die *Nachbereitung des Transports*, an. Dieser Schritt fasst die Schritte *Nachbereitung des Transports* und *Warten* zusammen. Hier wird von der klassischen Definition abgewichen, weil der Zeiteanteil *Warten* im Baustellenprinzip nur einen kleinen Zeiteanteil umfasst.

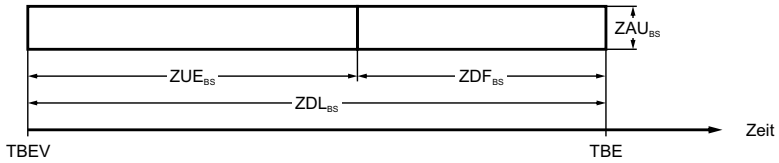
Die Bestandteile *Vorbereitung*, *Transport* und *Nachbereitung* bilden, angelehnt an das klassische Durchlaufelement, die Übergangszeit. Der Beginn des *Transports* markiert außerdem den Beginn der Belegungszeit (ZBF). Hier weicht das Durchlaufelement der Baustelle vom klassischen Durchlaufelement ab. Durch die Einführung der Belegungszeit ist es möglich, zwischen der Durchlaufzeit des Blocks und der Belegungszeit des ASF zu unterscheiden. Dies ist für die Beschreibung der Kapazität des ASF nötig.

Mit dem Ende des Bestandteils *Nachbereitung* beginnen die Durchführungszeit (ZDF_{ASF}) und die *Bearbeitung des Blocks*. Mit dem Ende dieses Schrittes enden die Durchlauf- und Durchführungszeit. Der letzte Bestandteil ist die *Vorbereitung*. Dieser Bestandteil bündelt die *Vorbereitung des Blocks für den Transport* und *Warten auf Transport*. Mit dem Ende dieses Bestandteils endet auch die Belegungszeit des Arbeitssystems Fläche ASF_i .

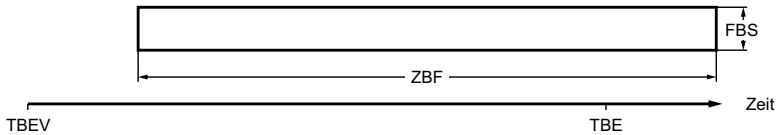
In Anlehnung an Bechte und Heinemeyer ist das vereinfachte zweidimensionale Durchlaufelement für das Arbeitssystem Fläche definiert (vgl. Abbildung 3.8b). Dieses fasst die Durchlaufelemente *Vorbereitung*, *Transport* und *Nachbereitung* zur Übergangszeit ZUE_{ASF} zusammen. Die *Bearbeitung des Blocks* entspricht der Durchführungszeit ZDF_{ASF} . Die Addition von Durchführungs- und Übergangszeit ergibt die Durchlaufzeit.



(a) Vereinfachtes eindimensionales Durchlaufelement des ASF



(b) Vereinfachtes zweidimensionales Durchlaufelement für die Auftragszeit



(c) Vereinfachtes zweidimensionales Durchlaufelement für die Belegungszeit

ZAU : Auftragszeit BS_i : Baustelle der Stufe i
 ZBF : Belegungszeit Fläche FBS : Fläche Baustelle
 ZDF_{BS} : Durchführungszeit TBEV : Bearbeitungsende Vorgängerbaustelle
 ZDL_{BS} : Durchlaufzeit TBE : Bearbeitungsende Baustelle
 ZUE_{BS} : Übergangszeit

12156.1

Abbildung 3.8: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente des Arbeitssystems Fläche

Die mittlere Durchlaufzeit für das ASF ergibt sich zu:

$$ZDL_{m,ASF} = \frac{\sum_{j=1}^n ZDL_{ASF,j}}{n} \quad (3.9)$$

mit $ZDL_{m,ASF}$ mittlere Durchlaufzeit des Arbeitssystems Fläche [BKT]
 $ZDL_{ASF,j}$ Durchlaufzeit des Blocks j im Arbeitssystem Fläche [BKT]
 n Anzahl der Blöcke [-]

Die Belegungszeit ergibt sich aus den Zeitanteilen *Transport*, *Nachbereitung*, *Bearbeitung des Blocks* und der *Vorbereitung*. Die mittlere Belegungszeit für das Arbeitssystem Fläche ergibt sich

somit zu:

$$ZBF_m = \frac{\sum_{j=1}^n ZBF_j}{n} \quad (3.10)$$

mit	ZBF_m	mittlere Belegungszeit des Arbeitssystems Fläche [BKT]
	ZBF_j	Belegungszeit eines Blocks im Arbeitssystem Fläche [BKT]
	n	Anzahl der Blöcke [-]

Im Unterschied zum klassischen Durchlaufelement unterscheidet das Durchlaufelement des ASF zwischen Durchlaufzeit und Belegungszeit. Dies ist nötig, da ein Block das Arbeitssystem Fläche bereits in der Übergangszeit belegt und die Belegung erst mit dem Transport zum nachfolgenden Arbeitssystem Fläche (ASF_{i+1}) endet. Das ASF steht somit in der gesamten Belegungszeit nicht für andere Produktionsprozesse zur Verfügung. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass Verzögerungen in der Logistik und somit in den Übergangszeiten direkt die Kapazität des ASF reduzieren.

Aufgrund der Unterteilung in Durchlauf- und Belegungszeit lassen sich dem Durchlaufelement zwei Dimensionen zuordnen, die Auftragszeit (ZAU_{ASF}) und die belegte Fläche des Arbeitssystems Fläche (FBS). Die Durchlaufzeit bildet mit der Auftragszeit ein zweidimensionales Durchlaufelement, das über die Auftragszeit einen Mitarbeiterbezug herstellt (vgl. Abb. 3.8b). Die Belegungszeit und die belegte Fläche des ASF bilden das flächenbezogene Durchlaufelement (vgl. Abb. 3.8c).

Beurteilung der Durchführungs- und Belegungszeit

Durchführungs- und Belegungszeit sind in ihrer Dauer stark von Einzelzeiten und ihrer Anordnungsvariante beeinflusst. Je besser es einem Unternehmen gelingt, die Einzeltätigkeiten in einem Block zu parallelisieren, desto kürzer fallen Durchführungs- und Belegungszeit somit aus. Für Beurteilung ist das Verhältnis aus Auftragszeit und Durchführungs- bzw. Belegungszeit auszuwerten. Da Start- und Endtermin der Durchführungszeit im Gegensatz zur Belegungszeit häufig nicht dokumentiert sind, wird die Belegungszeit für die Bestimmung des Parallelisierungsgrads verwendet.

Um den Zusammenhang zwischen den Einzeltätigkeiten und der Belegungszeit herzustellen, ist es notwendig, die Einzeltätigkeiten, angegeben in Stunden, in Betriebskalendertage umzurechnen. Hierfür kann die Leistung, mit der die Einzeltätigkeiten realisiert wurden, verwendet werden. Der sich ergebende Parallelisierungsgrad (PG) ist:

$$PG = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{ZAU_{ASM_i}}{L_{max,i}}}{ZBF} \quad (3.11)$$

mit	PG	Parallelisierungsgrad der Einzeltätigkeiten in einer Blockbearbeitung [-]
	ZAU_{ASM_i}	Einzeltätigkeit i in einem Block [Std]
	$L_{max,i}$	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
	ZBF	Belegungszeit eines Blocks [BKT]

Die Analyse verschiedener ASF-Durchläufe aus der Praxis führt zu dem in Abbildung 3.9 dargestellten Histogramm. Aufträge mit einem Parallelisierungsgrad kleiner eins liegen länger auf dem Arbeitssystem Fläche, als sie bearbeitet werden. Für alle anderen Aufträge gilt, dass sie parallele Einzeltätigkeiten enthalten. Aus diesem Grund dauert ihre Bearbeitung deutlich länger, als sie auf dem ASF liegen. Die Summe der Einzeltätigkeiten ist für 70% der Blöcke zwei- bis achtmal so groß wie ihre Belegungszeit. Viele Blöcke enthalten somit umfangreiche

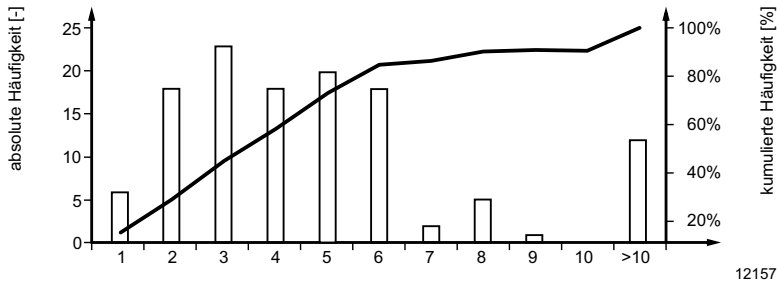


Abbildung 3.9: Histogramm des Parallelisierungsgrads

parallele Einzeltätigkeiten. Es kann jedoch nicht beurteilt werden, ob viele Perioden ohne oder mit nur wenigen Einzeltätigkeiten vorliegen. Für eine genaue Beurteilung dieser Größen ist auf Abschnitt 3.1.1 verwiesen.

Der Parallelisierungsgrad des ASF hilft somit zu identifizieren, ob parallele Tätigkeiten vorhanden sind oder nicht. Blöcke mit einem hohen Umfang an parallelen Tätigkeiten weisen weniger Potenzial auf, eine Verkürzung der Belegungszeit zu erreichen. Verspätungen an solchen Blöcken sind als kritischer zu bewerten, da die Möglichkeiten, den Rückstand durch eine Parallelisierung von Arbeiten aufzuholen, geringer sind.

Mit den eingeführten Kenngrößen Auftragszeit und Durchlaufzeit bzw. Fläche und Belegungszeit ist das Arbeitssystem Fläche quantitativ zu beschreiben. Der Parallelisierungsgrad hilft bei der Beurteilung der Nutzung des ASF. Für die Beurteilung des zeitlichen Verlaufs von Bestand, Durchlaufzeit und Reichweite führt der folgende Abschnitt das Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Fläche ein.

3.2.3 Das Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Fläche

Bechte schlägt vor, die Bearbeitungszeit kumuliert über der betrachteten Periode aufzutragen [Bec79, S. 36]. In Anlehnung hierzu wird im Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Fläche einerseits die belegte Fläche (vgl. Abbildung 3.10), andererseits die Auftragszeit (vgl. Abbildung 3.11) kumuliert aufgetragen.

Durchlaufdiagramm mit Flächenbezug

Die Zugangskurve beginnt vertikal versetzt über dem Nullpunkt. Dieser Versatz entspricht in Abbildung 3.10 der bereits belegten Fläche. Zugang und Abgang in das Arbeitssystem Fläche werden gemessen, kumuliert über der Zeit aufgetragen und bilden so die Zugangs- bzw. Abgangskurve.

Der vertikale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve entspricht zu jedem Zeitpunkt der belegten Fläche. Die belegte Fläche entspricht in dieser Betrachtung somit dem Bestand eines klassischen Arbeitssystems. Im Unterschied zu diesem kann die belegte Fläche jedoch nicht beliebig wachsen, da nur Blöcke, die in der Fläche eingelagert sind, die belegte Fläche verändern. Bezieht

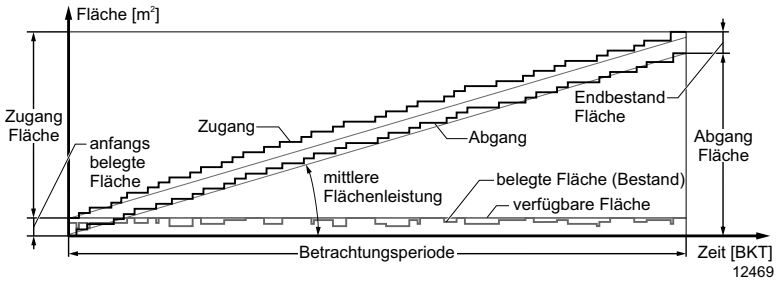


Abbildung 3.10: Durchlaufdiagramm des Arbeitssystems Fläche mit Flächenbezug

man die belegte Fläche auf die verfügbare Fläche, erhält man die Auslastung der Fläche:

$$\text{Auslastung der Fläche} = \frac{\text{genutzte Fläche}}{\text{verfügbare Fläche}} \quad (3.12)$$

Um auch die bereits fertiggestellten, jedoch noch in vorgelagerten Flächen wartenden Blöcke zu erfassen, wäre es möglich, auch die Flächenbelegung der Blöcke in der virtuellen Warteschlange im Diagramm aufzutragen. Die belegte Fläche ist durch Anpassen von Gleichung 3.6 rechnerisch zu ermitteln:

$$B(T_n) = B_{Anf}(T_1) + \sum_{T=T_1}^{T_n} ZU(T) - \sum_{T=T_1}^{T_n} AB(T) \quad (3.13)$$

mit	$B(T_n)$	belegte Fläche [m ²]
	B_{Anf}	belegte Fläche am Betriebskalendertag T_1 [m ²]
	$ZU(T)$	Fläche zugehender Blöcke am Betriebskalendertag T [m ²]
	$AB(T)$	Fläche abgehender Blöcke am Betriebskalendertag T [m ²]
	T_1	erster Tag des Untersuchungszeitraums [BKT]
	T_n	Tag, für den der Bestand berechnet wird [BKT]

Die idealisierte Abgangskurve verbindet den kumulierten Abgang zu Beginn der Betrachtungsperiode mit dem zum Ende der Betrachtungsperiode. Die ideale Zugangskurve ist um den mittleren Bestand vertikal zur idealen Abgangskurve versetzt.

Der horizontale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve entspricht der Reichweite des Systems. Weil zwischen der belegten Fläche und der Dauer der Einzeltätigkeiten keine unmittelbare Abhängigkeit besteht, kann es zu starken Schwankungen dieser Reichweite kommen.

Die mittlere Flächenleistung entspricht dem Verhältnis des Flächenabgangs zur Dauer des Untersuchungszeitraums und wird in der Einheit [m²/BKT] gemessen. Bei einer Flächenleistung von 500m² werden also täglich Aufträge mit einer Flächenbelegung von 500m² fertiggestellt. Nach der Trichterformel gilt:

$$\text{Flächenreichweite} = \frac{\text{mittlere belegte Fläche}}{\text{mittlere Flächenleistung}} \quad (3.14)$$

Durchlaufdiagramm mit Zeitbezug

In Abbildung 3.11 ist statt der belegten Fläche der Abgang und Zugang in Auftragsstunden aufgetragen. Folglich entspricht der Versatz der Zugangskurve gegenüber dem Nullpunkt den noch nicht abgearbeiteten Einzeltätigkeiten auf der Baustelle zum Zeitpunkt T_0 . Der vertikale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve entspricht zu jedem Zeitpunkt dem Bestand an Auftragsstunden. Der vertikale Abstand zwischen der idealisierten Zugangs- und Abgangskurve beschreibt den mittleren Bestand an Auftragsstunden. Der horizontale Abstand zwischen beiden Kurven entspricht der Reichweite des Systems.

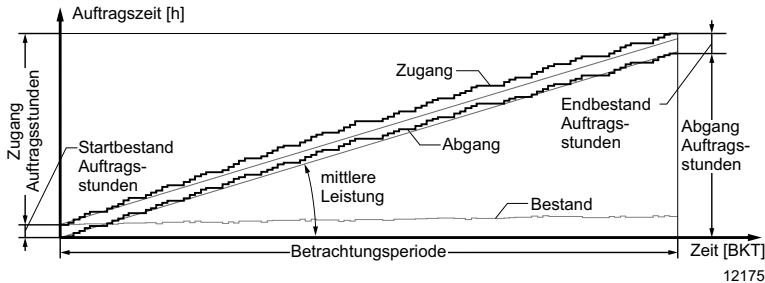


Abbildung 3.11: Durchlaufdiagramm Arbeitssystem Fläche mit Zeitbezug

Der Bestand ist mit Gleichung 3.6 direkt zu berechnen. Hier zeigt sich die Verknüpfung zwischen Bestand an Auftragsstunden im Arbeitssystem Fläche und den geleisteten Einzeltätigkeiten im Arbeitssystem Mitarbeiter. Abschnitt 3.3 geht auf die Kopplung detaillierter ein.

Für das Arbeitssystem Fläche sind somit zwei verschiedene Arten von Bestand definiert. Dies entspricht auch der Unterteilung der Durchlaufelemente in eine Flächen- und eine Zeitbetrachtung. Auf die Besonderheiten, die sich aus der Flächenbetrachtung für die Kapazität des ASF ergeben, geht der folgende Abschnitt ein.

3.2.4 Definition des Kapazitätsbegriffs für das Arbeitssystem Fläche

Die Kapazität eines Arbeitssystems definiert Alisch als "... maximales Produktionsvermögen eines Potenzialfaktors bzw. eines Potenzialfaktorsystems (Arbeitssystems)..." [Ali05, S. 1633]. Für ein Arbeitssystem in der Werkstattfertigung ist dies die Menge an Arbeitsstunden, die das System zur Verfügung stellt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein solches System auch eine Kombination verschiedener Produktionsfaktoren ist, wie beispielsweise eine Werkzeugmaschine und ein Mitarbeiter, der diese bedient.

In der Unikatfertigung besteht dieses Arbeitssystem aus der Fläche und den darauf arbeitenden Mitarbeitern sowie aus ergänzenden Ressourcen, wie beispielsweise Transporteinrichtungen (Stapler, Krananlagen und Schwertransporter), Maschinen oder Geräten. Das Arbeitssystem Fläche ist auf einen elementaren Produktionsfaktor reduzierbar: die Fläche.

Wie bereits eingeführt, ist es von Vorteil, die Fläche flexibel einzuteilen. Hierfür muss sie durch Teilflächen beschrieben werden, wofür viele verschiedene Ansätze [Cza08, S. 35 ff.][Lee97] bestehen. Für diese Arbeit wird der einfache Fall der Unterteilung in Quadrate verwendet. Bei hinreichend klein gewählter Kantenlänge lassen sich beliebige Flächen gut approximieren. Die Kapazität ist in

diesem Fall durch die folgende Gleichung zu ermitteln:

$$A_{ges} = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.15)$$

mit A_{ges} Gesamtfläche des Arbeitssystems Fläche [m²]
 A_i eine Teilfläche des Arbeitssystems Fläche [m²]

Im Unterschied zu anderen Arbeitssystemen wird das ASF unabhängig von der Anwesenheit von Mitarbeitern genutzt. Blöcke, die die Kapazität des ASF (Fläche) belegen, tun dies ohne Rücksicht auf das Schichtsystem der Mitarbeiter. Das ASF übernimmt aufgrund dieses Verhaltens zwei Funktionen. Einerseits ist es ein Arbeitssystem. In den Phasen, in denen keine Mitarbeiter arbeiten, ist es jedoch eine Lagerfläche. Für die Analyse der Kapazität ist es nicht sinnvoll, beide Verhaltensarten (Produktions- oder Lagerfläche) gleichzeitig zu erfassen. Das Merkmal, welches die getrennte Betrachtung ermöglicht, ist der Mitarbeiter. Über die gekoppelte Analyse der Mitarbeiterarbeitszeiten und die Belegung der Fläche lässt sich die real nutzbare Kapazität bestimmen. Abschnitt 3.3 beschreibt die hierfür notwendigen Schritte detailliert.

Eine weitere Besonderheit des Arbeitssystems Fläche ist, dass sich auf ihm häufig keine physischen Warteschlangen bilden. Blöcke können meist nicht direkt an der jeweils nächsten Fläche auf ihre Bearbeitung warten, weil diese noch belegt ist. Daher ist der Transport zwischen verschiedenen Fertigungsstufen eine wichtige Aufgabe, die sorgfältig zu planen ist. Die Fertigstellung von Blöcken auf den unterschiedlichen ASF ist so zu synchronisieren, dass mit dem Abtransport eines Blockes der Transport des nächsten Blockes auf das ASF einhergeht.

Dadurch entstehen virtuelle Warteschlangen. Für ein Arbeitssystem Fläche ASF_i besteht eine geplante Sequenz von Blöcken, die dieses ASF belegen. Die Länge der Warteschlange ist bestimmt von der Menge an bereits fertiggestellten Blöcken auf den vorangegangenen ASF. Im Unterschied zum Werkstatt- oder Fließfertigungsprinzip kann die Länge der virtuellen Warteschlange jedoch nur aus den Planungsunterlagen abgeleitet werden und ist nicht physisch zu sehen.

Da Flächen eine Engpassressource sind und die beschriebenen Eigenschaften die optimale Planung und Nutzung dieser Ressource zusätzlich erschweren, ist es notwendig, Planung und Nutzung durch eine flexible Flächennutzung zu unterstützen. Trotz dieses Ansatzes kann die Flächenkapazität jedoch nie zu 100% genutzt werden. Gründe hierfür sind:

- ☐ Abgang und Zugang lassen sich aufgrund von Transportressourcen nicht vollständig synchronisieren,
- ☐ Blockgeometrien verhindern eine verlustfreie Verschachtelung und
- ☐ zwischen den Blöcken sind Sicherheitsabstände einzuhalten.

Um die aktuelle Nutzung der Flächenkapazität dennoch beurteilen zu können, ist es nötig, eine Vergleichsgröße für die genutzte Fläche zu ermitteln: die mittlere belegte Fläche.

$$FB_m = \frac{\sum FMB_i \cdot ZBF_i}{P} \quad (3.16)$$

mit FB_m mittlere belegte Fläche [m²]
 FMB_i von einem Block i belegte Fläche [m²]
 ZBF_i Belegungsdauer der Fläche FMB_i (Durchlaufzeit) [BKT]
 P Dauer der Betrachtungsperiode [BKT]

FB_m entspricht somit dem mittleren Bestand am Arbeitssystem Fläche. Definiert man die Flächenleistung als das Verhältnis von kumulierter Flächenbelegung und der Länge des Untersuchungszeitraums und formt die Gleichung um, ergibt sich:

$$ZBF_m = \frac{FB_m}{FL_m} \quad (3.17)$$

mit	ZBF_m	mittlere Belegungsdauer der Fläche (Durchlaufzeit) [BKT]
	FB_m	mittlere belegte Fläche [m ²]
	FL_m	mittlere Flächenleistung [m ² /BKT]

Die Analogie zur *Trichterformel* auf Seite 17 ist offensichtlich und ebenso wie bei der *Trichterformel* lassen sich auch aus Gleichung 3.17 zwei Möglichkeiten ableiten, um den Bestand (die belegte Fläche) zu reduzieren: die mittlere Belegungsdauer der Fläche oder die Flächenleistung ist zu minimieren.

Die mittlere Belegungsdauer ist bestimmt vom Arbeitsinhalt eines Blocks und der Parallelisierung in der Abarbeitung. Somit ist die Belegungsdauer vor allem durch technologische Randbedingungen und das Raumangebot bestimmt und kann nicht beliebig reduziert werden. Die Flächenleistung beschreibt, wie viele Quadratmeter Fläche pro Betriebskalendertag vollständig bearbeitet wurden. Die Fläche steht hierbei nur synonym für den auf ihr platzierten Block und die in diesem enthaltenen Arbeitsinhalte. Einfluss auf die Flächenleistung hat somit einerseits die Planung, die den Arbeitsinhalt definiert. Andererseits kommen wieder die technologischen Randbedingungen zum Tragen. Die Flächenleistung lässt sich somit nur innerhalb enger Grenzen beeinflussen. Realisiert eine Werft einen konstanten Blockdurchsatz, hat sie somit zwei Möglichkeiten:

- ☐ Sie folgt einer Wachstumsstrategie und erweitert die Flächen. Hierdurch kann sie den Arbeitsinhalt je Quadratmeter reduzieren und so die Durchlaufzeit reduzieren.
- ☐ Sie etabliert neue Technologien, die die Bearbeitung der Arbeitsinhalte weiter parallelisieren oder direkt beschleunigen und reduziert auf diesem Weg die Durchlaufzeit.

Diese Gesetzmäßigkeiten zeigt die *flächenbezogene Trichterformel* auf. Für die Werft verdeutlicht die Gleichung 3.17 außerdem das Dilemma, in dem sie sich positionieren muss. Einerseits ist sie bestrebt, mit dem gegebenen Flächenangebot die notwendigen Arbeitsinhalte zu realisieren. Dies führt zu möglichst umfangreichen Arbeitsinhalten je Quadratmeter. Andererseits erhöht dieses Vorgehen die Durchlaufzeiten in der Produktion.

Die vorangegangenen Abschnitte modellieren das Arbeitssystem Fläche. Im folgenden Abschnitt wird das Arbeitssystem Fläche mit dem zuvor beschriebenen Arbeitssystem Mitarbeiter gekoppelt. Auf diese Weise entsteht wieder das Arbeitssystem Baustelle.

3.3 Kopplung der Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter

Die beschriebenen Arbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche bilden erst gekoppelt das Fertigungsprinzip Baustelle. In Abbildung 3.12 ist diese Kopplung dargestellt. Das Arbeitssystem Fläche stellt hierbei den Bereich zur Bearbeitung der Blöcke zur Verfügung und beinhaltet Transportressourcen wie die Krananlagen. Das Arbeitssystem Mitarbeiter ist, im Gegensatz zur örtlich starren Ressource Fläche, eine mobile Ressource. Sie ist überall im Arbeitssystem Fläche einzusetzen. Die folgenden Abschnitte erläutern, wie beide Arbeitssysteme miteinander interagieren und wie die Kopplung zu modellieren ist.

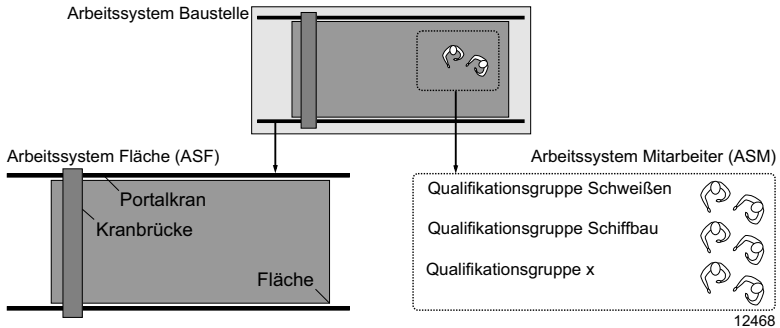


Abbildung 3.12: Kopplung der Teilarbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter

3.3.1 Die Anordnungsvarianten des Arbeitssystems

Belegt ein Block einen Teilbereich des Arbeitssystems Fläche, so enthält dieser Block eine definierte Menge an Einzeltätigkeiten, die in einem Auftrag zusammengefasst sind. Jeder Auftrag enthält also eine feste Menge an Arbeitsstunden: die Auftragszeit ZAU. Außerdem ist für jeden Auftrag definiert,

- ☐ welche Ressourcen für die Bearbeitung nötig sind und
- ☐ welche Aufträge fertiggestellt sein müssen, bevor die Bearbeitung beginnen kann.

Optional kann definiert werden,

- ☐ welche Aufträge begonnen werden können, wenn der Auftrag bearbeitet ist,
- ☐ wie viele Mitarbeiter minimal und maximal gleichzeitig an einer Einzeltätigkeit arbeiten können sowie
- ☐ wie die Einzeltätigkeiten innerhalb eines Auftrags voneinander abhängen.

Die optionalen Informationen erleichtern die Planung und Steuerung der einzelnen Aufträge.

Diese Merkmale bilden die Anordnungsvarianten der Einzeltätigkeiten. Im Abschnitt 3.2.1 wurde gezeigt, welchen Einfluss verschiedene Anordnungsvarianten auf die Durchlaufzeit eines Blocks haben können. Der dort beschriebene Einfluss bezieht sich jedoch nur auf die zu definierende Reihenfolge der Einzeltätigkeiten.

Die Reihenfolge selbst kann jedoch auch auf die Auftragszeit der Einzeltätigkeit wirken. Durch die Montage in einer ungünstigen Reihenfolge kann sich die Dauer einer Einzeltätigkeit verändern, wenn sich die Montageumstände verändern. Eine Herausforderung für die Planung ist somit, eine korrekte und realisierbare Montagereihenfolge (Anordnungsvariante) zu bestimmen und dabei die Terminegebenheiten zu berücksichtigen. Außerdem ist es nötig, eine möglichst flexible Beschreibung der Auftragszeit zu finden, die Veränderungen der Montagereihenfolge berücksichtigen kann.

Unter der Voraussetzung, dass eine solche Reihenfolge gefunden wurde und gleichzeitig eine Beschreibung der Auftragszeiten und der jeweils verwendeten Ressourcenmengen vorliegt, kann ein Termingerüst abgeleitet werden. Damit ist die minimale und die Plan-Durchlaufzeit bestimmbar.

3.3.2 Das Durchlaufelement des gekoppelten Arbeitssystems

Die Kombination der Durchlaufelemente für die Arbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Jede von einem Mitarbeiter realisierte Einzeltätigkeit ist durch ein Durchlaufelement erfasst (1 bis n). Die Durchlaufelemente sind innerhalb des Bestandteils ZDF_{ASF} des Durchlaufelements des Arbeitssystems Fläche angeordnet.

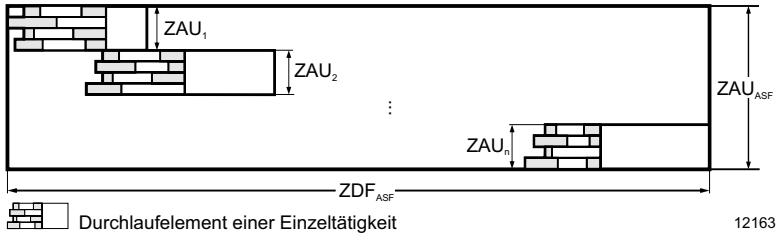


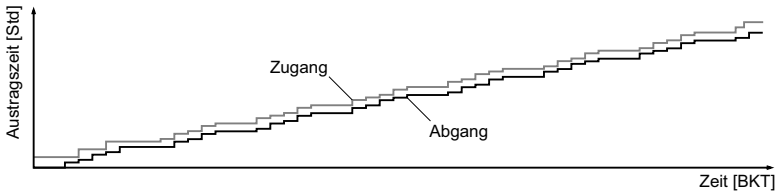
Abbildung 3.13: Kombination der Durchlaufelemente für die Arbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche

Die horizontale Position einer Einzeltätigkeit definiert den Zeitpunkt der Bearbeitung. Dies ist bereits zuvor als Anordnungsvariante eingeführt worden. Die Höhe jeder Einzeltätigkeit beschreibt die jeweilige Auftragszeit, ihre Länge die Durchlaufzeit. Aus der Abbildung ist außerdem ersichtlich, dass sich ZAU_{ASF} durch Addition der Auftragszeiten der Einzeltätigkeiten (ZAU_i) ergibt. Dieser Zusammenhang wurde bereits mit Gleichung 3.4 eingeführt. Das Gesamtsystem ergibt sich somit aus der Aggregation der ASM und berücksichtigt hierbei die Anordnungsvariante.

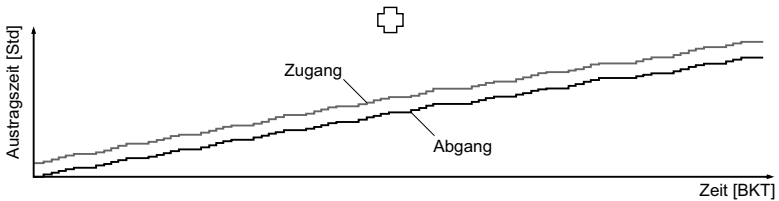
Einen sehr wichtigen Einfluss auf diese Aggregation hat hierbei die Anordnungsvariante. Einerseits bestimmt sie durch ihre Kompaktheit die Durchlaufzeit eines Blocks. Beurteilen lässt sich diese über den Parallelisierungsgrad. Andererseits beeinflusst sie die Einzeltätigkeiten in ihrer Dauer, da die aus der Reihenfolge resultierenden Einbausituationen die Montage aufwendig oder einfach gestalten können.

3.3.3 Das Durchlaufdiagramm des gekoppelten Arbeitssystems

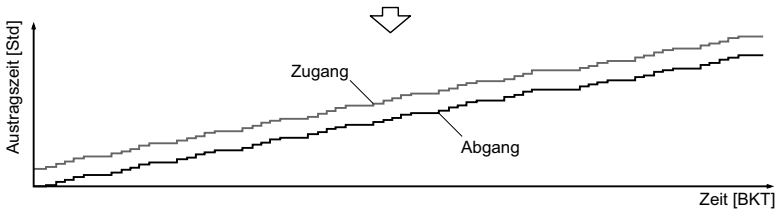
Das Durchlaufdiagramm des Gesamtarbeitssystems entsteht durch die Überlagerung der Zu- bzw. Abgangskurve der Teilsysteme. In den Abbildungen 3.14a und 3.14b sind die Durchlaufdiagramme für die Mitarbeiterqualifikationen Schweißen und Schiffbau abgebildet. Die Überlagerung beider Durchlaufdiagramme ist in Abbildung 3.14c dargestellt.



(a) Durchlaufdiagramm für die Qualifikationsgruppe: Schiffbau



(b) Durchlaufdiagramm für die Qualifikationsgruppe: Schweißen



(c) Aggregiertes Durchlaufdiagramm der Qualifikationsgruppen

12162

Abbildung 3.14: Durchlaufdiagramme für verschiedene Hierarchiestufen

Das flächenbezogene Durchlaufdiagramm kann nicht auf Qualifikationsebene erhoben werden. Hierfür wäre es nötig, den Flächenbedarf für Tätigkeiten zu ermitteln. Da Mitarbeiter teilweise in mehreren Ebenen arbeiten, ist hier kein sinnvoller Zusammenhang zu bestimmen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die flächenbezogenen Durchlaufdiagramme nur über mehrere Baustellen zu aggregieren. Kapitel 6 zeigt hierfür Beispiele. Durch die verschiedenen Hierarchiestufen und deren Aggregationen sowie durch die getrennte Betrachtung des Zeit- und des Flächenaspekts ergibt sich somit eine Vielzahl an Durchlaufdiagrammen. Dies erhöht die Transparenz und vereinfacht so die Analyse einer Baustellenfertigung.

3.3.4 Nutzen der Durchlaufdiagramme

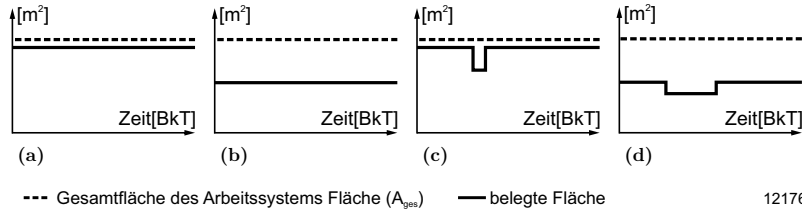
Durchlaufdiagramme sind in Fertigungen, die nach dem Werkstatt-, Insel- oder Fließprinzip aufgebaut sind, etablierte Werkzeuge der Analyse. Sie ermöglichen eine schnelle Aussage über Bestand, Durchlaufzeit und Reichweite. Das Durchlaufdiagramm der Fläche beurteilt:

- die Flächenleistung,
- die Reichweite bzw. die Belegungszeit einer Fläche,
- die belegte Fläche und
- die Flächenauslastung.

Die Flächenleistung kann deutlich stärker schwanken, als dies bei klassischen Durchlaufdiagrammen der Fall ist. So korrelieren die Menge an Auftragsstunden, die in einem Block zu realisieren sind, und die belegten Flächen nicht zwangsläufig. Blöcke mit großem Arbeitsinhalt belegen gegebenenfalls nur wenig Fläche, während große Blöcke zum Teil nur wenig Auftragszeit enthalten. Ein weiterer Grund ist der flexible Einsatz des Arbeitssystems Mitarbeiter. Werden Mitarbeiter zwischen Bauplätzen flexibel eingesetzt, kann sich die Durchlaufzeit und damit die Belegungszeit verlängern oder verkürzen. Als letzter Einflussfaktor ist die Verwendung der Bauplätze als Lagerfläche zu nennen. Das Durchlaufdiagramm der Fläche kann helfen, Soll-Ist-Abweichungen zu beurteilen.

Gerade für ein so flexibel genutztes Arbeitssystem wie die Baustelle ist eine solche aggregierte Überwachung, die trotz starker Schwankungen Planabweichungen präzise visualisieren kann, sehr vorteilhaft. Um die Leistung und die Durchlaufzeit der Fläche jedoch korrekt zu beurteilen, ist es notwendig, diese im Kontext der geleisteten Auftragszeiten zu betrachten. Hierfür sind das Durchlaufdiagramm der Fläche und der Zeit gemeinsam zu analysieren.

Die belegte Fläche auf der Baustelle ist mit dem Durchlaufdiagramm der Fläche sehr gut und einfach zu beurteilen. Trägt man die belegte Fläche im Diagramm direkt auf (vgl. Abb. 3.10), kann sehr einfach beurteilt werden, ob Zu- und Abgänge gut synchronisiert sind und wie hoch die Flächennutzung ist. Für die Flächennutzung ist die Kennzahl FB_m (Gleichung 3.16) oder das Niveau des Bestands mit der Gesamtfläche des Arbeitssystems Fläche zu vergleichen (A_{ges} Gleichung 3.15). In Abbildung 3.15a ist eine hohe Flächennutzung gegeben, während Abbildung 3.15b eine schlechte Flächenausnutzung zeigt. Eine gleichmäßige Flächenbelegung liegt vor, wenn keine tiefen und mehrere Tage andauernden Stufen in der Bestandskurve vorliegen (vgl. Abb. 3.15a, 3.15b). In



12176

Abbildung 3.15: Verschiedene Fälle des Bestandsverlaufs im flächenbezogenen Durchlaufdiagramm

Abbildung 3.15c sinkt die belegte Fläche für kurze Zeit ab und in Abbildung 3.15d kommt es zu deutlichen Verlusten bei der Flächennutzung. Das Durchlaufdiagramm der Fläche hilft, derartige Verluste zu identifizieren. Der große Vorteil ist, dass keine zusätzliche Datenerhebung für diese Information notwendig ist, da Transporte zwischen Baustellen im Schiffbau bereits erfasst werden. Bisher existierte jedoch keine einfache Auswertung für diese Information.

Das Durchlaufdiagramm der Fläche hilft außerdem, Flächenengpässe zu identifizieren. Ein erstes Indiz hierfür ist, wenn die belegte Fläche nur unwesentlich kleiner als die Gesamtfläche ist. Hat ein Block jedoch eine ungünstige Größe, sodass schon bei einem ungünstigen Verhältnis von FLN zu A_{ges} keine weiteren Blöcke auf der Fläche eingelagert werden können, kann ein solcher Engpass auch bei FLN wesentlich kleiner A_{ges} vorliegen. Ist die Stufenhöhe der Abgangskurve ein ungünstiger Teiler für den A_{ges} , liegt dieser Fall vor. Im Fall eines Engpasses liegt außerdem eine maximale Auslastung des Arbeitssystems Mitarbeiter vor. Nur wenn keine weiteren Mitarbeiter parallel auf der Baustelle arbeiten können, ist die Flächenleistung nicht weiter zu steigern und ein Engpass liegt vor. Hilfreich für diese Beurteilung sind:

- der Parallelisierungsgrad (Gleichung 3.11),
- die mittlere Leistung im zeitbezogenen Durchlaufdiagramm der Baustelle sowie
- das Wissen über die Einzeltätigkeiten und deren Parallelisierbarkeit.

Auch das zeitbezogene Durchlaufdiagramm beurteilt die Reichweite, den Bestand sowie die mittlere Leistung. Hierfür aggregiert das Diagramm die in Abschnitt 3.3.1 eingeführten Hierarchiestufen. Bei der Festlegung der Hierarchiestufe bzw. des Detaillierungsgrades der Planung stehen Unternehmen vor einem Dilemma: Einerseits steigt der Planungsaufwand mit zunehmender Detaillierung. Andererseits ermöglicht eine detaillierte Planung, Planabweichungen frühzeitig zu erkennen.

3.3.5 Zusammenfassung zur Kopplung der Arbeitssysteme

Die vorangegangenen Abschnitte haben die Theorie für die Teilarbeitssysteme Fläche (ASF) und Mitarbeiter (ASM) eingeführt. Die hierauf aufbauende Kopplung der Teilsysteme zeigt, welche Abhängigkeiten zwischen beiden bestehen und wie sie in einer zusammenfassenden Beschreibungslogik abbildbar sind.

Ausgehend von der eingeführten Theorie wird der folgende Abschnitt nun die Anforderungen zur simulationsgestützten Modellierung von Arbeitssystemen, die nach dem Baustellenprinzip operieren, einführen.

4 Anforderungen an die Implementierung der Fertigungssteuerung

Der Stand der Technik beschreibt die aktuell angewendeten Methoden zur Steuerung von Produktionsbetrieben. Für das Fertigungsprinzip der Baustellenfertigung findet vor allem die Projektplanung Anwendung. Dieses Steuerungsprinzip ist jedoch mit Nachteilen verbunden. Es ist unklar, wie sich die logistischen Zielgrößen beeinflussen lassen bzw. von welchen Steuergrößen sie abhängen. Dieser Mangel soll durch die Übertragung des Modells der Fertigungssteuerung in die Baustellenfertigung beseitigt werden.

Um das *Modell der Fertigungssteuerung* in der Baustellenfertigung zu verwenden, ist es notwendig, die vom Modell eingeführten Aufgaben, Stell- und Regelgrößen auf ihre Anwendbarkeit für die Baustellenfertigung zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Diese Überprüfung ist am einfachsten in einem Simulationsmodell zu realisieren. Die Anforderungen, die sich für die allgemeine Implementierung des *Modells der Fertigungssteuerung* im Schiffbau und für die spezifische Implementierung in ein Simulationsmodell für Baustellen ergeben, leiten die folgenden Abschnitte her.

Im Abschnitt 4.1 werden die Defizite und Anforderungen der Produktionsplanung im Schiffbau vorgestellt. Abschnitt 4.2 geht auf die Auftragsfreigabe ein, Abschnitt 4.3 auf die Kapazitätssteuerung und Abschnitt 4.4 führt schließlich die Anforderungen für die Reihenfolgebildung ein. Die Stell-, Regel- sowie Zielgrößen werden als Unterpunkte der Aufgaben untersucht.

4.1 Defizite der Produktionsplanung

Die Produktionsplanung definiert die Plan-Größen für die Arbeitssysteme, also Plan-Zugang, Plan-Abgang und Plan-Reihenfolge (vgl. Abbildung 4.1), die gleichzeitig die für die Steuerung der Arbeitssysteme notwendigen Vergleichsgrößen sind.

Im Schiffbau werden Zugang, Abgang und Reihenfolge häufig nur in Form von Arbeitspaketen auf Blockbasis definiert. Teilweise werden zwar detailliertere Planungen für spezifische Teile realisiert, wenn diese als besonders kritisch gelten. Allgemein ist dies aber nicht der Fall. Ein Grund hierfür ist die Unsicherheit über die Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Konstruktionsdaten. Aufgrund des parallelisierten Ablaufs von Konstruktion, Produktionsplanung und Produktion und der damit einhergehenden häufigen Änderungen der Konstruktionsdaten sind Zuverlässigkeit und Vollständigkeit meist nicht gegeben. Die sich hieraus ergebenden Defizite lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- D1 Es existiert kein definierter Detaillierungsgrad für die Planung.
- D2 Es besteht keine systematisch gestufte Detaillierung.
- D3 Die Anforderungen des Modells der Fertigungssteuerung (Abschnitt 2.1) und der Vorgaben der Arbeitssystemdefinitionen (Kapitel 3) werden bei der Definition der Plan-Daten nicht erfüllt.

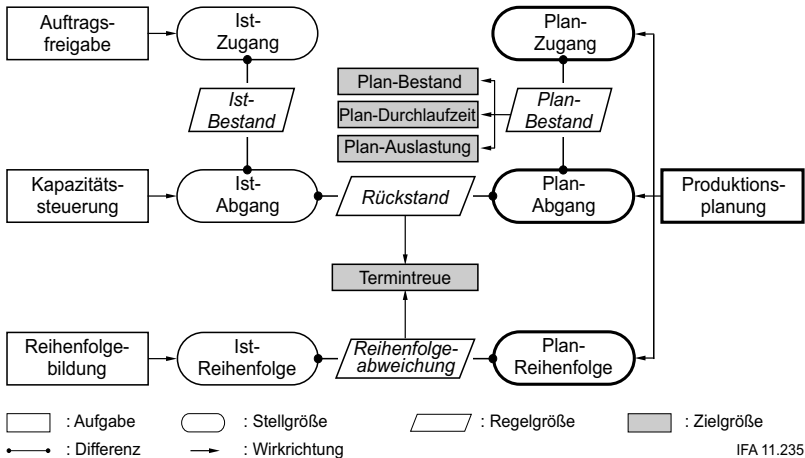


Abbildung 4.1: Modell der Fertigungssteuerung - Planung [Löd08, S. 133]

Aufgrund dieser Defizite erfolgt eine Planung bisher meist nur auf Blockebene. Eine detaillierte Planung machen lediglich Meister und Vorarbeiter kurz vor Produktionsbeginn, indem sie ihrem Personal Aufgaben zuweisen und Arbeitszeiten auf Arbeitspakete verbuchen. Hieraus resultieren weitere Planungsdefizite: So ist dieses Vorgehen häufig nicht standardisiert, wird nicht dokumentiert und das Planungswissen steht meist nur lokal zur Verfügung. Dies führt zu intransparenten und unsystematischen Planungsabläufen. Außerdem optimieren Meister und Vorarbeiter typischerweise eher den lokalen Ablauf, als ein Gesamtoptimum anzustreben. Diese Defizite haben jedoch keinen Einfluss auf die Implementierung in das Simulationsmodell und werden nicht weiter betrachtet. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass für eine Umsetzung in der Produktion auch diese Defizite zu lösen sind.

Einen direkten Einfluss auf die Implementierung haben die Defizite D1, D2 und D3. Nur wenn diese Defizite gelöst sind, ist es möglich, die Fertigungssteuerung aus der Werkstattfertigung auf die Baustellenfertigung zu übertragen und in einem Simulationsmodell zu untersuchen. In den folgenden Abschnitten werden diese Defizite näher beschrieben und Anforderungen abgeleitet. Tabelle 4.1 (S. 59) fasst alle Defizite und Anforderungen der Produktionsplanung zusammen.

4.1.1 Einfluss des Detaillierungsgrads

Ein definierter Detaillierungsgrad stellt einerseits den Zusammenhang zwischen den Konstruktions- und Planungsdaten her. Dafür ist festzulegen, welcher Konstruktionsfortschritt bestehen muss, damit die Planung Arbeitsschritte definieren kann. Dieser Aspekt ist für die Simulation der Baustellenfertigung nicht zwingend zu lösen, weshalb keine Anforderungen abzuleiten sind.

Andererseits ist zu bestimmen, welche Informationen die Planung zu definieren hat. Durch die Bereitstellung dieser Informationen ist das zurzeit in den meisten Werften bestehende Informations-

defizit zu beseitigen. Aus der Modellierung des Durchlaufdiagramms ergeben sich die Anforderungen, dass ein Plan-Starttermin (A1.1), eine Plan-Auftragszeit (A1.2), ein Plan-Endtermin (A1.3), ein Flächenbedarf (A1.4), die Belegungszeit des übergeordneten Blocks (A1.5), eine Identifikationsnummer des bearbeiteten Objekts (A1.6) sowie ein Bezeichner für den durchzuführenden Prozessschritt (A1.7) bereitzustellen sind. Mit der Erfüllung der unter A1 zusammengefassten Anforderungen stehen die für die Fertigungssteuerung mindestens erforderlichen Planungsdaten zur Verfügung.

4.1.2 Einfluss der gestuften Detaillierung

Das Defizit D1 beschreibt den Informationsmangel für einen spezifischen Detaillierungsgrad. Da der Konstruktionsprozess iterativ verläuft, gibt es nicht einen spezifischen Detaillierungsgrad. Stattdessen nimmt dieser im Konstruktionsverlauf zu. Eine Analyse des Informationsangebots für die Planung identifiziert drei Detaillierungsgrade (vgl. Abbildung 4.2). Eine grobe Detaillierung für frühe Phasen der Konstruktion, eine flexible Detaillierung für Phasen, in denen der Konstruktionsprozess noch nicht abgeschlossen ist, aber stetig mehr Informationen für die Planung erzeugt werden, und eine feine Detaillierung, sobald der Konstruktionsprozess abgeschlossen ist.

Alle drei Detaillierungsebenen beschreiben die Fertigungsstufen Vorfertigung, Blockfertigung und Aufsetzen, welche im Schiffbau typische Phasen der Baustellenfertigung sind. In der Vorfertigung entstehen Bleche mit Verstärkungen. Die Blockfertigung fügt diese zu Blockstrukturen zusammen und führt erste Ausstattungsarbeiten durch. In der letzten Phase werden diese Blöcke dann zur Schiffsstruktur gefügt und endausgestattet.

Die auf der ersten Detaillierungsebene vorhandenen und nur sehr groben Planungsinformationen (Abbildung 4.2a) lassen lediglich die Definition eines Produktes und eines einfachen Prozesses zu. Das Produkt beschreibt hierbei die spezifische Baugruppe wie ein Blech (Bl_i) oder einen Block

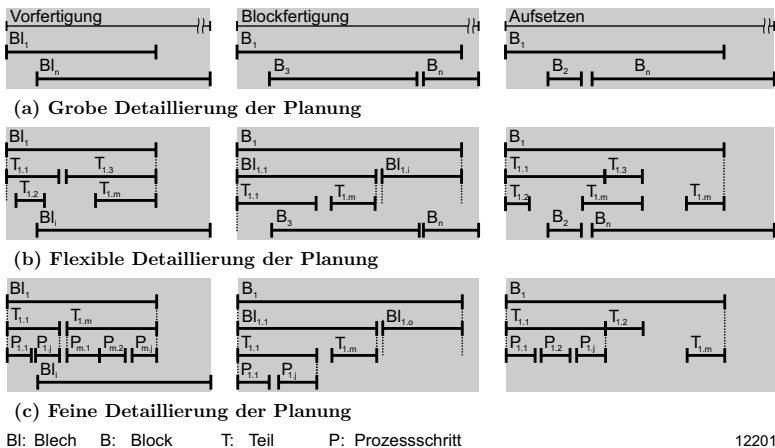


Abbildung 4.2: Varianten der Detaillierung der Planung

(B_n), der Prozess lediglich die Erstellung von diesem. Als Anforderung ergibt sich, dass es möglich sein muss, diesen groben Detaillierungsgrad in der Simulation zu erstellen und zu nutzen (A2.1).

Die flexible Detaillierung (vgl. Abbildung 4.2b) erweitert die Planung um Subbaugruppen und deren Produktionsprozesse. Im Unterschied zur ersten Detaillierungsstufe müssen sich die Arbeitsschritte zur Erstellung des Produkts beschreiben lassen. Abhängig vom Konstruktionsfortschritt können diese Arbeitsschritte sowohl die Erstellung großer Subbaugruppen mit sehr hoher Auftragszeit oder die Montage eines Rohres mit wenigen Stunden Auftragszeit umfassen. Hieraus ergibt sich die Anforderung, eine flexible Detaillierung in der Simulation erstellen und nutzen zu können (A2.2).

Für die Planung auf der höchsten Detaillierungsstufe (vgl. Abbildung 4.2c) muss ein vollständiges Produktmodell zur Verfügung stehen. Die Modelle der drei Phasen Vorfertigung, Blockfertigung und Aufsetzen sind so detailliert, dass jede Subbaugruppe mit ihren Bauteilen und den zugehörigen Prozessschritten ableitbar ist.

Für die Vorfertigung bedeutet dies, dass alle verwendeten Teile (T_m) und die an jedem Teil auszuführenden Prozessschritte (P_j) bekannt sind. Für die Blockfertigung müssen alle zugelieferten Bleche (Bl_i), alle zu montierenden Teile (T_m) sowie alle Prozesse (P_j) bekannt sein, die für die Montage des Blocks, der Bleche sowie der Teile notwendig sind. Für die Phase Aufsetzen sind zusätzlich die zugelieferten Blöcke (B_n) und die für deren Montage notwendigen Prozesse abzubilden.

Die sich ergebende Anforderung A2.3 legt fest, dass die Verknüpfung von Bauteilen und/oder Baugruppen mit verschiedenen Prozessschritten möglich sein muss. Die generische Assoziation von Prozessabläufen und Bauteilen ermöglicht es, den Aufwand für die Erzeugung dieser sehr detaillierten Modellierung zu reduzieren.

Mit den drei Detaillierungsgraden ist es möglich, den Produktionsprozess in verschiedenen Phasen der Produktentstehung zu beschreiben und mit der Simulation nachzubilden. Aufgrund der starken Parallelisierung im Verlauf der Produktentstehung gibt es jedoch keine klare Trennung zwischen den verschiedenen Detaillierungsgraden. So ist beispielsweise die Stahlstruktur früher definiert als Einbauteile wie z. B. Rohre. Somit muss es möglich sein, in einem Simulationsmodell mit allen drei Detaillierungen zu arbeiten (A2.4).

Anforderung A2.4 stellt die Nutzung unterschiedlicher Detaillierungsgrade innerhalb eines Modells sicher. Dies kann jedoch zu Inkonsistenzen in den Planungsdaten führen. Einerseits sind Informationen nicht immer so teilbar, dass sie in unterschiedliche Detaillierungsgrade passen. Andererseits entstehen durch den Prozess der Detaillierung unvollständige Informationsübergänge. Die hieraus resultierenden Inkonsistenzen sind zwingend zu verhindern (A2.5). Die für das Defizit D2 zu lösenden Anforderungen sind in der Tabelle 4.1 unter A2 (S. 59) zusammengefasst.

4.1.3 Absicherung der Bereitstellung passender Plan-Daten

Das Defizit D3 besagt, dass bisher bei der Erzeugung von Plan-Daten nicht die Anforderungen des Modells der Fertigungssteuerung und der Modellierung des Arbeitssystems Baustelle berücksichtigt wurden. Aus den Modellen lassen sich die folgenden drei Anforderungen ableiten:

Anforderung A3.1 berücksichtigt den grundlegenden Gedanken des Modells der Fertigungssteuerung, wonach die Regelgrößen die Grundlage für Steuerentscheidungen sind. Hierfür ist es notwendig, für jede in der Planung definierte und in der Simulation implementierte Plan-Größe eine entsprechende Ist-Größe in der Simulation zu erheben. Für alle unter A1 zusammengefassten Plan-Größen sind somit Ist-Größen im Simulationsmodell zu hinterlegen und zu messen.

Die Anforderung A3.2 greift den in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Gedanken der Mitarbeiterqualifikation auf. Die Mitarbeiterqualifikation ist das wichtigste Unterscheidungsmerkmal zwischen den

Arbeitssystemen Mitarbeiter (ASM) auf einer Baustelle. Um auch in der Steuerung eine Differenzierung zwischen den unterschiedlichen ASMs zu ermöglichen, ist es notwendig, die Qualifikation in der Simulation zu hinterlegen und auch als Merkmal auswerten zu können. Nur so wird es möglich, die einzelnen ASMs gezielt zu beeinflussen.

Die letzte Anforderung (A3.3) bedingt eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung zwischen allen Objekten, die in der flexiblen und der feinen Detaillierung geplant werden. Der grobe Detaillierungsgrad kann an dieser Stelle vernachlässigt werden, da der Einfluss auf die sehr grob geschätzte Bearbeitungszeit gering ist.

Für die anderen Detaillierungen ist dies jedoch nicht gegeben. Hier wirkt sich die Reihenfolge erheblich auf die Auftrags- und Durchführungszeiten aus. Abschnitt 3.1.1 geht hierauf detailliert ein. Weiterhin lassen sich Inkonsistenzen in den Planungsdaten durch Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen leicht verhindern.

4.1.4 Anforderungen an die Implementierung der Produktionsplanung

Die vorangegangenen Abschnitte leiten drei Hauptdefizite des aktuellen Planungsvorgehens in der Baustellenfertigung ab. Hieraus ergeben sich Anforderungen an die Implementierung in das Simulationsmodell. Die Tabelle 4.1 fasst all diese Anforderungen zusammen.

Tabelle 4.1: Anforderungen aufgrund der Produktionsplanung

D1	Kein definierter Detaillierungsgrad der Planung
A1.1	Der geplante Freigabezeitpunkt für jedes Objekt ist zu definieren (Plan-Starttermin).
A1.2	Die Auftragszeit für jedes Objekt ist zu definieren (Plan-Auftragszeit).
A1.3	Der geplante Fertigstellungszeitpunkt für jedes Objekt ist zu definieren (Plan-Fertigstellungstermin).
A1.4	Der Flächenbedarf eines Objektes ist zu definieren.
A1.5	Die Belegungszeit eines übergeordneten Blocks auf dem ASF ist zu definieren (Plan-Belegungszeit).
A1.6	Die Identifikationsnummer für jedes Objekt ist zu definieren.
A1.7	Die geplanten Prozessschritte eines Auftrags sind zu definieren.
D2	Keine systematisch gestufte Detaillierung
A2.1	Es ist ein grober Detaillierungsgrad für die Grobplanung zu definieren.
A2.2	Es ist ein flexibler Detaillierungsgrad für die Zwischenstufen der Planung zu definieren.
A2.3	Es ist ein feiner Detaillierungsgrad für die Detailplanung zu definieren, die eine generische Assoziation von Montageobjekten und Prozessschritten ermöglicht.
A2.4	Die Simulation muss verschiedene Detaillierungsgrade in einem Modell unterstützen.
A2.5	Die flexible und die feine Detaillierung dürfen nicht zu Inkonsistenzen (unpassende Detaillierung) in der Simulation führen.
D3	Vernachlässigung der Anforderungen des Modells der Fertigungssteuerung
A3.1	Zu jedem Plan-Datensatz ist ein Ist-Datensatz zu erzeugen.
A3.2	Jede Einzeltätigkeit des ASM ist nach der genutzten Qualifikation aufzuschlüsseln. Die Qualifikation muss im Datensatz gespeichert oder ableitbar sein.
A3.3	Für Detaillierungen auf der flexiblen oder feinsten Ebene ist eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung für jedes Objekt zu definieren.

Abhängig davon, ob eine gemeinsame oder getrennte Freigabe stattfindet, ist zu definieren, mit welchen Kriterien über die Freigabe entschieden wird (A4.2). Wurde die getrennte Freigabe gewählt, ist unklar, in welcher Reihenfolge das Freigabekriterium für die jeweiligen Teilsysteme ausgewertet wird (A4.3).

Eine Produktion besteht in der Regel aus mehreren Baustellen. Diese sind elastisch verkettet, wenn es möglich ist, Blöcke nach der Fertigstellung auf einer Pufferfläche zwischenzulagern. Ist die Zwischenlagerung nicht möglich, sind die Baustellen starr verkettet. Beide Fälle sollen durch die Simulation abgebildet werden können (A4.4).

Als Besonderheit ergibt sich, dass in der Simulation die starre oder flexible Verkettung beliebig eingestellt werden kann. Hierdurch ist es möglich, das Einzelverhalten einer Baustelle innerhalb eines Systems gekoppelter Arbeitssysteme zu untersuchen, ohne dass eine Beeinflussung durch die umgebenden Arbeitssysteme vorliegt. Soll jedoch das gesamte Produktionssystem mit seinen Wechselwirkungen untersucht werden, muss die Kopplung entsprechend den realen Bedingungen eingestellt werden.

Ebenfalls abhängig von der getrennten oder gemeinsamen Auftragsfreigabe ist die Definition des Plan-Freigabezeitpunkts und die Erfassung des Ist-Freigabezeitpunkts. Für die kombinierte Freigabe reicht es aus, einen gemeinsamen Plan- und Ist-Freigabezeitpunkt zu erfassen. Für die getrennte Freigabe sind dagegen für jedes Teil-Arbeitssystem der Plan- und der Ist-Freigabezeitpunkt zu erfassen (A4.5). Ebenso ist es wichtig, verschiedene Baustellen getrennt voneinander steuern zu können. Einerseits bearbeiten Baustellen unterschiedlicher Stufen (vgl. 3.6) sehr unterschiedliche Arbeitsinhalte und -umfänge. Andererseits entsteht aus ihrer Vernetzung eine Wechselwirkung, die steuerbar sein muss. Aus diesem Grund muss jede Baustelle über eine eigene Auftragsfreigabe verfügen (A4.6).

4.2.2 Ableitung des bestehenden Informationsdefizits

Die Simulation von Fertigungsabläufen auf Baustellen beschränkt sich bisher auf die Abbildung von Produktionsabläufen. Über Parameter können Simulationsanwender die Durchführbarkeit und Zielerreichung des Produktionsplans beeinflussen und so den Plan optimieren. Jedoch ist es bislang nicht möglich, eine Baustelle mit verschiedenen Freigabemethoden zu simulieren. Hieraus ergibt sich Anforderung A5.1, nach der für jedes freizugebende Objekt ein Plan-Starttermin für die Simulationslogik bereitzustellen ist. Da die bestandsregelnde Auftragsfreigabe zu einer Veränderung des Ist-Starttermin gegenüber dem Plan-Starttermins führen kann, muss außerdem der Ist-Starttermin durch die Simulation erfasst werden (A5.2).

Neben den Plan- und Ist-Größen gibt es noch verfahrensspezifische Parameter. Hierzu zählt beispielsweise der Vorgriffshorizont, der bestimmt, um welche Zeitdauer ein Auftrag vorzeitig freigegeben werden darf. Die spezifischen Parameter sind durch den Simulationsanwender festzulegen und der Simulationslogik zur Verfügung zu stellen (A5.3).

Jedes Freigabeverfahren benötigt außerdem ein Freigabekriterium [Löd08, S. 297]. Dies kann ein Termin, der Bestand oder ein Belastungszustand für das Arbeitssystem sein (A5.4). Außerdem ist für jedes Freigabeverfahren der Detaillierungsgrad zu definieren. Dieses Merkmal legt fest, ob ein Auftrag als Ganzes oder für jeden Teilschritt freizugeben ist. Je detaillierter die Freigabe erfolgen soll, umso mehr Informationen über Teilschritte sind notwendig (A5.5).

Da für die verschiedenen Freigabeverfahren unterschiedliche Informationen notwendig sind, sind für jedes Verfahren die bereitzustellenden Informationen auf Vollständigkeit zu prüfen (A5.6). Ist dies nicht gegeben, ist die Anwendung des betroffenen Verfahrens nicht möglich und der Anwender auf den Informationsmangel hinzuweisen.

4.2.3 Anforderungen an die Implementierung der Auftragsfreigabe

Die Defizite D4 und D5 beschreiben, welche Fragestellungen vor der Implementierung einer Auftragsfreigabe zu lösen sind. Die aus diesen Defiziten abgeleiteten Anforderungen fasst Tabelle 4.2 zusammen.

Tabelle 4.2: Anforderungen für die Implementierung einer Auftragsfreigabe

D4	Defizite aufgrund der Arbeitssystemstruktur
A4.1	Es ist zu definieren, ob Aufträge für die Arbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche getrennt oder gemeinsam freizugeben sind.
A4.2	In Abhängigkeit davon, ob eine getrennte oder gemeinsame Freigabe ausgewählt wurde, ist das Freigabekriterium festzulegen.
A4.3	Es ist festzulegen, in welcher Reihenfolge die Freigabekriterien bei einer gemeinsamen Freigabe zu prüfen sind.
A4.4	Es ist festzulegen, ob die Baustellen starr oder elastisch zu verketten sind.
A4.5	Die Freigabezeitpunkte für die Teilarbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter sind klar zu definieren und unabhängig voneinander zu erfassen.
A4.6	Die Freigabelogik muss für jede Baustelle einstellbar sein.
D5	Informationsbezogene Defizite
A5.1	Für jedes gesteuerte Objekt ist der Auftragsfreigabe der Plan-Starttermin zur Verfügung zu stellen.
A5.2	Für jedes gesteuerte Objekt ist der Ist-Starttermin zu erfassen.
A5.3	Der Anwender muss die spezifischen Parameter (z. B. Vorgriffshorizont) für Freigabeverfahren festlegen können.
A5.4	Für jedes Objekt ist abhängig vom Steuerungsverfahren ein passendes Freigabekriterium festzulegen.
A5.5	Für jedes Objekt sind die notwendigen Ressourcen und Prozessschritte festzulegen.
A5.6	Ist eine spezifische Freigabemethode gewählt, ist sicherzustellen, dass alle notwendigen Informationen durch den Anwender bereitgestellt wurden.

4.3 Defizite der Kapazitätssteuerung

Die Kapazitätssteuerung ist die zweite Aufgabe der Fertigungssteuerung (vgl. Abbildung 4.3). Über sie ist die Fertigungssteuerung in der Lage, den Rückstand eines Arbeitssystems zu beeinflussen. Allgemein stellt sich die Frage, wie und in welchem Maß sich die Kapazität eines Arbeitssystems anpassen lässt und wie sich eine Kapazitätssteuerung bei Störungen des Plan-Ablaufs verhält. Diese Fragestellung kann mit der Simulation untersucht werden. Hierfür ist jedoch die Kapazitätssteuerung zu implementieren.

Für die Implementierung bestehen unterschiedliche Defizite. Diese entstehen einerseits aus der Anwendung der Kapazitätssteuerung, die bislang noch nicht systematisch für das Arbeitssystem Baustelle konfiguriert wurde. Andererseits sind die Eigenschaften der Simulationsumgebung zu beachten, um eine valide Implementierung sicherzustellen. Die folgenden Defizite sind für die Implementierung zu beseitigen:

- D6 Definition des Kriteriums der Kapazitätsanpassung mit den zugehörigen Parametern und Informationen.
- D7 Definition des Umfangs der Kapazitätsanpassung mit den zugehörigen Informationen.
- D8 Handhabung von Zeitpuffern in den Durchlaufzeiten.

Die folgenden Abschnitte gehen auf die Defizite detaillierter ein und arbeiten die Anforderungen an das Konzept heraus. Abschnitt 4.3.5 fasst die Anforderungen in Tabelle 4.3 zusammen.

4.3.1 Einfluss des Kapazitätsanpassungskriteriums

Das Kriterium der Kapazitätsanpassung definiert das Merkmal, mit dem über eine Kapazitätsanpassung entschieden wird. Hierfür stehen nach Lödding sieben Kriterien zur Auswahl, die unterschiedlich auf das gesteuerte Arbeitssystem wirken [Löd08, S. 463 f.]. Abhängig von den Arbeitssystemeigenschaften und den Zielen der Kapazitätssteuerung sind für das Simulationsmodell Kriterien zu wählen, die sich an der Erfüllung des Kundenbedarfs orientieren.

Im Gegensatz zu anderen Fertigungsprinzipien gibt es in der schiffbaulichen Baustellenfertigung nur wenige Kunden. Diese kaufen mit großem Vorlauf ein spezifisches Produkt. Trotz des hieraus resultierenden langen Planungs- und Realisierungshorizonts wird der geplante Ablauf durch Änderungswünsche des Kunden häufig geändert. In dieser Hinsicht ähnelt die Baustelle einem Arbeitssystem, das von vielen verschiedenen Kundenaufträgen mit schlecht voraussagbarem Auftragseingang belastet wird. Aufgrund der Änderungswünsche ist auch die Terminabweichung nur schwer prognostizierbar.

Die Kapazitätsanpassung hat somit zwei Aufgaben. Einerseits muss sie in der Lage sein, den Rückständen, die sich aus Störungen im Produktionsablauf ergeben, entgegenzuwirken. Andererseits muss sie in der Lage sein, Rückstände, die aus Änderungswünschen eines Kunden resultieren, aufzuheben zu können. Das hierfür verwendete Kriterium muss beide Aufgaben erfüllen können (A6.1).

Rückstände sind mit einem Plan-Ist-Abgleich der Abgänge zu erfassen. Hierfür ist es notwendig, die Abgangszeitpunkte der Aufträge zu erfassen (A6.2). Eine große Herausforderung im Schiffbau besteht hier in der Erfassung von Rückmeldezeitpunkten, die eine frühzeitige Reaktion auf Abweichungen ermöglichen (A6.3).

Aufgrund der Struktur des Arbeitssystems ist der Rückstand mit mehreren Größen zu erfassen. Für die Fläche (ASF) sind dies Auftragsstunden und Quadratmeter (vgl. Abschnitt 3.2.2). Für den Mitarbeiter (ASM) sind es nur die Auftragszeiten in Stunden, jedoch sind diese qualifikationsbezogen zu erfassen (A6.4).

4.3.2 Einfluss des Detaillierungsgrads auf die Kapazitätssteuerung

Der Detaillierungsgrad der Kapazitätssteuerung legt fest, ob die Steuerung die Kapazität für die gesamte Fertigung (grober Detaillierungsgrad) oder für ein einzelnes Arbeitssystem regelt (feine Detaillierung) [Löd08, S. 465]. Aus dem Detaillierungsgrad resultiert somit ein Einfluss auf die bereits definierte Anforderung A6.3: der Abgang ist so zu erfassen, dass eine schnelle Reaktion auf Plan-Abweichungen möglich wird. Für die Baustellenfertigung bedeutet das, dass ein hinreichend feiner Detaillierungsgrad zu bestimmen ist.

Dieser Detaillierungsgrad ist nur zu erreichen, wenn die Steuerung die Kapazität des Arbeitssystems Mitarbeiter beeinflussen kann (A7.1) und wenn die getrennte Beeinflussung vernetzter Baustellen möglich ist (A7.5).

4.3.3 Einfluss des Umfangs der Kapazitätsanpassung

Über den Umfang der Kapazitätsanpassung definiert der Anwender, in welchem Maß die Kapazität des Arbeitssystems zu erhöhen bzw. zu verringern ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, welche Flexibilität das Arbeitssystem besitzt. Für das ASM sind dies die Flexibilität der Arbeitszeit, der Arbeitsgeschwindigkeit, der Mitarbeiteranzahl sowie die Mehrfachqualifikation von Mitarbeitern

[Löd08, S. 470 f.]. Die Kapazität des Arbeitssystems Fläche wird einerseits durch die Kapazität des ASM beeinflusst. Andererseits lässt sie sich durch Anpassen der zur Verfügung stehenden Fläche verändern. Die zu implementierende Kapazitätssteuerung muss in der Lage sein, diese Anpassungen für das ASM zu realisieren (A7.1). Eine Flächenanpassung ist jedoch kapitalintensiv und meist nicht kurzfristig durchführbar.

Außerdem muss die implementierte Kapazitätssteuerung flexibel auf verschiedene Rückstandssituationen reagieren können (A7.2). Dem Anwender ist hierfür eine Möglichkeit zu geben, verschiedene Kapazitätsanpassungen zu definieren (A7.3). Diese Anpassungen müssen einerseits positive und negative Kapazitätsanpassungen ermöglichen (A7.4). Andererseits müssen sie für jede Baustelle und jede Qualifikation einzeln möglich sein (A7.5).

4.3.4 Einfluss von Planungszeitpuffern

Produkte, die auf Baustellen erstellt werden, sind typischerweise sehr langwierige Projekte und aufgrund des iterativen Design- und Entwicklungsprozesses von vielen Unsicherheiten in den Plan-Abläufen geprägt. Um diese Unsicherheiten ausgleichen zu können, schlägt die Planung den Durchlaufzeiten Zeitpuffer zu. Häufig sind diese Zeitpuffer in den Durchlaufzeiten nicht identifizierbar.

Zeitpuffer dieser Gestalt führen jedoch eine Kapazitätssteuerung ad absurdum: Wenn die Entscheidung über eine Kapazitätsanpassung aufgrund von Terminüberschreitungen getroffen wird, obwohl noch ein Zeitpuffer vorhanden ist, ist diese Entscheidung nur schwer nachvollziehbar und noch schwerer durchzusetzen. In der Produktion entsteht unnötigerweise Unruhe. Eine Kapazitätsanpassung muss somit die vorhandenen Zeitpuffer berücksichtigen (A8.1). Somit sind Zeitpuffer in den Durchlaufzeiten nachvollziehbar darzustellen (A8.2).

4.3.5 Anforderungen an die Implementierung der Kapazitätssteuerung

Die Defizite D6 bis D8 zeigen, welche Herausforderungen für die Umsetzung einer Kapazitätssteuerung in der Baustellenfertigung bestehen. Die aus diesen Defiziten abgeleiteten Anforderungen fasst Tabelle 4.3 zusammen.

Tabelle 4.3: Anforderungen an die Implementierung der Kapazitätssteuerung

D6	Defizite - Definition des Kriteriums der Kapazitätsanpassung
A6.1	Es ist ein Kriterium für die Kapazitätsanpassung zu definieren.
A6.2	Der Abgangszeitpunkt für die Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter ist zu erfassen.
A6.3	Der Abgang ist so zu erfassen, dass eine schnelle Reaktion auf Plan-Abweichungen möglich wird.
A6.4	Für die Fläche ist der Abgang in geleisteten Zeiteinheiten und in Quadratmetern zu erfassen. Für den Mitarbeiter ist der Abgang in Zeiteinheiten je Qualifikation zu erfassen.
D7	Defizite - Definition des Umfangs der Kapazitätsanpassung
A7.1	Die implementierte Kapazitätssteuerung muss in der Lage sein, die Kapazität des ASM zu verändern.
A7.2	Die Kapazitätsanpassung muss flexibel auf unterschiedliche Rückstandssituationen reagieren können.
A7.3	Der Simulationsanwender muss die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung einstellen können.
A7.4	Eine Kapazitätsanpassung sollte die Kapazität sowohl erhöhen als auch senken können.
A7.5	Die Kapazitätsanpassung muss für jede Baustelle getrennt möglich sein.
D8	Defizite, die aus Zeitpuffern in den Auftragszeiten resultieren
A8.1	Zeitpuffer müssen bei der Kapazitätsanpassung berücksichtigt werden.
A8.2	Zeitpuffer in der Auftragszeit sind klar zu definieren und nachvollziehbar darzustellen.

4.4 Defizite der Reihenfolgebildung

Die dritte Aufgabe im *Modell der Fertigungssteuerung* ist die Reihenfolgebildung (vgl. Abbildung 4.3). Sie legt die Reihenfolge fest, in der die Aufträge an einem Arbeitssystem abgearbeitet werden. Für die Reihenfolgebildung gibt es eine Vielzahl an Verfahren. Jedoch empfiehlt Lödging eine einfache und leicht durchzusetzende Reihenfolgeregel zu wählen, statt eine möglichst optimale zu finden [Löd08, S. 444].

Nach Yu ist außerdem der Einfluss der Reihenfolgebildung abhängig von der Länge der Warteschlange [Yu01, S. 54]. Gerade für die Belegung von Baustellen ist diese jedoch in der Regel sehr kurz, weshalb der Nutzen einer aufwendigen Reihenfolgeregelung eher gering sein wird. Für das Arbeitssystem Mitarbeiter besteht jedoch häufig eine umfangreiche Warteschlange, weswegen Reihenfolgeregeln eine wichtige Stellgröße sein können. Für die Implementierung einer Reihenfolgebildung ergeben sich folgende Defizite:

D9 Welche Reihenfolgeregeln sind für das Baustellenprinzip sinnvoll?

D10 Welche Informationen sind für die Anwendung der sinnvollen Reihenfolgeregeln notwendig?

D11 Welche Wirkung haben Reihenfolgeregeln in der Baustellenfertigung?

Die vorgestellten Defizite zielen darauf ab, eine möglichst günstige Reihenfolgeregel für das Arbeitssystem Baustelle zu bestimmen. Hierbei sollen die Zielgrößen des Arbeitssystems berücksichtigt werden. Hierzu zählen die gleichmäßige und möglichst vollständige Nutzung der Flächen, eine möglichst gleichmäßige Nutzung der Ressourcen, zuverlässige Aussagen über die Durchlaufzeiten, niedrige Bestände und eine hohe Termintreue. Außerdem sollen die Reihenfolgeregeln die Flexibilität im Montageablauf möglichst wenig einschränken.

Gerade für sehr komplexe Produkte mit einer Vielzahl an möglichen Montagereihenfolgen ist die Auswahl einer optimalen Reihenfolgeregel eine schwierige Aufgabe. Für die Evaluierung bietet

sich wieder ein Simulationsmodell an. Da in dieser Arbeit jedoch der Fokus auf der Implementierung der Fertigungssteuerung liegt, wird die Bestimmung einer idealen Plan-Reihenfolge für die Baustellenfertigung nicht diskutiert.

Die Termintreue erscheint als logistische Zielgröße so dominant, dass für die Simulation nur eine Reihenfolgeregel ausgewählt wird, welche besonders positiv auf die Termintreue wirkt (vgl. [Löd08, S. 444] zur Wirkung der Reihenfolgeregeln). Für diese Reihenfolgeregel werden die entsprechenden Defizite in der Simulationsumgebung behoben.

4.4.1 Bestimmung einer sinnvollen Reihenfolgeregel

Für die Auswahl einer sinnvollen Reihenfolgeregel sind drei Aspekte zu berücksichtigen:

1. das Arbeitssystem mit seinen Eigenschaften,
2. die Plan-Vorgaben und damit die logistischen Ziele sowie
3. die Montagereihenfolge des Produkts.

Während der Einfluss des Arbeitssystems und der Plan-Vorgaben von der Literatur vielfach diskutiert wird [Löd08, S. 444], ist der Einfluss der Montagereihenfolge in diesem Kontext ein selten beachteter Aspekt. In der Fertigungssteuerung der meisten Fertigungsprinzipien wird davon ausgegangen, dass keine Reihenfolgeabhängigkeit zwischen den einzelnen Produkten besteht. Dies ist im Baustellenprinzip meist nicht der Fall. So bestehen im Schiffbau sowohl zwischen den Komponenten, die auf einer Baustelle im Block verbaut werden, als auch zwischen Blöcken Reihenfolgeabhängigkeiten. Diese sind bei der Reihenfolgebildung und -umsetzung am Arbeitssystem zu beachten.

Für die Implementierung der Reihenfolgeregelung ist somit einerseits sicherzustellen, dass die ausgewählte Regel in der Lage ist, eine definierte Reihenfolgebildung umzusetzen (A9.1). Andererseits darf die ausgewählte Regel nicht die bestehenden Reihenfolgeabhängigkeiten verletzen. Vertauschungen, die aufgrund der Reihenfolgeregel durchgeführt werden, müssen immer zu einer realisierbaren Montagereihenfolge führen (A9.2). Kann die Regel dies nicht sicherstellen, darf sie nur voneinander unabhängige Montageobjekte vertauschen.

Weitere Anforderung an die Reihenfolgeregel ist, dass sie nicht auf einer starren Montagereihenfolge basieren soll (A9.3). Gerade die große Flexibilität in der Abwicklung der Montage auf einer Baustelle ist ein Vorteil des Produktionsprinzips.

4.4.2 Informationsdefizit der Steuerungsinformationen

Jede Reihenfolgeregel sortiert die zu bearbeitenden Aufträge nach einem spezifischen Kriterium. Typische Beispiele sind die Ankunftsreihenfolge (FIFO oder LIFO), der Plan-Start- oder Plan-Endtermin oder der Schlupf. Für die Auswertung und Interpretation dieses Kriteriums werden Informationen aus der Produktionsplanung oder dem Produktionsablauf benötigt. In der Simulation sind diese Informationen der Reihenfolgesteuerung zur Verfügung zu stellen und gegebenenfalls aufzubereiten (A10.1).

Ziel der Reihenfolgeregelung ist es, die Abarbeitungsreihenfolge entsprechend dem Reihenfolgekriterium zu beeinflussen. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Reihenfolge von Objekten in einer Warteschlange vertauschbar ist. Für die Produktion auf der Baustelle ist dies jedoch nicht immer gegeben, weshalb zusätzlich sicherzustellen ist, dass die Reihenfolgeregel einen realisierbaren Montageablauf sicherstellt (A10.2).

Eine besondere Herausforderung liegt hier in der Beeinflussung der Durchführungszeiten durch die Montagereihenfolge. So können sowohl die Variante der Auftragsabwicklung (vgl. Abbildung 3.2) als auch die Veränderung der Montagefolge oder -position die Durchführungszeit deutlich verändern. Die Simulation muss entweder in der Lage sein, dieses Verhalten abzubilden oder derartige Veränderungen verhindern (A10.3).

4.4.3 Notwendigkeit für verschiedene Reihenfolgeregeln

Die beiden Teilarbeitssysteme ASM und ASF unterscheiden sich in ihrer Struktur. Einfluss auf die Auswahl einer Reihenfolgeregeln hat hierbei vor allem die Länge der jeweiligen Warteschlange vor dem Teilarbeitssystem. Während sich vor dem ASM üblicherweise eine längere Warteschlange bildet, ist die Warteschlange vor dem ASF meist sehr kurz. Meist warten nur ein oder zwei Blöcke auf ihre Bearbeitung. Diese befinden sich häufig auf einer Lagerfläche oder auf einer vorgelagerten Fläche. Eine physische Warteschlange liegt in diesem Fall nicht vor. Ergänzend kommt hinzu, dass die Flexibilität beim Aufsetzen der Blöcke eher klein ist. Ein beliebiges Vertauschen in der Reihenfolge ist hier meist nicht möglich.

Deshalb ist es sinnvoll, lediglich für das ASM eine Reihenfolgeregeln auszuwählen. Aufgrund der Länge der Warteschlange kann die Regel hier eine positive Wirkung auf die Termintreue erreichen. Das Vertauschen bei der Abarbeitung von Blöcken ist dagegen eine außergewöhnliche Entscheidung, die für eine spezifische Situation getroffen wird.

Reihenfolgeregeln beeinflussen die Termintreue [Löd08, S. 444 ff.], weshalb eine Reihenfolgeregeln in die Simulation zu implementieren ist (A11.1). Wegen der Einfachheit und des positiven Einflusses auf die Termintreue soll die Reihenfolgeregeln nach Termin erfolgen. Die Implementierung weiterer Regeln ist notwendig, um den Einfluss auf das Baustellenprinzip zu untersuchen (A11.2). Bei der Beurteilung, ob verschiedene Reihenfolgeregeln für das ASM notwendig sind, sind die Anforderungen vorgelagerter bzw. realisierbarer Montagefolgen (A9.2 und A10.2) zu beachten.

Reihenfolgeregeln sind häufig nicht in der Lage, die Montagereihenfolge zu beachten. Deshalb ist es notwendig, die voneinander unabhängigen Montageinhalte zu ermitteln. Beispielsweise besteht keine Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Montageinhalten unterschiedlicher Blöcke (vgl. Abbildung 4.4). Der Mitarbeiter (ASM_n) kann aus den Montageinhalten für V79, A17 und V2 wählen. In diesem Fall kann eine Regel frei nach dem Reihenfolgekriterium entscheiden (A11.3).

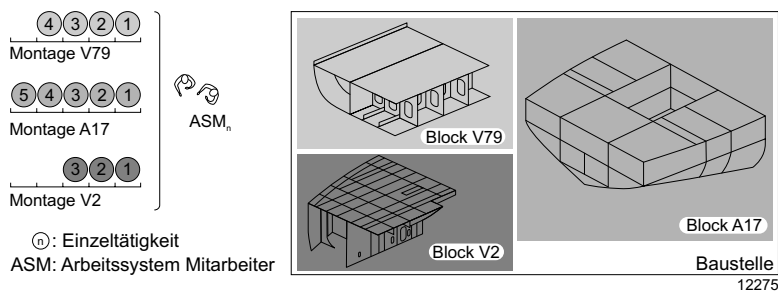


Abbildung 4.4: Reihenfolgeunabhängigkeit zwischen Blöcken

Für die Abarbeitung der Montageinhalte eines Blocks ist die vorgegebene Reihenfolge jedoch zu beachten (Nummerierung der Warteschlange).

4.4.4 Anforderungen an die Reihenfolgebildung

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben die Defizite D9 bis D11 eingehend und leiten Anforderungen für die Implementierung ab. Diese Anforderungen sind in der Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Anforderungen an die Reihenfolgeregelung in der Baustellenfertigung

D9	Für die Baustellenfertigung sind keine sinnvollen Reihenfolgeregeln definiert.
A9.1	Die Reihenfolgeregel muss eine definierte Reihenfolgebildung umsetzen.
A9.2	Die Reihenfolgeregel muss die Montagereihenfolgen, die aufgrund der Produktstruktur entstehen, beachten.
A9.3	Die Reihenfolgeregel der Fertigungssteuerung soll keine starre Montagereihenfolge voraussetzen.
D10	Der Informationsbedarf für die Reihenfolgesteuerung ist unbekannt.
A10.1	Für die Reihenfolgeregelung ist ein Kriterium mit den zugeordneten Informationen festzulegen.
A10.2	Das Reihenfolgekriterium darf nur zu Reihenfolgevertauschungen führen, die zu einer realisierbaren Montagereihenfolge führen.
A10.3	Veränderungen in der Montagereihenfolge und daraus resultierende Veränderungen in der Auftragszeit müssen durch die Simulation abgebildet oder verhindert werden.
D11	Die Wirkung von Reihenfolgeregeln in der Baustellenfertigung ist unklar.
A11.1	Eine Reihenfolgeregel muss in die Simulation implementiert sein.
A11.2	Für eine variable Beeinflussung der Termintreue des Arbeitssystems Mitarbeiter sind unterschiedliche Reihenfolgeregeln nötig.
A11.3	Die Reihenfolgesteuerung muss in der Lage sein, die Verknüpfung zwischen Montageinhalt und Block zu bestimmen, sodass sie Arbeitsinhalte ohne Reihenfolgeabhängigkeiten erkennen kann.

Mit der Bestimmung der Defizite und Anforderungen der Reihenfolgeregelung sind alle Aufgaben im *Modell der Fertigungssteuerung* untersucht worden. In den folgenden Abschnitten wird ein Konzept zur Erfüllung dieser Anforderungen erarbeitet und anschließend implementiert. Anhand dieser wird dann die Leistungsfähigkeit der Fertigungssteuerung für die Baustellenfertigung untersucht.

5 Gestaltung der Fertigungssteuerung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der aktuelle Stand der Technik zur Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung auf Baustellen und die Modellierung der Baustelle auf Basis des *Trichtermodells* beschrieben. In den nun folgenden Abschnitten werden Teilkonzepte zur Implementierung der Fertigungssteuerung erarbeitet. Die Grundlage für die Implementierung bildet das Simulationswerkzeug Plant Simulation von Siemens und das *Simulation Toolkit for Shipbuilding* (STS), ein Bausteinkasten für den Schiffbau. Auf die Funktionalitäten des STS wird bei der Konzeptentwicklung nicht eingegangen (vgl. dazu [Ste06]).

Das Kapitel beginnt mit den Konzepten zur Produktionsplanung (Abschnitt 5.1). Anschließend werden die Konzepte zur Implementierung der Auftragsfreigabe (Abschnitt 5.2) und der Kapazitätssteuerung (Abschnitt 5.3) vorgestellt. Das Kapitel schließt mit der Betrachtung der Konzepte zur Reihenfolgebildung (Abschnitt 5.4).

5.1 Gestaltung der Produktionsplanung

Der Produktionsplan ist ein zentraler Informationsträger der Produktion. Abschnitt 2.5 stellte typische Ansätze für die Erzeugung von Produktionsplänen vor und ging auf die Besonderheiten der Unikatfertigung ein. Die folgenden Abschnitte werden den gewählten Ansatz zur Erzeugung des Produktionsplans im Simulationsmodell vorstellen. Anschließend werden die Konzepte zur Erfüllung der Anforderungen A1.1 bis A3.3 vorgestellt.

5.1.1 Erzeugung von Produktionsplänen für das Simulationsmodell

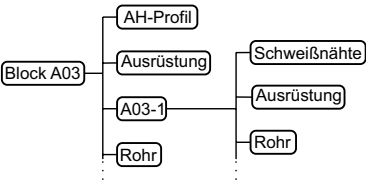
Der für die Anwendung der Steuerungsverfahren notwendige Produktionsplan kann durch verschiedene Verfahren erzeugt werden. Hierbei sind lediglich die Randbedingungen der Steuerungsmethoden zu beachten. Der im Folgenden vorgestellte Generierungsansatz ist eine sehr effiziente und flexible Methode zur Plan-Datenerzeugung.

Die Plan-Generierung hat zum Ziel, ein typisches Produktionsprogramm für eine Fertigung zu erzeugen, ohne dabei alle Teilschritte manuell zu beschreiben. Stattdessen nutzt sie Produktmuster und ein Mengengerüst (vgl. Abbildung 5.1).

Ein Produktmuster beschreibt einen spezifischen Block mit allen Bauteilen und der Montagehierarchie. Jedes Produktmuster (vgl. Anhang A.2) basiert auf den Produktdaten eines realen Schiffes. Das Mengengerüst definiert, welche Produktmuster in welcher Menge und Reihenfolge zu produzieren sind. Aus diesen Informationen erzeugt ein Datengenerator Aufträge und Teile und stellt sie der Simulation zur Verfügung.

Zusätzlich werden Randbedingungen und Prozessdefinitionen in der Simulation bereitgestellt. Randbedingungen, sogenannte Constraints [Bei07, Bei08], beschreiben Abhängigkeiten zwischen Teilen, Prozessen, Terminen und Ressourcen. Auch diese Informationen sind einer realen Produktion entnommen. Mit Hilfe dieser Informationen wurde der Produktionsplan ermittelt, indem die Simulation Einzeltätigkeiten und Produktionshierarchien mit den verfügbaren Ressourcen abgleicht.

Beispielhierarchie eines Produktmusters



Mengengerüst

Pos Nr.	Produktmuster	Menge
1	A03	2
2	V05	7
3	R01	4
4	A03	5
5	R01	

12283

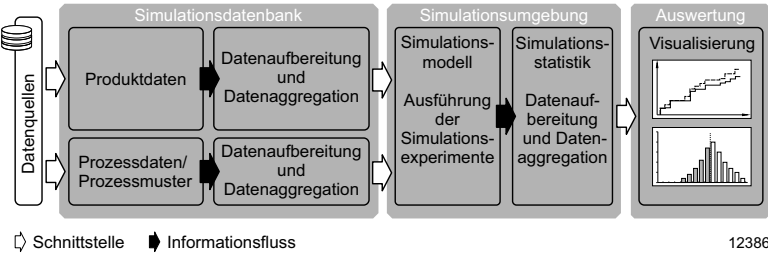
Abbildung 5.1: Eingangsinformation für die Datengenerierung

Einige Werften nutzen die Simulation für die Produktionsplanung. Vorteil dieses Vorgehens ist es, die hohe Komplexität der Produktstruktur zusammen mit den Randbedingungen der Produktion im selben Modell abzubilden. Hierdurch ist die Planungsabteilung in der Lage, einen Produktionsplan mit verhältnismäßig geringem Aufwand zu erstellen bzw. anzupassen. Hierfür ist es jedoch wichtig, den Informationsfluss zwischen Planung und Simulationsmodell abzusichern.

In Abbildung 5.2 ist der typische Informationsfluss dargestellt. Quellen für Informationen sind die EDV-Systeme des Unternehmens. Aus diesen sind regelmäßig die aktuellen Produktdaten zu exportieren, um so den Datenbestand im Simulationsmodell stetig mit dem Konstruktionsstand abzugleichen. Um eine hohe Datenqualität sicherzustellen, sind hierfür eine Datenbankstruktur und Schnittstellen aus dieser Datenbank in das Simulationsmodell umgesetzt worden [Ste11].

Die Datenbank ermöglicht es, die Produktdaten zentral zusammenzuführen, zu aggregieren und vorzuhalten. Die standardisierten Schnittstellen zu den Datenquellen und zum Simulationsmodell verringern Fehler bei der Datenübertragung. Zudem sind durch eine Versionsverwaltung der Daten in der Datenbank Fehler leichter zu identifizieren.

Die Prozessinformationen und -muster sind nur bedingt in den EDV-Systemen eines Unternehmens vorhanden. So sind in Planungssystemen die auszuführenden Einzeltätigkeiten zwar definiert, häufig entspricht diese Beschreibung jedoch nicht den Konventionen des Simulationsmodells. Diesen Mangel beseitigt die Datenaufbereitung und -aggregation, indem sie eine standardisierte Prozessbeschreibung realisiert und hierdurch die Basis für die Auftragsfreigabe schafft. Ohne klar definierte



◇ Schnittstelle ➡ Informationsfluss

12386

Abbildung 5.2: Datenfluss der Prozess- und Produktinformationen für das Modell

Prozesse ist es nicht möglich, Freigabezeitpunkte und Detaillierungsgrad festzulegen oder eine Auslösungslogik zu definieren.

Zunächst sind Parameter und Details aus den Datenquellen zu exportieren. Qualität und Aufwand dieser Exporte hängen jedoch sehr stark davon ab, wie gut Konstruktions-, Planungs- und Simulationssysteme vernetzt sind. Eine Automatisierung der Exporte und die Standardisierung von Schnittstellen reduziert den Aufwand und hilft, die Bereitstellung korrekter Daten abzusichern.

Auf Basis der Parameter und Details sowie der geplanten Produktionsprozesse erzeugt ein Experte anschließend Prozessbeschreibungen. Hierfür zerlegt er beispielsweise eine Montageaufgabe in Arbeitsschritte. Idealerweise kann er hierfür ein generisches Prozessmuster verwenden. Für jeden Arbeitsschritt muss er anschließend eine Bearbeitungsdauer festlegen. Dies kann über eine fixe Zeit oder über einen Algorithmus der folgenden Form geschehen:

$$\text{Algorithmus} = P_1 \cdot P_{10} + \frac{\text{Länge}}{P_2} \cdot P_{11} \cdot \text{Material} \cdot P_{20}$$

Parameter dieser Gleichung wie die Länge oder das Material sind Größen, die den Datenquellen zu entnehmen sind. Die Parameter P_i sind simulationsspezifische Parameter, die jedoch ebenfalls in der Datenbank vorzuhalten sind und von den Eingangsgrößen abhängen können.

Es ist ersichtlich, dass der Aufwand für eine solche manuelle Prozessherzeugung sehr groß ist. Damit einher geht eine hohe Fehleranfälligkeit bei einer manuellen Erzeugung der Prozessbeschreibungen. Verschiedene Beispiele aus der Industrie zeigen jedoch, dass die Simulation den Planungsaufwand verringert [Küh06, S. 53 ff.] [Sen10, Ste06]. Simulationsanwender sind aus diesem Grund bedacht, Prozessbeschreibungen im Unternehmen so zu gestalten, das sich diese direkt in Prozessbeschreibungen für die Simulation umsetzen lassen. Dies reduziert den Aufwand der Simulationsanwendung und verringert die Fehleranzahl bei der Übertragung in die Simulationsmodelle deutlich.

Störungen und Änderungswünsche der Kunden führen zu Abweichungen von dem generierten Produktionsplan, sind aber mit der Simulation leichter in ihrer Auswirkung zu beurteilen. Hierfür sind die Eingangsdaten des Simulationsmodells anzupassen. Anschließend ist die Situation anhand der Simulationsergebnisse zu beurteilen.

Diese Arbeit verwendet den Ansatz der simulationsbasierten Plan-Ermittlung, weil hierdurch ein realistischer Produktionsplan für beliebige Baustellenmodelle zu ermitteln ist. Andere Ansätze zur Ermittlung eines Produktionsplans sind hierdurch nicht ausgeschlossen und lassen sich in gleicher Art und Weise in den folgenden Konzepten verwenden.

5.1.2 Festlegung eines Detaillierungsgrads für die Planung

Der kurz umrissene Ansatz zur Plan-Ermittlung bestimmt verschiedene Kennzahlen und Plan-Größen. Die folgenden Abschnitte gehen auf die wichtigsten dieser Kennzahlen und Plan-Größen ein.

Mit Beginn der Plan-Ermittlung vor Simulationsbeginn werden die Plan-Starttermine für alle Teile und Aufträge auf einen fixen Termin festgelegt. Nach der Simulation des Produktionsablaufs ist den Simulationsstatistiken zu entnehmen, zu welchem Zeitpunkt mit der Bearbeitung der Aufträge und Teile begonnen wurde. Dieser Zeitpunkt wird als Plan-Starttermin definiert (A1.1 ✓). Auf die gleiche Weise kann der Rückmeldung auch der Fertigstellungstermin für jeden Prozessschritt, für jedes Teil und jeden Auftrag entnommen werden. Die Planung leitet hieraus den Plan-Fertigstellungszeitpunkt ab (A1.3 ✓).

Für die Auftragszeit wurde in Abschnitt 3.1.1 bereits eine Berechnungsvorschrift (Gleichung 3.4) eingeführt. Entsprechend dieser sind die Auftragszeiten unter Berücksichtigung des Prozess-

Bauteil- und Qualifikationsbezugs zu addieren. In den Rückmeldedaten der Simulation ist für jeden Prozessschritt der Start- und der Endtermin gespeichert. Ausgehend von diesen wird die Auftragszeit für jede Aggregationsstufe berechnet (A1.2 ✓). Um eine möglichst große Flexibilität bei der Auswertung der Informationen zu erreichen, ist es möglich, die Daten für jedes ASM (bzw. Qualifikation) und jedes ASF getrennt auszuwerten.

Die Plan-Belegungszeit ist mit zwei Ansätzen zu ermitteln: Einerseits kann sie aus dem Starttermin des ersten Prozessschrittes eines Blocks und dem Endtermin des letzten Prozessschrittes berechnet werden. Andererseits ist sie über Zu- und Abgang eines Blocks auf die Fläche zu ermitteln. Das hier vorgestellte Konzept verwendet den zweiten Ansatz (A1.5 ✓).

Um die Anforderung A1.4 zu erfüllen, wird der Flächenbedarf eines Blocks als Eingangsdatensatz bereitgestellt. Geometrische Beschreibungen lassen sich aus CAD-Quell-Systemen in die Simulation importieren. Im Simulationsmodell werden sie über Länge, Breite und Höhe definiert (A1.4 ✓).

Die eindeutige Identifikation eines Teils oder Blocks ergibt sich aus der Identifikationsnummer (Identnummer) des Objekts, die im Produktmuster festgelegt wird und einer fortlaufenden Nummer, die der Daten-Generator erzeugt. Über die fortlaufende Nummer lassen sich gleiche Teile für verschiedene Instanzen eines Produktmusters unterscheiden (A1.6 ✓). Die Identnummern wiederum bilden die Struktur der Produkthierarchie ab.

Die notwendigen Prozessschritte eines Teils werden über zwei Ansätze definiert: Für Ansatz eins sind Prozessmuster zu definieren [Kön11, S. 4 ff.]. Diese bilden typische Abläufe ab, die an einer Vielzahl an Teilen umzusetzen sind. Ein solches Prozessmuster beschreibt beispielsweise, dass für die Montage einer Pumpe

1. Montagepunkte und Rohranschlüsse vorzubereiten sind,
2. die *Pumpe* zu *positionieren* und zu *montieren* ist,
3. die *Pumpe* *angeschlossen* werden muss.

Mit einer Typisierung kann dieses Prozessmuster anschließend mit Bauteilen des Typs *Pumpe* assoziiert werden. Das Teil *Pumpe* besitzt hierfür verschiedene Parameter, welche die Teilprozesse des Musters beeinflussen. Beispielsweise beeinflusst das Gewicht die Auftragszeit des Teilprozesses *Pumpe positionieren* bzw. *montieren* und die Anzahl der Anschlüsse wirkt sich auf die Auftragszeit des Teilprozesses *Pumpe anschließen* aus.

Für Ansatz zwei ist ein spezifischer Prozess für jeden Montageschritt zu definieren. Hierfür ist es nicht nötig, Parameter für die Prozessbeeinflussung zu definieren. Stattdessen muss ein Fachmann die Dauer präzise abschätzen. Dieser Ansatz wird für grobe Prozessbeschreibungen oder für sehr seltene, nicht systematisierbare Tätigkeiten genutzt. Alle Prozesse sind, gleich ob es sich um Prozessmuster oder spezifische Prozesse handelt, in der Montagestrategie- und Prozesszeitentabelle zu definieren. Die Anforderung, Prozessschritte planen zu können, ist somit erfüllt (A1.7 ✓).

Neben diesen Kerninformationen verwendet die Simulation noch viele weitere Informationen. Eine Übersicht der wichtigsten Tabellen und ihrer Inhalte ist Anhang A.1 zu entnehmen. Auf die Verknüpfung der einzelnen Tabellen und Informationen und darauf, wie diese in der Simulation für die Prozessabbildung verwendet werden, geht Abschnitt 5.2.2 ein.

5.1.3 Konzept für eine systematisch gestufte Detaillierung

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben, wie der Informationsbedarf für die Planung erfüllt wurde. Hierbei wurde jedoch nicht auf die Detaillierung der Informationen eingegangen. Für die Prozessbeschreibungen ist sowohl eine feine als auch eine grobe Beschreibung denkbar.

Die Modellierung im Simulationsmodell setzt lediglich voraus, dass für jedes zu montierende Objekt ein Prozess mit einer zugehörigen Qualifikation definiert wird. Jedoch ist nicht festgelegt, was ein Objekt ist. Somit ist es möglich, das gesamte Schiff als ein Objekt zu definieren, für das der Prozess *Schiff produzieren* auszuführen ist. Als anderes Extrem kann jede Tätigkeit, die für die Produktion notwendig ist, als ein Prozess definiert werden. Somit ist ein flexibler Detaillierungsgrad gegeben (A2.2 ✓).

Anforderung A2.1 bedingt eine grobe Detaillierung, die in der frühen Angebotsphase für die Kapazitätsabschätzung verwendet werden kann. In der schiffbaulichen Planung verwendet man typischerweise eine Blockteilung. Der Planer unterteilt hierfür den Schiffskörper in Quader und definiert für jeden Quader, wann dieser und die Subquader auf welchen Baustellen zu fertigen sind.

Diese Definition ermöglicht jedoch noch keine vollständige Simulation des Produktionsablaufs, da bereits in der Vorfertigung (vgl. Abbildung 4.2, S. 57) Baugruppen auf Bauplätzen erzeugt werden. Diese werden erst später zu Blöcken gefügt. Somit ist es notwendig, zumindest über Pseudo-Baugruppen eine Detaillierung zu erstellen, die auch die Simulation der Vorfertigung ermöglicht. Daten hierfür sind mit wenig Aufwand zu erzeugen, da sich gerade in dieser Phase der Unikatcharakter des Schiffs noch nicht stark auswirkt. Aus diesem Grund ist es möglich, Daten von älteren Schiffen zu verwenden oder mit anderen Schätzungen zu arbeiten.

Die flexible Detaillierung unterstützt auch die Modellierung der Prozesse auf dieser groben Ebene. Somit lassen sich die Prozesse für die beschriebene Blockteilung und die Pseudo-Baugruppen in der Vorfertigung abbilden. Anforderung A2.1 ist somit erfüllt (A2.1 ✓).

Für eine feinere Detaillierung liegt eine Vielzahl an Objekten mit jeweils meist mehreren Prozessschritten vor. Die flexible Detaillierung ermöglicht es zwar, diese Daten zu modellieren, jedoch ist dies mit großem Aufwand für die Erstellung und Zuordnung verbunden. Der Hauptaspekt für die Erfüllung der Anforderung liegt daher auf der generischen Assoziation von Prozessen und Objekten, um so den Erzeugungsaufwand zu minimieren.

Im Simulationsmodell wird diese über die Typisierung von Objekten und eine constraint-basierte Zuordnung von Prozessen/Prozessmustern umgesetzt. Constraints definieren hierbei, welche Prozesse/Prozessmuster mit welchen Objekttypen verknüpft sind. Über Parameter, die jedes Objekt entsprechend seiner Typisierung besitzt, ist der Prozess/das Prozessmuster zusätzlich zu parametrieren. Constraints sind elementare Bestandteile der flexiblen Detaillierung, da sie die generische Assoziation ermöglichen. Zusätzlich sichern sie eine große Flexibilität bei der Detaillierung, da sie keine starren Abhängigkeiten definieren (A2.3 ✓).

Die Forderung, verschiedene Detaillierungsgrade in einem Modell nutzen zu können, beruht auf dem iterativen Produktentstehungsprozess (vgl. Abbildung 2.3). Mit der flexiblen Detaillierung ist es jederzeit möglich, sowohl ein Objekt als auch einen Prozess/ein Prozessmuster zu ersetzen. Das Objekt ist in diesem Fall eine Baugruppe, die in Subbaugruppen oder Teile zerlegt wird. Der Prozess/das Prozessmuster ist die Einzeltätigkeit zur Realisierung des größeren Objektes und wird durch die feinere Beschreibung der Einzeltätigkeiten zur Realisierung der Baugruppen/Teile ersetzt. Die Forderung, verschiedene Detaillierungsgrade in einem Simulationsmodell zu ermöglichen, ist somit erfüllt (A2.4 ✓).

Die Forderung, verschiedene Detaillierungsgrade in einem Modell nutzen zu können, führt schnell zu Inkonsistenzen bei der Prozessmodellierung. Typischerweise treten diese auf, wenn Prozessabläufe detailliert werden (vgl. Abbildung 5.3). Hierbei kann es zu Überschneidungen zwischen Teilschritten kommen. Fall 1 zeigt zwei aufeinander folgende grobe Prozesse, von denen nur einer detailliert wurde. Hierbei ist der Prozess *Aggregatanschlüsse vorbereiten* falsch modelliert worden, wodurch es zu einer Überschneidung mit dem groben Prozess *Aggregat anschließen* kommt.

In Fall 2 sieht der Prozess *Rohr montieren* implizit vor, dass die Prozessschritte *Halter montieren* parallel von mehreren Mitarbeitern bearbeitet werden. Bei der Detaillierung wurde dieses nicht

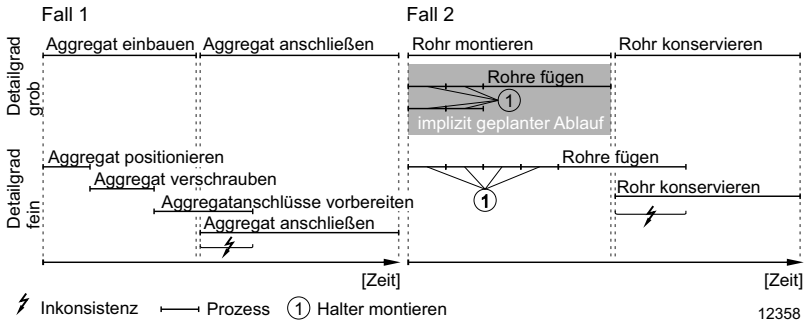


Abbildung 5.3: Entstehung von Inkonsistenzen im Verlauf der Prozessdetaillierung

berücksichtigt, weswegen es zu einer Verlängerung der Durchführungszeit kommt und zwischen den Prozessen *Rohr fügen* und *Rohr konservieren* eine Inkonsistenz entsteht. Ansätze, um Inkonsistenzen zu verhindern, sind:

- ☐ sorgfältige Modellierung,
- ☐ constraint-basierte Modellierung der Prozessschritte,
- ☐ automatisierte Evaluierung der veränderten Prozessmodellierung,
- ☐ grafische Unterstützung bei der Prozessmodellierung.

Durch die *sorgfältige Modellierung* wird die Qualität der Prozessmodellierung gesteigert. Weniger Fehler erzeugen weniger Aufwand für Fehlerbeseitigungsmaßnahmen und steigern die Wahrscheinlichkeit, eine Modellierung mehrfach verwenden zu können. Beides wirkt positiv auf die Produktivität bei der Detaillierung. Eine vertiefende Übersicht zu Produktivität, Qualität und Qualitätssteigerung im Softwareengineering gibt Jones [Jon94, S. 426 ff.].

Bei der constraint-basierten Modellierung sind die Prozessschritte durch Regeln und nicht durch eine starre Reihenfolge verknüpft. Hierdurch lassen sich zwar Überschneidungen zwischen den Hauptschritten verhindern, fehlerhafte Detaillierungen wie im Prozessschritt *Rohr montieren* (Fall 2) jedoch nicht. Hierfür ist sicherzustellen, dass die Regeln die Parallelisierung abbilden. Die constraint-basierte Modellierung vereinfacht zusätzlich die Wiederverwendung von Modellen, was nach Brooks erstrebenswert ist [Bro11, S. 222].

Die automatisierte Evaluierung nutzt ein Simulationsmodell, um modellierte Prozesse unterschiedlicher Detaillierungsgrade miteinander zu vergleichen. Weicht die feine Detaillierung erheblich von den Eckterminen der groben ab, wird der Planer aufgefordert, diesen Prozessschritt manuell zu prüfen. Prüfparameter für den Vergleich sind beispielsweise die Durchlaufzeit, die errechnete Auftragszeit sowie die genutzten Ressourcen.

Der vierte Ansatz nutzt Visualisierungen, um den Planer bei der Prozessmodellierung zu unterstützen. Ein Prozess wird in der Simulation durch eine Gleichung mit verschiedenen Parametern abgebildet. Der Planer, der diese Gleichungen erstellt, muss die Assoziation von Gleichung, Parametern, betroffenem Bauteil sowie notwendigen Ressourcen und Randbedingungen gedanklich

ausführen. Repräsentationen, die Produkt, Terminplanungen und Meta-Informationen [Löd12, S. 36 f.] sowie Constraints [Mar11, S. 467] für den Planer bereitstellen, unterstützen diesen Prozess und verringern das Auftreten von Fehlern. Für das hier vorgestellte Simulationsmodell wurden die Ansätze *sorgfältige Modellierung* und die *constraint-basierte Modellierung* genutzt (A2.5 ✓).

5.1.4 Anforderungen an die Erfüllung der Modellierung

Mit der Beseitigung der Defizite *kein definierter Detaillierungsgrad in der Planung* und *keine systematisch gestufte Detaillierung* liegen Plan-Daten vor, die sich sowohl an das Informationsangebot der Produktentwicklung als auch an den Informationsbedarf der Fertigungssteuerung anpassen lassen. In den folgenden Abschnitten werden nun Teilkonzepte erarbeitet, um die Anforderungen der Fertigungssteuerung in der Planung zu berücksichtigen.

Der Vergleich von Plan- und Ist-Daten bildet die Grundlage für viele Steuerungsentscheidungen. Das Simulationsmodell ermittelt Ist-Zugang und -Abgang auf dieselbe Weise wie zuvor Plan-Zugang und -Abgang: Bei Freigabe eines Objekts erfasst die Fertigungssteuerung den Termin als Ist-Zugang mit der zugeordneten Auftragszeit. Zusätzlich dokumentiert sie den Flächenbedarf und die verwendeten Qualifikationen. Mit Beendigung eines Prozessschritts dokumentiert sie wiederum den Termin mit der Dauer des jeweiligen Prozessschrittes. Hierdurch entsteht ein zum Plan-Datensatz äquivalenter Ist-Datensatz, der lediglich in den Beträgen abweichen kann (A3.1 ✓).

Um die Auswertung der Daten zu erleichtern, besteht die Forderung, jede Einzeltätigkeit, aufgeschlüsselt nach ihrer Qualifikation, auszuwerten. In den Rückmelde-daten des Simulationsmodells ist jeder Prozessschritt (Einzeltätigkeit) mit der ausführenden Qualifikation verknüpft. Über eine entsprechende Methode lassen sich diese Daten sowohl auf der Qualifikations- als auch Baustelenebene aggregieren. In Kombination mit dem zuvor beschriebenen Teilkonzept erfüllt dies die Anforderung (A3.2 ✓).

Mit den bis hier bestehenden Modellierungsansätzen lässt sich eine Vielzahl an Prozessen beliebig detailliert beschreiben und modifizieren. Anforderung A3.3 ergänzt dies um die Forderung nach einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung für jedes Objekt. Durch den constraint-basierten Modellierungsansatz ist diese Anforderung bereits auf jeder Detaillierungsebene erfüllt (A3.3 ✓). Besonders vorteilhaft ist die flexible Definition von Vorgängern und Nachfolgern, die keine starre Sequenz erzeugt. Lediglich wenn der Entscheidungsraum durch Constraints vollständig eingeschränkt wird, entsteht eine solche starre Sequenz. Auf wichtige Aspekte für diesen Fall geht Abschnitt 5.4 ein.

5.1.5 Erfüllung der Anforderungen an die Produktionsplanung

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben, mit welchen Teilkonzepten sich die Anforderungen an die Produktionsplanung erfüllen lassen. Tabelle 5.1 fasst die Anforderungen und ihren Erfüllungsgrad zusammen.

Tabelle 5.1: Umsetzung der Anforderungen aufgrund der Produktionsplanung

D1	Kein definierter Detaillierungsgrad der Planung	
A1.1	Der geplante Freigabezeitpunkt für jedes Objekt ist zu definieren (Plan-Starttermin).	✓
A1.2	Die Auftragszeit für jedes Objekt ist zu definieren (Plan-Auftragszeit).	✓
A1.3	Der geplante Fertigstellungszeitpunkt für jedes Objekt ist zu definieren (Plan-Fertigstellungstermin).	✓
A1.4	Der Flächenbedarf eines Objektes ist zu definieren.	✓

weiter auf der nächsten Seite

A1.5	Die Belegungszeit eines übergeordneten Blocks auf dem ASF ist zu definieren (Plan-Belegungszeit).	✓
A1.6	Die Identifikationsnummer für jedes Objekt ist zu definieren.	✓
A1.7	Die geplanten Prozessschritte eines Auftrags sind zu definieren.	✓
D2 Keine systematisch gestufte Detaillierung		
A2.1	Es ist ein grober Detaillierungsgrad für die Grobplanung zu definieren.	✓
A2.2	Es ist ein flexibler Detaillierungsgrad für die Zwischenstufen der Planung zu definieren.	✓
A2.3	Es ist ein feiner Detaillierungsgrad für die Detailplanung zu definieren, der eine generische Assoziation von Montageobjekten und Prozessschritten ermöglicht.	✓
A2.4	Die Simulation muss verschiedene Detaillierungsgrade in einem Modell unterstützen.	✓
A2.5	Die flexible und die feine Detaillierung dürfen nicht zu Inkonsistenzen (unpassende Detaillierung) in der Simulation führen.	✓
D3 Vernachlässigung der Anforderungen des Modells der Fertigungssteuerung		
A3.1	Zu jedem Plan-Datensatz ist ein Ist-Datensatz zu erzeugen.	✓
A3.2	Jede Einzeltätigkeit des ASM ist nach der genutzten Qualifikation aufzuschlüsseln. Die Qualifikation muss im Datensatz gespeichert oder ableitbar sein.	✓
A3.3	Für Detaillierungen auf der flexiblen oder feinsten Ebene ist eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung für jedes Objekt zu definieren.	✓

Aufbauend auf den hier vorgestellten Konzepten und Informationen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben, wie die Anforderungen an die Auftragsfreigabe (Abschnitt 5.2), die Kapazitätssteuerung (Abschnitt 5.3) und die Reihenfolgebildung (Abschnitt 5.4) umgesetzt wurden.

5.2 Gestaltung der Auftragsfreigabe

Die Aufgabe der Auftragsfreigabe ist festzulegen, ab welchem Zeitpunkt ein Auftrag bearbeitet werden darf [Löd08, S. 297]. In der Baustellenfertigung legt sie somit einerseits fest, zu welchem Zeitpunkt ein Auftrag dem Arbeitssystem Fläche (ASF) zugeht. Andererseits bestimmt sie, wann ein Auftrag für die Bearbeitung durch das Arbeitssystem Mitarbeiter (ASM) zur Verfügung steht. Die Auftragsfreigabe für das Fertigungsprinzip Baustelle unterscheidet sich somit von Fertigungsprinzipien wie der Werkstatt- oder Fließfertigung. In diesen Fertigungsprinzipien sind zwar auch für verschiedene Arbeitssysteme Freigabeentscheidungen zu treffen, jedoch werden diese Arbeitssysteme von Aufträgen sequenziell durchflossen. Die folgenden Abschnitte grenzen zunächst den Begriff *Auftrag* im Kontext der Baustellenfertigung ein und leiten anschließend ein Teilkonzept zur Erfüllung der Anforderungen für die Implementierung der Auftragsfreigabe her.

5.2.1 Auflösen der arbeitssystemstrukturbedingten Defizite

Der Begriff Auftrag bezeichnet eine Plan-Folge von Produktionsschritten zur Erstellung eines Objekts. Bei dem Objekt kann es sich um ein Halbzeug, eine Baugruppe oder ein Endprodukt handeln. In einem Auftrag sind Auftragszeiten, Plan-Start- und -Endtermine sowie die verwendeten Ressourcen, das Material und die ausführenden Arbeitssysteme festgelegt. Diese Beschreibung gilt unabhängig vom Fertigungsprinzip.

Unterschiede bestehen im Detailgrad der Beschreibung sowie im Umfang der zu einem Auftrag zusammengefassten Produktionsschritte. So sind im Fließ-, Insel- und Werkstattprinzip Auftragszeiten teilweise sekundengenau festgelegt und Produktionsschritte teilweise auf Basis von MTM-Analysen beschrieben. Aufträge im Baustellenprinzip umfassen dagegen häufig mehrere Hundert Stunden.

Unterschiedliche Qualifikationen bearbeiten einen Auftrag parallel und Produktionsschritte werden nur sehr grob beschrieben.

Diese Eigenschaften haben zu den bereits beschriebenen Modellierungsansätzen (vgl. Abschnitt 3.1.1 und 3.2.1) geführt. Durch die flexible Detaillierung der Auftragsdaten ist es nun möglich, sowohl den Ansprüchen der Fertigungssteuerung in frühen als auch in späten Phasen eines Schiffbauprojektes zu begegnen. Plan- und Ist-Daten lassen sich nun in einem ähnlichen Detailgrad wie in den anderen Fertigungsprinzipien bereitstellen. Entsprechend der Anforderung A4.1 ist jedoch aufgrund der gekoppelten Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter festzulegen, ob die Freigabe getrennt oder gemeinsam erfolgen soll.

Gestaltung der Struktur und des Kriteriums für die Freigabe

Die Freigabe eines Blocks direkt mit der Freigabe aller Objekte für das ASM umzusetzen, bedeutet, dass eine große Menge an Bauteilen und damit umfangreiche Auftragszeiten freigegeben werden. Es ist jedoch Ziel der Fertigungssteuerung, einerseits den Arbeitsfortschritt besser nachvollziehen zu können und andererseits zeitnah auf den Arbeitsablauf einzuwirken. Umfangreiche Auftragszeiten machen die Nachvollziehbarkeit schwierig und freigegebene Aufträge sind nicht mehr mit der Stellschraube Zugang zu beeinflussen.

Eine weitere Besonderheit ist, dass eine Freigabe für die Fläche zunächst nur eine Kapazitätsbelegung zur Folge hat, da das Arbeitssystem sowohl Lager- als auch Bearbeitungsfläche sein kann. Die Freigabe bindet somit nicht direkt Mitarbeiterkapazitäten, jedoch erhöht sich der Bestand an Auftragszeit auf der Baustelle. Im Gegensatz hierzu führt eine Freigabe für das ASM zu einer Belegung der Mitarbeiterkapazität. Als Eigenheit der Baustellenfertigung im Schiffbau sei darauf hingewiesen, dass die Freigabe eines Bauteils meist nicht zu einer Veränderung der Flächenbelegung führt. Bauteile werden meist in einem Block verbaut und verbrauchen deshalb keine weiteren Flächen. Um sowohl umfangreiche Auftragszeiten zu vermeiden als auch die Steuerung über die Stellgröße Zugang zu ermöglichen, sind die Aufträge für beide Arbeitssysteme getrennt freizugeben (A4.1 ✓).

Da die Freigabe für beide Arbeitssysteme getrennt erfolgt, ist für jede Freigabe ein Freigabekriterium festzulegen (Anforderung A4.2). Für das Arbeitssystem Mitarbeiter sind bisher die sofortige Auftragsfreigabe, die Freigabe nach Plan-Starttermin und zwei bestandsregelnde Auftragsfreigaben nutzbar. Weitere Verfahren lassen sich jedoch implementieren.

Die sofortige Auftragsfreigabe ist über einen Plan-Starttermin umgesetzt, der vor dem Beginn des Simulationszeitraums liegt, und findet nur für die Erzeugung des Produktionsplans Anwendung. Zur Simulationslaufzeit entstehen keine unbekannten Aufträge, weshalb sich die sofortige Auftragsfreigabe mit einer Freigabe nach Plan-Starttermin abbilden lässt.

Die Freigabe nach Plan-Starttermin gibt Aufträge entsprechend der in der Plan-Ermittlung bestimmten Zeitpunkte frei.

Für die bestandsregelnde Auftragsfreigabe wurde CONWIP in zwei Ausprägungen implementiert. Auf das Verfahren und die spezifischen Freigabekriterien geht der Abschnitt 5.2.2 detaillierter ein. Die Anforderung, ein Freigabekriterium für die Auftragsfreigabe zu definieren, ist somit für das Arbeitssystem Mitarbeiter erfüllt.

Das Arbeitssystem Fläche verwendet die sofortige Auftragsfreigabe und die Freigabe nach Plan-Termin. Beide Steuerungsmethoden lassen sich jedoch nicht gezielt auswählen, sondern sind mit der Modellstruktur verknüpft. So nutzt die Funktion Plan-Ermittlung die sofortige Auftragsfreigabe. Auch in diesem Fall bedeutet die sofortige Auftragsfreigabe, dass alle Blöcke zum Beginn des Simulationszeitraums zur Verfügung stehen und entsprechend ihrer Reihenfolge in der Auftragsliste abgearbeitet werden.

Im Verlauf eines Simulationsexperiments stellt die Steuerung Blöcke nach den Plan-Terminen bereit. Ein Block gilt in diesem Fall jedoch als *nicht freigegeben*, wenn es nicht gleichzeitig auch zur Einlagerung in die Fläche kommt. Auf der Fläche können sich keine Warteschlangen bilden. Steht keine Fläche zur Verfügung, kann der Block nicht eingelagert werden, steht somit nicht zur Bearbeitung zur Verfügung und ist aus diesem Grund auch nicht als freigegeben verbucht. Das Arbeitssystem Fläche verfügt somit über eine implizite Bestandskontrolle, die über die bereitgestellte Fläche zu beeinflussen ist.

Für die Erfassung von Zugängen folgt hieraus, dass zum Plan-Starttermin ein Auftrag dem System Fläche zur Verfügung steht, jedoch erst als freigegeben verbucht wird, wenn auch genügend freie Fläche für die Einlagerung zur Verfügung steht. Für beide Arbeitssysteme sind somit die Freigabekriterien definiert (A4.2 ✓).

Die getrennte Freigabe von Aufträgen für die beiden Arbeitssysteme macht die Anforderung A4.3 obsolet. Dennoch ist es sinnvoll, eine Entscheidungsreihenfolge festzulegen, da nur so eine nachvollziehbare Implementierung möglich wird. Einfluss auf die Entscheidung, ob die Freigabe zuerst für das Arbeitssystem Fläche oder Mitarbeiter getroffen wird, haben die folgenden Faktoren:

1. Ist klar bestimmbar, welches der beiden Arbeitssysteme das Engpasssystem ist?
2. Ist klar bestimmbar, welches der beiden Arbeitssysteme flexibler reagieren kann?
3. Blockiert eines der beiden Arbeitssysteme das andere?

Die Frage, welches der Arbeitssysteme das Engpasssystem bildet (1.), ist nicht allgemeingültig zu beantworten. Einerseits besteht häufig ein Mangel an Fläche und innerhalb eines Blocks ist es aus Platzgründen und wegen der Eigenschaften einzelner Fertigungsverfahren nicht möglich, beliebig viel Personal einzusetzen. Eine späte Festlegung bei der Flächenbelegung wäre also von Vorteil. Andererseits kommt es auch häufig vor, dass nicht genügend Mitarbeiter mit den notwendigen Qualifikationen zur Verfügung stehen. Einen großen Einfluss auf die Definition des aktuellen Engpasssystems haben die Arbeitsinhalte, weshalb aus diesem Faktor nur bedingt eine Freigabereihenfolge ableitbar ist.

Vergleicht man die Anpassbarkeit beider Arbeitssysteme, ist klar, dass das Arbeitssystem Mitarbeiter nicht beliebig schnell und beliebig umfangreich in seiner Kapazität zu verändern ist. Jedoch ist die Erweiterung und Verringerung des Arbeitssystems Fläche sowohl kostenintensiver als auch zeitaufwendiger als für das ASM (2.). Somit spricht viel dafür, zunächst die Freigabeentscheidung auf der Baustelle zu treffen, um anschließend noch das Flexibilitätspotenzial beim ASM nutzen zu können.

Ob eines der beiden Arbeitssysteme blockierend auf das andere Arbeitssystem wirkt, ist klar zu beantworten (3.). Ein voll belegtes Arbeitssystem Fläche enthält Blöcke, die wiederum zu realisierende Einzeltätigkeiten enthalten. Somit stehen die Arbeitsinhalte für das Arbeitssystem Mitarbeiter grundsätzlich zur Verfügung. Lediglich der Mangel an unvollendeten Blöcken auf der Baustelle führt zu einer Blockade des Arbeitssystems Mitarbeiter. In diesem Fall bestehen jedoch Probleme in der Lieferkette zwischen verschiedenen ASF, die nicht auf den einzelnen ASF zu beeinflussen sind.

Stehen jedoch keine Mitarbeiter zur Verfügung, ist die Bearbeitung der auf der Fläche befindlichen Blöcke blockiert. Die Einlagerung weiterer Blöcke führt lediglich zu einer Bestandserhöhung auf der Fläche und damit auch im Bestand der Einzeltätigkeiten für das ASM. Im schlimmsten Fall blockiert der Bestand an Blöcken die Fläche vollständig. In diesem Fall ist es nur mit zusätzlichem Aufwand möglich, den Bestand an Einzeltätigkeiten zu verändern. Jedoch stehen immer Aufträge zur Verfügung, die durch das ASM zu bearbeiten sind. Das ASM wird durch das ASF somit nur blockiert, wenn die ASF:

- ☐ nur mit fertigen Blöcken belegt ist oder
- ☐ mit den falschen Blöcken belegt ist.

In beiden Fällen besteht ein Problem in der Belegung verketteter ASF. Dieses ist für alle ASF zu lösen. Blockaden des ASM aufgrund dieser beiden Fälle sind bei der Festlegung der Freigabereihenfolge nicht zu berücksichtigen, da sie durch die Freigabereihenfolge nicht zu beeinflussen sind. Vielmehr besteht ein generelles Reihenfolgeproblem bei der Freigabe für das gekoppelte Arbeitssystem Baustelle.

Einfluss auf die Freigabereihenfolge haben jedoch die Blockade aufgrund des ASM und die hohe Flexibilität des ASM. Aufgrund dieser Faktoren (2. & 3.) erfolgt die Freigabe zunächst für das ASF und anschließend für das ASM. Über den blockierenden Faktor wird somit möglichst spät entschieden und es ist einfacher, auf Abweichungen zu reagieren. Die Reihenfolge, in der die Freigabekriterien für ASF und ASM zu prüfen sind, ist somit festgelegt (A4.3 ✓).

Kopplung von Baustellen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Abläufe und Einflussfaktoren zeigen, welche Probleme bei der Freigabe von Teilen bzw. Blöcken im Schiffbau bestehen. Diese Herausforderungen werden durch die Vernetzung mehrerer Baustellen zu einem Gesamtarbeitssystem zusätzlich vergrößert. Aus dieser Vernetzung folgte bereits die Anforderung A4.4, nach der festzulegen ist, ob Baustellen starr oder elastisch zu verkettet sind.

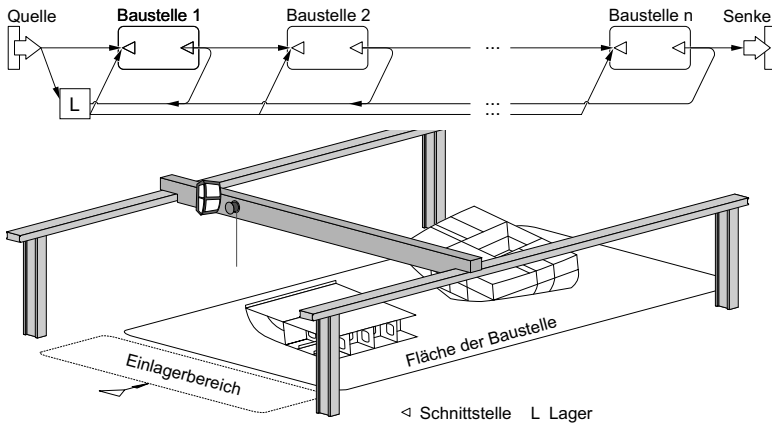
Die starre Verkettung von zwei Baustellen führt zu einer starken Abhängigkeit zwischen beiden Baustellen, da das Umlagern auf eine Folgebaustelle nur möglich ist, wenn genug Fläche auf dieser bereitsteht. Dieser Einfluss macht es schwierig, Fehler im Produktionsablauf zu identifizieren, was gegen eine starre Verknüpfung spricht. Außerdem verfügen reale Baustellenfertigungen häufig über ASFs, die zumindest teil- und zeitweise als Lagerflächen verwendet werden können, oder über explizit ausgewiesene Lagerflächen. Dies spricht für die Nutzung einer flexiblen Verkettung mehrerer Baustellen.

Im vorliegenden Simulationsmodell wurden die Baustellen elastisch verknüpft. Fertige Blöcke verlassen eine Baustelle und werden in einem virtuellen Lager eingelagert. Aus diesem Lager erfolgt anschließend die Bereitstellung für die nachfolgende Baustelle. Das Lager wurde in Form einer unbegrenzten Liste ohne Flächenbedarf für die eingelagerten Blöcke realisiert. Sowohl der Transport in das Lager als auch aus dem Lager benötigt keine Transportressourcen oder Zeit.

Diese Modellierung entspricht nicht den realen Bedingungen einer Baustellenfertigung, für die Restriktionen bei den zur Verfügung stehenden Flächen, Transportkapazitäten sowie den Transportdauern bestehen. Diese leiten sich jedoch immer aus den Werftspezifika ab und sind nicht Bestandteil des hier zu untersuchenden Arbeitssystems Fläche.

Die Entscheidung, die umgebenden Ressourcen nicht zu modellieren, erfolgte bewusst. Hierdurch ist die Wechselwirkung zwischen Baustellen zunächst aus der Analyse entfernt. Nur so kann das Verhalten der Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter analysiert werden. Dennoch ist das Simulationsmodell so modular aufgebaut, dass die Verknüpfung der Baustellen aufgelöst und eine passende Transportstrecke mit Lagern und Transportressourcen eingesetzt werden kann.

In Abbildung 5.4 ist exemplarisch die Struktur mehrerer verketteter Baustellen dargestellt. Eine Quelle erzeugt alle Teile und stellt sie den Baustellen 1 bis n zur Verfügung. Der Transport von der Quelle in das zentrale Lager und von dort in die Schnittstellen der Baustellen sowie über die Schnittstellen erfolgt ohne Zeitverlust und Ressourcenbedarf. Jede Baustelle wiederum besteht aus dem Arbeitssystem Fläche, das durch Transporte mit dem Kran oder durch das Arbeitssystem Mitarbeiter belegt wird. Auf dem ASF führen die Mitarbeiter die Einzeltätigkeiten



12402

Abbildung 5.4: Struktur der verketteten Baustellen und der untergeordneten Flächen im Simulationsmodell

aus. In jedem ASF gibt es außerdem ein Eingangs- und Ausgangslager sowie eine Eingangs- und Ausgangsschnittstelle.

Mit der Bereitstellung im Eingangslager (Einlagerbereich) steht das Bauteil oder der Block für den Transport auf die Fläche bereit. Kran oder Mitarbeiter entnehmen an dieser Stelle die zu bearbeitenden Teile bzw. Blöcke. Mit Fertigstellung der Einzeltätigkeiten wird der entstandene Block über das Ausgangslager ausgeschleust. Die verwendeten Schnittstellen ermöglichen die Verbindung mit beliebigen anderen Netzwerken. Dies können andere Baustellen, Lager oder Transportnetzwerke sein. Letzteres bildet die Möglichkeit, typische Transportstrukturen auf einer Werft nachzubilden. So lassen sich etwa Transporte mit Schwerlastzügen und das Ablegen auf Zwischenlagerflächen nachbilden. Die beschriebene Struktur definiert, wie zwei Baustellen zu verkettet sind und erfüllt Anforderung A4.4 ✓.

Gestaltung der Freigabelogik für Baustellen

Kapitel 3 modelliert die Abläufe in den Arbeitssystemen Fläche und Mitarbeiter. Diese Modellierung muss sich entsprechend Anforderung A4.5 in den Freigabezeitpunkten widerspiegeln. Die folgenden Abschnitte definieren deshalb die Zeitpunkte der Freigabe für beide Systeme.

Der Freigabezeitpunkt legt fest, zu welchem Augenblick ein Objekt für das Arbeitssystem verfügbar und diesem zugeordnet ist. Physisch bedeutet das, dass sich das Objekt in die Warteschlange vor dem Arbeitssystem einreihet. Da das ASF nicht über eine physische Warteschlange verfügt, ist diese Beschreibung nicht übertragbar.

Einfluss auf die Freigabe hat die Art der Verkettung zweier Baustellen. Sind Baustellen starr miteinander verkettet, kann ein Block eine Baustelle nur verlassen, wenn die direkte Umlagerung in die Fläche der nachfolgenden Baustelle möglich ist. In diesem Fall ist der Block freizugeben,

wenn er die Baustelle verlassen soll. Sind Baustellen flexibel verkettet, sind zwei Fälle möglich: Einerseits gibt es Blöcke, die direkt in die Fläche der nachfolgenden Baustelle umzulagern sind. Diese sind in gleicher Weise freizugeben wie bei der starren Verkettung. Andererseits gibt es Blöcke, die zunächst in eine Lagerfläche eingelagert werden. Für diese Blöcke erfolgt die Freigabe zu einem späteren Zeitpunkt.

Ein Sonderfall tritt auf, wenn die Bearbeitung eines Blocks abgeschlossen ist, ohne dass eine Um- oder Einlagerung erfolgt. In diesem Fall wird aus dem Teil des Arbeitssystems Fläche eine Lagerfläche. Sobald die Umlagerung auf die nachfolgende Baustelle ansteht, muss die Freigabe wie bei starr verketteten Baustellen erfolgen.

Neben der Verkettung haben noch weitere Randbedingungen Einfluss auf den Freigabezeitpunkt. Für diese Randbedingungen ist festzulegen, in welcher Reihenfolge sie zu prüfen sind und welche Freigabeentscheidung zu treffen ist, wenn sie nicht erfüllt sind. Die Randbedingungen sind:

- ☐ Ist der Plan-Starttermin erreicht?
- ☐ Sind die notwendigen Teile für den Beginn der Bearbeitung vorhanden?
- ☐ Sind alle Reihenfolgebedingungen (globale und lokale Constraints) erfüllt?
- ☐ Ist genug Fläche für die Einlagerung vorhanden?

Im entwickelten Simulationsmodell sind die Baustellen elastisch verkettet. Die Belegung der Baustelle erfolgt somit immer über ein Zwischenlager, sodass Auslagerung und Freigabeentscheidung voneinander entkoppelt sind. Außerdem wird das ASF immer zunächst mit einem Platzhalter belegt, der die notwendige Fläche reserviert. Damit dieser Auftrag jedoch eingelagert werden kann, sind die beschriebenen Randbedingungen zu prüfen.

Sobald der Plan-Starttermin eines Auftrags erreicht ist, prüft die Freigabelogik, ob das erste Bauteil verfügbar ist. Dann werden die lokalen und globalen Constraints überprüft. Anschließend erfolgt die Einlagerung des Auftrags in das ASF, bei der geprüft wird, ob genügend Fläche vorhanden ist. Ist dies der Fall, wird der Block als freigegeben erfasst und der Zeitpunkt wird als Termin der Ist-Freigabe des Blocks gespeichert.

Ist eine der Randbedingungen nicht erfüllt, wird der Block in eine Warteschlange eingereiht, die nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet wird. Aufträge in der Warteschlange werden erneut geprüft, sobald es zu einer Veränderung in den Randbedingungen kommt. Die Freigabe des Blocks ist nicht gleichzusetzen mit dem Beginn der Arbeiten am Block, da hierfür ein Auftrag für das Arbeitssystem Mitarbeiter freigegeben sein muss.

Freigaben für das ASM können nur erfolgen, wenn der betreffende Block für das ASF freigegeben und in sie eingelagert ist. Hierdurch wird verhindert, dass Bauteile die Baustellen blockieren, obwohl der Block noch nicht bereit steht. Sobald der Block in eine Fläche eingelagert ist, überprüft die Freigabelogik die Fertigungshierarchie für die zu montierenden Objekte. Dafür sind wiederum verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen. Ist der Plan-Starttermin erreicht, das Bauteil verfügbar und sind alle lokalen und globalen Constraints erfüllt, so wird das Freigabekriterium überprüft. Ist dieses ebenfalls erfüllt, wird das Bauteil freigegeben und kann durch das Arbeitssystem Mitarbeiter bearbeitet werden.

Die beschriebene Freigabestruktur für das ASF und das ASM erfüllt die Randbedingungen, die durch die Werft festgelegt werden und berücksichtigt auch die Verknüpfung der beiden Arbeitssysteme. Die Anforderung ist damit erfüllt (A4.5 ✓) und in den folgenden Absätzen wird nun auf die Parametrierung der Freigabelogik eingegangen.

Die formulierten Teilkonzepte zur Abbildung der Arbeitssystemstruktur beschreiben ein modulares Simulationsmodell, das aus verschiedenen Baustellen bestehen kann. Für jede dieser

Baustellen können unterschiedliche Freigabestrategien von Nutzen sein. Um unterschiedliche Verfahren miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, diese für jede Baustelle auswählen und konfigurieren zu können (vgl. Anforderung A4.6). Die hierfür verwendete Logik fasst die in Abbildung 5.5 dargestellte Benutzeroberfläche zusammen.

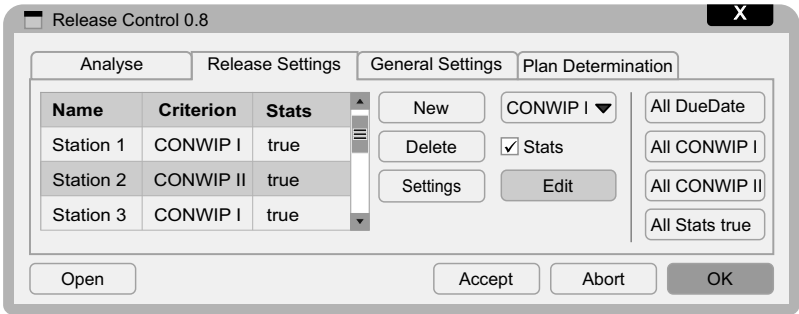
Die Oberfläche ist die Zentrale Steuereinheit (Release Control) für die Konfiguration der Plan-Ermittlung, Simulationsanalyse und Auftragsfreigabe. An dieser Stelle wird jedoch nur auf die Konfiguration der Auftragsfreigabe (Release Settings) eingegangen. Arbeitsstationen, die in das Modul eingebunden sind, findet der Anwender in der Liste. Hier ist nachvollziehbar, welche Baustelle (Station) welches Kriterium verwendet und ob Rückmeldedaten für diesen Modellteil erhoben werden. Werden neue Baustellen in das Modell eingebunden, kann der Anwender diese der Release Control bekannt machen und anschließend alle implementierten Freigabemethoden auch in der neuen Baustelle verwenden.

Das zentrale Steuerelement für die Freigabemethoden ist die Tabelle der Freigabeparameter (Settings). In dieser sind für jede Baustelle und das jeweils verwendete Freigabeverfahren die benötigten Freigabeparameter hinterlegt.

Mit der hier vorgestellten Release Control hat der Simulationsanwender die Möglichkeit, Freigabemethoden zu Baustellen hinzuzufügen, diese zu parametrieren und zwischen verschiedenen Steuermethoden zu wechseln. Neben der Forderung, die Freigabelogik für jede Baustelle einzeln einstellen zu können, ist somit auch die Übertragung der Freigabemethoden auf neue Baustellen abgesichert (A4.6 ✓). Die Anforderungen aufgrund der Arbeitssystemstruktur sind durch die beschriebenen Teilkonzepte erfüllt. Die folgenden Abschnitte lösen die informationsbezogenen Defizite der Auftragsfreigabe.

5.2.2 Auflösen der informationsbezogenen Defizite

Informationsbezogene Defizite in der Auftragsfreigabe entstehen, weil Teile und Prozesse nicht hinreichend für die Steuerung abgebildet sind. Die folgenden Abschnitte beschreiben, wie Starttermine und Freigabezeitpunkte miteinander zu verknüpfen sind, welche Parameter für die unterschiedlichen



12368

Abbildung 5.5: Oberfläche für die Konfiguration der Freigabeverfahren im Simulationsmodell

Freigabeverfahren durch den Nutzer zu definieren sind und wie die nötigen Prozessinformationen erzeugt und deren Bereitstellung abzusichern sind.

Bereitstellung und Erfassung von Startterminen für die Auftragsfreigabe

Um die Anforderungen A5.1 und A5.2 zu erfüllen, ist der Auftragsfreigabe für jedes Objekt ein Plan-Starttermin zur Verfügung zu stellen und der Ist-Starttermin zu erfassen. Bei der Freigabe von Objekten muss unterschieden werden, ob diese für das Arbeitssystem Fläche oder für das Arbeitssystem Mitarbeiter bestimmt sind. Objekte für das ASF sind Blöcke, für das ASM sind es Teile.

Im vorliegenden Modell bestimmt die Plan-Ermittlung die Plan-Starttermine für alle Objekte und dokumentiert diese Informationen in zwei getrennten Listen: der Lieferliste und der Auftragsliste (vgl. Anhang A.1 S. 155). Die Lieferliste enthält die Informationen zu den Teilen, während die Auftragsliste die Informationen zu den Blöcken speichert. Über diese Listen kann ein Anwender auch die Informationen beliebiger anderer Planungssysteme für die Simulation bereitstellen. Bei einem Datenimport ist darauf zu achten, dass die Informationen für einen Block in beiden Listen enthalten sind. Aus jedem Block wird nach dem Bearbeitungsende ein Einbauteil für die Folgebaustelle, weshalb der Block für diesen Schritt die notwendigen Informationen besitzen muss.

Mit der Initialisierung stellt die Simulation alle Blöcke und Teile bereit. Hierbei werden alle in den Listen enthaltenen Informationen den Objekten als Attribute übergeben. Sobald ein Objekt einen Freigabepunkt erreicht, lassen sich die Attribute auslesen und für die Entscheidung interpretieren (A5.1 ✓).

Für die Festlegung, wann der Ist-Starttermin definiert wird und wie er anschließend zu erfassen ist, ist zunächst detaillierter auf die Implementierung im Modell einzugehen. Hierbei sind die Abläufe für Block und Teil getrennt zu beschreiben, da Freigabe und Informationsfluss für beide Objekte unterschiedlich ablaufen. Die folgenden Absätze beschreiben zunächst den Ablauf für den Block und anschließend für das Teil.

Die Simulation erzeugt einen Platzhalter in der Quelle des Modells mit allen Attributen eines Blocks. Aus der Quelle verschiebt eine Methode diesen in ein Lager (OrderStore) innerhalb der Zielbaustelle. Hier verweilt der Platzhalter bis zum Plan-Starttermin des Blocks. Ist der Plan-Starttermin erreicht, prüft eine Methode die Constraints und hält den Freigabeprozess an, bis alle Constraints erfüllt sind. Anschließend ruft die Simulation eine Methode zum Umlagern des Blocks in die Fläche auf. Diese prüft, ob genügend freie Fläche zur Verfügung steht. Sollte nicht genug Fläche zur Verfügung stehen, suspendiert die Simulation die Methode, bis diese Bedingung erfüllt ist.

Sobald die Umlagerung des Platzhalters erfolgen darf, verschiebt die Methode den Platzhalter in die Fläche. Den Zeitpunkt der Einlagerung speichert die Simulation in der Tabelle des Flächenzugangs, zusammen mit dem Flächenbedarf und dem Betriebskalendertag. Die Informationen sind somit im Gegensatz zu den Plan-Daten nicht an den Platzhalter bzw. den späteren Block gebunden. Notwendig wäre dies, um das Durchlaufelement für den Block zu erzeugen. Da der technische Aufwand für die Verknüpfung von Information und Block aufwendiger wäre und den Aufwand für die Auswertung vergrößert hätte, wurde hierauf verzichtet.

Der Prozess zur Definition des Ist-Starttermins von Teilen ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Freigabe von Teilen unterscheidet zwischen Teilen, die zuvor Blöcke waren, und anderen Teilen. Teile, die die Simulation zum Start erzeugt, verschiebt sie in das Lager für Teile (MaterialStore). Teile, die im Simulationsverlauf entstehen, indem das Modell fertige Blöcke in Teile umwandelt, legt die Simulation in das Lager der Baugruppen (AssemblyStore).

Für alle Teile in beiden Lagern prüft eine Methode, ob der Plan-Starttermin erreicht ist und

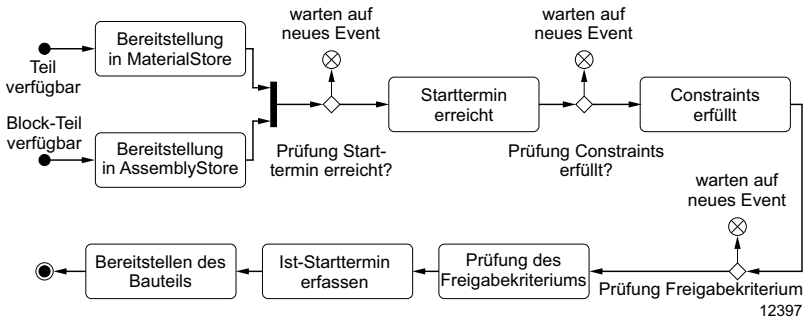


Abbildung 5.6: UML-Diagramm der Ist-Starttermin-Definition

alle Constraints erfüllt sind. Ist dies gegeben, verschiebt eine Methode beide Teilearten in ein Zwischenlager, in dem die Freigabemethoden prüfen, ob die Freigabe zulässig ist. So ist vor der Freigabeentscheidung von Teilen sichergestellt, dass eine valide Reihenfolge vorliegt. Sobald die Freigabemethode feststellt, dass das Freigabekriterium erfüllt ist, verschiebt eine weitere Methode das Teil in ein Lager, aus dem Mitarbeiter oder der Kran Teile auf die Baustelle transportieren können. Mit dem Verschieben der Teile in dieses Entnahmelager speichert die Simulation das Datum und den Betriebskalendertag in der Tabelle *Ist-Zugang ASM*.

Der Zeitpunkt der Erfassung des Ist-Zugangs ist sowohl für die Belegung des ASF als auch für die Belegung des ASM definiert. Somit ist die Anforderung, für jedes gesteuerte Objekt den Ist-Starttermin zu erfassen, erfüllt (A5.2 ✓). Die folgenden Abschnitte beschreiben, welchen Einfluss das Kriterium der Freigabemethoden hat und wie die Parameter zu beeinflussen sind.

Definition von Freigabekriterium und Parametern für alle Freigabemethoden

Das Kriterium einer Freigabemethode beschreibt, nach welchem Gesichtspunkt eine Steuerung erfolgen soll. Lödging legt vier mögliche Kriterien zur Klassifizierung von Freigabemethoden fest [Löd08, S. 297]: das Nullkriterium, den Plan-Starttermin, den Bestand in der Fertigung und die Belastung der Arbeitssysteme der Fertigung.

Im Schiffbau ist die projektbezogene und damit die termingestützte Steuerung der Fertigung ein übliches Vorgehen. Aus diesem Grund wurde ein Freigabeverfahren implementiert, das den Plan-Starttermin als Kriterium verwendet. Dieses Verfahren ähnelt dem aktuellen Vorgehen im Schiffbau und kann deshalb einerseits als Vergleichsverfahren verwendet werden. Andererseits kann es das Potenzial einer detaillierteren termingestützten Freigabe aufdecken, das gegenüber dem aktuellen sehr groben Vorgehen besteht.

Außerdem wurden im Simulationsmodell zwei Verfahren implementiert, die ein bestandsregelndes Kriterium verwenden: CONWIP-I und CONWIP-II. Bestandsregelnde Verfahren haben in den anderen Fertigungsprinzipien einen positiven Einfluss auf Bestand und Durchlaufzeiten. Die Untersuchung der Anwendbarkeit der bestandsregelnden Verfahren in der Baustellenfertigung ist eines der zentralen Untersuchungsziele dieser Arbeit.

Grundgedanke der CONWIP-Steuerung ist es, einen Auftrag freizugeben, sobald die Bestandsgrenze im Arbeitssystem unterschritten wird. „Dazu wird derjenige Auftrag aus der Liste freizugebender

Aufträge ausgewählt, der die höchste Priorität hat. Die Liste freizugebender Aufträge enthält alle bekannten, aber noch nicht freigegebenen Aufträge, deren Plan-Starttermin innerhalb eines definierten Vorgriffshorizonts liegt.“ (zitiert nach [Löd08, S. 327], Originalquelle [Hop96]). Lödding, Hopp und Spearman beschreiben das Verfahren ausführlich. In Abbildung 5.7 ist dieses Prinzip auf die Baustellenfertigung im Schiffbau übertragen.

Im Unterschied zum klassischen CONWIP-Verfahren sind hier mehrere CONWIP-Kreise dargestellt. Ein Grund hierfür ist die Auftragsstruktur, die meist eine klare Trennung der Arbeitsinhalte ermöglicht. Außerdem ist so direkterer Einfluss auf die Qualifikationsgruppen und deren Auftragsbestand möglich. Gemessen wird der Bestand in Vorgabestunden [Mel91]. Dieser Ansatz wurde gewählt, um die grobe und feine Detaillierung leichter vergleichen zu können.

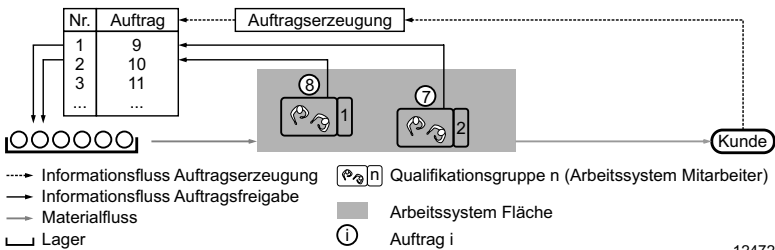
Das Differenzierungsmerkmal der Ausprägungen CONWIP-I und II ist die Bestandsgrenze. Das CONWIP-I-Verfahren kann die Bestandsgrenze nicht überschreiten. Es gibt also den Auftrag mit der höchsten Priorität frei, wenn dessen Auftragszeit kleiner oder gleich dem freien Bestand des Arbeitssystems ist. Das CONWIP-II-Verfahren gibt einen Auftrag frei, sobald die Bestandsgrenze im Arbeitssystem unterschritten wird. Hierbei achtet es nicht darauf, ob die Auftragszeit kleiner oder gleich dem freien Bestand des Arbeitssystems ist. Der mittlere Bestand eines Arbeitssystems mit CONWIP-II-Steuerung ist somit höher als der eines Arbeitssystems mit CONWIP-I-Steuerung.

Die drei implementierten Verfahren lassen sich entsprechend der Klassifizierung nach Lödding den folgenden Kriterien zuordnen und erfüllen somit die Anforderung, dass für jedes implementierte Verfahren ein Kriterium festzulegen ist (A5.4 ✓).

- Freigabeverfahren Plan-Starttermin $\Rightarrow$ Kriterium Plan-Starttermin
- Freigabeverfahren CONWIP-I $\Rightarrow$ Kriterium Bestand in der Fertigung
- Freigabeverfahren CONWIP-II $\Rightarrow$ Kriterium Bestand in der Fertigung

Neben der Festlegung, welche Freigabekriterien und welche Verfahren im Simulationsmodell zu verwenden sind, ist die Festlegung der Parameter der einzelnen Verfahren erforderlich, um das bestehende Informationsdefizit zu beheben. Hierbei besteht die Herausforderung, die Parameter sinnvoll festzulegen und es dem Anwender leicht zu machen, sie anzupassen.

Freigabemethoden nutzen Parameter, um den Freigabeprozess zu beeinflussen. Diese sind entweder verfahrensbedingte Parameter, wie der Plan-Starttermin oder die Anzahl an CONWIP-Stunden, oder ergänzende Parameter, die helfen, das Freigabeverfahren besser an die Fertigung und die



12472

Abbildung 5.7: Prinzip der CONWIP-Steuerung für das Arbeitssystem Mitarbeiter

Arbeitsinhalte anzupassen. Ein typisches Beispiel hierfür ist beim CONWIP-Verfahren der Vorgriffshorizont.

Alle Parameter der implementierten bestandsregelnden Freigabeverfahren sind über die Settings-Option in der bereits vorgestellten Oberfläche aufzurufen und zu beeinflussen (Abbildung 5.5). Für die CONWIP-Verfahren I & II sind das der maximale Bestand an Auftragszeit, aufgegliedert nach ASF (Station) und den vorhandenen Mitarbeiterqualifikationen sowie der Vorgriffshorizont. Für beide Verfahren ist darauf zu achten, dass die Bestandsgrenzen passend zur jeweiligen Kapazität einer Baustelle ausgelegt sind.

Die Settings-Option bietet dem Anwender einen Zugang zu den verschiedenen Parametern der Freigabeverfahren. Die Erweiterung des Modells um weitere Flächen und Mitarbeiterqualifikationen unterstützt das Modul, indem es diese automatisch in die Parametertabelle integriert. Bei der Integration weiterer Freigabeverfahren ist darauf zu achten, dass die notwendigen Freigabeparameter ebenfalls über diese Option eingebunden werden. Die Forderung, für jedes freizugebende Objekt den oder die jeweiligen Parameter festlegen zu können, ist somit erfüllt (A5.3 ✓).

Bereitstellung der notwendigen Prozessinformation für jede Freigabemethode

Die vorangegangenen Abschnitte betrachteten vor allem die Bereitstellung der Freigabeinformationen im Simulationsmodell. Neben diesen Informationen besteht jedoch auch ein sehr umfangreicher Informationsbedarf bei der Prozessbeschreibung. Diese definiert die Produktionsabläufe und stellt somit die sich stetig vergrößernde Informationsbasis für die simulierten Abläufe dar.

Die erste hierfür zu erfüllende Anforderung ist, für jedes Objekt die für die Bearbeitung notwendigen Ressourcen und Prozessschritte zu definieren (A5.5). Zentraler Informationsträger für diese Prozessinformationen ist die Montagestrategietabelle (vgl. Anhang A.7), die alle Prozessmuster und manuell definierten Prozesse des Modells enthält. Gibt die Freigabesteuerung ein Bauteil zur Bearbeitung frei, durchsucht das Simulationsmodell diese Tabelle und bestimmt die am Teil auszuführenden Prozesse.

Die Verknüpfung eines Teils mit dem jeweiligen Prozessmuster erfolgt über die Attribute *Montagestrategie* und *Teiletyp*. Hierfür bestimmt eine Methode der Simulation zunächst die Montagestrategie des Teils und durchsucht anschließend die Montagestrategietabelle. Findet die Methode die passende Montagestrategie, durchsucht sie diese nach dem aktuellen Teiletyp. Für diesen sind ein oder mehrere Prozessschritte definiert.

Für jeden Prozessschritt ist definiert, welche Qualifikation ihn ausführt, wie viele Mitarbeiter minimal und maximal an der Durchführung beteiligt sein können und welche zusätzlichen Ressourcen nötig sind. Die Montagestrategietabelle definiert außerdem, wie oft der Prozess parallel ausgeführt werden darf, welche Mitarbeiterqualifikation hierfür notwendig ist und wie lange die Bearbeitung dauert.

Die Bearbeitungszeit kann entweder über einen festen Wert oder einen Algorithmus definiert werden. Algorithmen werden in der Prozesszeitentabelle als Gleichung definiert und nutzen Parameter des Teils und der Montagestrategietabelle, um die Prozesszeit zu berechnen.

Die Informationen der Montagestrategietabelle und der Prozesszeitentabelle sind anpassbar. So ist durch Austauschen der *Montagestrategie* der angewendete Bearbeitungsprozess mit einer anderen Variante auszutauschen oder die Bearbeitungszeit durch eine präzisere Beschreibung zu ersetzen. Der Simulationsanwender kann somit einen beliebigen Prozess, dessen Ressourcenverbrauch und die Auftragszeit des Prozesses definieren. Die Anforderung ist somit erfüllt (A5.5 ✓).

Die letzte Anforderung an die Auftragsfreigabe fordert, dass nur Freigabemethoden durch die Simulation nutzbar sind, für die der Anwender auch alle notwendigen Informationen hinterlegt

hat (A5.6). Hierbei ist zwischen den Parametern der Freigabemethoden sowie den Prozess- und Produktinformationen zu unterscheiden.

Mit der Festlegung des Datentyps für die Parameter lässt sich eine Vielzahl an falschen Eingaben abfangen. Für die Freigabemethode Plan-Starttermin ist der Parameter als Datum anzugeben. Für die CONWIP-Methoden I & II sind die CONWIP-Stunden als Real-Wert und der Vorgriffshorizont als Integer-Wert definiert.

Die Festlegung der Datentypen schützt jedoch nicht vor einer inhaltlich falschen Eingabe von Werten. Eine automatisierte Prüfung durch Vergleich der Eingabewerte erscheint ebenso wenig zielführend, da hierfür der zulässige Raum an Eingaben einzuschränken ist. Dies ist kaum zu realisieren, da abhängig von Modell und Simulationsziel der Eingabewert stark variiert.

Die vom Anwender variierten Parameter werden aus diesem Grund nur bezüglich ihres Variablentyps überprüft. Außerdem werden ungültige Eingabewerte, wie beispielsweise negative CONWIP-Stunden, ausgeschlossen. Weitere Kontrollmechanismen sind nicht vorgesehen. Der Anwender muss seine Eingaben somit sorgfältig durchführen.

Zusätzliche Kontrollmechanismen setzen voraus, dass Modelleinstellungen automatisch interpretiert werden, um hieraus Kontrollgrößen abzuleiten. Ein sinnvoller Ansatz für die CONWIP-Steuerung wäre es beispielsweise, die Menge an CONWIP-Stunden auf Basis der zur Verfügung stehenden Mitarbeiter zu berechnen. Hierdurch ließen sich deutlich zu niedrig oder zu hoch eingestellte CONWIP-Mengen verhindern. Für alle bestandsregelnden Freigabeverfahren lässt sich zudem prüfen, ob die größten freizugebenden Einzeltätigkeiten der Bestandsbegrenzung des Freigabeverfahrens nicht widersprechen. Als Konvention soll hier gelten, dass einmaliges Überschreiten zulässig ist.

Solche Ansätze bedeuten jedoch einen sehr großen Aufwand für die Modellimplementierung und Wartung, während die Menge an zu kontrollierenden Eingabewerten gering ist. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Absicherungsmaßnahmen auf den deutlich umfangreicheren Datenbestand der Prozess- und Produktinformationen.

Die beschriebenen Ansätze zeigen auf, wie die für die Freigabeverfahren notwendigen Informationen im Simulationsmodell bereitzustellen sind. Für die Auftragszeit (ZAU) einer Einzeltätigkeit soll an dieser Stelle jedoch noch ein weiterer Ansatz vorgestellt werden, da es sich um eine sehr kritische Größe handelt. Ein falscher Eingabewert kann drei Zustände einnehmen:

1. $ZAU_{Eingabe} \leq 0$
2. $ZAU_{Eingabe} \neq ZAU_{Real}$
3. $ZAU_{Eingabe} \gg ZAU_{max}$

Der Fall 1 ist über einen Vergleich zu bestimmen. Negative Durchführungszeiten sind hierbei ein identifizierter Fehler, wogegen $ZAU=0$ auftreten kann und zu überprüfen ist. Hier kann jedoch eine Filterung nach zulässigen Durchführungszeiten mit einem Betrag von null die unzulässigen Werte identifizieren. Für den Fall 2 besteht keine einfache Möglichkeit, falsche Werte zu identifizieren. In Fall 3 lassen sich für die generischen Prozesse Vergleichsgrößen festlegen, bei deren Überschreitung der Anwender einen Hinweis auf diese Regelverletzung erhält. Im hier vorgestellten Simulationsmodell wurden die Überprüfungen manuell durchgeführt und nicht als automatische Prüfmethoden implementiert. Es ist nachvollziehbar, dass Extremwerte einfach zu identifizieren sind, während kleine Abweichungen sich nur mit viel Aufwand bestimmen lassen. Auch diese kleinen Abweichungen können sich jedoch zu größeren Abweichungen kumulieren.

In Summe ist die Datenbereitstellung, -aufbereitung und -aggregation für die Verwendung im Simulationsmodell aufwendig und fehleranfällig. Verschiedene Ansätze des Datenmanagements

und der Datenprüfung reduzieren den Aufwand und helfen, Fehler leichter zu finden, ohne eine vollständige Lösung anzubieten. Die Prüfung der Daten ist vielmehr ein stetig durchzuführender Prozess, über den sich die Qualität der Planung und Simulation stetig verbessern lässt. Die Anforderung, für eine spezifische Freigabemethode sicherzustellen, dass der Anwender alle notwendigen Informationen bereitstellt, ist hiermit dennoch hinreichend erfüllt (A5.6 ✓).

5.2.3 Erfüllung der Anforderungen an die Auftragsfreigabe

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben, wie sich die Anforderungen an die Auftragsfreigabe erfüllen lassen. Lediglich die Teilanforderung A5.6 ist nicht vollständig erfüllt, sodass der Simulationsanwender auf eine sorgfältige Datenbereitstellung achten muss.

Für die Anforderung A4.3 ergab sich im Verlauf der Konzepterstellung, dass die Erfüllung nicht notwendig ist, da andere Teilkonzepte die Anforderung obsolet machten. Für die Modellstruktur war eine klare Definition des Ablaufs dennoch nützlich und wurde aus diesem Grund erarbeitet.

Tabelle 5.2: Anforderungen für die Implementierung einer Auftragsfreigabe

D4 Defizite aufgrund der Arbeitssystemstruktur		
A4.1	Es ist zu definieren, ob Aufträge für die Arbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche getrennt oder gemeinsam freizugeben sind.	✓
A4.2	In Abhängigkeit davon, ob eine getrennte oder gemeinsame Freigabe ausgewählt wurde, ist das Freigabekriterium festzulegen.	✓
A4.3	Es ist festzulegen, in welcher Reihenfolge die Freigabekriterien bei einer gemeinsamen Freigabe zu prüfen sind.	(✓)
A4.4	Es ist festzulegen, ob mehrere Baustellen starr oder elastisch zu verketteten sind.	✓
A4.5	Der Freigabezeitpunkt für die Teilarbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter ist klar zu definieren und unabhängig voneinander zu erfassen.	✓
A4.6	Die Freigabelogik muss je Baustelle einstellbar sein.	✓
D5 Informationsbezogene Defizite		
A5.1	Für jedes gesteuerte Objekt ist der Auftragsfreigabe der Plan-Starttermin zur Verfügung zu stellen.	✓
A5.2	Für jedes gesteuerte Objekt ist der Ist-Starttermin zu erfassen.	✓
A5.3	Der Anwender muss die spezifischen Parameter (z. B. Vorgriffshorizont) für Freigabeverfahren festlegen können.	✓
A5.4	Für jedes Objekt ist abhängig vom Steuerungsverfahren ein passendes Freigabekriterium festzulegen.	✓
A5.5	Für jedes Objekt sind die notwendigen Ressourcen und Prozessschritte festzulegen.	✓
A5.6	Ist eine spezifische Freigabemethode gewählt, ist sicherzustellen, dass alle notwendigen Informationen durch den Anwender bereitgestellt wurden.	(✓)

Mit den vorgestellten Teilkonzepten wurde die Auftragsfreigabe für die Baustellenfertigungen umgesetzt. In den nächsten Absätzen wird nun auf die Teilkonzepte für die Kapazitätssteuerung eingegangen.

5.3 Gestaltung der Kapazitätssteuerung

Entsprechend dem *Modell der Fertigungssteuerung* ist die Kapazitätssteuerung die einzige Möglichkeit, einen Rückstand ohne Umplanung zu beseitigen.

Die folgenden Abschnitte werden deshalb zunächst die in Kapitel 3 vorgestellten Kapazitäts-

begriffe aufgreifen und deren Beeinflussbarkeit durch das implementierte Modell vorstellen (Abschnitt 5.3.1). Hieran schließen sich die Teilkonzepte zur Beseitigung der Defizite der Kapazitätssteuerung an. Diese sind aufgeteilt in die Abschnitte Kriterium der Kapazitätsanpassung (Abschnitt 5.3.2), Konzept zur Anpassung der Kapazität im Simulationsmodell (Abschnitt 5.3.3), Konfiguration der Kapazitätssteuerung (Abschnitt 5.3.4) sowie die Lösungsansätze zum Umgang mit Zeitpuffern in Durchlaufzeiten (Abschnitt 5.3.5). Der letzte Abschnitt fasst die Konzepte zur Erfüllung der Anforderungen an die Kapazitätssteuerung zusammen (Abschnitt 5.3.6).

5.3.1 Arten der anpassbaren Kapazitäten

Das Modellierungskapitel führt verschiedene Kapazitätsgrößen ein (Kapitel 3), geht jedoch nicht im Kontext des Simulationsmodells auf deren Beeinflussbarkeit ein. Die folgenden Abschnitte greifen deshalb die Definitionen für die Kapazität der Ressourcen *Fläche* und *Mitarbeiter* auf und beleuchten diese vor dem Hintergrund ihrer Beeinflussbarkeit im Simulationsmodell.

Kapazitätsanpassung der Ressource Fläche

Die Kapazität der Fläche ist definiert als die Summe ihrer Teilflächen A_i und bildet die zur Verfügung stehenden Produktionsbereiche ab. Im Simulationsmodell bedeutet dies, dass eine Kapazitätsanpassung einer Veränderung der modellierten Produktionsflächen entspricht.

Für das Modell bestehen hier zwei Möglichkeiten zur Anpassung. Einerseits ist die Fläche durch Konfigurieren bestehender Fläche zu verändern. Andererseits lassen sich neue Flächen in das Modell einfügen. Diese Veränderungen sind jedoch als ein manueller Modellierungsansatz gestaltet und nicht in die Kapazitätssteuerung integriert. Dies entspricht der Realität, in der die Veränderung von Flächenkapazitäten ein umfangreicher und langwieriger Entscheidungsprozess ist und nicht durch einen Steuerungsmechanismus ausgeführt wird.

Kapazitätsanpassung der Ressource Mitarbeiter

Die Kapazität der Ressource Mitarbeiter ist definiert als die Menge an Arbeitsstunden, die ein Mitarbeiter pro Betriebskalendertag leisten kann. Eine Anpassung der Kapazität entspricht somit der Verringerung oder Erweiterung der Schichtzeiten für einen Mitarbeiter. Kapazitätserweiterungen lassen sich somit mit Überstunden und Zusatzschichten erhöhen und durch Kurzarbeit oder temporäre Betriebsschließungen verkürzen.

Die Schichtzeiten eines einzelnen Mitarbeiters zu beeinflussen, ist technisch möglich, aber für die Rückstandsregelung nicht nötig. Stattdessen regelt die Simulation die Kapazität der Mitarbeiter auf Qualifikationsebene. Dies entspricht der in Abschnitt 3.1.1 eingeführten Modellierung der Auftrags- und Durchführungszeiten. Hier ist die feinste Stufe der Hierarchie, auf der der Mitarbeiter erfasst ist, die Qualifikationsebene. Die dieser Stufe untergeordneten Ebenen Teil und Prozess ermöglichen keine sinnvolle Beeinflussung der Mitarbeiterkapazität.

Mit den Beschreibungen der möglichen Kapazitätsanpassungen für die Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter ist die Voraussetzung für die Bestimmung eines Kapazitätsanpassungskriteriums gelegt. Das Kriterium wird im folgenden Abschnitt festgelegt.

5.3.2 Das Kriterium der Kapazitätsanpassung

Das Kriterium der Kapazitätsanpassung ist an der Zielsetzung auszurichten. Im Schiffbau ist das Ziel, ein kundenspezifisches Produkt mit schlecht prognostizierbaren Bearbeitungsdauern und einer langen Durchlaufzeit termingerecht fertigzustellen.

Analysiert man die von Lödging eingeführten Kriterien, lassen sich für diesen Schritt mehrere ausschließen. Die Produktion für ein Lager und damit ein *Lagerbestand* (Kriterium 2) besteht nicht, da das Produkt Schiff und auch viele seiner Einzelteile nur zweckgebunden produziert werden. Das Kriterium *voraussichtliche Terminabweichung von Aufträgen* (Kriterium 5) ist nicht zielführend, da die Terminabweichung von Teilaufträgen nur in sehr seltenen Fällen einen Einfluss auf die resultierende Terminabweichung hat.

Den *Bestand vor oder nach dem Arbeitssystem* (Kriterium 6) als Kriterium zu verwenden, ist kaum möglich, da die Bestandsmessung vor und hinter den Arbeitssystemen Fläche und Mitarbeiter kaum möglich ist. Für die Fläche bilden sich diese Bestände nicht und im Fall des Mitarbeiters ist die Erfassung und Zuordnung dieser Bestände aufgrund der hohen Flexibilität und Mobilität der Mitarbeiter nur mit viel Aufwand möglich. Aus denselben Gründen ist auch das Kriterium 7 (*aktive und passive Blockade*) auszuschließen.

Somit bleiben lediglich die Kriterien *Erfüllung des Kundenbedarfs* (Kriterium 1), *Rückstand* (Kriterium 3) und *Abweichung von der Plan-Kapazität* (Kriterium 4) als sinnvolle Kriterien für die Kapazitätssteuerung übrig. Nach Lödging sind diesen Kriterien die *Rückstandsregelung* und die *planorientierte Kapazitätssteuerung* zuzuordnen.

Für das hier beschriebene Simulationsmodell wurde als zentrales Kriterium der *Rückstand* gewählt. Ob diese Rückstände aus verringerten Kapazitäten oder aus einer Störung des Produktionsablaufs resultieren, ist hier nicht von großem Einfluss. Die Anforderung, ein Kriterium der Kapazitätsanpassung zu bestimmen, ist somit erfüllt (A6.1 ✓).

Festlegung des Abgangszeitpunkts

Die Festlegung des Rückstands als Kriterium für die Kapazitätsanpassung führt direkt zur nächsten Anforderung: der Erfassung des Abgangszeitpunkts für die Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter. Für die Kapazitätssteuerung ist jedoch nur der Abgang des Arbeitssystems Mitarbeiter von Interesse, da die Kapazität der Fläche nicht durch die Steuerung beeinflusst wird. Dennoch beschreiben die folgenden Abschnitte, wie für beide Arbeitssysteme der Abgang zu erfassen ist. Nur mit Hilfe des Abgangs ist es möglich, für beide Systeme den Rückstand zu bestimmen und Durchlaufdiagramme für die Analyse zu erzeugen.

In der Definition des Durchlaufelements nach Heinemeyer ist der Abgang als der Moment definiert, in dem die Bearbeitung des Objektes am Arbeitssystem beendet ist und dieses das Arbeitssystem verlässt [Hei74, S. 4]. Warten und sich anschließende Transporte des Objekts sind bereits dem folgenden Arbeitssystem zuzuschlagen.

Für die Fläche sind zwei verschiedene Definitionen für den Abgang notwendig, da auch zwei verschiedene Durchlaufelemente definiert wurden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Für die Belegungszeit ist diese Definition nach Heinemeyer direkt zu übernehmen.

Ein Objekt (Block) ist in dem Moment als Abgang zu verbuchen, in dem die Auslagerung aus der Fläche erfolgt. Für diese Auslagerung hebt ein Kran den Block von der Fläche und transportiert ihn zu einem Übergabepunkt. Hierbei stellt sich die Frage, wann ein Block als ausgelagert gilt. Denkbar ist jeder Zeitpunkt zwischen dem Beginn des Anhebens des Blocks bis zu dem Zeitpunkt, zu dem der Kran frei ist von der Last und der Block den Übergabepunkt verlassen hat. Kritisch ist die Fragestellung deshalb, da eine Auslagerung aus der Fläche mehrere Stunden dauern kann.

Als Abgangszeitpunkt wurde der Moment definiert, in dem der Block aus der Fläche gehoben wird. Die Zeitspannen für das Anheben und Transportieren zum Übergabepunkt sind somit nicht enthalten. Dies entspricht der eingeführten Modellierung (vgl. Abb. 3.8), führt jedoch zu dem Problem, dass es Zeiträume gibt, in denen die Fläche als frei gebucht ist, jedoch nicht zu

belegen ist. Auf dieses Problem weist das Kapitel 3 bereits hin, und bei der Interpretation von Analyseergebnissen ist dieses Verhalten zu berücksichtigen.

Für den auftragszeitbezogenen Abgang ist die Definition nach Heinemeyer zu adaptieren. Entsprechend Abschnitt 3.2.2 ist hier als Abgangszeitpunkt das Bearbeitungsende des Blocks zu verbuchen. Dieser Zeitpunkt ist gleich dem Ende der letzten Einzeltätigkeit, die am Block ausgeführt wird. Im umgesetzten Simulationsmodell wird dieser Abgang nur für das Arbeitssystem Mitarbeiter erfasst. Eine Erfassung für die Fläche wäre jedoch interessant, da der Zeitraum zwischen der Beendigung der letzte Einzeltätigkeit und der Auslagerung stark schwanken kann.

Zusätzliche Informationen ließen sich an dieser Stelle erheben, wenn beide Abgangsdefinitionen gemeinsam und blockbezogen dokumentiert würden. Dies würde die bereits eingeführten Betrachtungen des mittleren Flächenbestands (Gleichung 3.16) und des Parallelisierungsgrads der Einzeltätigkeiten (Gleichung 3.11) ergänzen. Hierdurch ließen sich Leerlaufzeiten auf der Fläche detaillierter bestimmen. Im hier beschriebenen Modell wurde hierauf jedoch verzichtet.

Während die Überwachung des Arbeitssystems Fläche einen globalen Überblick über das gesamte Arbeitssystem gibt, schafft die Steuerung des Arbeitssystems Mitarbeiter die Möglichkeit, direkt auf den Arbeitsfortschritt einzuwirken. Bei der Festlegung des Abgangszeitpunkts ist deshalb auch die Forderung nach einer schnellen Reaktion auf Plan-Abweichungen (A6.4) zu berücksichtigen.

Eine solche zeitnahe Reaktion ist jedoch nur möglich, wenn der Umfang der Arbeitspakete klein ist und die Rückmeldung über den Arbeitsfortschritt häufig erfolgt. Somit ist als Abgangszeitpunkt der Zeitpunkt auszuschließen, zu dem alle Arbeiten am Block oder alle Arbeiten einer Qualifikation abgeschlossen sind. Stattdessen ist ein Zeitpunkt zu bestimmen, der in jeder Phase der Produktentstehung das Informationsangebot berücksichtigt und zu passenden Rückmeldeinformationen führt.

Für diese Problemstellung wurde bereits im Modellierungskapitel ein Lösungsansatz gesucht und mit der Hierarchie der Auftrags- und Durchführungszeiten auch eingeführt (vgl. ab S. 31). Diese Hierarchie schafft die Grundlage, die Mitarbeitertätigkeiten prozessbasiert und an den aktuellen Planungsstand angepasst zu beschreiben.

Die flexible Detaillierung der Produktionsprozesse ermöglicht es so einerseits, zu jeder Phase der Produktentstehung den Fertigstellungszeitpunkt und damit den Abgang an das gleiche Ereignis zu koppeln: die Beendigung eines Prozessschrittes. Andererseits ist sichergestellt, dass in späten Phasen ein feiner Detaillierungsgrad vorliegt, der häufig für Rückmeldungen sorgt.

Um dieses Konzept im Simulationsmodell zu realisieren, ist es notwendig, immer dann eine Rückmeldung zu erhalten, wenn ein Prozess endet. Hierfür konnte eine Standardkomponente des STS verwendet werden, die das Ende eines Prozessschrittes erfasst. Immer wenn diese Methode ausgeführt wird, erfolgt die flächen- und qualifikationsbezogene Erfassung des Abgangs.

Dieses Teilkonzept erfüllt somit die Anforderung, den Abgang hinreichend häufig zu erfassen, um eine zeitnahe Reaktion bei Störungen zu ermöglichen (A6.3 ✓). Außerdem ist durch das Konzept auch der Abgangszeitpunkt für die beiden Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter definiert (A6.2 ✓). Die folgenden Abschnitte beschreiben nun, in welchen Einheiten der Abgang für die Teilarbeitssysteme zu erfassen ist.

Dimensionen der Abgangserfassung

Die Anforderung A6.4 definiert, dass der Abgang für die einzelnen Arbeitssysteme in den folgenden Dimensionen zu erfassen ist:

- ☐ Mitarbeiter in [h] je Qualifikation
- ☐ Fläche in [m^2] und [h]

Mitarbeiter bearbeiten Prozesse, die in der Simulation direkt mit Teilen verknüpft sind. Hierfür ordnet das Modell zu Beginn der Simulation jedem Teil alle Prozessbeschreibungen zu. Diese bestehen aus der Festlegung, welcher Prozess mit welcher Dauer von welcher Qualifikation auszuführen ist und welcher Prozess sich hieran anschließt.

Endet ein Prozess, liest eine Methode des Modells die Dauer in Stunden aus und verbucht diesen Abgang mit Datum und Qualifikation in den Rückmeldedaten. Hierdurch ist der Betrag der Auftragszeit sowohl für die Bestimmung der Abgänge je Mitarbeiterqualifikation als auch für die flächenbezogenen Abgänge in Stunden verfügbar. Für den Abgang der Fläche sind alle beendeten Prozesse aller Qualifikationen zu aggregieren, während für den Abgang je Qualifikation die gebuchten Stunden einer Qualifikation zu aggregieren sind.

Die Simulation ordnet jedem Teil, das auf die Fläche fließt, den jeweiligen Flächenbedarf als Attribut zu. Sobald dieses Teil die Fläche wieder verlässt, ist dieses Attribut auszulesen und an die Rückmeldedaten zu übergeben. Diese verbucht die abgegangenen Quadratmeter gemeinsam mit dem Datum und aggregiert die Informationen am Ende der Simulation. Die Anforderung, den Abgang von beiden Teilarbeitssystemen in den definierten Dimensionen zu erfassen, ist somit erfüllt (A6.4 ✓).

Mit der Umsetzung der unter Defizit D6 zusammengefassten Anforderungen sind einerseits alle Voraussetzungen geschaffen, um Durchlaufdiagramme zu erzeugen. Andererseits liegen alle Informationen vor, um im Simulationsmodell eine Kapazitätssteuerung aufzubauen. Die folgenden Abschnitte beschreiben, wie diese Kapazitätssteuerung zu konfigurieren ist und welchen besonderen Einfluss Zeitpuffer auf die Kapazitätssteuerung haben. Auf den Nutzen der Durchlaufdiagramme geht Kapitel 6 ein.

5.3.3 Konzepte zur Anpassung der Kapazitäten

Für die Produktionssteuerung ist die Anpassung der Kapazitäten das Mittel, um Rückstände in der Produktion abzubauen. Hierbei besteht die Herausforderung, den Einfluss der Steuergrößen auf das System einzuschätzen, weshalb die Simulation der Wechselwirkungen zwischen Kapazitätssteuerung und dem Arbeitssystem Baustelle von großem Interesse ist.

Anpassung der Kapazitäten

Die zentrale Anforderung an die Kapazitätssteuerung ist es, die Kapazität des Arbeitssystems Mitarbeiter verändern zu können (A7.1). Um dieses Verhalten im Simulationsmodell abzubilden, gibt es verschiedene Ansätze. So lassen sich zusätzliche Mitarbeiter erzeugen, die parallel oder im Anschluss an die geplant arbeitenden Mitarbeiter arbeiten. Die Anzahl der geplanten Mitarbeiter lässt sich erhöhen oder die Arbeitszeit der geplanten Mitarbeiter wird erweitert. Die hier vorgestellte Lösung nutzt einen kombinierten Ansatz.

Wenn eine Schicht endet, löscht der STS die Ressourcen, die die geplanten Mitarbeiter softwaretechnisch modellieren. Die Dauer der Schicht kann nach dem Simulationsstart nicht mehr beeinflussen werden, weswegen die direkte Erweiterung des Schichtregimes ausgeschlossen ist. Stattdessen erzeugt eine Methode neue Ressourcen in gleichem Umfang wie in der vorangegangenen Schicht. Hierbei beachtet die Methode Qualifikation und Anzahl der Ressourcen. Dies ist wichtig, da ein Rückstand auch aus einer reduzierten Kapazität der Mitarbeiter resultieren kann. In diesem Fall darf eine Schichterweiterung nur so viele neue Mitarbeiter erzeugen, wie in der Schicht auch gearbeitet haben. Der Plan-Zustand ist hierbei zu vernachlässigen.

Ein zentraler Punkt einer solchen automatischen Schichterweiterung ist der Zeitpunkt, zu dem diese beschlossen wird. Dieses ist primär von der Flexibilität des Unternehmens abhängig. Kann

eine Produktion auch wenige Minuten vor Ende einer Schicht flexibel reagieren, kann die Steuerung diese Entscheidung spät treffen. Ist die Produktion dazu nicht in der Lage, ist die Entscheidung mit entsprechendem Vorlauf zu treffen.

Die Simulationssoftware definiert Schichten immer zu Beginn eines neuen Tages. Aus diesem Grund trifft das hier vorgestellte Modell diese Entscheidung zum selben Zeitpunkt. Ist also Rückstand entstanden und sind daher Überstunden durch die Mitarbeiter zu leisten, so erzeugt das Modell zusätzliche Mitarbeiter und Schichten. In gleicher Weise entscheidet die Steuerung auch über Wochenendschichten.

Um Schichterweiterungen transparenter zu machen, lassen sich über die Analysefunktionen des Modells sowohl der Umfang der Schichterweiterungen als auch die Auslastung der Mitarbeiter gemeinsam darstellen. Abbildung 5.8 zeigt dieses Analysewerkzeug. Balken stellen die Mitarbeiterauslastung unterteilt in *arbeiten* und *warten* dar, während die durchgezogene Linie die *Schichterweiterung* visualisiert. Die gestrichelte Linie verdeutlicht die Plan-Kapazität.

Kommt es zu einem Rückstand aufgrund von verringerten Mitarbeiterkapazitäten oder falsch geplanten Auftragszeiten, ist dieser Rückstand durch eine Erhöhung der Mitarbeiterkapazität zu kompensieren. In diesem Fall zeigt die Analyse einen erhöhten grauen Balken und eine Schichterweiterung an.

Liegt jedoch eine verspätetes Teil vor, das den Arbeitsfortschritt blockiert, ist es nicht sinnvoll, die Mitarbeiterkapazität zu erhöhen. Andernfalls erhöht sich nur der Zeiteanteil, in dem die Mitarbeiter warten, ohne dass sich der Rückstand abbaut (z. B. Woche ab dem 5.8.). In diesem Fall liegt eine unnötige Schichterweiterung vor.

Die Kapazitätssteuerung ist in der Lage, die Kapazität zu beeinflussen (A7.1 ✓) und die Auswirkungen lassen sich visualisieren. Sie ist jedoch nicht in der Lage, den Grund für einen Rückstand zu bestimmen. Sie kann deshalb unnötige Schichterweiterungen nicht verhindern. Im realen Arbeitssystem ist diese Aufgabe durch eine Steuerstelle zu übernehmen. Diese ist in der Lage, den Rückstand unter Berücksichtigung der Ursache zu beurteilen.

Die folgenden Abschnitte gehen nun auf das Konzept zur flexiblen Beeinflussung der Kapazität (A7.2) sowie dessen Implementierung ein (A7.3 und A7.4).

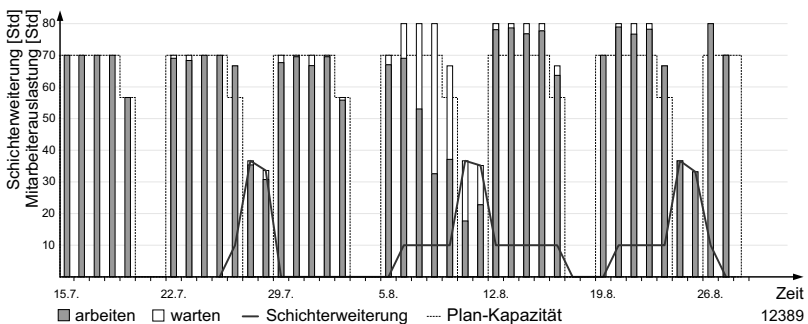


Abbildung 5.8: Diagramm zur Analyse der Mitarbeiterauslastung und Schichterweiterung

5.3.4 Konfiguration der Kapazitätssteuerung

Das Simulationsmodell verwendet eine Entscheidungstabelle (vgl. Abbildung 5.9), in der unterschiedliche Schichtmodelle mit Anwendungsregeln zu kombinieren sind. Anwendungsregeln definieren hierbei, an welchen Tagen die Prüfung einer Regel erfolgt (Day), innerhalb welcher Grenzen eine Schichterweiterung angewendet wird (LowerLimit & UpperLimit) und mit welcher Schichterweiterung der jeweilige Rückstand verknüpft ist (Extension).

Mit Hilfe der dargestellten Anwenderoberfläche ist es möglich, den verwendeten Regelsatz um weitere Schichterweiterungen und Anwendungsregeln zu ergänzen, diese zu verändern oder zu löschen. Der Anwender kann so das Verhalten der Kapazitätssteuerung direkt beeinflussen (A7.3 ✓) und sie somit befähigen, auf unterschiedliche Rückstandssituationen zu reagieren (A7.2 ✓).

Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es hierbei jedoch nicht, Schichten zu definieren. Die Steuerung liest diese aus der Personalsteuerung aus und stellt sie dem Anwender zu Verfügung. Dies hat den Vorteil, dass Arbeitszeitmodelle zentral an einer Stelle zu verwalten sind und Redundanzen und Fehler reduziert werden. Außerdem kann die Simulation hierdurch Arbeitszeitmodelle aus anderen EDV-Systemen auslesen und der Anwender muss diese nur noch mit passenden Anwendungsregeln verknüpfen.

In gleicher Weise, wie sich zusätzliche Schichten bei Bedarf aktivieren lassen, lassen sich die Plan-Schichten durch verkürzte Arbeitszeitmodelle ersetzen. Konfigurieren kann der Anwender das Verhalten bei einem negativen Rückstand ebenfalls über dieselbe Anwenderoberfläche unter dem Karteireiter *Negative Backlog* (A7.4 ✓).

Die letzte Teilanforderung des Defizits D7 formuliert die Notwendigkeit, die Kapazitäten für jede Baustelle getrennt einzustellen (A7.5). Da es im Modell notwendig war, die einzelnen Qualifikationen in ihrem Umfang an jede Baustelle (Station S_i) anzupassen und damit für jede Qualifikation auf jeder Baustelle ein Schichtmodell zu definieren war, greift die Kapazitätssteuerung diesen Ansatz auf.

Die Rückmeldedaten werten den Rückstand für jede Baustelle und damit für die jeweiligen Quali-

Qualification	Day	LowerLimit	UpperLimit	Extension
welder_S1	Su-Thu	0.0000	1:06:00:00.0000	Do Nothing
welder_S1	Su-Thu	1:06:00:00.0000	2:02:00:00.0000	overtime_1415
welder_S1	Su-Thu	2:02:00:00.0000	2:22:00:00.0000	overtime_0500
welder_S1	Su-Thu	2:02:00:00.0000	2:22:00:00.0000	overtime_1415

12395

Abbildung 5.9: Anwenderoberfläche der Kapazitätssteuerung (Entscheidungstabelle)

fikationen getrennt aus. Der Anwender konfiguriert lediglich das Verhalten der Kapazitätssteuerung, indem er für jeden Qualifikationstyp je Baustelle die gewünschten Schichtmodelle auswählt und für diese die Anwendungsregeln definiert.

Die Kapazitätssteuerung unterscheidet somit nicht nur, bei welcher Rückstandssituation eine Anpassung der Schichtzeiten erfolgt, sondern auch, bei welcher Qualifikation ein Rückstand auftritt und auf welcher Baustelle. Somit ist auch die letzte Anforderung des Defizits D7 erfüllt (A7.5 ✓).

5.3.5 Zeitpuffer in Auftragszeiten

Zeitpuffer sind ein Mittel, um Unsicherheiten in der Planung zu berücksichtigen. Im Schiffbau sind diese Zeitpuffer meist implizit in den Auftragszeiten enthalten und nicht explizit als Auftragszeitpuffer ausgewiesen. Für die Kapazitätssteuerung sind diese impliziten Zeitpuffer eine große Herausforderung, da sie Kapazitätserweiterungen ad absurdum führen können. Anforderung A8.1 legt deshalb fest, dass Zeitpuffer durch die Kapazitätssteuerung zu berücksichtigen sind.

Im Simulationsmodell sind Prozesszeiten als fixer Betrag modelliert und nicht mit stochastischen Schwankungen beaufschlagt. Deshalb treten keine Prozesszeiten auf, die vom Plan-Zustand abweichen. Will der Anwender die Problemstellung nachbilden, muss er die Prozesszeit verändern. Da der Plan-Abgang jedoch mit diesen Zeiten ermittelt wurde, würde eine Simulation mit veränderten Prozesszeiten zu einer Abweichung im Abgang führen. Die Steuerung würde dies als Rückstand interpretieren und eine Kapazitätsanpassung vornehmen. Dies ist nicht sinnvoll. Ziel der Anforderung ist es, eine Kapazitätsanpassung herbeizuführen, wenn ein Rückstand vorliegt und nicht, wenn die Abweichung des Ist vom Soll zur Interpretation führt, ein Rückstand würde vorliegen.

Begründet liegt das falsche Verhalten in der Form der Planung, bei der Zeitpuffer implizit in der Prozesszeit verrechnet sind. Die Steuerung ist hier nicht in der Lage zu unterscheiden, ob eine Prozesszeit von der geplanten abweicht oder aufgrund anderer Einflüsse nicht genügend Einzeltätigkeiten bearbeitet wurden. Anhand eines Beispiels beschreiben die folgenden Abschnitte das Verhalten näher.

Im Beispiel ist ein Auftrag mit einer Dauer von 5 Stunden zu bearbeiten. Die Auftragszeit enthält eine Pufferzeit von 2 Stunden. Die Bearbeitung führt ein Mitarbeiter durch. Für dieses Beispiel ergeben sich drei Fälle:

1. $ZAU_{Ist} < ZAU_{Plan} + \text{Zeitpuffer} \Rightarrow$ Der Zeitpuffer wurde nicht oder nur teilweise genutzt.
2. $ZAU_{Ist} = ZAU_{Plan} + \text{Zeitpuffer} \Rightarrow$ Der Zeitpuffer wurde vollständig ausgenutzt.
3. $ZAU_{Ist} > ZAU_{Plan} + \text{Zeitpuffer} \Rightarrow$ Die Prozesszeit wurde trotz Zeitpuffer überschritten.

Für diese drei Fälle wird für ein Gedankenexperiment von der üblichen Praxis, Plan-Auftragszeiten als Rückmeldewert zu verwenden, abgewichen. Stattdessen wird die real genutzte Ist-Auftragszeit ZAU_{Ist} verwendet. Dies ist sinnvoll, da in der üblichen Praxis die Zeitpuffer nicht implizit in den Auftragszeiten verrechnet sind. Stattdessen nutzt die Planung Auftragszeitpuffer, um Unsicherheiten auszugleichen.

Im ersten Fall erfassen die Rückmeldedaten zu einem früheren Zeitpunkt eine geringere Auftragszeit als Abgang. Zum Plan-Bearbeitungsende liegt somit ein Rückstand für diesen Prozess in Höhe der nicht verbrauchten Pufferzeit vor. Um diesen aufzuholen, veranlasst die Kapazitätssteuerung eine Schichterweiterung. Real ist zum Plan-Bearbeitungsende der Auftrag bereits abgeschlossen und es gab eine Phase, in der Mitarbeiter nicht gearbeitet haben. Der geplante Prozess war beendet und ein Nachfolgeauftrag war erst später verfügbar. Aufgrund der zurückgemeldeten Differenz zwischen Ist- und Soll-Abgang errechnet die Steuerung jedoch einen Rückstand und erhöht die Kapazität.

Im zweiten Fall greift die Kapazitätssteuerung nicht ein, da zwischen Plan- und Ist-Zustand kein Unterschied besteht. In diesem Fall ist jedoch der Algorithmus zur Berechnung der Prozesszeit so anzupassen, dass die Pufferzeit Bestandteil der Prozesszeit wird. Eine Pufferzeit ist hier unnötig, da die Bearbeitungsdauer dem Zeitpuffer der realen Dauer entspricht. Die Steuerung reagiert aber in diesem Fall wie gewünscht. Im realen Produktionsablauf ist jedoch kaum zu bestimmen, ob die Pufferzeit für den geplanten oder einen anderen Auftrag verwendet wurde.

Im dritten Fall erfasst die Steuerung zu einem späteren Zeitpunkt eine höhere Durchführungszeit als die geplante. Durch die verspätete Rückmeldung der Auftragszeit kommt es zunächst zu einem positiven Rückstand. Die Kapazitätssteuerung veranlasst deshalb eine Kapazitätserweiterung. Sobald der Prozess jedoch abgeschlossen ist, erfassen die Rückmeldedaten eine Auftragszeit, die höher ist als die geplante. Hierdurch gerät das System in einen negativen Rückstand. Die Kapazitätssteuerung reduziert im Fall eines negativen Rückstands die Kapazität.

Das beschriebene Verhalten zeigt, dass die Kapazitätssteuerung bei Auftragszeiten mit Puffern invers zum gewünschten Verhalten reagiert. Im ersten Fall müsste sie die Kapazität mit Abschluss des Auftrags reduzieren, sodass kein negativer Rückstand aufgebaut wird. Im dritten Fall ist die Kapazität zu erhöhen, um den Rückstand aufzuholen. Außerdem verschiebt die höhere Auftragszeit für alle folgenden Aufträge den Rückstand in die negative Richtung. Die Steuerung wird somit eine Kapazitätsreduktion herbeiführen, obwohl eigentlich ein positiver Rückstand besteht. Der zweite Fall aktiviert die Kapazitätssteuerung nicht und hat nur einen Effekt für die Bestimmung der Plan-Auftragszeit.

Ein Konzept, dass Auftragszeiten mit impliziten Zeitpuffern erfasst und der Kapazitätssteuerung eine richtige Reaktion ermöglicht, müsste sowohl in den Plan- als auch den Ist-Zeiten diese Pufferzeiten erfassen und interpretieren. Dies hat verschiedene Nachteile. So steigt der Aufwand für Berechnung und Erfassung der Kenngrößen deutlich und Durchlaufdiagramme lassen sich aufgrund der häufigen Änderungen schlecht miteinander vergleichen. Außerdem sind Plan-Abweichungen in solchen Durchlaufdiagrammen schwieriger zu identifizieren.

Um diese Nachteile zu vermeiden, ist ein Umdenken in der schiffbaulichen Planung notwendig: Anstatt den Auftragszeiten Zeitpuffer zuzuschlagen, sind diese über Kapazitätspuffer zu definieren. Hierdurch hat die Produktion die Möglichkeit, bei einer zu klein abgeschätzten Auftragszeit die Bearbeitung zu beenden, ohne nachfolgende Aufträge zu verzögern. Die getrennte Definition von Auftragszeit und Puffer erfüllt die Anforderung, Zeitpuffer transparent darzustellen (A8.2 ✓).

Wie bereits beschrieben, ist es Ziel der Planung, durch implizite Zeitpuffer die Unsicherheit bei der Abschätzung von Auftragszeiten handhaben zu können. Es werden somit Kapazitätsreserven geschaffen, die sich später auf falsch geplante Arbeitsinhalte umverteilen lassen. Neben den Problemen, die aus dieser Kapazitätsplanung für die Bewertung und die Steuerung resultieren können, entstehen außerdem noch weitere Probleme.

So nimmt sich die Planung die Möglichkeit, ihre Algorithmen zur Abschätzung der Auftragszeiten zu verbessern, da sie nicht über die reale Nutzung der Auftragszeiten informiert wird. Es ist nicht möglich, Durchlaufzeiten zu optimieren, da unklar ist, an welchen Aufträgen geplante Kapazitäten genutzt bzw. nur teilweise genutzt wurden. Somit sind weder Rückstände transparent bestimmbar noch lassen sich freie Kapazitäten für die Rückstands-beseitigung nutzen. Es ist auf Basis dieser Planung nur begrenzt möglich, eine sinnvolle Kapazitätssteuerung zu etablieren.

Um trotz der unsicheren Datenbasis eine Kapazitätssteuerung zu ermöglichen, ist es somit notwendig, Kapazitätspuffer und nicht Zeitpuffer in den frühen Phasen der Planung vorzusehen und diese anschließend zu verwenden, um fehlerhafte Planungen auszugleichen. Hieraus folgen jedoch weitere Gesichtspunkte:

- Die Planung ist stetig an den aktuellen Informationsstand anzupassen.

- ☐ Der Arbeitsfortschritt ist genau zu erfassen und der Planung für Anpassungen zur Verfügung zu stellen.
- ☐ Ungenutzte Kapazitäten sind ebenso zu melden wie ein Kapazitätsmangel.
- ☐ Ziel der Produktion und Planung muss die stetige Optimierung des Kapazitätsverbrauchs sein.
- ☐ Ein stetiger Wissenstransfer zwischen Produktion und Planung ist zu etablieren, sodass Planungsqualität und Rückmeldequalität stetig verbessert werden.

Es ist somit nicht zielführend, Aufwand in die Berücksichtigung von Zeitpuffern in Auftragszeiten bei der Etablierung einer Kapazitätssteuerung zu stecken. Stattdessen ist der Informationsfluss zwischen der Planung und der Produktion zu verbessern, sodass geplante Auftragszeiten mit den realen korrelieren. Die Anforderung, Zeitpuffer bei der Kapazitätssteuerung zu berücksichtigen, wird somit verworfen (A8.1 ✕). Stattdessen sind Auftragszeiten und Kapazitätspuffer getrennt zu definieren.

5.3.6 Erfüllung der Anforderungen an die Kapazitätssteuerung

Mit der Erfüllung der Anforderungen ist die Konzeptentwicklung für die Kapazitätssteuerung abgeschlossen. Die folgende Tabelle fasst alle Teilanforderungen zusammen und zeigt auf, ob die Anforderungen erfüllt werden konnten. Für die Anforderung A8.1 wurde gezeigt, dass das aktuelle Vorgehen in der schiffbaulichen Planung nicht sinnvoll ist.

Tabelle 5.3: Anforderungen an die Implementierung der Kapazitätssteuerung

D6	Defizite - Definition des Kriteriums der Kapazitätsanpassung	
A6.1	Es ist ein Kriterium für die Kapazitätsanpassung zu definieren.	✓
A6.2	Der Abgangszeitpunkt für die Arbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter ist zu erfassen.	✓
A6.3	Der Abgang ist so zu erfassen, dass eine schnelle Reaktion auf Plan-Abweichung möglich wird.	✓
A6.4	Für die Fläche ist der Abgang in geleisteten Zeiteinheiten und in Quadratmetern zu erfassen. Für das ASM ist der Abgang in Zeiteinheiten je Qualifikation zu erfassen.	✓
D7	Defizite - Definition des Umfangs der Kapazitätsanpassung	
A7.1	Die implementierte Kapazitätssteuerung muss in der Lage sein, die Kapazität des ASM zu verändern.	✓
A7.2	Die Kapazitätsanpassung muss flexibel auf unterschiedliche Rückstandssituationen reagieren können.	✓
A7.3	Der Simulationsanwender muss die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung einstellen können.	✓
A7.4	Eine Kapazitätsanpassung sollte sowohl zur Kapazitätserhöhung als auch -senkung führen können.	✓
A7.5	Die Kapazitätsanpassung muss für jede Baustelle getrennt möglich sein.	✓
D8	Defizite, die aus Zeitpuffern in den Auftragszeiten resultieren	
A8.1	Zeitpuffer müssen bei der Kapazitätsanpassung berücksichtigt werden.	✓
A8.2	Zeitpuffer in der Auftragszeit sind klar zu definieren und nachvollziehbar darzustellen.	✕

Mit den beschriebenen Konzepten zur Umsetzung einer passenden Produktionsplanung, Auftragsfreigabe sowie Kapazitätssteuerung sind für drei der vier Aufgaben des Modells der Fertigungssteuerung Konzepte vorgestellt worden. Die Konzepte für die letzte Aufgabe, die Reihenfolgebildung, beschreiben die folgenden Abschnitte.

5.4 Gestaltung der Reihenfolgebildung

Die bisher vorgestellten Konzepte zeigen Unterschiede des Fertigungsprinzips Baustellenfertigung gegenüber den anderen Fertigungsprinzipien auf. Diese Unterschiede haben Auswirkungen auf die Reihenfolgebildung einer Baustellenfertigung, weshalb diese zunächst zusammengefasst werden und erst anschließend die Diskussion der einzelnen Anforderungen erfolgt.

Grundsätzlich ist jedoch schon an dieser Stelle festzustellen, dass es nicht Ziel dieser Arbeit ist, eine ideale Reihenfolgeregel zu bestimmen oder gar zu entwickeln. In den zuvor diskutierten Aufgaben besteht bereits viel Potenzial zur Verbesserung und eine große Notwendigkeit zur Adaption. Die Reihenfolgeregelung ist im Vergleich zu Serienfertigung dagegen nicht von großem Einfluss. Dennoch ist es notwendig, das Vorgehen zur Reihenfolgebildung zu systematisieren.

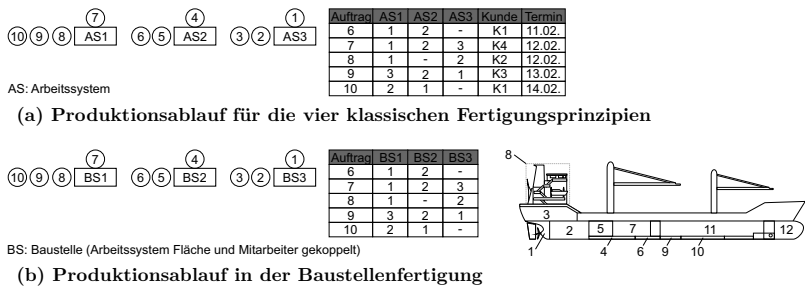
5.4.1 Unterschiede in der Reihenfolgebildung für die Baustellenfertigung

Der größte Unterschied der Baustellenfertigung zu anderen Fertigungsprinzipien ist, dass sich vor der Baustelle keine realen Warteschlangen bilden. Eine Regel zur Reihenfolgebildung ist hier unnötig, da kaum Wahlmöglichkeiten bestehen.

Es ist aber möglich, eine virtuelle Warteschlange zu bilden, die alle zukünftig zu bearbeitenden Blöcke enthält. Jedoch greift hier eine weitere Besonderheit der schiffbaulichen Baustellenfertigung. Während in den anderen Fertigungsprinzipien die Aufträge um die Kapazität des jeweiligen Arbeitssystems konkurrieren und üblicherweise unabhängig voneinander sind, ist dies in der Baustellenfertigung nicht der Fall.

Blöcke, die über eine Baustelle fließen, gehören meist zu einem Schiff. Um dieses Schiff zu errichten, ist es notwendig, die erstellten Blöcke in einer bestimmten Reihenfolge zur Verfügung zu stellen. Es ist offensichtlich, dass zuerst die Blöcke produziert werden, die auch zuerst verbaut werden müssen. Baut eine Werft innerhalb einer Baustelle Blöcke für unterschiedliche Schiffe, besteht diese Abhängigkeit nur für Blöcke eines Schiffs.

In Abbildung 5.10 ist dieser Unterschied zwischen den Fertigungsprinzipien zusammengefasst. In der Tabelle in Abbildung 5.10a sind für alle Produkte die genutzten Arbeitssysteme, die Kunden



12401

Abbildung 5.10: Abhängigkeit zwischen Aufträgen in der Baustellenfertigung im Vergleich zum Werkbank-, Verrichtungs-, Insel- und Fließprinzip

und die Liefertermine aufgelistet. Zwischen den Produkten bestehen keine Abhängigkeiten. Für die Reihenfolgebildung bietet sich hier das Priorisieren nach Termin an.

In Abbildung 5.10b ist die gleiche Tabelle für die Baustellenproduktion abgebildet. Hier sind keine Termine für die einzelnen Blöcke vorgegeben. Im Schiffbau ist es üblich, mit dem Kunden den Brennstart, den Einbautermin der Hauptmaschine sowie den Liefertermin zu vereinbaren. Weitere Termine legt die Werft lediglich zur Planung und Steuerung ihrer Produktion fest. Diese lassen sich somit unter Beachtung der drei anderen Termine beliebig festlegen.

Aus der Schiffsdarstellung ist jedoch eine logische Reihenfolge für die Fertigung der Blöcke abzuleiten, da Schiffe meist vom Heck zum Bug und von unten nach oben errichtet werden. Es besteht jedoch etwas Flexibilität in der Produktionsreihenfolge: So ist es möglich, nach Block 2 entweder Block 3 oder Block 4 zu montieren. Außerdem ist es möglich, nicht montierbare Blöcke auf Pufferflächen zwischenzulagern. Es ist jedoch nicht möglich, vor Block 3 Block 8 zu montieren. Aufgrund dieser Struktur ergibt sich für die Werft ein viel größerer Spielraum bei der Festlegung einer Reihenfolge. Sie muss lediglich sicherstellen, dass sie die mit dem Kunden vereinbarten Termine einhält.

Im Unterschied zum Teilarbeitssystem Fläche lassen sich für das Teilarbeitssystem Mitarbeiter Warteschlangen bilden. Da sich die Mitarbeiter aber frei auf der Baustelle bewegen, sind diese Warteschlangen ebenfalls nur schwer physisch zuzuordnen. Sie sind aber als abzuarbeitender Auftrag den Auftragslisten zu entnehmen.

Aufgrund der großen Ähnlichkeit dieses Arbeitssystems zu einem klassischen Arbeitssystem wie einer Werkzeugmaschine ist davon auszugehen, dass die Reihenfolgebildung einen ähnlichen Effekt auf Durchlaufzeit und Kapazität hat, wie Yu sie beschreibt [Yu01, S. 54]. Hierbei wird aber davon ausgegangen, dass die Reihenfolgebildung keinen Einfluss auf die Auftragszeiten hat.

Dies ist jedoch mit Schiffen nicht der Fall. So ist beispielsweise die Montage von Rohren im geschlossenen Schiffskörper aufwendiger als in einer offenen Blockstruktur ohne Außenhaut. Dasselbe gilt auch für viele Schweiß- und Ausstattungsarbeiten. Die große Herausforderung ist es jedoch, den Effekt auf die Montagedauer und den Kapazitätsbedarf abzuschätzen, um anschließend eine günstige Montagestrategie zu wählen.

Der Aufwand, verschiedene Montagestrategien mit ihren Auftragszeiten zu hinterlegen, zu bewerten und auszuwählen und gegebenenfalls an veränderte Situationen anzupassen, ist jedoch sehr groß. Deshalb wird hiervon abgesehen und die Arbeit konzentriert sich darauf, eine transparente Reihenplanung zu ermöglichen und anschließend die Reihenfolgebildung zuverlässig durchzusetzen.

Eine weitere Besonderheit ist der Kundeneinfluss auf die Produktion. Während in den anderen Fertigungsprinzipien eine Vielzahl an Kunden Termine für verschiedene voneinander unabhängige Produkte festlegt, ist die Situation im Schiffbau eine andere: Hier legt der Kunde nur sehr wenige Termine mit der Werft fest, jedoch nimmt er stark Einfluss auf die Struktur des Produktes. Teilweise kommt es auch in späten Phasen der Produktion noch zu starken Veränderungen, die den Produktionsplan deutlich stören. Hier können Veränderungen der Reihenfolge sowohl einen positiven als auch einen negativen Effekt auf die Auftragszeit haben. Eine allgemeine Aussage ist hier jedoch nicht möglich, da zu viele Abhängigkeiten und Wechselwirkungen bestehen.

Unter Berücksichtigung dieser drei Besonderheiten der Baustellenfertigung werden die folgenden Abschnitte nun auf die Konzepte zur Umsetzung einer Reihenfolgebildung eingehen.

5.4.2 Definition einer sinnvollen Reihenfolgeregel für die Baustellenfertigung

Die beschriebenen Unterschiede zwischen der Baustellenfertigung und den vier anderen Fertigungsprinzipien zeigen auf, dass sich die Reihenfolgeregelung vor allem auf die Bestimmung sinnvoller Montagereihenfolgen für das Arbeitssystem Mitarbeiter konzentrieren muss. Hierbei besteht nur

noch wenig Spielraum für eine Variation dieser, ohne dadurch umfangreiche Plan-Änderungen zu verursachen.

Die erste Anforderung an die Reihenfolgebildung legt fest, dass die Reihenfolgeregel helfen muss, die logistischen Ziele zu erreichen (A9.1). Unter der Voraussetzung, dass die Plan-Reihenfolge den besten bekannten Ablauf beschreibt, muss die Reihenfolgebildung am Arbeitssystem die geplante Reihenfolge umsetzen. Das bedeutet für das Arbeitssystem Mitarbeiter, Aufträge in der Plan-Reihenfolge zu bearbeiten. Das implementierte Modell setzt dieses mit der Abarbeitung nach Termin durch (vgl. Abbildung 5.11).

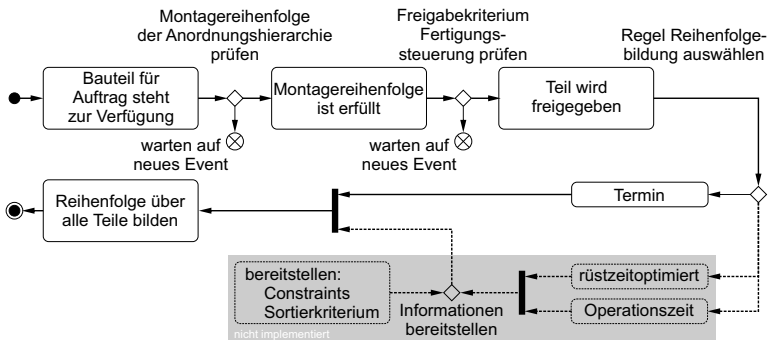
Zunächst muss das Teil für einen Auftrag bereitstehen. Anschließend überprüft der Constraint-Manager, ob die Randbedingungen für die Bearbeitung erfüllt sind. Dies sichert die Anordnungshierarchie der Einzeltätigkeiten ab. Anschließend ist das Freigabekriterium der Fertigungssteuerung zu prüfen. Nur für Teile, die freigegeben sind, kann eine Reihenfolgebildung stattfinden. Das Simulationsmodell verwendet hierfür eine FIFO-Liste, in der es das Material vorhält, bis freie Mitarbeiter zur Verfügung stehen.

Durch die Prüfung von Constraints und Freigabeterminen erfolgt die Abarbeitung typischerweise nach Termin in der Plan-Reihenfolge. Da die Constraints die Plan-Reihenfolge bewusst nicht vollständig festlegen, sind Abweichungen von dieser jedoch möglich. Da dieser Fall aber selten auftritt, wird an dieser Stelle von einer Abarbeitung nach Termin in Plan-Reihenfolge gesprochen.

Ist eine weitere Regel zur Reihenfolgebildung zu implementieren, ist die FIFO-Liste zu ersetzen. Jedoch setzt das voraus, dass zusätzliche Informationen für die Reihenfolgebestimmung bereitgestellt werden (gestrichelte Elemente in Abbildung 5.11). Die Forderung, eine definierte Reihenfolgebildung sicherzustellen, ist durch das implementierte Vorgehen abgedeckt (A9.1 ✓).

Die Anforderung A9.2 hat das Ziel, Abweichungen von der Montagereihenfolge zu verhindern. Aufgrund des vorgestellten Prozesses zur Reihenfolgebildung in der Simulation ist dies bereits abgesichert. Jedoch kann die vorgestellte Reihenfolgeregel auch keine Anpassung in der Reihenfolge vornehmen. Sie sichert lediglich die Reihenfolgebildung für das Arbeitssystem Mitarbeiter ab und übernimmt damit die gleiche Funktion wie die Reihenfolgebildung am realen System.

Soll die Terminregel ersetzt werden, sind neben dem Sortierkriterium auch wieder die Constraints



12394

Abbildung 5.11: UML-Diagramm zur Reihenfolgebildung im Simulationsmodell

der Anordnungshierarchie zu prüfen. Änderungen in der Reihenfolge sind nur zulässig für Teile, die nicht voneinander abhängen. Dies ist für Teile unterschiedlicher Blöcke der Fall (Abbildung 4.4, S. 67) und für Teile, die nicht über Constraints verknüpft sind. Hierdurch ist auch sichergestellt, dass keine Abhängigkeit der Auftragszeiten von der Reihenfolge besteht. Halten alle Varianten der Reihenfolgebildung dies ein, so ist die Anforderung erfüllt (A9.2 ✓).

Kritisch für die Reihenfolgebildung ist eine starre Reihenfolge (A9.3). Diese entsteht, wenn so viele Randbedingungen definiert sind, dass keine Flexibilität mehr besteht. Die hierbei entstehende Montageabfolge ist jedoch mit einem hohen Definitionsaufwand verbunden und typischerweise sind viele der Regeln nicht zwingend. Im Fall einer Änderung am Produkt ist außerdem das gesamte Set an Randbedingungen zu hinterfragen und häufig teilweise aufzulösen.

Um dies zu verhindern, kann das Simulationsmodell verschiedene Arten von Constraints verwenden: lokale, globale, zeitliche und ressourcenbindende. Lokale Constraints definieren Abarbeitungsfolgen zwischen Teiletypen (vgl. Tabelle 5.4). Ihnen zu Grunde liegen meist technologische Randbedingungen. Aus den Beispieldaten ist zu entnehmen, dass vor den verschiedenen Schweiß Tätigkeiten zunächst die Einzeltätigkeit *Bauwerk räumen* auszuführen ist.

Globale Constraints definieren für spezifische Teile eine Rangfolge in der Montage. Hierbei entstehen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen, wie sie aus Projektplanungswerkzeugen bekannt sind. Ziel der Anwendung dieser Constraints ist es einerseits, Reihenfolgen zwischen gleichen Teiletypen zu definieren. Andererseits entsteht die Möglichkeit, Reihenfolgen typübergreifend zu definieren. Dies ist von besonderem Interesse, wenn eine Reihenfolgeabweichung zur Beeinflussung der Auftragszeiten führt, da die Montage hierdurch erschwert wird [Löd11]. Globale Constraints helfen, diese Beeinflussung zu verhindern.

Die zeitlichen und ressourcenbindenden Constraints sollen an dieser Stelle nicht detailliert erläutert werden. Sie definieren Constraints wie die globalen Constraints, indem sie spezifische Teile mit einem Kriterium verknüpfen. Mit dem angewendeten Constraint-Konzept ist es möglich, eine flexible Beschreibung der Reihenfolge zu formulieren, die anschließend von der Reihenfolgebildung am Arbeitssystem Mitarbeiter noch zu beeinflussen ist (A9.3 ✓).

5.4.3 Informationsbedarf der Reihenfolgeregulung

Um eine Reihenfolgebildung durchführen zu können, ist es notwendig, ein Sortierkriterium zur Verfügung zu stellen (vgl. Abbildung 5.11). Da keine Reihenfolgebildung für das Teilsystem Baustelle erfolgt, ist das Kriterium nur für das Teilsystem Mitarbeiter zu definieren (A10.1).

Tabelle 5.4: Lokale Constraints für den Teiletyp Bauwerk

Montagestrategie	Teiletyp	Einzeltätigkeit	TeiletypC	EinzeltätigkeitC
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Bauwerk	Umbauen
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Naht	Schweißen
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Naht AH	Schweißen
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Naht HP Quer	Schweißen
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Naht Tack	Heften
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Naht MiG	Schweißen
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Rohr	Schweißen
9003	Bauwerk	Bauwerk räumen	Transporthilfe	Schweißen

Für die implementierte Reihenfolgebildung nach Termin ist lediglich die Plan-Reihenfolge umzusetzen. Dies geschieht mit einer Liste, die in der weit überwiegenden Zahl der Fälle nach Termin befüllt und dann nach dem First-in-First-out-Prinzip abzuarbeiten ist. Die Anforderung ist in der Simulation somit erfüllt (A10.1 ✓). In der realen Produktion stellt die Durchsetzung jedoch eine größere Herausforderung dar. Im Vergleich zu vielen anderen meist komplizierteren Regeln ist die gewählte Reihenfolge jedoch mit akzeptablem Aufwand durchzusetzen.

Um abzusichern, dass die Reihenfolgebildung nur zu technisch umsetzbaren Vertauschungen führt (A10.2), ist das eingeführte Constraint-Konzept aufzugreifen. Dies stellt während der Auftragsfreigabe die Umsetzbarkeit sicher und muss erneut angewendet werden, wenn es durch die Reihenfolgebildung zu erneuten Vertauschungen kommt. Hier ist es jedoch nur noch nötig, die Constraints zwischen den zu vertauschenden Teilen zu prüfen. Da jedoch keine vertauschende Reihenfolgeregel implementiert wurde, erfolgt diese Prüfung nicht. Aus Abbildung 5.11 ist aber abzuleiten, zu welchem Zeitpunkt die Prüfung erfolgen muss (A10.2 ✓).

Eine kritische Anforderung leitet sich aus dem Einfluss der Montagereihenfolge auf die Auftragszeiten ab. Hier bietet das Simulationsmodell durch die algorithmische Beschreibung von Bearbeitungszeiten die Möglichkeit, diesen Einfluss zu modellieren. Als Beispiele sind hier die Baulage oder die Montage in verwinkelten Situationen zu nennen.

Die Baulage eines Blocks ändert sich im Verlauf der Produktion und führt dazu, dass Montagen z. B. ungünstig über Kopf oder in einer günstigen Situation auszuführen sind. Ein Parameter, der die Bearbeitungsdauer verlängert, kann so mit der Lage eines Blocks gekoppelt werden und ermöglicht hierdurch eine Berücksichtigung dieser Zusammenhänge. In gleicher Weise ist die Montage in verwinkelten Situationen zu modellieren. Diese treten beispielsweise auf, wenn Rohre bei geschlossener Schiffsaußenhaut oder in offenem Zustand zu montieren sind. Im zweiten Fall ist die Montagedauer kürzer.

Die Anforderung, diese Fälle abbilden zu können, ist über die algorithmische Prozessbeschreibung erfüllt (A10.3 ✓). Jedoch ist diese Möglichkeit nur unter bestimmten Randbedingungen einzusetzen. Sie bildet eine gute Möglichkeit, verschiedene Pläne zu ermitteln und diese miteinander zu vergleichen. In Verbindung mit Soft-Constraints [Bei08, Bei10] ist sie außerdem ein Optimierungskriterium.

Besteht jedoch ein Plan und soll dieser durch die Steuerung realisiert werden, ist von der Nutzung des Ansatzes abzusehen: Durch die algorithmische Beschreibung der Auftragszeiten entstehen sonst zu viele Einflussparameter, die gegenwärtig nicht zu handhaben sind. Treten jedoch starke Störungen auf und ist die Fertigungssteuerung nicht in der Lage, den Plan zu realisieren, ist der Ansatz sehr gut für eine Anpassung des Plans zu verwenden.

5.4.4 Nutzen unterschiedlicher Reihenfolgeregeln für die Baustellenfertigung

Den Einfluss der Reihenfolgebildung auf ein Produktionssystem diskutiert die Literatur vielfach [Sch00, Wie10, Sch06]. Eine detaillierte Übersicht zum Einfluss auf z. B. Werkstattfertigungen gibt Bornhäuser [Bor09]. Welchen Einfluss die Reihenfolgeregeln auf die Baustellenfertigung haben, ist bisher jedoch nicht untersucht worden. Die folgenden Absätze stellen Teilkonzepte vor, welche Reihenfolgeregel das Simulationssystem nutzt, wie sich weitere Regeln implementieren lassen und welche Besonderheiten für die Baustellenfertigung zu berücksichtigen sind.

Die bereits eingeführte Terminregel stellt sicher, dass eine Reihenfolgebildung am Arbeitssystem Mitarbeiter besteht (A11.1 ✓). Um jedoch die Termintreue entsprechend anderer Gesichtspunkte zu beeinflussen, sind weitere Reihenfolgeregeln notwendig. Diese sind jedoch nicht implementiert worden (A11.2 ✗). Aufgrund der vorgestellten Struktur (vgl. Abbildung 5.11, S. 100) sind jedoch weitere Regeln implementierbar.

Entsprechend der letzten Anforderung ist es notwendig, die Reihenfolgesteuerung so zu gestalten, dass sie die Verknüpfung eines Montageinhalts mit dem jeweiligen Block bestimmen kann (A11.3). Dies ist über die Parent-ID möglich, die als Bestandteil der Meta-Daten dem Bauteil zugeordnet ist. Sie identifiziert den Block, in den das Teil einzubauen ist.

Für alle Teile ist somit prüfbar, welche Teile unterschiedliche Parent-IDs besitzen. Für diese Teile besteht untereinander keine Reihenfolgeabhängigkeit. Auf diese Prüfung verzichtet jedoch die implementierte Lösung. Stattdessen überprüft das Modell die lokalen Constraints. Diese definieren die bestehenden Abhängigkeiten im Modell vollständig.

Außerdem ist diese Prüfung bereits zwingend durchzuführen (vgl. Abbildung 5.11). Die Zuordnung zwischen Bauteil und Block zu untersuchen, bedeutet hier nur eine Aufwandssteigerung, die keinen zusätzlichen Nutzen erzeugt. Die Anforderung ist somit indirekt erfüllt, da sichergestellt ist, dass Teile unterschiedlicher Blöcke sich beliebig in ihrer Reihenfolge tauschen lassen (A11.3 ✓).

5.4.5 Erfüllung der Anforderungen an die Reihenfolgebildung

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben Teilkonzepte zur Absicherung der Anforderungen aus Kapitel 4. Den Erfüllungsgrad der einzelnen Anforderungen fasst Tabelle 5.5 zusammen. Anforderung A11.2 ist nicht erfüllt, jedoch wurde ein Konzept vorgestellt und die Struktur des Simulationsmodells ermöglicht es, weitere Regeln zur Reihenfolgebildung zu implementieren.

Tabelle 5.5: Anforderungen an die Reihenfolgeregelung in der Baustellenfertigung

D9	Für die Baustellenfertigung sind keine sinnvollen Reihenfolgeregeln definiert.	
A9.1	Die Reihenfolgeregel muss eine definierte Reihenfolgebildung umsetzen.	✓
A9.2	Die Reihenfolgeregel muss die Montagereihenfolgen, die aufgrund der Produktstruktur entsteht, beachten.	✓
A9.3	Die Reihenfolgeregel der Fertigungssteuerung soll keine starre Montagereihenfolge voraussetzen.	✓
D10	Der Informationsbedarf für die Reihenfolgesteuerung ist unbekannt.	
A10.1	Für die Reihenfolgeregelung ist ein Kriterium mit den zugeordneten Informationen festzulegen.	✓
A10.2	Das Reihenfolgekriterium darf nur zu Reihenfolgevertauschungen führen, die zu einer realisierbaren Montagereihenfolge führen.	✓
A10.3	Veränderungen in der Montagereihenfolge und daraus resultierende Veränderungen in der Auftragszeit müssen durch die Simulation abgebildet oder verhindert werden.	✓
D11	Die Wirkung von Reihenfolgeregeln in der Baustellenfertigung ist unklar.	
A11.1	Eine Reihenfolgeregel muss in die Simulation implementiert sein.	✓
A11.2	Für eine variable Beeinflussung der Termintreue des Arbeitssystems Mitarbeiter sind unterschiedliche Reihenfolgeregeln nötig.	✗
A11.3	Die Reihenfolgesteuerung muss in der Lage sein, die Verknüpfung zwischen Montageinhalt und Block zu bestimmen, so dass sie Arbeitsinhalte ohne Reihenfolgeabhängigkeiten erkennen kann.	✓

Mit der Erfüllung dieser Anforderungen ist die Fertigungssteuerung für die Teilsysteme Fläche und Mitarbeiter gestaltet. Das Folgekapitel beschreibt die Implementierung des Simulationsmodells sowie die durchgeführten Experimente zur Modellvalidierung und zur Beurteilung der Fertigungssteuerung. Die Arbeit schließt mit dem Ausblick auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten im Modell und für die Fertigungssteuerung auf Baustellen.

6 Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung

Das folgende Kapitel beschreibt, wie die modellgestützte Fertigungssteuerung zu implementieren ist. Ziel ist es, die Stolpersteine bei der Einführung der Methode aufzuzeigen und Lösungsansätze anzubieten. Die Abbildung des Arbeitssystems Baustelle in einem Simulationsmodell war hierfür der Ansatz, der Komplexität des Arbeitssystems gerecht zu werden. Gleichzeitig ermöglicht die Simulation eine einfachere Veränderung und Evaluation des Arbeitssystems, als dies mit einer realen Fertigung möglich wäre.

Aus diesem Grund beschreibt der erste Abschnitt den Aufbau des Simulationsmodells (Abschnitt 6.1). Diese Beschreibung setzt sich zusammen aus der Vorstellung der logistischen Struktur, der Modellierung der Baustelle sowie der Beschreibung des Vorgehens zur Validierung des Modells.

Ausgehend von diesem validierten Modell untersucht Abschnitt 6.2 die Wirkung der Fertigungssteuerung auf unterschiedliche Störungsszenarien. Anhand der Szenarien lassen sich die Möglichkeiten zur Einflussnahme auf den Produktionsablauf beurteilen. Hierdurch soll dem Anwender einerseits der Nutzen der modellgestützten Fertigungssteuerung in Baustellenfertigungen aufgezeigt werden. Andererseits zeigen die Abschnitte die Grenzen der Fertigungssteuerung im komplexen Umfeld der schiffbaulichen Fertigung auf.

6.1 Aufbau der Versuchsumgebung

Um für die Untersuchung der Fertigungssteuerung eine realitätsnahe Versuchsumgebung zur Verfügung zu stellen, ist es notwendig, mehrere Baustellen zu modellieren und zu verketteten. Hierfür ist das Simulationsmodell in ein Hauptnetz, mehrere Subnetze und verschiedene Bausteine unterteilt. Die folgenden Abschnitte beschreiben das Hauptnetz mit der logistischen Struktur (Abschnitt 6.1.1) und den hierin implementierten Simulationsbausteinen. Die Bausteine stellen die Grundfunktionalitäten der Baustellenfertigung, wie beispielsweise die Personal- und Fertigungssteuerung, zur Verfügung.

Anschließend geht Abschnitt 6.1.2 auf den Aufbau der verwendeten generischen Baustellen ein. Ziel dieses Abschnittes ist es, die Struktur der modellierten Baustellen darzustellen. Alle Baustellen im Simulationsmodell unterscheiden sich in Größe und Aufteilung, jedoch nicht in ihrer Funktion.

Abschnitt 6.1.3 beschreibt die Validierung des Simulationsmodells. Hierfür stellt der Abschnitt die Randbedingungen für die Validierung vor und geht anschließend auf die angewendete Methodik und die Ergebnisse der Validierung ein.

6.1.1 Modellierung der logistischen Struktur einer Werft

Das Hauptnetz lässt sich in die folgenden Bestandteile zerlegen:

- die Bausteine des STS (Simulation Toolkit for Shipbuilding),
- die Bausteine der Fertigungssteuerung,

- ☐ die logistische Struktur des Hauptnetzes,
- ☐ die Eingangsinformationen (Daten und Constraints) sowie die Ausgangsdaten.

Zentrales Element des implementierten Simulationsmodells sind die drei Baustellen (vgl. Abbildung 6.1), die direkt miteinander verknüpft sind. Fertige Blöcke können so in die nachfolgende Baustelle fließen. Innerhalb der Baustellen gibt es weitere Methoden, welche z. B. das Überspringen von Bauplätzen oder das Einlagern ermöglichen. Eine detaillierte Beschreibung von Struktur und Aufbau dieser Baustellen gibt Abschnitt 6.1.2.

Da das Simulationsmodell nur die Produktion auf Baustellen abbilden soll, war es notwendig, Systemgrenzen zu definieren. Über diese lassen sich vor- und nachgelagerte Produktionsbereiche der Werft abgrenzen. Da die vorgelagerten Bereiche Kaufteile, Rohmaterial und Halbzeuge zum Lieferzeitpunkt bereitstellen, ist die Systemgrenze hier mit einer Quelle und einem Lager modelliert. Wechselwirkungen mit nachgelagerten Bereichen sind nicht modelliert, weshalb diese Systemgrenze als Senke modelliert ist, die fertige Blöcke löscht.

Die grundlegenden Funktionalitäten der schiffbaulichen Produktion sind mithilfe des STS (Simulation Toolkit for Shipbuilding) abgebildet. Hierzu gehören die *Modellstatistik* (Rückmeldedaten), die *Materialsteuerung*, das *Schichtregime*, die *Personalsteuerung* sowie ein *Constraint-Manager*. Die *Modellstatistik* erhebt für alle STS-Bausteine die Rückmeldedaten und aggregiert diese. Außerdem stellt sie bereits grundlegende Diagramme und Kennzahlen für die Auswertung zur Verfügung. Sie ist jedoch nicht in der Lage, Durchlaufdiagramme oder das Diagramm zur Analyse der Schichterweiterungen (Abbildung 5.8) zu erstellen.

Die *Materialsteuerung* realisiert die Verschiebung und Bereitstellung aller Blöcke im Modell. Sie enthält auch die Methoden, die das Überspringen von Baustellen und das Umlagern auf eine Lagerfläche ermöglicht. Im Baustein *Schichtregime* definiert der Anwender alle Schichten im Simulationsmodell, sodass die *Personalsteuerung* nur Mitarbeiter innerhalb definierter Zeiten bereitstellt. Die *Personalsteuerung* übernimmt die koordinierende Aufgabe der Mitarbeiterbereitstellung. Hierzu gehört, Mitarbeiter für Aufgaben bereitzustellen sowie den Bestand an freien Ressourcen zu reduzieren bzw. zu erhöhen, wenn Mitarbeiter Aufträge abgeschlossen haben. Schichtregime und Personalsteuerung bilden eine wichtige Informationsquelle für die Bausteine der Fertigungssteuerung.

Der *Constraint-Manager* ist der letzte umfangreiche Baustein aus dem STS-Toolset im Simulationsmodell. Er realisiert die im Konzeptteil beschriebene generische Assoziation von Bauteilen und Prozessschritten.

Informationen innerhalb des Simulationsmodells sind über eine Vielzahl an Tabellen bereitzustellen. In Abbildung 6.1 ist zu sehen, dass beispielsweise der *Constraint-Manager* mit Informationen zu versorgen ist. Die hierauf basierenden Vorgaben fließen anschließend den Baustellen zu und legen hier die Randbedingungen für die Montagesteuerung fest. Alle Baustellen stellen einerseits über die Rückmeldedaten eine Vielzahl an Kennzahlen bereit. Andererseits stellen sie die elementaren Informationen für die Fertigungssteuerung zur Verfügung; die Ausgangsdaten.

Auf Basis dieser Informationen werden von den Bausteinen der Fertigungssteuerung Durchlauf- und Auslastungsdiagramme erzeugt und Steuerungsentscheidungen getroffen. Die Bausteine der Fertigungssteuerung sind unterteilt in

- ☐ den Datengenerator,
- ☐ die Freigabesteuerung,
- ☐ die Kapazitätssteuerung sowie

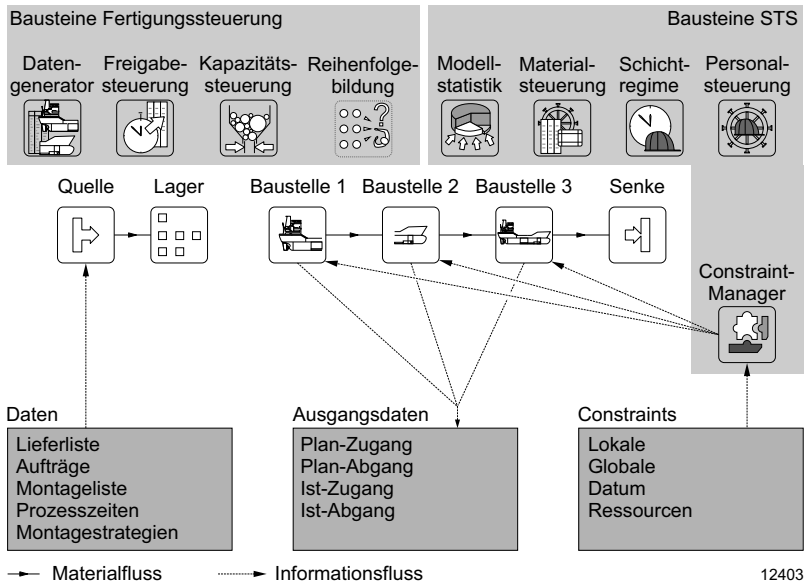


Abbildung 6.1: Hauptnetz des Simulationsmodells

□ die Reihenfolgebildung.

Der *Datengenerator* hat zwei Aufgaben: die Datenerzeugung und die Bereitstellung der Benutzeroberfläche. Über die Benutzeroberfläche kann der Anwender das Mengengerüst für die Plan-Erzeugung definieren. Er ist hierbei nicht auf die vier hinterlegten Produkthierarchien beschränkt, sondern kann diese auch durch weitere Hierarchien ergänzen. Auf Basis des Mengengerüsts erzeugt der *Datengenerator* anschließend das Teilespektrum und die Randbedingungen für die Plan-Erzeugung.

Die Plan-Erzeugung ist eine Funktionalität des Bausteins *Freigabesteuerung*. Auch dieser Baustein hat mehrere Aufgaben. So stellt er neben der Benutzeroberfläche für die Plan-Erzeugung auch die Benutzeroberfläche für die Festlegung der Freigabemethoden sowie für die Erzeugung von Durchlaufdiagrammen zur Verfügung. Außerdem enthält er die Logiken für die automatisierte Plan-Erzeugung und für die Freigabesteuerung.

Auf Basis der durch den *Datengenerator* erzeugten Daten (Lieferliste, Auftragsliste, Montageliste, Prozesszeiten sowie Montagestrategien) und der logistischen Struktur des Simulationsmodells führt der Baustein die Plan-Erzeugung durch, indem er mehrere Simulationsläufe hintereinander ausführt. In diesen Planungsläufen kommen die Funktionalitäten der Fertigungssteuerung nicht zur Anwendung. Ergebnis der Plan-Erzeugung ist ein Produktionsplan.

Elemente *Auslagerungsfläche* und *Ausgangsschnittstelle* ab, wobei die *Ausgangsschnittstelle* den Materialfluss zurück in das Hauptnetz realisiert.

Das *Freigabelager* ist die Komponente, über die die Freigabesteuerung den Zugang zur Fläche steuert. Nur wenn die Freigabebedingung erfüllt ist, kann Material das Lager verlassen. Anschließend steht das Material in der Einlagerungsfläche bereit. Abhängig vom Gewicht hebt entweder der Kran das Material auf die Fläche oder eine Methode verschiebt es direkt an den Montageort: Leichte Objekte und Montagematerial transportieren die Mitarbeiter direkt an den Montageort, weshalb der Transport nicht explizit modelliert ist.

Für die gesamte Transportkette und für die Abarbeitung der Prozessschritte muss sichergestellt sein, dass es nicht zu Reihenfolgeabweichungen kommt. Aus diesem Grund liegt ein großes Augenmerk in der gesamten logistischen Struktur des Bauplatzes darauf, Reihenfolgevertauschungen zu verhindern. Die Einlagerungsfläche ist deshalb in Form eines Lagers modelliert und verhindert Reihenfolgevertauschungen zwischen der Bereitstellung vor der Fläche und der Einlagerung in die Fläche.

Ein Baustein, der eine zielgerichtete Reihenfolgebildung in der Baustelle realisiert, muss Vertauschungen in diesem Lager vornehmen. In diesem Fall ist es jedoch zwingend notwendig, die Constraints zwischen den vertauschten Objekten zu prüfen (vgl. Abbildung 5.11, S. 5.11), um eine realisierbare Montagereihenfolge sicherzustellen.

Sobald Material in die Fläche eingelagert ist, kann die Bearbeitung beginnen. Folgt der Produktionsablauf dem Plan, sind Mitarbeiter verfügbar und beginnen mit der Bearbeitung. Liegt ein Störungsszenario vor und sind beispielsweise Mitarbeiter nicht verfügbar, unterbricht das Modell den Bearbeitungsprozess. Die Bearbeitung beginnt in diesem Fall erst, wenn wieder freie Mitarbeiter bereitstehen. Das betroffene Material gilt dennoch als freigegeben und die Durchlaufzeit hat begonnen. Sobald freie Mitarbeiter verfügbar sind, werden die unterbrochenen Bearbeitungsprozesse in der Reihenfolge abgearbeitet, in der sie unterbrochen wurden. Hierdurch ist sichergestellt, dass es in diesem Fall nicht zu unsystematischen Reihenfolgevertauschungen kommt.

Die Simulation beschreibt die Erstellung eines Blocks als eine Aneinanderreihung verschiedener Produktionsprozesse. Jeder Prozess ist hierbei mit einem Verbrauch von Ressourcen für eine definierte Zeit beschrieben. Führt ein Mitarbeiter eine Montagetätigkeit auf der Fläche aus, steht dieser Mitarbeiter und notwendiges Werkzeug oder Material nicht für andere Prozessschritte zur Verfügung. Mit Abschluss des Prozesses erhöht sich der Ressourcenbestand entsprechend wieder. Die Dauer des Prozesses und damit der Verbrauch der Ressource ist über die Prozesslänge definiert. Prozessschritte auf der Fläche und ihre Dauer sind somit abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen, primär von den zur Verfügung stehenden Mitarbeitern. Da Prozessbeschreibungen keinen Technologiebezug haben, lässt sich jede Art von Produktion auf der Fläche hierüber beschreiben.

Die Simulation steuert die Verfügbarkeit der Mitarbeiter über die Personalsteuerung und das Schichtregime im Hauptnetz (vgl. Abbildung 6.1). Hier greift auch die Kapazitätssteuerung ein, sobald der Baustein einen Rückstand feststellt. Der Simulationsanwender stellt hierzu für jede Baustelle Schwellwerte ein, die festlegen, in welchem Umfang die Kapazitäten der jeweiligen Baustelle bei einem bestehenden Rückstand angepasst werden (vgl. Abbildung 5.9, S. 94). Die Kapazitätssteuerung ändert anschließend das Arbeitszeitmodell im Schichtregime und dieses steuert dann die Verfügbarkeit der Ressource Mitarbeiter.

Ausgehend von der beschriebenen Struktur lassen sich beliebige Flächen in der schiffbaulichen Fertigung modellieren. Die in dieser Arbeit modellierten Flächen sind als Rechtecke modelliert. Die Abmessungen fasst Tabelle 6.1 zusammen. Die XY-Ausdehnung definiert die Grundfläche, die Höhe legt die Operationshöhe der Krananlage fest. Sperrflächen verringern die Grundfläche und reservieren diese beispielsweise für Fahrwege. Die Matrixgröße definiert die Auflösung der Fläche.

Tabelle 6.1: Eigenschaften der Baustellen im Simulationsmodell

Baustelle	Ausdehnung X [m]	Ausdehnung Y [m]	Höhe [m]	Sperrflächen [m²]	Matrixgröße [m]
Baustelle 1	25	20	15	keine	1
Baustelle 2	45	28	15	keine	1
Baustelle 3	40	42	15	keine	1

Die modellierten Bauplätze erheben nicht den Anspruch, die reale Fertigung einer Werft nachzubilden. Sie orientieren sich jedoch in Aufbau und Funktion an realen Produktionsstätten und bilden deren Abläufe nach. Das vorgestellte Modell ist nicht durch direkten Vergleich mit der Realität zu validieren. Die Randbedingungen und Voraussetzungen für die Validierung sowie den Validierungsansatz beschreiben die folgenden Abschnitte.

6.1.3 Validierung des Simulationsmodells

Die Validierung eines Modells stellt Simulationsexperten und Anwender immer wieder vor große Herausforderungen, da häufig unklar ist, wie und in welchem Umfang ein Modell zu prüfen ist. Diese Arbeit orientiert sich am Vorgehen von [Rab08, Bal98] und an der VDI-Richtlinie 3633 [VDI10]. Speziell für die Validierung von logistischen Simulationsmodellen ist die folgende Definition sehr greifbar [Rab08, S. 15]:

„Validierung ist die kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben.“

Da kein reales System besteht, mit dem sich das entwickelte Simulationsmodell vergleichen lässt, muss das Validierungsverfahren in ein passendes Vorgehen überführt werden. Hierfür waren zwei Gesichtspunkte maßgeblich:

- ☐ Realisierung einer Versuchsumgebung, die realitätsnahe Simulationsszenarien ermöglicht.
- ☐ Korrekte Funktion der implementierten Funktionen der Fertigungssteuerung.

Die folgenden Abschnitte gehen nicht auf die Validierung der vorhandenen STS-Bausteine ein. Diese sind bereits seit vielen Jahren und bei einer Vielzahl an Partnern in verschiedenen Branchen im Einsatz.

Validierung der Versuchsumgebung

Die Validierung der Versuchsumgebung wurde in zwei Bestandteile zerlegt: die Validierung der logistischen Struktur sowie die Validierung der Daten. Ziel der Validierung der logistischen Struktur war es, ein realitätsnahes Netz von Baustellen zu erstellen. Zur Anwendung kamen die Ansätze Animation und Monitoring. Sowohl während der Validierung als auch bei den Simulationsanalysen sind nur Festwerte verwendet worden.

Beim Animationsansatz begutachtet ein Simulationsexperte das Modell in verschiedenen Simulationsläufen und überprüft z. B., ob das Modell Bauteile zu den richtigen Baustellen transportiert. Speziell der Plan-Zustand des Produktionsplans ist hier einfach zu analysieren, da in diesem Fall die Objekte nur kurz an Stationen verweilen, bevor die Umlagerung erfolgt. Außerdem beginnt auch die Bearbeitung der Objekte sofort. Verzögerungen sind deshalb ein leicht zu identifizierendes

Tabelle 6.2: Aufbau der Produktstrukturen (Muster) im Simulationsmodell

Muster	Baugruppen	Bauteile	Ausrüstungsteile	Rohre	Schweißstöße	ET	AH-Platte	AH-Profil
A-09	2	30	8	6	71	47	0	0
R-01	4	27	30	50	170	66	5	8
V-05	6	5	18	5	78	12	6	33
A-03	4	56	66	99	332	161	5	39
Summe	16	118	122	160	651	286	16	80

Indiz für Fehler in der logistischen Struktur. Im entwickelten Modell liegen solche Verzögerungen nicht vor.

Beim Monitoringansatz überprüft der Simulationsexperte Zustandsgrößen und Variablen während des Simulationslaufes. Informationsträger waren hier die Auftrags-, Material- und Bauwerkstabellen der Freigabelager. Diese wurden mit den animierten Bauteilflüssen abgeglichen und bezüglich ihrer Plausibilität bewertet. Auf diese Weise lässt sich jedoch nur der Bauteilfluss in einzelnen Modellabschnitten bewerten. Die logistische Struktur wurde im Verlauf von 1½ Jahren wöchentlich mit beiden Ansätzen untersucht. Es wurden ca. 450 Simulationsexperimente allein für die Validierung der Struktur durchgeführt.

Beide Ansätze sind nur begrenzt in der Lage, die Validität vollständig nachzuweisen. Sie können lediglich das Modellverhalten in einzelnen Abschnitten überprüfen. Da jede Baustelle jedoch auf der gleichen generischen Grundstruktur basiert, war die Prüfung einer Baustelle hinreichend. Aufgrund der Komplexität des Systems und dem Mangel an Vergleichssystemen lassen sich Verfahren wie beispielsweise Ereignisvaliditäts-, Festwert- oder Grenzwertest sowie statistische Techniken [Rab08, S. 98 ff.] nicht anwenden.

Die Validierung der Eingangsdaten war nicht notwendig, da hierfür reale Daten vorlagen. Aus diesen ließen sich vier Produktstrukturen (Muster) extrahieren, deren Aufbau in Tabelle 6.2 zusammengefasst ist. Die gelisteten Teile enthalten typische schiffbauliche Bauteile, die hier nicht näher erklärt werden. Für diesen Datenbestand wurde geprüft, ob alle Bauteile bei Montagen Verwendung fanden und ob die jeweilige Montage auf der geplanten Baustelle erfolgte.

Kritisch für die Modellierung einer realen Produktion sind vor allem die Bearbeitungsauern und Constraints, welche sich jedoch auch aus den Realdaten extrahieren ließen. Da sich die Montagereihenfolge der Blöcke simulieren ließ, bestehen keine Constraints, die zu einer nicht realisierbaren Montagefolge führen. Es wurden 217 lokale und 1404 globale Constraints extrahiert und unverändert im Modell verwendet.

Tabelle 6.3: Analyse der Bearbeitungszeiten des Simulationsmodells

Bauteilname	Prozess	Minimum [Sekunden]	Maximum [Sekunden]	Mittelwert [Sekunden]
AH-Platte	Auflegen	0,0	0,0	0,0
	Ausrichten	1200,0	1200,0	1200,0
Rohr	Montieren	0,0	24000,0	6050,0
	Schweißen	0,0	6000,0	861,8

Das Modell nutzt 181 generische Prozessschritte, die mithilfe einer Datenanalyse auf Plausibilität untersucht wurden. Hierfür sind die Minimal- und Maximalwerte sowie der Mittelwert aller Prozessdauern bzw. Prozessgeschwindigkeiten untersucht worden. Tabelle 6.3 ist die Struktur der Analyse zu entnehmen. Der vollständige Datensatz der Analyse ist im Anhang angegeben (Abschnitt B.1).

Das beschriebene Vorgehen sichert die Modellstruktur und den verwendeten Datenbestand ab. Fehler innerhalb des Modells lassen sich auf Abweichungen der Auftragszeiten gegenüber einer realen schiffbaulichen Fertigung eingrenzen. Diese sind für die Evaluierung der Fertigungssteuerung jedoch unerheblich.

Validierung der Bausteine der Fertigungssteuerung

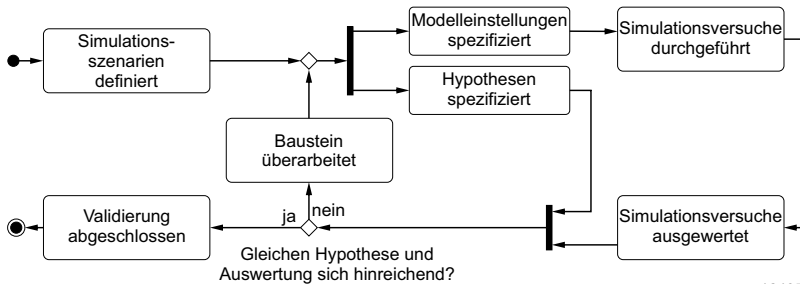
Die Versuchsumgebung dient dazu, die korrekte Funktion der neu entwickelten Bausteine der Fertigungssteuerung zu testen. Hierfür wurde eine Vielzahl an verschiedenen Validierungstechniken untersucht [Bal98, S. 355 ff.] und aufgrund der Randbedingungen die Black-Box-Methode (Functional Testing) ausgewählt. Maßgeblich für die Auswahl war einerseits die Tatsache, dass zwar Eingangsdaten auf Basis realer Produkt- und Produktionsdaten zur Verfügung standen, jedoch keine Ausgangsdaten eines realen Arbeitssystems vorlagen. Andererseits liegt das Hauptziel der Validierung auf der Funktionsabsicherung des Bausteins. Das entspricht dem Grundgedanken des Ansatzes, der das Transerverhalten anhand der Ein- und Ausgangswerte des Simulationsmodells untersucht und bewertet.

Um die Black-Box-Methode in ein systematisches Vorgehen einzubetten, wurden allgemeine Hypothesen formuliert. Basis der Hypothesenbildung ist das Verhalten der drei Aufgaben Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung aus dem *Modell der Fertigungssteuerung* in den klassischen Fertigungsprinzipien. Überträgt man dieses Verhalten in das Baustellenprinzip, lassen sich die folgenden Hypothesen zum Systemverhalten formulieren:

- ☐ Die Reduktion der Ressource Mitarbeiter führt zu einer messbaren Bestandserhöhung.
- ☐ Der verspätete Zugang von Bauteilen führt zu einer Bestandssenkung.
- ☐ Ein ungesteuerter Zugang führt bei verringerter Kapazität zu einer Bestandserhöhung am Arbeitssystem.
- ☐ Die Freigabesteuerung ist in der Lage, den Bestand auch bei Störungen konstant auf einem Vorgabewert zu halten.
- ☐ Die Freigabesteuerung CONWIP kann verfügbare Teile vor ihrem Plan-Freigabezeitpunkt freigeben und verletzt dabei weder die Bestandsgrenze noch die Montagereihenfolge.
- ☐ Die Kapazitätssteuerung ist in der Lage, den Rückstand auf einer Baustelle zu messen und bei Überschreiten einer Rückstandsgrenze die Mitarbeiterkapazität anzupassen.

Aufbauend auf diesen Hypothesen entstand das in Abbildung 6.3 dargestellte Vorgehen zur Validierung. Erster Schritt des Vorgehens ist die Definition von Simulationsszenarien. Eine Zusammenfassung der angewendeten Szenarien gibt Tabelle B.3 (Anhang, S. 165).

Ausgehend von diesen Szenarien wurden die Hypothesen und Modelleinstellungen spezifiziert. Die allgemein formulierten Hypothesen definieren das spezifische Systemverhalten nur qualitativ und lassen sich somit nicht für eine quantitative Validierung nutzen. Dies ist erst durch eine numerische Spezifikation der Erwartungswerte möglich. Die Spezifikation der Modelleinstellungen definiert,



12405

Abbildung 6.3: UML-Diagramm des Vorgehens zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine

welche Parameter für die Steuerungsbausteine anzuwenden sind, welcher Art die Störungen sind und welche Ressourcenmengen im Simulationsmodell zu verwenden sind.

Im Anschluss an die Spezifikation der Modelleinstellungen und Hypothesen wurden die Simulationsversuche durchgeführt und ausgewertet. Deckten sich die Simulationsergebnisse mit den Hypothesen, gelten die Bausteine der Fertigungssteuerung als validiert. Lag keine hinreichende Deckung vor, ließen sich die Abweichungen auf einen Fehler im Baustein zurückführen. In diesem Fall wurde der Baustein überarbeitet und die Validierung erneut durchgeführt.

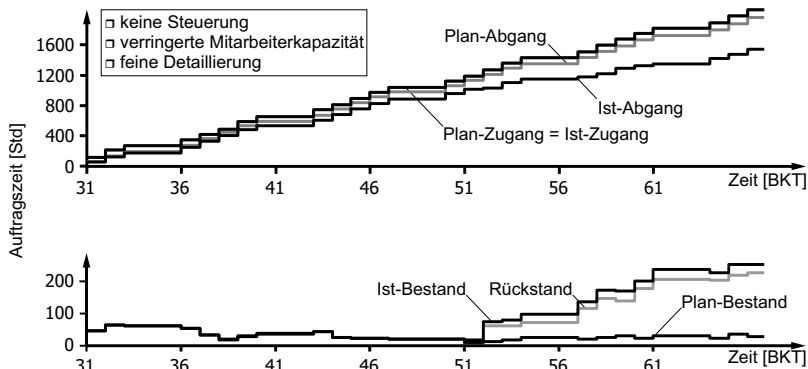
Die Abbildung 6.4 zeigt Durchlaufdiagramme einer solchen Analyse. Im dargestellten Fall zeigen die Diagramme den Auftragszugang und -abgang auf einer Baustelle für eine Mitarbeiterqualifikation. Das hier evaluierte Störungsszenario ist die Verringerung der Mitarbeiterkapazität, beispielsweise aufgrund von Krankheit, und soll die CONWIP-I-Steuerung validieren. Nicht dargestellt ist der Initialzustand, in dem keine Störung vorliegt und in dem die Plan- und Ist-Kurven für Zugang, Abgang und Bestand deckungsgleich liegen.

Abbildung 6.4a zeigt das Durchlaufdiagramm für den Störfall. Die Freigabe erfolgte in diesem Fall nach Termin. Die Störung reduzierte die Mitarbeiterkapazität zwischen den Betriebskalendertagen 50 und 61 um jeweils 30 Stunden. Erwartungsgemäß stellt sich ein verringerter Abgang ein, während Ist-Bestand und Rückstand zunehmen.

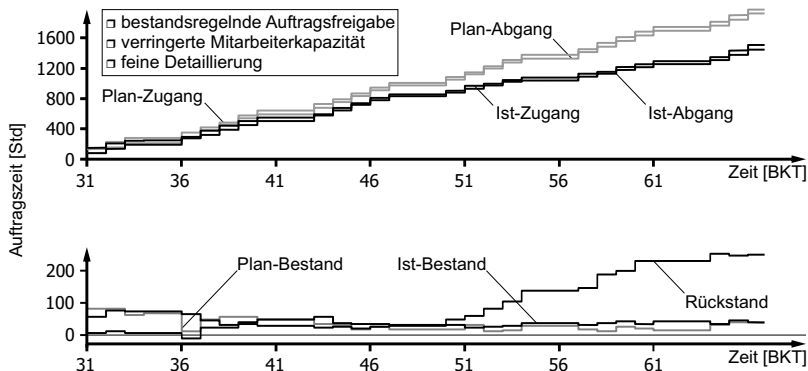
Abbildung 6.4b zeigt die Durchlaufdiagramme für dasselbe Störungsszenario mit aktivierter CONWIP-I-Steuerung. Auch hier entsteht eine Abweichung zwischen Plan- und Ist-Abgang. Im Unterschied zu Abbildung 6.4a ist jedoch der Ist-Zugang an diese Störsituation angepasst, sodass sich der Ist-Bestand verringert und nun eng dem Plan-Bestand folgt. Der Rückstand liegt jedoch in fast unveränderter Form weiter vor.

Die vorgestellte Analyse ist ein Beispiel für die Validierung der CONWIP-I-Steuerung im Simulationsmodell. Mit Aktivierung des Steuerungsverfahrens gelingt es, den Bestand in dem gestörten Arbeitssystem auf einen Vorgabewert einzustellen. Jedoch ist die CONWIP-I-Steuerung erwartungsgemäß nicht in der Lage, den auftretenden Rückstand aufzuholen. Dies kann nur eine Kapazitätssteuerung realisieren. Bereits in den Validierungsbeispielen sind somit die Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen und den logistischen Zielgrößen ersichtlich, wie sie das *Modell der Fertigungssteuerung* beschreibt [Löd08, S. 7].

Die Betrachtung des Zeitraums zwischen Betriebskalendertag 31 und 45 zeigt außerdem eine



(a) Durchlaufdiagramm für die Validierung der Steuerung im Störungsszenario *reduzierte Mitarbeiterkapazität* (ohne CONWIP-Steuerung)



(b) Durchlaufdiagramm für die Validierung der Steuerung im Störungsszenario *reduzierte Mitarbeiterkapazität* (CONWIP-Steuerung)

— Ist-Größen — Plan-Größen

12420

Abbildung 6.4: Durchlaufdiagramme für die Validierung der Freigabesteuerung

geringe Abweichung zwischen Plan und Ist sowohl für den Zugang als auch den Abgang (vgl. Abbildung 6.4b). Diese Abweichung ist auf die Freigabe mit Vorgriffshorizont zurückzuführen, welche die CONWIP-I-Steuerung zusätzlich anwendet. Auch dieses Verhalten entspricht der Vermutung über die Steuerung und bestätigt somit ebenfalls die Validität dieser.

Einen Überblick über die gesamte Validierung erlaubt Tabelle 6.4, indem sie die zu validierenden Inhalte und die Szenarien gegenüberstellt. Es ist ersichtlich, dass die Bausteine der Fertigungssteuerung mehrfach mit unterschiedlichen Szenarien validiert wurden. Hierdurch wurde die simultane Verwendung der Bausteine überprüft.

Für die CONWIP-II-Steuerung wurde keine szenariobasierte Validierung durchgeführt. Die Implementierung dieses Steuerungsverfahrens greift auf viele Bestandteile der CONWIP-I-Steuerung zurück, weshalb nur vereinfachte Funktionstests zur Anwendung kamen. Auf die Validierung der Reihenfolgebildung wurde vollständig verzichtet, da diese Funktionalität nur Standardbausteine nutzt.

Mit Abschluss der Validierung liegt ein Simulationsmodell vor, für das die zu Beginn des Abschnitts festgelegten Anforderungen erfüllt sind: Es liegt eine realitätsnahe Versuchsumgebung vor und die korrekte Funktion der neu implementierten Bausteine ist sichergestellt. Die folgenden Abschnitte nutzen dieses Modell, um die modellgestützte Fertigungssteuerung für die Baustellenfertigung zu evaluieren.

Tabelle 6.4: Zuordnung der Simulationsszenarien zum jeweils evaluierten Inhalt des Simulationsmodells

Szenario Nr.	logistische Struktur	CONWIP-I	CONWIP-II	Vorgriffshorizont	Kapazitätssteuerung
Szenario 1	✓	–	–	–	–
Szenario 2	✓	–	–	–	–
Szenario 3	–	✓	–	–	–
Szenario 4	–	✓	–	–	–
Szenario 5	✓	–	–	–	–
Szenario 6	✓	–	–	–	–
Szenario 7	–	✓	–	–	–
Szenario 8	–	–	–	–	✓
Szenario 9	–	–	–	–	✓
Szenario 10	–	✓	–	✓	✓
Szenario 11	✓	–	–	–	–
Szenario 12	–	✓	–	–	–
Szenario 13	✓	–	–	–	✓
Szenario 14	✓	–	–	–	–
Szenario 15	✓	–	–	–	–
Szenario 16	✓	–	–	–	–
Szenario 17	–	✓	–	–	–
Szenario 18	–	✓	–	✓	–
Szenario 19	–	✓	–	–	✓
Szenario 20	–	✓	–	✓	–
Auswertung	validiert	validiert	nicht validiert	validiert	validiert

6.2 Evaluierung der modellgestützten Fertigungssteuerung

Für die Evaluierung der modellgestützten Fertigungssteuerung verwendet diese Arbeit einen Produktionsplan mit verschiedenen Störungsszenarien. Abschnitt 6.2.1 beschreibt den verwendeten Produktionsplan mit seinen Randbedingungen sowie die Störungsszenarien. Die Szenarien bilden typische Störfälle des Produktionsablaufs einer Werft ab. Alle Analysen nutzen diesen Produktionsplan sowie die Störungsszenarien als Ausgangspunkt ihrer Untersuchungen.

Abschnitt 6.2.2 beschreibt das Vorgehen der Evaluierung. Die Evaluierung ist in drei Schritte untergliedert. Schritt eins untersucht die Wirkung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe auf die zwei Störungsszenarien (Abschnitt 6.2.3). Schritt zwei untersucht die Wirkung der Rückstandsregelung (Abschnitt 6.2.4). Schritt drei kombiniert die bestandsregelnde Auftragsfreigabe und die Rückstandsregelung und schließt so die Evaluation ab (Abschnitt 6.2.5). Abschnitt 6.2.6 beurteilt die Wirksamkeit der Fertigungssteuerung in der Baustellenfertigung.

6.2.1 Beschreibung des verwendeten Produktionsplans

Ausgangspunkt der Evaluation ist das validierte Simulationsmodell. Innerhalb dieses Simulationsmodells erfolgt die Plan-Erzeugung. Die folgenden Abschnitte stellen den ungestörten Produktionsablauf mit seinen Randbedingungen sowie zwei Störungsszenarien vor.

Der ungestörte Produktionsablauf: Szenario 1

Der verwendete Produktionsplan wurde mithilfe der eingeführten Plan-Erzeugung bestimmt. Die im Produktionsplan verwendeten Produktmuster und ihre logistischen Kennzahlen sind in Tabelle C.1 aufgelistet. Tabelle C.2 listet die Produktmuster in der chronologischen Reihenfolge ihrer Verwendung auf. Hier wurde eine zufällige Auswahl getroffen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das reale Schiff jedes dieser Produktmuster bzw. jeden Block nur einmal benötigt. Um jedoch einen hinreichend großen Umfang an Arbeitsinhalten für die Baustellen zu erhalten, wurde jeder Block mehrfach verwendet. Gegenüber einer realen Fertigung besteht somit ein Unterschied in der Menge an Eingangsdaten. Für die Fertigungssteuerung, deren Evaluation das Ziel dieser Arbeit ist, ist dies jedoch unerheblich.

Weiterhin zeigt Abbildung C.1 die Summe der Vorgabezeiten, mit denen die Anzahl der benötigten Mitarbeiter je Qualifikation und Baustellen abgeschätzt wurde. Diese Anzahl wurde mit der Simulation überprüft und gegebenenfalls angepasst. Die final verwendete Anzahl an Mitarbeitern ist Tabelle C.3 zu entnehmen.

Der Produktionsplan ergibt sich somit aus dem Simulationsmodell, der zeitlichen Bearbeitungsfolge der Produktmuster, der Anzahl an Mitarbeitern sowie den Constraints. Ermittelt wurde dieser Plan anhand von 17 Simulationsläufen. Verwendung fand der Plan aus Simulationslauf 16.

Für den Initialfall (ungestörter Produktionsplan) liegen Plan- und Ist-Werte deckungsgleich. Abbildung 6.5 zeigt das Durchlaufdiagramm für diesen Fall. Im Diagramm sind der Zugang und Abgang für die gekoppelten Baustellen 1 bis 3 sowie der Bestandsverlauf dargestellt. Der verwendete Produktionsplan basiert auf einer groben Detaillierung. Aufträge sind in Form großer Pakete geplant und werden sowohl bei Zugang als auch Abgang in diesen Paketen erfasst. Dies ist der Grund für den treppenförmigen Verlauf mit großen Sprüngen im Zugang und Abgang.

Neben der groben ist auch eine feine Detaillierung untersucht worden. Diese basiert auf demselben Produktionsplan, löst die aggregierte Erfassung der Arbeitspakete jedoch auf. Hierfür werden Zugang und Abgang auf Teilebasis erfasst, weshalb die Sprünge im Durchlaufdiagramm kleiner sind und Zugang und Abgang enger beieinander liegen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen,

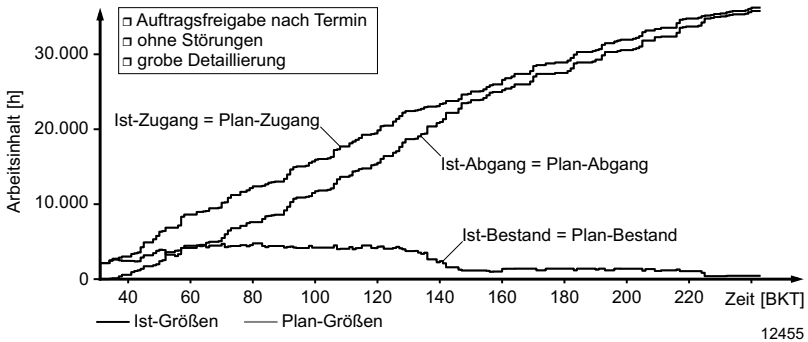


Abbildung 6.5: Durchlaufdiagramm des ungestörten Produktionsablaufs (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)

dass somit unterschiedliche Ansätze für die Erfassung des Zugangs und des Abgangs vorliegen. Dies führt zu scheinbar deutlich geringeren Durchlaufzeiten für die feine Planung. Hierbei handelt es sich jedoch um eine durch das Messverfahren verursachte Verkürzung der Durchlaufzeiten.

Abbildung 6.5 zeigt neben der groben Detaillierung auch die Kopplung der drei Baustellen. Über den Zeitverlauf nehmen Durchlaufzeit und Bestand schrittweise ab. Das erste Mal geschieht dies um Betriebskalendertag 140, wenn Baustelle 1 die Arbeiten abschließt und den Bestand an Auftragsstunden bis zum Wert null abgebaut hat. Dasselbe passiert um den BKT 225 auf Baustelle 2.

Für den Untersuchungsfall mit grober Detaillierung ist die Anwendung von Fertigungssteuerungsverfahren kritisch zu hinterfragen, da die grobe Detaillierung des Plans Einfluss auf die Steuerparameter hat. Dieser Sachverhalt wird deutlich, wenn man den Produktionsablauf und die

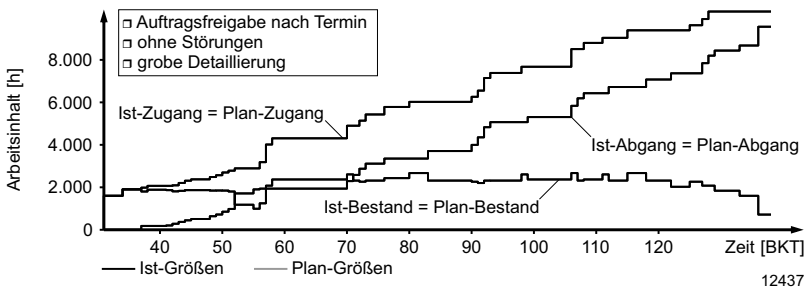


Abbildung 6.6: Durchlaufdiagramm des ungestörten Produktionsablaufs (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

Steuerungsentscheidungen detailliert betrachtet.

Abbildung 6.6 zeigt das Durchlaufdiagramm dieser detaillierten Betrachtung. Zugang und Abgang am Arbeitssystem betragen zum Teil mehrere Hundert Stunden je Betriebskalendertag und übersteigen die Mitarbeiterkapazität von 72 Std/BKT deutlich (vgl. Tabelle C.3). Außerdem gibt es immer wieder Phasen, in denen kein Zugang und Abgang vorliegt. Die Auftragsfreigabe gibt somit Aufträge frei, die größer sind als die Tageskapazität der Qualifikationsgruppe. Gleichzeitig erfolgt die Fertigstellung der Aufträge in einem Umfang, den die Qualifikationsgruppe nicht an einem Tag realisieren kann. Die Bestandsgrenzen der Freigabesteuerung dürfen somit nicht kleiner sein als die größten Arbeitspakete aus der Planung, da die Auftragsfreigabe die Produktion ansonsten blockiert. Aufgrund der großen Arbeitspakete und der daraus resultierenden späten Rückmeldung über Rückstände reagiert die Kapazitätssteuerung erst spät und typischerweise sehr stark. Auch dies ist ein unerwünschtes Verhalten für eine zielgerichtete Fertigungssteuerung.

Die Auftragsfreigabe und die Kapazitätssteuerung lassen sich auch bei einer groben Detaillierung einsetzen. Es ist jedoch leicht nachvollziehbar, dass die Steuerparameter an den Detaillierungsgrad anzupassen sind. Aufgrund der hohen Bestandsgrenzen kann die Auftragsfreigabe jedoch nur bedingt eine Bestandsbeeinflussung durchführen. Die Kapazitätssteuerung wiederum schwankt häufig zwischen ihren Extremlagen. Beide Fertigungssteuerungsverfahren benötigen somit eine hinreichend feine Planung, um sinnvolle Steuerentscheidungen zu treffen.

Aus Abbildung 6.6 wird außerdem deutlich, dass die vollständige Simulationsdauer für die Baustelle 2 erfasst wurde. Somit sind auch die Hochlauf- und Auslaufphasen für das Teilarbeitssystem enthalten. In allen folgenden Analysen sind diese Phasen in den Auswertungen nicht enthalten.

Identifizieren lassen sich diese Phasen mithilfe von Auslastungsdiagrammen (Abbildung 6.7). Im Auslastungsdiagramm sind sowohl die Hochlauf- als auch die Auslaufphase als die Phasen zu identifizieren, in denen Mitarbeiter nicht arbeiten. Das Auslastungsdiagramm stellt diese Phasen als weiße Balken dar. Abbildung 6.7 zeigt diese für die am 27.1. beginnende Woche. Erst ab dem fünften Tag (31.01.) beginnen die Mitarbeiter mit der Arbeit. Über das Datum sind diese Phasen anschließend den Betriebskalendertagen in den Durchlaufdiagrammen zuzuordnen.

Die folgenden zwei Abschnitte beschreiben die Störungsszenarien *verringerte Mitarbeiterkapazität* und *verspätete Teilleieferung*. Ausgangspunkt für die Störungsszenarien war der in diesem Abschnitt beschriebene ungestörte Produktionsablauf.

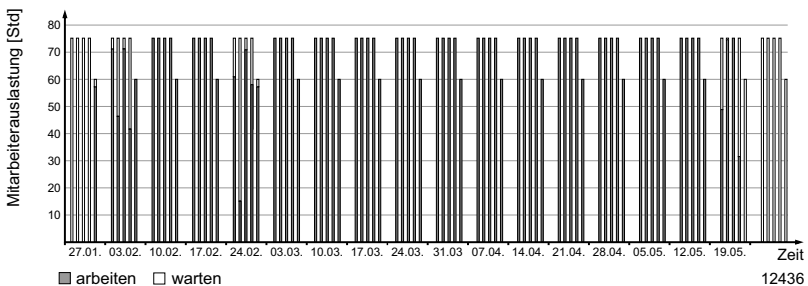


Abbildung 6.7: Auslastungsdiagramm des ungestörten Produktionsablaufs (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

Der gestörte Produktionsablauf: Szenario 2 – verringerte Mitarbeiterkapazität

Die Verringerung der Kapazität ist ein typischer Störfall in der Produktion und resultiert aus Fehlzeiten der Mitarbeiter, beispielsweise aufgrund von Krankheit. Um einen deutlichen Effekt auf die verfügbare Kapazität zu erreichen, wurde die Mitarbeiteranzahl der Qualifikationsgruppe Schweißen um vier Personen und die der Qualifikationsgruppe Schiffbau um eine Person reduziert (vgl. Tabelle C.5). Dies entspricht einer mittleren Reduktion der Mitarbeiterkapazität von 403,2 auf 367 Stunden je Betriebskalendertag (ca. 9% Kapazitätsreduktion) über den gesamten Simulationszeitraum.

Das Durchlaufdiagramm in Abbildung 6.8 zeigt den Effekt der Kapazitätsreduktion für die Baustellen 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen. Ist- und Plan-Zugang liegen in Deckung, Ist- und Plan-Abgang laufen jedoch auseinander. Der berechnete mittlere Bestand B_m beträgt 2267 Stunden und liegt deutlich über dem Plan-Wert von 952 Stunden. Bei einer Mitarbeiterkapazität von 367 Stunden je BKT steht somit ein sechsfach höherer Auftragsbestand von 2267 Stunden zur Verfügung.

Berechnet man die erbrachte mittlere Leistung für die Periode, zeigt sich eine noch deutlichere Diskrepanz zwischen Leistung und verfügbarem Auftragsbestand. In diesem Fall ist der Bestand neunmal so hoch.

$$L_m = \frac{AB_{ENDE} - AB_{START}}{P} = \frac{30277 - 0}{125} = 242 \frac{Std}{BKT} \quad (6.1)$$

mit	L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]
	AB_{ENDE}	Abgang am Ende der Periode [Std]
	AB_{START}	Abgang zum Start der Periode [Std]
	P	Länge des Bezugszeitraums [BKT]

Die logistischen Kennzahlen zeigen, dass ein Großteil der Kapazität im Produktionsplan nicht genutzt wird (ca. 33%). Die Analyse der Auslastungsdiagramme für die verschiedenen Baustellen bestätigt dies. Auch hier zeigen sich immer wieder Perioden mit Leerlauf. Jedoch zeigen die Diagramme auch, dass dies meist nur für eine der zwei Qualifikationsgruppen der Fall ist. Es liegt somit ein Engpass vor. Diese Tatsache ist bei allen folgenden Analysen zu beachten.

Durch den reduzierten Abgang ergibt sich ein mittlerer Rückstand von $RS_m = 1332$ Stunden. Berechnet man auf Basis dieser Größen die Terminabweichung im Abgang, ergibt sich:

$$TAA_m = \frac{RS_m}{L_m} = \frac{1332}{242} = 5,5 \frac{Std}{BKT} \quad (6.2)$$

mit	TAA_m	mittlere (berechnete) Abgangsterminabweichung [BKT]
	RS_m	mittlerer Rückstand [Std]
	L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]

Die Ausgangssituation für das Störungsszenario ist somit beschrieben. Das Szenario ist geprägt durch eine deutliche Terminabweichung von 5,5 BKT sowie eine mittlere Leistung, die nur 66% der zur Verfügung stehenden Kapazität nutzt. Aufgrund der Störung liegt die mittlere Leistung jedoch nur 7% unter der geplanten mittleren Leistung.

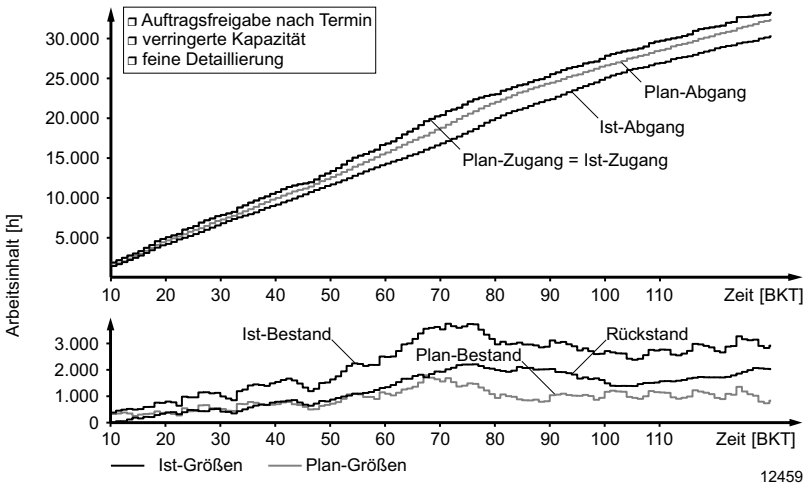


Abbildung 6.8: Durchlaufdiagramm für Szenario 2 - *verringerte Mitarbeiterkapazität* (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)

Der gestörte Produktionsablauf: Szenario 3 – *verspätete Teilelieferung*

Um auch beim Störungsszenario *verspätete Teilelieferung* einen deutlichen Effekt zu erreichen, wurden 10 Gruppen von Teilen mit Verspätungen von fünf bis neun Tagen beaufschlagt. Tabelle C.6 gibt einen Überblick, welche Teilegruppen auf unterschiedlichen Baustellen einzubauen sind, wann dies ursprünglich stattfinden sollte und zu welchem Zeitpunkt die Gruppen aufgrund der Störung bereitgestellt werden. An jedes dieser Teile sind verschiedene Tätigkeiten geknüpft, die von den Qualifikationsgruppen Schweißen und Schiffbau ausgeführt werden. Durch die verspätete Bereitstellung der Teilegruppen erfolgt auch deren Bearbeitung mit Verspätung.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass zwischen Teilen immer Randbedingungen bestehen können, sogenannte Constraints. Die Absicherung ihrer Einhaltung realisiert der Constraint-Manager, weshalb die folgende Analyse nicht weiter auf diese Abhängigkeiten eingeht. Wichtig ist hier jedoch festzustellen, dass aufgrund der Constraints eine verspätete Bereitstellung von Teil A zu einem verspäteten Start anderer Teile führen kann. Effekte auf den Ablauf sind aus diesem Grund nur schwierig abzuschätzen und Wechselwirkungen lassen sich nur anhand der Simulationsergebnisse beurteilen. Hierbei besteht aufgrund der Vielzahl an Teilen und Tätigkeiten jedoch immer ein Zuordnungsproblem von Wirkung und Ursache.

Abbildung 6.9 zeigt das Durchlaufdiagramm für das beschriebene Störungsszenario. Deutlich zu erkennen ist die Abweichung des Ist-Zugangs vom Plan-Zugang zwischen BKT 35 und 65. Diese Abweichungen resultieren aus dem verspäteten Zugang der Bauteile. Im selben Zeitraum treten außerdem Verspätungen im Abgang auf, die ebenfalls aus dem verspäteten Zugang resultieren.

Der berechnete mittlere Bestand über alle Baustellen ist $B_m = 906$ Stunden und weicht vom

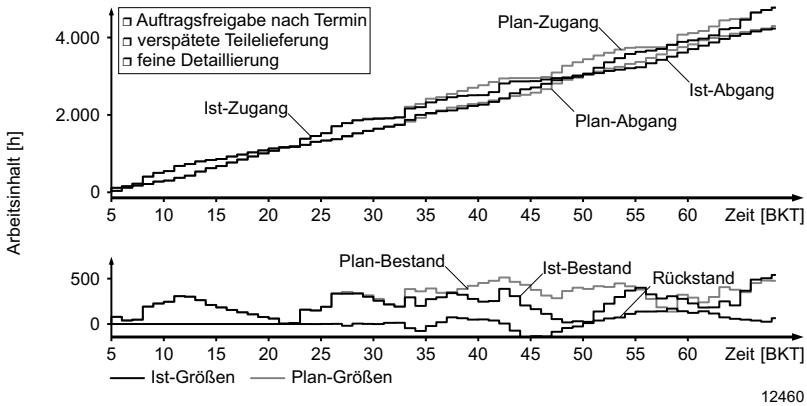


Abbildung 6.9: Durchlaufdiagramm für Szenario 3 – *verspätete Lieferung* (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

mittleren Bestand des Plan-Zustands um 22 Stunden ab. Dies zeigt, dass die Auswirkungen der verspäteten Bereitstellung auf den Bestand sehr gering sind (lediglich 2%). Unter Verwendung der Simulationsergebnisse und der Gleichungen 6.1 und 6.2 sind mittlere Leistung, mittlerer Rückstand und die Terminabweichung im Abgang zu bestimmen. Für die Qualifikationsgruppe Schweißen und Baustelle 2 ergibt sich:

$$B_m = 245 \text{ Std} \Rightarrow \text{Reduktion} \approx 22\%$$

$$L_m = 69 \text{ Std/BKT} \Rightarrow \text{Reduktion um } \approx 2\% \text{ gegenüber der mittleren Plan-Leistung}$$

$$RS_m = 42 \text{ Std}$$

$$TAA_m = 0,6 \text{ BKT}$$

Für die Qualifikationsgruppe Schiffbau ebenfalls auf Baustelle 2 ergeben sich:

$$B_m = 65 \text{ Std} \Rightarrow \text{Erhöhung} \approx 37\%$$

$$L_m = 58,7 \text{ Std/BKT} \Rightarrow \text{Reduktion um } \approx 3\% \text{ gegenüber der mittleren Plan-Leistung}$$

$$RS_m = 70 \text{ Std}$$

$$TAA_m = 1,2 \text{ BKT}$$

Die logistischen Kennzahlen zeigen deutlich, dass die verspätete Bereitstellung von Teilen sowohl zur Reduktion als auch zur Erhöhung des mittleren Bestands führen kann. Maßgeblich hierfür ist, ob trotz verspäteter Lieferung noch Aufträge zur Bearbeitung zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall, kommt es zur Blockade des Arbeitssystems und der Bestand steigt. Der Einfluss der verspäteten Bereitstellung auf die Leistung ist gering. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Qualifikationsgruppe Schweißen mit $L_m = 69 \text{ Std/BKT}$ fast die gesamte Kapazität von 72 Std/BKT nutzt. Demgegenüber nutzt die Qualifikationsgruppe Schiffbau mit $L_m = 58,7 \text{ Std/BKT}$ lediglich

74% der zur Verfügung stehenden Kapazität (79,2 Std/BKT). Für beide Qualifikationsgruppen entstehen aufgrund der verspäteten Bereitstellung sowohl ein mittlerer Rückstand als auch eine mittlere Terminabweichung im Abgang.

Die folgenden Abschnitte untersuchen die Fähigkeit der Auftragsfreigabe und der Kapazitätssteuerung, den Produktionsablauf positiv zu beeinflussen. Ziel ist hierbei, einen definierten Bestand einzustellen und so die Durchlaufzeit des Systems zu beeinflussen. Außerdem ist der störungsbedingte Rückstand abzubauen.

6.2.2 Durchführung der Evaluierung

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben die drei Szenarien hinsichtlich der Störung und der Detaillierung. Die Szenarien bilden die Basis der Evaluierung und werden mit verschiedenen Steuerungsverfahren kombiniert. Der Morphologische Kasten in Abbildung 6.10a zeigt die möglichen Kombinationen. Für die Freigabe nach CONWIP sind außerdem verschiedene Parametrierungen der Steuerung untersucht worden: zwei CONWIP-Mengen, zwei Varianten zur Handhabung der CONWIP-Grenze sowie drei verschiedene Vorgriffshorizonte. Der Morphologische Kasten in Abbildung 6.10b fasst die verschiedenen Parametrierungen zusammen. Tabelle C.4 listet die verwendeten Parameterwerte detailliert auf.

In der Evaluierung sind die verschiedenen Aspekte im Zusammenspiel zu untersuchen. Das hierfür notwendige systematische Vorgehen zeigen die Morphologischen Kästen. Die Vergleichsbasis für die Beurteilung der Simulationsergebnisse sind die zwei in Abbildung 6.10a dargestellten Fälle. Hierbei steht der Fall mit feiner Detaillierung (Kreis) im Vordergrund. Bereits in Abschnitt 6.2.1 wurde beschrieben, welche Nachteile die grobe Detaillierung (Raute) aufweist.

Die folgenden Abschnitte untersuchen die Wirkung der *Auftragsfreigabe* (Abschnitt 6.2.3) und der *Kapazitätssteuerung* (Abschnitt 6.2.5) auf die Störungen. Abschnitt 6.2.5 betrachtet abschließend beide Steuerungen kombiniert. Die folgende Evaluation betrachtet hierfür sowohl die Kopplung von drei Baustellen als auch eine einzelne Qualifikationsgruppe auf einer Baustelle.

Parameter	Ausprägung		
Störung	keine Störung (Szenario 1)	verringerte Kapazität (Szenario 2)	verspätete Lieferung (Szenario 3)
Detaillierung	grob (aggregiert)		fein (detailliert)
Auftragsfreigabe	nach Termin		CONWIP
Kapazitätssteuerung	starre Kapazität		Rückstandsregelung

(a) Morphologischer Kasten für die Konfiguration der Simulationsexperimente

Parameter	Ausprägung		
Anzahl CONWIP-Stunden	gering		hoch
Überschreitung CONWIP-Grenze zulässig	nein		ja
Vorgriffshorizont	0 Tage	1 Tag	2 Tage

(b) Morphologischer Kasten der Parameter der Steuerungsverfahren

12470

Abbildung 6.10: Morphologischer Kasten für die Gestaltung der Simulationsexperimente

6.2.3 Evaluierung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe

Ziel der Auftragsfreigabeverfahren ist es, den Zugang zum Arbeitssystem zu steuern, um den Bestand zu regeln. Dies ist ein wichtiger Schritt für die gezielte Steuerung der Produktionsabläufe und ermöglicht eine systematische logistische Positionierung für das Arbeitssystem Baustelle. Der folgende Abschnitt untersucht die Wirkung der Bestandsregelung auf den ungestörten Produktionsablauf, bei starrer Kapazität und für die grobe und feine Detaillierung. Für die Parametrierung wurden alle Parameterkombinationen untersucht (vgl. Abbildung 6.10).

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe in Szenario 1

Mit der Aktivierung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe lassen sich deutlich Steuerungseinflüsse auf das Arbeitssystem erkennen. Abbildung 6.11 zeigt das entsprechende Durchlaufdiagramm für die gekoppelten drei Baustellen und alle Qualifikationsgruppen. Als bestandsregelnde Auftragsfreigabe fand in diesem Fall das CONWIP-I-Verfahren mit hoher CONWIP-Stundenanzahl und keinem Vorgriffshorizont Anwendung.

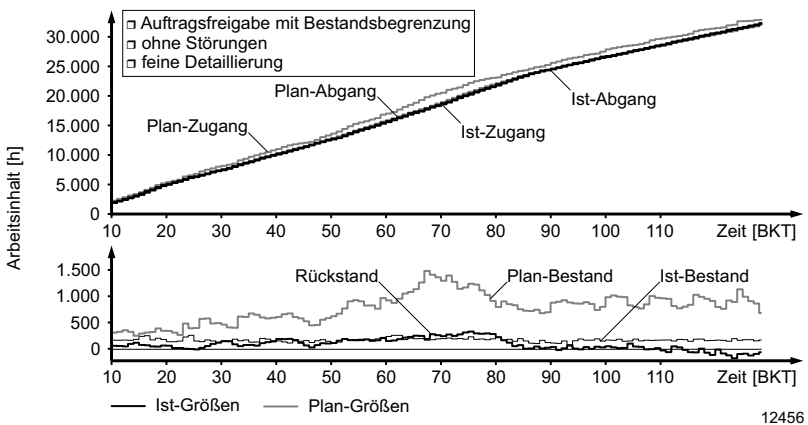
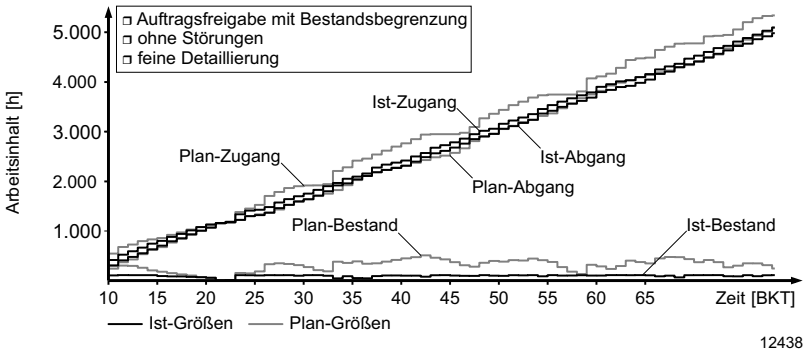


Abbildung 6.11: Durchlaufdiagramm für Szenario 1 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)



12438

Abbildung 6.12: Durchlaufdiagramm für Szenario 1 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

Deutlich zu erkennen ist die Verringerung des Bestands, der nun deutlich unter dem Planwert liegt. Ursächlich hierfür ist die Bestandsregelung, aufgrund der ein späterer Ist-Zugang erfolgt. Auch Plan- und Ist-Abgang liegen nicht mehr in Deckung, jedoch sind die Abweichungen marginal. Im Diagramm ist zu erkennen, dass Abgang und Zugang in kleineren Sprüngen erfolgen. Außerdem hat sich die Durchlaufzeit deutlich verringert. Die Durchlaufzeitverkürzung ist jedoch zum Teil auf die Veränderung der Zugangs- und Abgangsmessung zurückzuführen. Es ist ersichtlich, dass die Aktivierung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe Einfluss auf den Bestand nimmt. Zusätzlich liegt ein homogener Verlauf für alle Kurven vor, was in einem gleichmäßigeren Produktionsablauf begründet ist.

Derselbe Einfluss ist in Abbildung 6.12 für die Qualifikationsgruppe Schweißen für die Baustelle 2 im Detail dargestellt. Auch für dieses Arbeitssystem zeigt sich der deutlich verringerte Bestand. Außerdem sieht man einen deutlich gleichmäßigeren Verlauf des Bestands. Dieser homogene Verlauf ist begründet in der Bestandsbegrenzung und in der detaillierten Erfassung von Zugang und Abgang. Als negativ ist zum Teil der verspätete Abgang zu sehen. Jedoch erfolgt dieser meist nur um einen Tag verschoben. Dies ist einerseits durch die Erfassung zu begründen. Angearbeitete Arbeitsinhalte werden erst mit Beendigung verbucht. Aufgrund der späteren Freigabe kann es hier zu kleineren Verzögerungen kommen. Andererseits liegen Verspätungen von einem Tag innerhalb der Termintreueintervalle und sind somit nicht als kritisch zu bewerten.

Die logistischen Kennzahlen für das Szenario 1 sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. Die Indizierung der Experimente legt fest, ob die Auftragsfreigabe eine niedrige (n) oder hohe (h) Anzahl an CONWIP-Stunden verwendet und ob ein Vorgriffshorizont von null, einem oder zwei Tagen zur Verfügung stand.

Die Kennzahlen bestätigen die Aussage des Durchlaufdiagramms: Die bestandsbegrenzende Auftragsfreigabe reduziert den Bestand (B_m) am gesamten Arbeitssystem. Aufgrund der Bestandsbegrenzung kommt es teilweise zu einer verspäteten Freigabe. Dies führt zu einer verspäteten Fertigstellung und einem mittleren Rückstand (RS_m). Dieser ist jedoch niedriger als die Tageskapazität der drei Baustellen. Für das Parameterset mit dem Vorgriffshorizont von zwei Tagen gelingt es, einen negativen mittleren Rückstand zu erreichen. In diesem Fall liegt auch eine negative Abweichung im Abgangstermin (TAA_m) vor. Grund hierfür sind die bereits identifizierten

Tabelle 6.5: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 1: *keine Störung*

Experiment	B_m [Std]	RS_m [Std]	L_m [Std/BKT]	TAA_m [BKT]
Termin	834	0	231	0,00
CONWIP-I _{n,0}	158	92	231	0,40
CONWIP-I _{h,0}	185	47	231	0,20
CONWIP-I _{n,1}	160	98	231	0,40
CONWIP-I _{h,2}	187	-162	231	-0,69
CONWIP-II _{n,0}	165	50	231	0,20
CONWIP-II _{h,0}	188	51	231	0,20

Leistungsreserven im Arbeitssystem.

Die mittlere Leistung wird im untersuchten Fall nicht beeinflusst. Vergleicht man die verschiedenen Parametrierungen, zeigt sich, dass mit höherer CONWIP-Anzahl ein höherer mittlerer Bestand und ein niedrigerer mittlerer Rückstand einhergeht. Lediglich die Auftragsfreigabe CONWIP-II, welche die Bestandsgrenze überschreiten kann, erreicht für beide Anzahlen an CONWIP-Stunden ähnliche mittlere Rückstände.

Auf die Bestandsregelung bei grober Detaillierung wird an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen. Aufgrund der großen Auftragspakete und der damit notwendigen hohen Anzahl an CONWIP-Stunden kann die bestandsregelnde Auftragsfreigabe kaum Einfluss auf den Produktionsablauf nehmen. Der Bestand schwankt aufgrund der bestandsregelnden Auftragsfreigabe um den Plan-Bestand und liegt somit auf sehr hohem Niveau.

Die folgenden Abschnitte untersuchen nun die bestandsregelnde Auftragsfreigabe in den Szenarien 2 (*verringerte Kapazität*) und 3 (*verspätete Lieferung*).

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe in Szenario 2

In Abschnitt 6.2.1 wurde das Szenario 2 mit dem Durchlaufdiagramm in Abbildung 6.8 vorgestellt. Das Durchlaufdiagramm zeigt eine Abweichung zwischen Plan-Abgang und Ist-Abgang sowie eine Ist-Bestandszunahme und den Aufbau von Rückstand. Diese Abweichung entspricht der Reduktion der Mitarbeiterkapazität.

Die Aktivierung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe beeinflusst das Systemverhalten in Szenario 2 deutlich. Abbildung 6.13 zeigt das Durchlaufdiagramm für die bestandsregelnde Auftragsfreigabe CONWIP-I mit niedriger CONWIP-Stundenanzahl und einem Vorgriffshorizont von null Tagen.

Die Aufträge werden später freigegeben, sodass Plan- und Ist-Zugang nicht mehr in Deckung liegen. Hiermit einher geht eine deutliche Verringerung des Bestands auf einen Wert von unter 400 Stunden. Dies entspricht auch den Steuerungsparametern, wie sie in Tabelle C.4 für das Steuerungsverfahren gelistet sind. Diese würden einen maximalen Bestand an Auftragszeit von 500 Stunden über alle Qualifikationsgruppen und Baustellen zulassen.

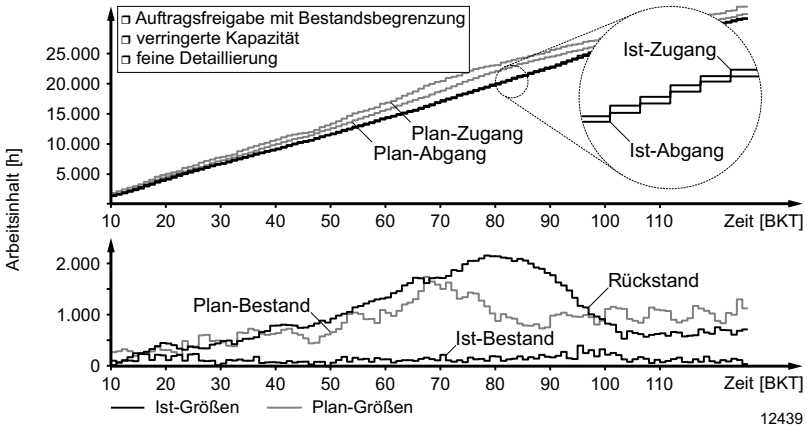


Abbildung 6.13: Durchlaufdiagramm für Szenario 2 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustellen 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)

Außerdem ist das Steuerungsverfahren in der Lage, die Durchlaufzeit deutlich zu reduzieren, zu sehen am horizontalen Abstand zwischen Ist-Zugang und -Abgang. Die Berechnung der mittleren Reichweite ist mithilfe der Gleichung 3.19 aus [Löd08] möglich:

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (6.3)$$

mit R_m mittlere Reichweite [BKT]
 B_m mittlerer Bestand im Untersuchungszeitraum [Std]
 L_m mittlere Leistung [Std/BKT]

Aus der Rechnung ergibt sich eine Reduktion der mittleren Reichweite von 9,74 BKT auf unter 1 BKT (vgl. Tabelle 6.6). Aufgrund von Gleichung 3.28 aus [Löd08] folgt daraus eine Reduktion von mehr als 90% für die mittlere Durchlaufzeit. Dies ist jedoch auch nicht verwunderlich, da die mittlere Durchlaufzeit für Produktionsabläufe auf Baustellen meist eine vernachlässigte Größe ist. Gezielte Verbesserungsmaßnahmen aus der Fertigungssteuerung sind daher in vielen Unternehmen unüblich. Das Gleiche gilt für Durchlaufzeitmessungen.

Aus den Kennzahlen ist abzulesen, dass die bestandsregelnde Auftragsfreigabe auch in Szenario 2 niedrige Bestände realisiert. Aufgrund der Störung kommt es in den meisten Experimenten dennoch zu einem mittleren Rückstand. Dies zeigt sich auch in der mittleren Abweichung im Abgang. Lediglich in zwei Experimenten treten hier sehr niedrige bzw. negative Werte auf. Grund für den Abbau des Rückstands sind freie Kapazitäten im Plan-Zustand. Diese lassen sich durch günstige Effekte bei der Auftragssteuerung nutzen und bauen den Rückstand ab. Dies spiegelt sich auch in der erhöhten mittleren Leistung für diese zwei Fälle wider.

Tabelle 6.6: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 2: *verringerte Kapazität*

Experiment	B_m [Std]	RS_m [Std]	L_m [Std/BKT]	R_m [BKT]	TAA_m [BKT]
Termin	2279	1352	233	9,74	5,78
CONWIP-I _{n,0}	186	1043	244	0,76	4,27
CONWIP-I _{h,0}	219	1386	238	0,91	5,81
CONWIP-I _{n,1}	185	1353	238	0,78	5,68
CONWIP-I _{h,2}	205	-183	257	0,80	-0,71
CONWIP-II _{n,0}	192	1381	239	0,81	5,79
CONWIP-II _{h,0}	207	47	255	0,80	0,18
min. Verbesserung	90%	-3%	-2%	91%	-1%
max. Verbesserung	92%	114%	10%	92%	112%

Für die anderen Fälle wird deutlich, dass die bestandsregelnde Auftragsfreigabe den mittleren Bestand und die mittlere Durchlaufzeit senkt. Ob die Auftragsfreigabe diesen Effekt auch für Szenario 3 umsetzen kann, untersucht der nächste Abschnitt.

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe in Szenario 3

Um auch beim Störungsszenario *verspäteter Zugang von Teilen* einen deutlichen Effekt zu erreichen, wurden 10 Gruppen von Teilen mit Verspätungen von fünf bis neun Tagen beaufschlagt. Tabelle C.6 gibt einen Überblick, welche Teilegruppen auf unterschiedlichen Baustellen einzubauen sind, wann dies ursprünglich stattfinden sollte und zu welchem Zeitpunkt die Teile aufgrund der Störung bereitgestellt werden. An jedes dieser Teile sind verschiedene Tätigkeiten geknüpft, die die beiden Qualifikationsgruppen Schweißen und Schiffbau realisieren. Durch die verspätete Bereitstellung der Teilegruppen konnte auch die Bearbeitung der anhängigen Tätigkeiten erst mit Verspätung erfolgen.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass zwischen Teilen immer Randbedingungen bestehen können, sogenannte Constraints. Die Absicherung ihrer Einhaltung realisiert der Constraint-Manager, weshalb die folgende Analyse nicht weiter auf diese Abhängigkeiten eingeht. Wichtig ist hier jedoch festzustellen, dass aufgrund der Constraints eine verspätete Bereitstellung von Teil A zu einem verspäteten Start anderer Teile führen kann. Effekte auf den Ablauf sind aus diesem Grund nur schwierig abzuschätzen und Wechselwirkungen lassen sich nur anhand der Simulationsergebnisse beurteilen. Hierbei besteht aufgrund der Vielzahl an Teilen und Tätigkeiten jedoch immer ein Zuordnungsproblem zwischen Ursache und Wirkung.

Abbildung 6.9 zeigt das Durchlaufdiagramm in Szenario 3 für eine Freigabe nach Termin (S. 121). Deutlich zu erkennen ist die Abweichung des Ist-Zugangs vom Plan-Zugang zwischen BKT 35 und 65. Diese Abweichungen resultieren aus dem verspäteten Zugang der Bauteile. Im selben Zeitraum treten außerdem Verspätungen im Abgang auf, die ebenfalls aus dem verspäteten Zugang resultieren.

Aufgrund des verspäteten Zugangs liegt zwischen den BKTs 35 und 65 außerdem ein Abfall im Bestand vor. Durch den hieraus resultierenden Mangel an Aufträgen ist es nicht möglich, alle Mitarbeiter in diesem Zeitraum zu beschäftigen (vgl. Abbildung 6.14). Deshalb warten die Mitarbeiter immer wieder zwischen der sechsten und zweiundzwanzigsten Woche. Dies entspricht dem Zeitraum BKT 35 bis 55 im Durchlaufdiagramm. Die Analyse der vorliegenden Wartezeiten und ihr Vergleich mit dem Initialzustand gestaltet sich im Auslastungsdiagramm jedoch schwierig.

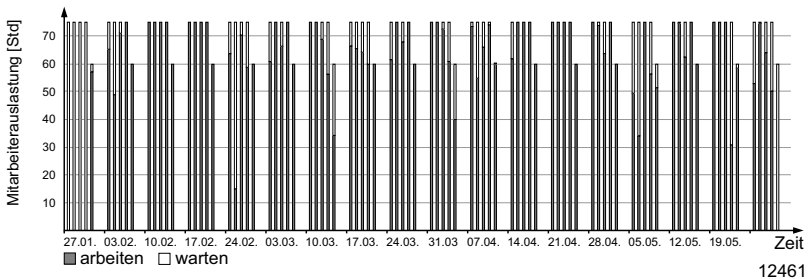


Abbildung 6.14: Auslastungsdiagramm für Szenario 3 mit Auftragsfreigabe nach Termin (Baustellen 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

Maßgeblich hierfür sind zwei Gründe:

- ☐ bereits im Initialzustand lagen Wartezeiten vor und
- ☐ verspätete und pünktliche Teile überlagern sich.

Die Wartezeiten im Initialzustand können eine Verschiebung der Störungen verursachen. Dies kann dazu führen, dass sich die im Auslastungsdiagramm dargestellten Wartezeiten verlängern oder verschieben. Die detaillierte Analyse zeigte beide Effekte. Da weder das Auslastungsdiagramm noch das Durchlaufdiagramm in der Lage sind, den Störfall bauteilbezogen auszuwerten, ist die Interpretation schwierig.

Abbildung 6.15 zeigt das Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe auf Baustelle 2 für die Qualifikationsgruppe Schweißen. Das hier angewendete CONWIP-Verfahren legt eine Bestandsgrenze von 95 Stunden fest, die nicht überschritten wird. Außerdem liegen Ist-Zugang und Ist-Abgang dichter zusammen als im Durchlaufdiagramm der nicht bestandsregelter Freigabesteuerung (Abbildung 6.9, S. 121). Den aus der Störung resultierenden Rückstand kann das Steuerungsverfahren jedoch nicht kompensieren.

Die logistischen Kennzahlen bestätigen dieses Systemverhalten (vgl. Tabelle 6.7). Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe reduziert den mittleren Bestand (B_m) und die mittlere Reichweite (R_m). Damit einher geht eine Reduktion der Durchlaufzeit um mehr als 78%. Anhand der mittleren Terminabweichung im Abgang (TAA_m) ist jedoch auch ersichtlich, dass das Störungsszenario nur zu einer geringen Verspätung führt.

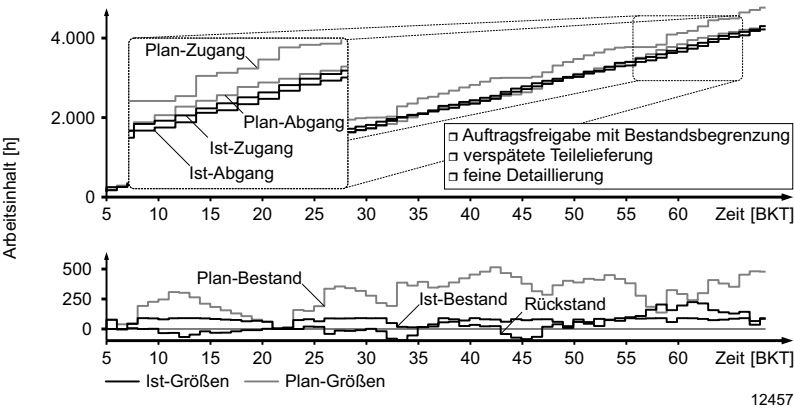


Abbildung 6.15: Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

Tabelle 6.7: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 3: *verspätete Teilelieferung*

Experiment	B_m [Std]	RS_m [Std]	L_m [Std/BKT]	R_m [BKT]	TAA_m [BKT]
Termin	905	65	255	3,54	0,25
CONWIP-I _{n,0}	170	143	256	0,55	0,56
CONWIP-I _{h,0}	199	86	257	0,77	0,33
CONWIP-I _{n,1}	173	97	255	0,68	0,38
CONWIP-I _{h,2}	201	-119	256	0,78	-0,46
CONWIP-II _{n,0}	179	127	256	0,70	0,50
CONWIP-II _{h,0}	203	49	256	0,79	0,19
min. Verbesserung	78%	-120%	0%	78%	-124%
max. Verbesserung	81%	283%	-1%	84%	284%

Die Ergebnisse der Analyse bestätigen die Wirksamkeit der bestandsregelnden Auftragsfreigabe. Es zeigt sich somit, dass auch das Arbeitssystem Baustelle trotz inhomogener Arbeitspakete befähigt werden kann, niedrige mittlere Reichweiten bzw. Durchlaufzeiten zu erreichen. Voraussetzung hierfür sind eine bessere Messung von Zugängen und Abgängen sowie eine detaillierte bestandsregelnde Auftragsfreigabe.

6.2.4 Evaluierung der Kapazitätssteuerung

Der Morphologische Kasten in Abbildung 6.16 definiert die im folgenden Abschnitt untersuchte Konfiguration der Fertigungssteuerung. Aufträge werden nach Termin freigegeben und die Rückstandsregelung ist aktiv. Analysiert wurden die beiden Szenarien, in denen eine Störung vorliegt (Szenario 1 und 2). In Szenario 1 treten keine Rückstände auf und die Rückstandsregelung

hat keinen steuernden Einfluss auf den Ablauf. Der Fokus der Evaluierung liegt auf der feinen Detaillierung, da die Rückstandsregelung bei grober Detaillierung sehr volatil und mit Verzögerung auf Rückstände reagiert.

Die Rückstandsregelung in Szenario 2

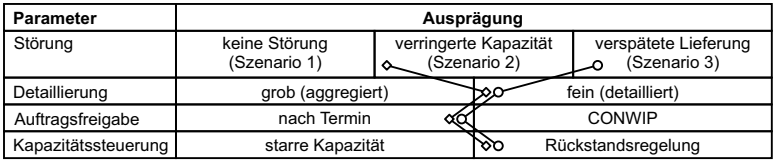
Die Aktivierung der Rückstandsregelung beeinflusst das Arbeitssystem sichtbar (Abbildung 6.17). Gegenüber dem Durchlaufdiagramm ohne Steuerung (Abbildung 6.8, S. 120) äußert sich dies vor allem in der erhöhten Steigung des Ist-Abgangs. Grund hierfür sind Schichterweiterungen, über die die Rückstandsregelung den Rückstand abbaut und Plan- und Ist-Abgang wieder in Deckung bringt.

Außerdem sind Unterschiede zwischen den Ist-Beständen und den Rückständen zu erkennen. Im Fall ohne Rückstandsregelung nimmt der Bestand bis ca. Betriebskalendertag 70 zu und hält sich anschließend auf diesem Niveau. Der Rückstand nimmt über die gesamte Periode immer weiter zu und erreicht zum Ende der Periode das Niveau des Bestands.

Im Fall mit Rückstandsregelung wächst der Ist-Bestand weniger und Ist- und Plan-Bestand kommen innerhalb der Betrachtungsperiode wieder in Deckung. Auch der Rückstand ist deutlich niedriger als im Fall ohne Rückstandsregelung.

Die logistischen Kennzahlen bestätigen das Bild der Durchlaufdiagramme (vgl. Tabelle 6.8). So sinken der mittlere Bestand (B_m) um 47% und der mittlere Rückstand (RS_m) um 80% gegenüber der Auftragsfreigabe nach Termin ohne Rückstandsregelung (Termin ohne RR).

Die mittlere Leistung (L_m) erhöht sich aufgrund der Kapazitätsanpassung. Dies führt auch zu einer Verringerung der mittleren Reichweite bzw. der mittleren Durchlaufzeit. Sehr positiv zu bewerten ist die Reduktion der mittleren Terminabweichung im Abgang (TAA_m) um 81%.



12471

Abbildung 6.16: Morphologischer Kasten: Konfiguration für die Evaluierung der Kapazitätssteuerung

Tabelle 6.8: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 2: verringerte Kapazität (mit und ohne Rückstandsregelung)

Experiment	B _m [Std]	RS _m [Std]	L _m [Std/BKT]	R _m [BKT]	TAA _m [BKT]
Termin ohne RR	2279	1352	233	9,74	5,78
Termin mit RR	1206	276	254	4,75	1,09
Verbesserung	47%	80%	9%	51%	81%
CONWIP-I _{n,0} ohne RR	186	1043	244	0,76	4,27
Verbesserung	92%	23%	5%	92%	26%

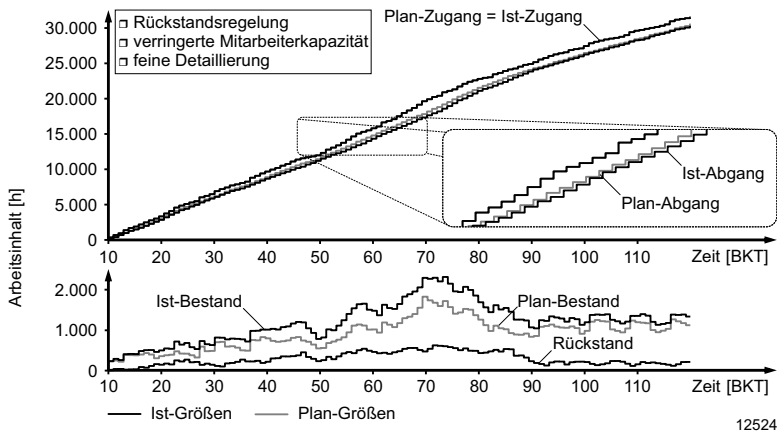


Abbildung 6.17: Durchlaufdiagramm für Szenario 2 mit Rückstandsregelung (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)

Vergleicht man die Veränderung aufgrund der bestandsregelnden Auftragsfreigabe mit der aufgrund der Rückstandsregelung, zeigt sich, dass die bestandsregelnde Auftragsfreigabe einen deutlich größeren Einfluss auf den mittleren Bestand (92% gegenüber 47%) hat. Auch die mittlere Reichweite wird stärker reduziert (92% gegenüber 51%). Demgegenüber gelingt es der Rückstandsregelung besser, den mittleren Rückstand (80% gegenüber 23%) und die mittlere Terminabweichung im Abgang (81% gegenüber 26%) zu reduzieren.

Durch die Kombination beider Verfahren sollte es somit möglich sein, das Arbeitssystem wieder in den Plan-Zustand zu überführen. Hierauf geht Abschnitt 6.2.5 detailliert ein.

Die Rückstandsregelung in Szenario 3

Abbildung 6.18 zeigt, welchen Einfluss die Rückstandsregelung auf das Szenario 3 hat. Innerhalb weniger Betriebskalendertage stellt die Steuerung den Plan-Zustand wieder her. Aufgrund des geringen Umfangs der Störung ist das Verhalten der Steuerung jedoch einfacher durch Vergleichen der logistischen Zielgrößen zu beurteilen (vgl. Tabelle 6.9).

Die Tabelle zeigt, dass die Rückstandssteuerung den mittleren Rückstand um 60% reduziert. Hiermit einher geht die Reduktion der mittleren Terminabweichung im Abgang von 60%. Dies gelingt der Steuerung mit einer Erhöhung von weniger als 1% der mittleren Leistung. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Rückstandssteuerung so gut wie keinen Einfluss auf den mittleren Bestand (4% B_m) und die mittlere Reichweite (4% R_m) hat.

Der Vergleich mit der bestandsregelnden Auftragsfreigabe zeigt, dass diese nicht in der Lage ist, den mittleren Rückstand oder die mittlere Terminabweichung im Abgang zu reduzieren. Stattdessen kommt es hier zu einer leichten Erhöhung von ca. 0,3 BKT.

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe ist jedoch sehr gut in der Lage, den mittleren Bestand und die mittlere Reichweite zu reduzieren. Auch für dieses Störungsszenario führt eine Kombination

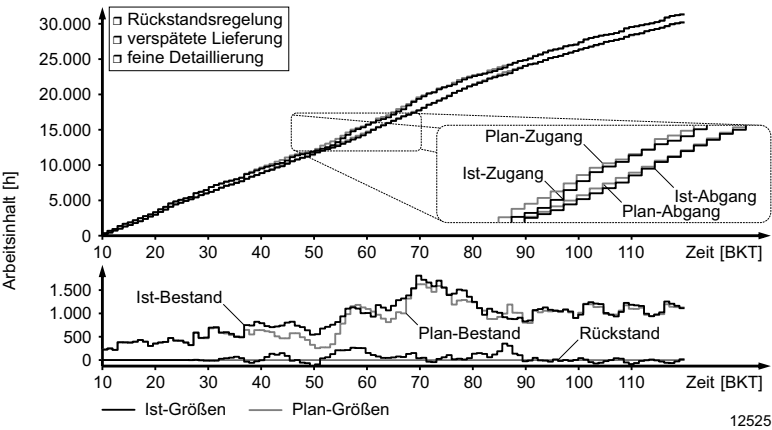


Abbildung 6.18: Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit Rückstandsregelung (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)

Tabelle 6.9: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 3: *verspätete Teilelieferung* (mit und ohne Rückstandsregelung)

Experiment	B_m [Std]	RS_m [Std]	L_m [Std/BKT]	R_m [BKT]	TAA_m [BKT]
Termin ohne RR	905	65	256	3,54	0,25
Termin mit RR	866	26	255	3,39	0,10
Verbesserung	4%	60%	<-1%	4%	60%
CONWIP- $I_{n,0}$ ohne RR	170	143	257	0,66	0,56
Verbesserung	81%	-120%	1%	81%	-124%

beider Verfahren somit vermutlich zu einer weiteren Verbesserung des Produktionsablaufs.

6.2.5 Evaluierung der Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe und die Rückstandsregelung beeinflussen das Arbeitssystem Baustelle ebenso positiv wie Arbeitssysteme in den anderen Fertigungsprinzipien. Jedoch baut die bestandsregelnde Auftragsfreigabe den Rückstand nicht ab und die Rückstandsregelung ist nicht in der Lage, die Durchlaufzeiten direkt zu beeinflussen. Erst im Zusammenspiel sind beide Steuerungen in der Lage, ein gestörtes Arbeitssystem effizient und schnell in den Plan-Zustand zurückzuführen. Der Nachweis hierfür wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Der Morphologische Kasten in Abbildung 6.19 zeigt die Konfiguration der Experimente. Auch in diesem Abschnitt liegt der Fokus auf der feinen Detaillierung, da in der groben Detaillierung die Steuerungen meist zu spät und zu stark auf die Störungen reagieren. Für die Auftragsfreigabe findet die CONWIP-Steuerung in ihren zwei Ausprägungen und mit allen Parametereinstellungen

Parameter	Ausprägung		
Störung	keine Störung (Szenario 1)	verringerte Kapazität (Szenario 2)	verspätete Lieferung (Szenario 3)
Detaillierung	grob (aggregiert)		fein (detailliert)
Auftragsfreigabe	nach Termin	CONWIP	
Kapazitätssteuerung	starre Kapazität	Rückstandsregelung	

12471

Abbildung 6.19: Morphologischer Kasten: Konfiguration für die Evaluierung von bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung

Anwendung. Als Referenz dient die Freigabe nach Termin mit einer starren Kapazität.

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe und die Rückstandsregelung in Szenario 2

Die Anwendung der groben Planung führt im Durchlaufdiagramm zu einem sehr volatilen Verhalten der Ist-Kurven. Entweder erfolgen Abgang und Zugang deutlich verspätet oder viel zu früh. Dieses Verhalten zerstört das Vertrauen in die Steuerung und ist nicht sinnvoll. Aus diesem Grund ist es nötig, die feine Planung anzuwenden. Nur so lassen sich sinnvolle und zielgerichtete Steuerungsentscheidungen treffen.

Abbildung 6.20 zeigt das Durchlaufdiagramm des fein geplanten Produktionsablaufs aktiver bestandsregelnder Auftragsfreigabe (CONWIP-I mit niedriger CONWIP-Anzahl und einem Vorgriffshorizont von null Tagen) und aktiver Rückstandsregelung. Das analysierte Arbeitssystem besteht aus drei Baustellen mit allen Qualifikationsgruppen.

Die Abbildung zeigt einen hohen Überdeckungsgrad zwischen Plan- und Ist-Abgang. Grund hierfür sind die Steuerungen zur *Auftragsfreigabe* und *Kapazitätssteuerung*, die ihre positive Wirkung auf Bestand und Durchlaufzeit sowie Rückstand entfalten. So reduziert die CONWIP-I-Steuerung den Bestand deutlich und auf ein gleichbleibendes Niveau. Dieses Verhalten entspricht den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.3. Die Rückstandsregelung reduziert den Rückstand bis zum Ende der betrachteten Periode auf nahezu null. Dies entspricht den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.4.

Die Analyse der logistischen Kennzahlen bestätigt das vom Durchlaufdiagramm vermittelte

Tabelle 6.10: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 2: *verringerte Kapazität* (bei aktiver bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung)

Experiment	B_m [Std]	RS_m [Std]	L_m [Std/BKT]	R_m [BKT]	TAA_m [BKT]
Termin ohne RR	2279	1352	234	9,74	5,78
CONWIP-I _{n,0} mit RR	175	383	251	0,69	1,52
CONWIP-I _{h,0} mit RR	203	537	251	0,82	2,17
CONWIP-I _{n,1} mit RR	174	288	250	0,7	1,15
CONWIP-I _{h,2} mit RR	198	-155	255	-0,77	-0,61
CONWIP-II _{n,0} mit RR	183	524	251	0,73	2,10
CONWIP-II _{h,0} mit RR	206	-22	266	0,8	-0,08
min. Verbesserung	91%	60%	7%	92%	62%
max. Verbesserung	92%	111%	14%	93%	111%

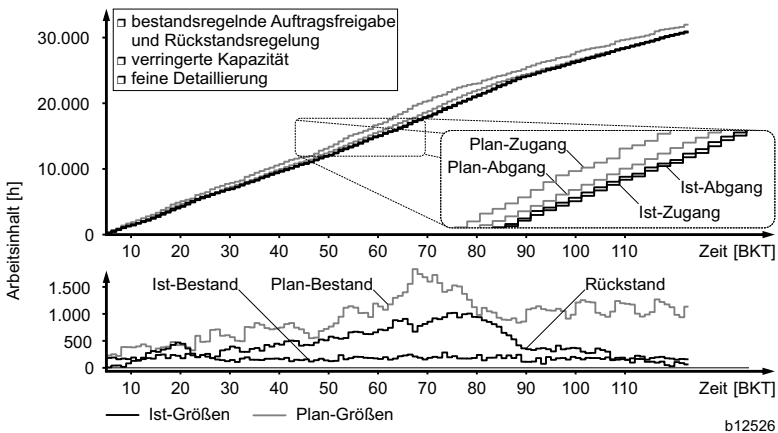


Abbildung 6.20: Durchlaufdiagramm für Szenario 2 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)

Bild. Tabelle 6.10 zeigt, dass sich der mittlere Bestand um mehr als 90% reduziert. Gleichzeitig gelingt es, den mittleren Rückstand um minimal 60% zu reduzieren. Da die Parametrierung der Rückstandsregelung nicht verändert wird, liegt eine Wechselwirkung mit der bestandsregelnden Auftragsfreigabe vor. Diese Wechselwirkung geht so weit, dass sogar negative Rückstände erreicht werden.

Aufgrund der Kapazitätsanpassungen durch die Rückstandsregelung kommt es zu einer Leistungssteigerung zwischen 7% und 14%. Es ist jedoch zu bedenken, dass hier eine Zusatzbelastung der Mitarbeiter vorliegt, die nicht in beliebigem Maß genutzt werden kann.

Sehr positiv zu bewerten sind die Verbesserungen bei der mittleren Reichweite (bzw. der Durchlaufzeit) und der mittleren Terminabweichung im Abgang. So reduziert sich die Durchlaufzeit um mehr als 90% und die mittlere Terminabweichung im Abgang ist um mindestens 60% reduziert. Für die Reichweite ist jedoch zu bedenken, dass Materialflussabrisse und daraus hervorgehende Auslastungsverluste unbedingt zu vermeiden sind. Aufgrund der sehr großen Flexibilität in der Abarbeitung bietet die Unikatfertigung auf Baustellen hier jedoch viele Möglichkeiten, positiv auf den Produktionsablauf einzuwirken.

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe und die Rückstandsregelung in Szenario 3

Abbildung 6.21 zeigt das Durchlaufdiagramm für Szenario 3 bei Anwendung der CONWIP-I-Steuerung und der Rückstandsregelung. Das Störungsszenario verursacht nur kleine Plan-Abweichungen. Aus diesem Grund zeigt das Durchlaufdiagramm die Qualifikationsgruppe Schweißen als Gesamtarbeitssystem nutzt die logistischen Kennzahlen.

Im Durchlaufdiagramm ist zu sehen, dass Ist-Zugang und Ist-Abgang über lange Teile der betrachteten Periode zwischen Plan-Zugang und Plan-Abgang liegen. Die Durchlaufzeit ist hier

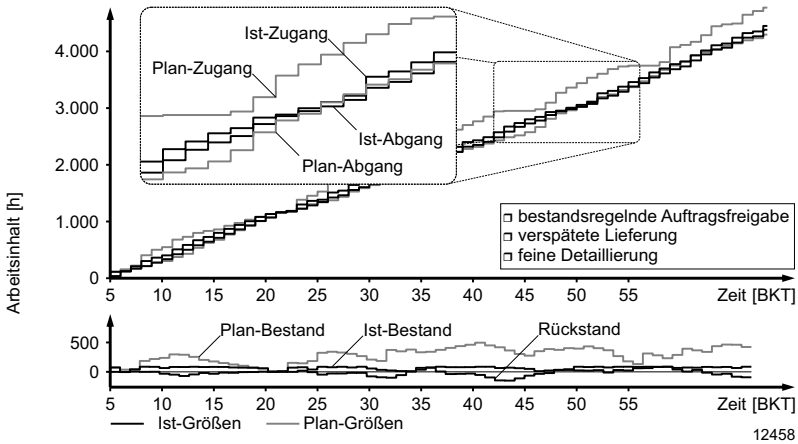


Abbildung 6.21: Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

signifikant reduziert und der Abgang erfolgt meist zum Plan-Zeitpunkt. Im Vergleich zum Durchlaufdiagramm des nicht gesteuerten Arbeitssystems gelingt es der Steuerung, die störungsbedingten Plan-Abweichungen schnell auszugleichen (vgl. Abbildung 6.15, S. 129)

Die Analyse des Rückstands zeigt, dass dieser zwischen 200 und -100 Stunden schwankt. Diese Schwankung ist niedriger als im ungesteuerten Arbeitssystem und bestätigt die positive Wirkung

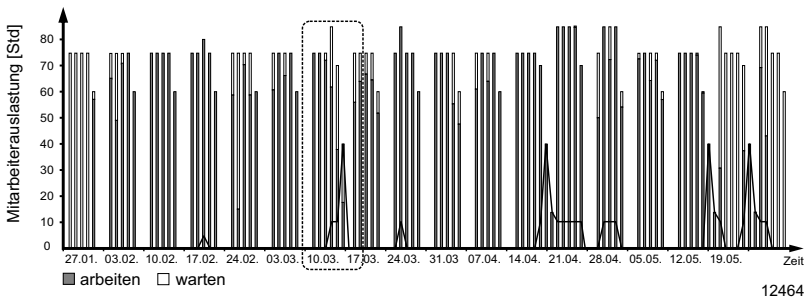


Abbildung 6.22: Auslastungsdiagramm für Störungsszenario *verspätete Teilelieferung* mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)

der Rückstandsregelung.

Im Durchlaufdiagramm ist jedoch nicht der Umfang der Kapazitätsanpassungen zu erkennen. Dies gelingt erst mit dem Auslastungsdiagramm in Abbildung 6.22, welches für den analysierten Zeitraum die Auslastung für dieselbe Qualifikation und Baustelle zeigt. Die Abbildung zeigt außerdem einen der größten Kritikpunkte bei der Anwendung der Rückstandsregelung in diesem Störungsszenario: Das Steuerungsverfahren ist nicht in der Lage, den Grund für den Rückstand zu berücksichtigen. Im Fall von verspäteten Bereitstellungen bedeutet das, dass eine Erhöhung der Kapazitäten stattfinden kann, obwohl keine Aufträge zur Verfügung stehen. Das Auslastungsdiagramm zeigt dies für die Kalenderwoche 11, in der Schichterweiterungen stattfinden und gleichzeitig Wartezeiten vorliegen. Diese Schichterweiterungen sind somit unsinnig und führen die Steuerung ad absurdum (vgl. [Löd08, S. 495 ff.]). Fälle wie der gezeigte sind im realen Einsatz zwingend zu verhindern, da sie das Vertrauen in die Steuerungsverfahren unterminieren.

Die logistischen Kennzahlen in Tabelle 6.11 betrachten das gesamte Arbeitssystem, bestehend aus drei Baustellen und allen Qualifikationsgruppen. Auch sie bestätigen die positive Wirkung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe und der Rückstandsregelung.

Mithilfe der bestandsregelnden Auftragsfreigabe gelingt es, den mittleren Bestand um bis zu 82% zu reduzieren. Dieses Verhalten entspricht dem in Abschnitt 6.2.3 beschriebenen Verhalten. Die Kombination aus bestandsregelnder Auftragsfreigabe mit Vorgriffshorizont und der Rückstandsregelung reduziert den mittleren Rückstand signifikant. Diese Aussage ist jedoch kritisch zu betrachten, da die bereits beschriebenen Kapazitätsreserven im System vorhanden sind. Diese ermöglichen es, die Flexibilität in der Abarbeitung besser zu nutzen.

Die Rückstandsregelung muss die Kapazität nur sehr wenig beeinflussen (maximal 1% Leistungserhöhung). Dies ist vor allem in dem geringen Störungsumfang begründet. Die mittlere Reichweite und auch die mittlere Terminabweichung im Abgang zeigen jedoch die sehr positive Wirkung der Steuerungsverfahren. So gelingt es den Steuerungsverfahren, die mittlere Reichweite – respektive die Durchlaufzeit – um mehr als 78% zu reduzieren. Für die mittlere Terminabweichung im Abgang wird sogar eine negative Abweichung erreicht.

Auch im Szenario 3 gelingt es den Steuerungsverfahren, den Produktionsablauf zu beeinflussen und so die Plan-Abweichungen abzubauen. Kritisch zu sehen ist lediglich der Fall, in dem Kapazitätserhöhungen stattfinden, obwohl kein Material zur Verfügung steht. Aufgrund der größeren Flexibilität in der Abarbeitung (flexible Montagereihenfolgen) ist es jedoch einfacher, diesen Fall zu verhindern. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein transparenter Produktionsablauf, wie er sich

Tabelle 6.11: Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 3: *verspätete Teilelieferung* (bei aktiver bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung)

Experiment	B_m [Std]	RS_m [Std]	L_m [Std/BKT]	R_m [BKT]	TAA_m [BKT]
Termin ohne RR	905	65	256	3,54	0,25
CONWIP-I _{n,0} mit RR	161	28	257	0,63	0,11
CONWIP-I _{h,0} mit RR	189	43	256	0,74	0,17
CONWIP-I _{n,1} mit RR	163	-279	258	0,63	-1,08
CONWIP-I _{h,2} mit RR	192	-96	257	0,75	-0,38
CONWIP-II _{n,0} mit RR	172	19	257	0,67	0,07
CONWIP-II _{h,0} mit RR	197	7	257	0,77	0,03
min. Verbesserung	78%	34%	0%	78%	32%
max. Verbesserung	82%	529%	1%	82%	532%

nur mit einer detaillierteren Planung realisieren lässt.

6.2.6 Beurteilung der Wirksamkeit von Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung in der Baustellenfertigung

Die vorangegangenen Abschnitte untersuchen die bestandsregelnde Auftragsfreigabe, die Rückstandsregelung sowie die Kombination aus beiden Steuerungsverfahren innerhalb der Baustellenfertigung. Die Analysen zeigen, dass die Steuerungsverfahren einen deutlichen Einfluss auf die logistischen Kennzahlen haben.

Hierbei ist vor allem die Wirkung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe in den Vordergrund zu stellen. Ihr gelingt es auf Basis einer typischen schiffbaulichen Planung, den Bestand signifikant zu reduzieren. Hierfür war es jedoch notwendig, die Auftragsstruktur detaillierter zu planen. Die logistischen Kennzahlen beweisen jedoch, dass hierdurch die Durchlaufzeiten sehr positiv zu beeinflussen sind.

Gleichzeitig schafft die detaillierte Erfassung der Zugänge und Abgänge eine deutlich höhere Transparenz am Arbeitssystem, indem sie auch kleinere Störungen sichtbar macht. Die höhere Detaillierung ist somit nicht nur eine Voraussetzung für die sinnvolle Anwendung der bestandsregelnden Auftragsfreigabe, sondern ermöglicht auch eine zielgerichtete Reaktion auf Plan-Abweichungen. Diese lassen sich zu einem früheren Zeitpunkt bestimmen, als es mit der im Schiffbau typischen groben Planung möglich ist.

Die Rückstandsregelung ergänzt das Steuerungsverhalten günstig, indem neben dem Bestand und der Durchlaufzeit auch der Rückstand direkt zu beeinflussen ist. Kritisch zu sehen ist hierbei die Kapazitätsanpassung im Fall von verspäteten Lieferungen. Hier kommt es vor, dass die Kapazität erhöht wird, obwohl keine Aufträge zur Verfügung stehen. Die Rückstandsregelung ist für diesen Fall um weitere Regeln zu ergänzen, um diesen Fall zu verhindern.

Ein weiterer Kritikpunkt im untersuchten Simulationsmodell ist das ungenutzte Leistungspotenzial im Arbeitssystem. Da es sehr aufwendig ist, eine vollständig gleichmäßige Auslastung der beteiligten Qualifikationsgruppen zu erreichen, ist für einzelne Qualifikationsgruppen immer mit Leerlaufzeiten zu rechnen. In der realen Produktion wird dieses Problem beispielsweise mithilfe der Mehrfachqualifikation gelöst, die den Belastungsabgleich zwischen den Qualifikationsgruppen erleichtert.

Für den hier untersuchten Fall erschweren die ungenutzten Kapazitäten die Analyse der Rückstandsregelung. In Abschnitt 6.2.3 wird der Effekt sichtbar. Hier gelingt es der CONWIP-I-Steuerung (Konfiguration hohe Anzahl CONWIP-Stunden, Vorgriffshorizont 2 Tage), die Leistung ohne Kapazitätsanpassungen zu erhöhen. Scheinbar ist diese Konfiguration besser dafür geeignet, das Störungsszenario zu handhaben als die Kopplung von bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung. Dies ist jedoch nur möglich, weil freie Kapazitäten bereits im Arbeitssystem vorhanden sind. Ohne diese kann nur die Rückstandsregelung den Rückstand aufholen.

Tabelle 6.12: Vergleich der Wirksamkeit von bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung

		Art der Auftragsfreigabe	
		Freigabe nach Termin	bestandsregelnde Auftragsfreigabe
Rückstandsregelung	nein	$RS_m = 1352$	$RS_m = 838$
	ja	$RS_m = 276$	$RS_m = 259$

Insgesamt lassen sich aus den Simulationsversuchen die folgenden Schlussfolgerungen ziehen: Die Rückstandsregelung ist in der Lage, die Effekte von Störungen wirksam auszugleichen. Sie reduziert den Rückstand, unabhängig vom Freigabeverfahren, am deutlichsten (vgl. Tabelle 6.12). Sie ist gut mit einer bestandsregelnden Auftragsfreigabe zu kombinieren. Hier ist vor allem der positive Einfluss auf die Durchlaufzeit herauszustellen. Außerdem hat die bestandsregelnde Auftragsfreigabe einen positiven Einfluss auf den Rückstand.

In Kombination mit einem Vorgriffshorizont schafft die bestandsregelnde Auftragsfreigabe die nötige Flexibilität im Arbeitssystem. Erst hierdurch wird der Fertigungssteuerung der Raum zum „Atmen“ gegeben, sodass es nicht zu Materialflussabbrissen kommt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Schiffbau in Deutschland steht seit vielen Jahren vor der Herausforderung, mit asiatischen Werften am Markt um Kundenaufträge zu konkurrieren. Ein wichtiger Baustein für den Erfolg der Werften ist ihre hohe Termintreue bei der Ablieferung des Produktes und die hieraus entstehende Zuverlässigkeit für den Kunden. Dennoch fällt es vielen Werften schwer, die zeitlichen Abläufe präzise zu beschreiben und hieraus Planungs- und Steuerungsentscheidungen abzuleiten. Die hier bestehenden Potenziale bieten die Möglichkeit, die Durchlaufzeiten der Werften weiter zu senken. Aufgrund dieser Tatsache besteht der Wunsch, die Zusammenhänge zwischen den Aufgaben und den logistischen Zielgrößen der PPS besser zu verstehen, um so diese Potenziale zu erschließen.

Das *Modell der Fertigungssteuerung* zeigt einfach und klar, welche Zusammenhänge zwischen diesen Größen bestehen. Obwohl diese Zusammenhänge so klar und einfach erscheinen, ist es bisher nicht gelungen, dieses Modell auf die schiffbauliche Unikatfertigung zu übertragen. Gründe hierfür sind die hohe Komplexität von Produkt und Produktion sowie das Fehlen einer passenden Theorie. Ziel dieser Arbeit war es deshalb, eine theoretische Modellierung zu entwickeln, der es gelingt, die Produktionsabläufe im Schiffbau präzise zu beschreiben. Außerdem sollte diese Modellierung in einem Simulationsmodell implementiert und anhand von diesem evaluiert werden.

Das Simulationsmodell soll hierbei zwei Aufgaben erfüllen: die Bestätigung der theoretischen Modellierung sowie die Schaffung einer Versuchsumgebung. Vor allem diese bietet erst die Möglichkeit, die Zusammenhänge zwischen den Aufgaben und den Zielgrößen auch im Schiffbau einer systematischen Untersuchung zugänglich zu machen.

7.1 Zusammenfassung

Der erste zentrale Baustein der Arbeit ist die Modellierung zur Beschreibung der Produktionsabläufe auf den Baustellen beziehungsweise den Montageflächen. Die Arbeit untergliedert diese in die Beschreibung der Vorgänge auf der Fläche und die Beschreibung der Mitarbeitertätigkeiten. Hierbei wird der Mitarbeiter als eigenständiges Arbeitssystem definiert, um so der Ortsunabhängigkeit der Mitarbeiter und ihren breiten Einsatzmöglichkeiten Rechnung zu tragen.

Der zweite Baustein der Arbeit ist die Implementierung des Simulationsmodells. Dieses bildet die entwickelte theoretische Modellierung in einer modularen Versuchsumgebung ab. Die Modularität ist hierbei in zwei Aspekte zu untergliedern: Einerseits ist die Anpassung und Erweiterung der Bauplatzbeschreibungen aufwandsarm möglich. Das Modell lässt sich auf diese Weise an reale Werften anpassen und ermöglicht deren Analyse. Andererseits ist das Steuerungskonzept modular gestaltet. Dies stellt sicher, dass die Versuchsumgebung um weitere Steuerungsmethoden zu ergänzen und für die gewünschten Steuerungskonzepte zu konfigurieren ist.

Das entwickelte Simulationsmodell nutzt einen im Schiffbau bereits etablierten Simulationsbausteinkasten, um die Abläufe auf den Montageflächen abzubilden. Einige Werften nutzen diesen oder ähnliche Bausteinkästen bereits seit mehreren Jahren, um umfangreiche Teile des Produktionsablaufs (Stahlbau und Installation von Ausrüstungskomponenten) mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad zu modellieren und zu simulieren. Der Fokus hier liegt jedoch auf der Abbildung von Planungszuständen und der Evaluierung von Störungsszenarien. Nicht untersucht wird bisher,

wie sich diese Störungen durch standardisierte Steuerungsmethoden kompensieren lassen. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Ansatz ist dieses Vorgehen sinnvoll zu ergänzen. Die Arbeit zeigt, dass die Steuerungsmethoden in der Lage sind, eine Vielzahl an kleineren und mittleren Störungen aufzufangen und den Plan wie gewünscht umzusetzen. Gleichzeitig reduzieren die Steuerungsmethoden die Intransparenz der Produktionsabläufe.

Häufiges Problem der schiffbaulichen Fertigung ist gerade diese Intransparenz und die Schwierigkeit, Störungsauswirkungen zu beurteilen. Die vorgestellten bestandsregelnden Freigabeverfahren zwingen die Produktion nun einerseits, Auftragsfreigabe und Auftragsfertigstellung genauer zu messen und somit der Planung und Steuerung eine präzisere Rückmeldung über die Abläufe zu geben. Andererseits steigern sie die Reaktionsfähigkeit des Arbeitssystems weiter, indem sie die Durchlaufzeit eines Auftrags reduzieren. Durch den Einsatz der Fertigungssteuerungsmethoden lassen sich somit die Produktionsprozesse von Werften verbessern. Des Weiteren zeigt die Arbeit, welchen Vorteil die detaillierte Erfassung und Steuerung der Abläufe hat. Gerade vor dem Hintergrund der bisher schlecht abschätzbaren und inhomogenen Auftragszeiten der schiffbaulichen Fertigung stellt dies einen großen Vorteil dar.

Die vorangegangenen Kapitel betrachten anhand dieser Daten mehrere Störungsszenarien und stellen die Einflussmöglichkeiten der untersuchten Steuerungsverfahren vor. Hieraus lassen sich drei Grundsätze für die Etablierung der Fertigungssteuerung auf Baustellen ableiten:

- ☐ Eine effektive Fertigungssteuerung benötigt eine hinreichend genaue Planung und Erfassung von Zugang und Abgang auf die Baustelle.
- ☐ Die bestandsbegrenzende Freigabe ist in der Lage, Bestände und Durchlaufzeiten in der Baustellenfertigung zu regeln.
- ☐ Die Kapazitätssteuerung ist in der Lage, Rückstände abzubauen. Wie in der Werkstattfertigung ist jedoch darauf zu achten, dass die Kapazitätssteuerung nur Rückstände kompensieren kann, für die Material bereitsteht.

Beachtet man diese Grundsätze, so lässt sich der Ablauf auf Baustellen transparent und zielgerichtet gestalten. Außerdem ist der Aufwand zur Steuerung im Störfall reduzierbar. Die folgenden Absätze beleuchten bestehende Defizite des Ansatzes und Weiterentwicklungspotenziale.

7.2 Ausblick

Die geschaffene theoretische Modellierung sowie das Simulationsmodell eröffnen eine Vielzahl neuer Untersuchungsmöglichkeiten. In den Fokus zu stellen sind hier zunächst die Implementierung weiterer Verfahren zur Freigabe-, Kapazitäts- und Reihenfolgesteuerung. So beschreibt allein Lödding fünf weitere Freigabeverfahren, fünf Verfahren für die Kapazitätssteuerung und sechs Verfahren zur Reihenfolgebildung [Lö08], die nicht im Simulationsmodell implementiert sind. Welche dieser Verfahren sinnvoll in der schiffbaulichen Produktion anzuwenden sind, ist somit nicht zu beurteilen. Erst ihre Implementierung ermöglicht die Analyse ihrer Wirksamkeit.

Besonders herauszustellen ist hier der Einfluss der Reihenfolgesteuerung, der bisher kaum beleuchtet ist. Mit der Arbeit von Kuyumcu besteht hier eine detaillierte Modellierung der Vorgänge [Kuy13], die auch in die Baustellenfertigung zu übertragen ist. Der hier vorgelegten Arbeit gelingt es bisher nur, eine definierte Reihenfolge sicherzustellen. Deshalb war es nicht möglich, die Wirkung der Reihenfolgebeeinflussung auf die Termintreue zu untersuchen.

Neben der Implementierung weiterer Steuerungsverfahren könnte zudem die Entwicklung einer Kennlinientheorie für Baustellen im Vordergrund stehen. Erst über diese ist die zielgerichtete

logistische Positionierung für das Arbeitssystem möglich. Die vorgestellte Modellierung sowie das Simulationsmodell mit seinen Fertigungssteuerungsverfahren bilden die Grundlage für die Ableitung von Produktionskennlinien. Diese wiederum bildet die Basis für die Entwicklung einer Theorie zur Verdichtung der Kennlinien. Auf diesem Weg ließe sich anschließend die gesamte Werft abbilden und analysieren.

Neben den Untersuchungen dieser logistischen Zusammenhänge bestehen noch weitere arbeitssystemspezifische Merkmale, die noch nicht hinreichend untersucht sind. Hierzu gehören:

- ☐ der Einfluss der Bestandsbegrenzung der Fläche auf die Bestandsbegrenzung des Arbeitssystems Mitarbeiter,
- ☐ der Unterschied zwischen starrer und flexibler Verkettung der Baustellen und die daraus resultierenden Wirkungen auf das Gesamtarbeitssystem Werft sowie
- ☐ der Einfluss, den eine nicht kompensierte Verspätung eines Blocks auf die Bearbeitung auf Folgebaustellen hat.

Ein weiterer Gesichtspunkt, mit dem sich die Arbeit nicht beschäftigt, ist die Mehrfachqualifikation von Mitarbeitern. Diese ist sowohl für der Bestimmung von Plänen als auch für den Abbau von Rückständen zu nutzen. Aufgrund der Komplexität der Steuerung des Systemverhaltens verzichtet die Arbeit jedoch auf die Nutzung dieser Option. Dennoch stellt sie einen sehr aussichtsreichen Aspekt dar, der zunächst für Teilsysteme eingehender zu betrachten wäre.

Die durchgeführten Analysen sind auf die Produktion im Schiffbau fokussiert. Aufgrund der Ähnlichkeit sind die Ergebnisse jedoch auch auf andere Branchen übertragbar. Besonders der Baubetrieb bietet sich aufgrund seiner großen Ähnlichkeit hierfür an. Modell und Simulationsumgebung sind jedoch für diese Branche zu hinterfragen und entsprechend der bestehenden Unterschiede anzupassen. Der große Nutzen einer systematischeren Beeinflussung der Bauabläufe ist jedoch nicht zu bestreiten.

Literaturverzeichnis

- [Ali05] ALISCH, K.: *Gabler Wirtschafts-Lexikon*, Gabler, Wiesbaden (2005)
- [Bal98] BALIC, O.: Verification, Validation and Testing, in: J. Banks (Herausgeber) *Handbook of simulation*, Wiley, New York und NY (1998), S. 335–393
- [Bau07] BAUER, H.: *Baubetrieb*, Springer, Berlin und Heidelberg, 3. Aufl. (2007)
- [Bec79] BECHTE, W.: *Methoden und Hilfsmittel der Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse in Klein- und Mittelbetrieben: Fachbericht aus d. Inst. für Fabrikanlagen d. Techn. Univ. Hannover*, Beuth, Berlin und Köln (1979)
- [Bec80] BECHTE, W.: *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (1980)
- [Bei07] BEISSERT, U.; KÖNIG, M. und BARGSTÄDT, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Building Engineering, in: *Proceedings of the 24th International Conference Managing IT in Construction CIB W078* (2007)
- [Bei08] BEISSERT, U.; KÖNIG, M. und BARGSTÄDT, H.-J.: Simulation von Ausführungsstrategien mit Hilfe von Soft Constraints und lokaler Suche, in: M. Rabe (Herausgeber) *13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik* (2008)
- [Bei10] BEISSERT, U.; KÖNIG, M. und BARGSTÄDT, H.-J.: Soft constraint-based simulation of execution strategies in building engineering. *Journal of Simulation* (2010)
- [Ber93] BERTRAND, J. und MUNTSLAG, D.: Production control in engineer-to-order firms. *International Journal of Production Economics* (1993): S. 3–22
- [Ber08] BERNER, F.; KÖCHENDÖRFER, B. und SCHACH, R.: *Grundlagen der Baubetriebslehre 2: Baubetriebsplanung*, Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft, Wiesbaden B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2008)
- [Bor09] BORNHÄUSER, M.: *Reifegradbasierte Werkstattsteuerung*, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2009)
- [Bor11] BORRMANN, A.; GÜNTNER, W. A.; HORENBURG, T.; KÖNIG, M.; MACK, J.; PFAFF, S.; STEINHÄUER, D. und WIMMER, J.: Simulationsgestützte Bauablaufplanung, in: B. Günthner (Herausgeber) *Digitale Baustelle - innovativer Planen* (2011), S. 159–204
- [Bra11] BRACHT, U.; GECKLER, D. und WENZEL, S.: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin und Heidelberg (2011)
- [Bro11] BROOKS, F. P.: *The mythical man-month: Essays on software engineering*, Addison-Wesley, Boston und Mass, 37. Aufl. (2011)
- [CES13] CESA & EMEC: *Annual report / Community of European Shipyards' Associations*, CESA, Brussels, 1. Aufl. (2013), URL http://www.cesa-shipbuilding.org/links_downloads#, zuletzt abgerufen am 02.09.2013

- [Cho98] CHOA, K.; OHA, J.; RYUB, K. und CHOIC, H.: An Integrated Process Planning and Scheduling System for Block Assembly in Shipbuilding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (1998), Bd. 47(1): S. 419–422
- [Cla12] CLARKSON RESEARCH SERVICE LIMITED: ShipType Orderbook Monitor (2012)
- [Cza08] CZARNIETZKI, R.: *Entwicklung rechnerunterstützter Methoden zur Belegungsplanung auf einer Kompaktwerft und deren Anwendung zur Untersuchung ausgewählter Fertigungsreihenfolgen bei der Panel- und Sektionsfertigung*, Dissertation, Universität Rostock, Rostock (2008)
- [Drä94] DRÄGER, H.: *Gesamtauftragsüberwachung in der Kleinserien- und Einzelfertigung am Beispiel des Betriebsmittelbaus*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (1994)
- [Elo92] ELORANTA, E.: The future factory: Challenge for one-of-a-kind production. *International Journal of Production Economics* (1992), Bd. 28(2): S. 131–142
- [Eve06] EVERSHEIM, W.; PFEIFER, T. und WECK, M.: *100 Jahre Produktionstechnik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen von 1906 bis 2006*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin und Heidelberg (2006)
- [Eyr07] EYRES, D. J.: *Ship construction, sixth edition*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 6. Aufl. (2007)
- [FK14] FIEBAK-KREMER, I.: Krananlage Meyer Werft (2014), URL http://www.gce-agency.com/bilder_kunden/nc1/nc1_getaway_meyer_02.jpg, zuletzt abgerufen am 26.01.2014
- [Fle97] FLEISCHMANN, H. D.: *Bauorganisation: Ablaufplanung, Baustelleneinrichtung, Arbeitsstudium, Bauausführung*, Werner Verlag, Düsseldorf, 3. neubearb. und erweiterte Aufl. (1997)
- [Gru10] GRUSS, R.: *Schlanke Unikatfertigung: Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production*, Dissertation, Wiesbaden (2010)
- [Gün11] GÜNTHER, B. (Herausgeber): *Digitale Baustelle - innovativer Planen* (2011)
- [Hei74] HEINEMEYER, W.: *Die Analyse der Fertigungsdurchlaufzeit im Industriebetrieb*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (1974)
- [Hof07] HOFSTADLER, C.: *Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb: Mit 5 Tabellen*, Springer, Berlin (2007)
- [Hop96] HOPP, W. J. und SPEARMAN, M. L.: *Factory physics: Foundations of manufacturing management*, McGraw-Hill, Boston und Mass (1996)
- [Jon94] JONES, C.: *Assessment and control of software risks*, Yourdon Press computing series, Prentice Hall, Englewood Cliffs und NJ (1994)
- [Kam14] KAMAG: Schwerlasttransporter von Kamag (2014), URL http://www.kamag.de/uploads/pics/3_22.jpg, zuletzt abgerufen am 26.01.2014
- [Kir08] KIRSCH, J.: *Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme*, Dissertation, Univ. (TH), Karlsruhe (2008)
- [Kol12] KOLIĆ, D.; FAFANDJEL, N. und ZAMARIN, A.: Lean Manufacturing Methodology for Shipyards, in: *The 20th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding*, Zagreb (2012), S. 18–29

- [Kön07] KÖNIG, M.; BEISSERT, U. und BARGSTÄDT, H.-J.: Constraint-based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering, in: *Proceeding of the 6th EUROSIM Congress* (2007), URL http://www.simofit.de/Paper_EUROSIM_2007_koenig_beissert_steinhauer_bargstaedt.pdf, zuletzt abgerufen am 13.11.2013
- [Kön11] KÖNIG, M.; HABENICHT, I. und SPIECKERMANN, S.: On-Site Logistics Simulation in Early Planning Phases, in: H.-J. Bargstädt und K. Ailland (Herausgeber) *International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, Verlag der Bauhaus-Universität Weimar (2011), S. 728–737
- [Kot10] KOTHE, U. und WANNER, M.-C.: Strukturierung der Planung einer Kompaktwerft, in: M.-C. Wanner (Herausgeber) *Großstrukturen*, Redieck & Schade, Rostock (2010), S. 190–199
- [Kuh94] KUHLMANN, T.: *Konzeption und Entwicklung eines Systems zur Koordinierung der Produktion komplexer Unikate*, Dissertation, Universität Bremen, Bremen (1994)
- [Küh06] KÜHN, W.: *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*, Hanser, München (2006)
- [Kuy13] KUYUMCU, A.: *Modellierung der Termintreue in der Produktion*, Dissertation, Techn. Univ. Hamburg-Harburg, Hamburg-Harburg (2013)
- [Lee97] LEE, J. K.; LEE, K. J.; PARK, H. K.; HONG, J. S. und LEE, J. S.: Developing scheduling systems for Daewoo Shipbuilding: DAS project. *European Journal of Operational Research* (1997), Bd. 97(2): S. 380–395
- [Lit61] LITTLE, J. D. C.: A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *Operations Research* (1961), Bd. 9(3): S. 383–387
- [Löd08] LÖDDING, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*, VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg, 2. Aufl. (2008)
- [Löd11] LÖDDING, H.; FRIEDEWALD, A. P. und HEINIG, M.: Improving Assembly Planning Simulation with the use of Virtual Reality in the Maritime Industry, in: *15th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, Bd. 2011, RINA (2011), S. 157–163
- [Löd12] LÖDDING, H.; NYHUIS, P.; SCHMIDT, M. und KUYUMCU, A.: Modelling lateness and schedule reliability: how companies can produce on time. *Production Planning & Control* (2012): S. 1–14
- [Los93] LOS, R. H.: *Entwicklung und Implementierung von Werkstattsteuerungssystemen für die Unikatfertigung und -montage am Fall des Schiffbaus*, Dissertation, Universität Bremen, Bremen (1993)
- [Mar11] MARX, A. und KÖNIG, M.: Preparation of Constraints for Construction Simulation, in: Y. Zhu und R. R. Issa (Herausgeber) *International Workshop on Computing in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers (2011), S. 462–469
- [Ma800] MASSOW, C.: *Flächenbelegungsplanung im Schiffbau*, Bd. 94/2000 von *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Springer, Berlin (2000)
- [Mel91] MELNYK, S. A.; RAGATZ, G. L. und FREDENDALL, L.: Load smoothing by the planning and order review/release systems: A simulation experiment. *Journal of Operations Management* (1991), Bd. 10(4): S. 512–523

- [Mey10] MEYER WERFT: Im Dialog: Die Meyer Werft informiert ihre Lieferanten (2010), URL http://www.meyerwerft.de/media/06_lieferanten/im_dialog/Im_Dialog_No_06_02_2010_D.pdf, zuletzt abgerufen am 01.10.2013
- [Ned07] NEDESS, C.; FRIEDEWALD, A. und WAGNER, L.: Modellierung und Simulation von Produktionsflächen im Schiffbau. *PPS-Management : Zeitschrift für ERP-Systeme in Produktion und Logistik* (2007), Bd. 12(2): S. 36–39
- [Nic08] NICKEL, R.: *Logistische Modelle für die Montage*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (2008)
- [Nyh06] NYHUIS, P.; NICKEL, R. und BUSSE, T.: Logistisches Controlling der Materialverfügbarkeit mit Bereitstellungsdigrammen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (2006), Bd. 101(5): S. 265–268
- [Nyh12] NYHUIS, P. und WIENDAHL, H.-P.: *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*, Springer Vieweg, Heidelberg, 3. Aufl. (2012)
- [OEC13] OECD WORKING PARTY ON SHIPBUILDING: Peer Review of Japanese Government Support Measures to the Shipbuilding Sector (2013), URL [http://www.oecd.org/sti/ind/C-WP6\(2012\)26-FINAL-ENG.pdf](http://www.oecd.org/sti/ind/C-WP6(2012)26-FINAL-ENG.pdf), zuletzt abgerufen am 27.08.2013
- [Ott07] OTT, M.: *Fertigungssystem Baustelle*, Dissertation, Univ. (TH) Karlsruhe, Karlsruhe (2007)
- [Pet96] PETERMANN, D.: *Modellbasierte Produktionsregelung*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (1996)
- [Rab08] RABE, M.; SPIEKERMANN, S. und WENZEL, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken (2008)
- [REF93] REFA: *Ausgewählte Methoden des Arbeitsstudiums*, REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation, Hanser, München (1993)
- [Rei93] REINHARDT, A.; KOOP, D.; HANISCH, S.; RABE, M. und ROTTBECK, B.: Simulationsinstrumente - Modellierung und Implementierung, in: A. Kuhn; A. Reinhardt und H.-P. Wiendahl (Herausgeber) *Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik*, Bd. 7 von *Fortschritte in der Simulationstechnik*, Vieweg, Braunschweig [u.a.] (1993), S. 309–346
- [Rex12] REX, C.; THORSEN, B.; RASMUSSEN, K. L.; NIELSEN, S. und THØGERSEN, K. M.: Shipping Market Review: October (2012), URL <http://www.shipfinance.dk/en/Publications/Download/~media/Shipping-Market-Review/Shipping-Market-Review-October-2012.ashx>, zuletzt abgerufen am 06.08.2013
- [Rii92] RIIS, J. O.; MORTENSEN, H. S. und JOHANSEN, J.: A New Concept for Managing One-of-a-kind Production, in: B. Hirsch und K.-D. Thoben (Herausgeber) *"One-of-a-kind" production*, Bd. 2 von *IFIP transactions B - Applications in technology*, North-Holland, Elsevier Science, Amsterdam und New York (1992), S. 195–208
- [Row13] ROWE, M. und ASIA, C.: Shipbuilding Market Overview: Presentation to Marine Money HK - 19th March 2013 (2013), URL <http://www.marinemoney.com/sites/all/themes/marinemoney/forums/HK13/presentations/0955B%20Martin%20Rowe.pdf>, zuletzt abgerufen am 30.08.2013
- [Sch80] SCHOMBURG, E.: *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und*

- steuerungssysteme im Maschinenbau, Dissertation, Techn. Hochsch. Aachen, Aachen (1980)
- [Sch90] SCHLAUCH, R.: *Flächenorientierte Termin- und Kapazitätsplanung bei innerbetrieblicher Baustellenfertigung*, Dissertation, Stuttgart (1990)
- [Sch00] SCHÖNSLEBEN, P.: *Integrales Logistikmanagement. Planung und Steuerung von umfassenden Geschäftsprozessen*, Springer, Berlin, 2. überarb. und erw. Aufl. (2000)
- [Sch06] SCHUH, G.: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*, Springer, Berlin, 3. völlig neu bearb. Aufl. (2006)
- [Sch08] SCHMIDT, M.: Modeling of Logistic Processes in Assembly Areas, in: S. I. Ao (Herausgeber) *WCECS 2008, World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, 22 - 24 October, 2008*, Lecture notes in engineering and computer science, IAENG International Association of Engineers, Hong Kong (2008), S. 1067–1072
- [Sch10] SCHMIDT, M.: *Modellierung logistischer Prozesse der Montage*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (2010)
- [Sen10] SENDER, J. und BOHNENBERG, R.: Methoden zur strategischen Kapazitätsplanung im Schiffbau, in: M.-C. Wanner (Herausgeber) *Großstrukturen*, Redieck & Schade, Rostock (2010), S. 173–180
- [Ste06] STEINHAEUER, D.: Simulation in Shipbuilding – Supporting Shipyard Planning, in: S. Wenzel (Herausgeber) *12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, San Diego und Erlangen, S. 1–14
- [Ste11] STEINHAEUER, D.; HÜBLER, M.; WAGNER, L. A.; ESINS, E.; PESTER, P.; FRIEDEWALD, A. P. und WANDT, R.: GeneSim - Generisches Daten- und Modellmanagement für die schiffbauliche Produktionssimulation, in: Forschungszentrum Jülich GmbH (Herausgeber) *Statusagung Schifffahrt und Meerestechnik 2011*, Projektträger Jülich, Rostock (2011), S. 7–23
- [Sti96] STIDSEN, T.; KRAGEL, L. V. und MATEESCU, O.: Jobshop scheduling in a shipyard, in: W. Wahlster (Herausgeber) *12th European Conference on Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons, Ltd. (1996), S. 639–643
- [Sto99] STORCH, R. L. und LIM, S.: Improving flow to achieve lean manufacturing in shipbuilding, *Production Planning & Control* (1999), Bd. 10(2): S. 127–137
- [The13] THE SHIPBUILDERS ASSOCIATION OF JAPAN (SAJ): Shipbuilding Statistics (2013), URL http://www.sajn.or.jp/e/statistics/Shipbuilding_Statistics_Mar2013e.pdf, zuletzt abgerufen am 30.08.2013
- [Tu95] TU, Y.; HOLM, H. und BRANDT RASMUSSEN, U.: Closed Loop Scheduling and Control of One-of-a-Kind Production, in: Chapman und Hall (Herausgeber) *Computer applications in production and engineering*, London (1995), S. 301–308
- [Tu11] TU, Y. und DEAN, P.: *One-of-a-kind production*, Springer, London und New York (2011)
- [VDI10] VDI: VDI-Norm 3633, Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen (2010)
- [Wag11] WAGNER, L. A.: *Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau*, Dissertation, Techn. Univ. Hamburg-Harburg, Hamburg-Harburg (2011)

- [Wan09] WANNER, M.-C. und CZARNIETZKI, R.: Untersuchung ausgewählter Fertigungsreihenfolgen bei der Panel- und Sektionsfertigung auf einer Kompaktwerft. *PPS-Management : Zeitschrift für ERP-Systeme in Produktion und Logistik* (2009), Bd. 14(1): S. 44–48
- [Wan10] WANNER, M.-C. und KOTHE, U.: Wertstromdesign im Schiffbau, in: M.-C. Wanner (Herausgeber) *Großstrukturen*, Redieck & Schade, Rostock (2010), S. 204–211
- [Wie97] WIENDAHL, H.-P.: *Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*, Hanser, München (1997)
- [Wie10] WIENDAHL, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*, Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 7. Aufl. (2010)
- [Wor92] WORTMANN, J.: Production management systems for one-of-a-kind products. *Computers in Industry* (1992), Bd. 19(1): S. 79–88
- [Wor97] WORTMANN, J. C.; MUNTSAG, D. R. und TIMMERMANS, P. J. M.: *Customer-driven manufacturing*, Chapman & Hall, London und New York, 1. Aufl. (1997)
- [Wor00] WORMUTH, R.; SCHNEIDER, K.-J. und ACKERMANN, T.: *Baulexikon: Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens mit vielen Abbildungen*, Bauwerk, Berlin, 1. Aufl. (2000)
- [Yu01] YU, K.-W.: *Terminkennlinie: Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsprozess*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover (2001)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Orderbestand der Werften - Daten aus [Cla12]	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2.1	Einordnung des <i>Modells der Fertigungssteuerung</i> nach Lödning [Löd08, S. 7] in die Aachener Aufgabenreferenzsicht [Sch06, S. 21]	6
2.2	Das <i>Modell der Fertigungssteuerung</i> nach Lödning [Löd08, S. 7]	7
2.3	Zwei Perspektiven auf den Entstehungsprozess eines Schiffes	8
2.4	Einordnung der Fertigungsprinzipien in den Schifferstellungsprozess	9
2.5	Entwicklung der Produktivität japanischer Werften gemessen als Index des realen Wertzuwachses je Mitarbeiter [OEC13, S. 32]	12
2.6	Transportressourcen im Schiffbau	16
2.7	Zielgrößen der Logistikleistung und Logistikkosten [Löd08, S. 19]	17
2.8	Durchlaufzeitanteile von Losen [Nyh12, S. 22, Bildteil b]	18
2.9	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm [Wie97, S. 84]	20
2.10	Dilemma der Arbeitsvorbereitung nach [Hof07, S. 37]	21
2.11	Merkmalsstrukturen der Auftragsabwicklung [Sch06, S. 121]	22
3.1	Hierarchiestufen der Auftrags- und Durchführungszeiten	32
3.2	Varianten der Auftragsabwicklung auf der Baustelle	33
3.3	Vollständiges Durchlaufelement des Arbeitssystems Mitarbeiter	35
3.4	Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente für das Arbeitssystem Mitarbeiter	36
3.5	Idealisiertes Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem Mitarbeiter	37
3.6	Struktur von Fertigung und Baustelle im Schiffbau	38
3.7	Vollständiges arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement des ASF	42
3.8	Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente des Arbeitssystems Fläche	43
3.9	Histogramm des Parallelisierungsgrads	45
3.10	Durchlaufdiagramm des Arbeitssystems Fläche mit Flächenbezug	46
3.11	Durchlaufdiagramm Arbeitssystem Fläche mit Zeitbezug	47
3.12	Kopplung der Teilarbeitssysteme Fläche und Mitarbeiter	50
3.13	Kombination der Durchlaufelemente für die Arbeitssysteme Mitarbeiter und Fläche	51
3.14	Durchlaufdiagramme für verschiedene Hierarchiestufen	52
3.15	Verschiedene Fälle des Bestandsverlaufs im flächenbezogenen Durchlaufdiagramm	53
4.1	<i>Modell der Fertigungssteuerung</i> - Planung [Löd08, S. 133]	56
4.2	Varianten der Detaillierung der Planung	57
4.3	<i>Modell der Fertigungssteuerung</i> - Aufgaben der Steuerung [Löd08, S. 7]	60
4.4	Reihenfolgeunabhängigkeit zwischen Blöcken	67
5.1	Eingangsinformation für die Datengenerierung	70
5.2	Datenfluss der Prozess- und Produktinformationen für das Modell	70

5.3	Entstehung von Inkonsistenzen im Verlauf der Prozessdetaillierung	74
5.4	Struktur der verketteten Baustellen und der untergeordneten Flächen im Simulationsmodell	80
5.5	Oberfläche für die Konfiguration der Freigabeverfahren im Simulationsmodell	82
5.6	UML-Diagramm der Ist-Starttermin-Definition	84
5.7	Prinzip der CONWIP-Steuerung für das Arbeitssystem Mitarbeiter	85
5.8	Diagramm zur Analyse der Mitarbeiterauslastung und Schichtenerweiterung	93
5.9	Anwenderoberfläche der Kapazitätssteuerung (Entscheidungstabelle)	94
5.10	Abhängigkeit zwischen Aufträgen in der Baustellenfertigung im Vergleich zum Werkbank-, Verrichtungs-, Insel- und Fließprinzip	98
5.11	UML-Diagramm zur Reihenfolgebildung im Simulationsmodell	100
6.1	Hauptnetz des Simulationsmodells	107
6.2	Subnetz des Simulationsmodells (generische Baustelle)	108
6.3	UML-Diagramm des Vorgehens zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine	113
6.4	Durchlaufdiagramme für die Validierung der Freigabesteuerung	114
6.5	Durchlaufdiagramm des ungestörten Produktionsablaufs (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	117
6.6	Durchlaufdiagramm des ungestörten Produktionsablaufs (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	117
6.7	Auslastungsdiagramm des ungestörten Produktionsablaufs (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	118
6.8	Durchlaufdiagramm für Szenario 2 - <i>verringerte Mitarbeiterkapazität</i> (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	120
6.9	Durchlaufdiagramm für Szenario 3 - <i>verspätete Lieferung</i> (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	121
6.10	Morphologischer Kasten für die Gestaltung der Simulationsexperimente	122
6.11	Durchlaufdiagramm für Szenario 1 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	123
6.12	Durchlaufdiagramm für Szenario 1 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	124
6.13	Durchlaufdiagramm für Szenario 2 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustellen 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	126
6.14	Auslastungsdiagramm für Szenario 3 mit Auftragsfreigabe nach Termin (Baustellen 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	128
6.15	Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	129
6.16	Morphologischer Kasten: Konfiguration für die Evaluierung der Kapazitätssteuerung	130
6.17	Durchlaufdiagramm für Szenario 2 mit Rückstandsregelung (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	131
6.18	Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit Rückstandsregelung (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	132
6.19	Morphologischer Kasten: Konfiguration für die Evaluierung von bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung	133
6.20	Durchlaufdiagramm für Szenario 2 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung (Baustelle 1 bis 3 und alle Qualifikationsgruppen)	134
6.21	Durchlaufdiagramm für Szenario 3 mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen)	135

6.22 Auslastungsdiagramm für Störungsszenario *verspätete Teilelieferung* mit bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung (Baustelle 2 und Qualifikationsgruppe Schweißen) 135

A.1 Hierarchie des Blocks A-09 159

A.2 Hierarchie des Blocks R-01 160

A.3 Hierarchie des Blocks V-05 160

A.4 Hierarchie des Blocks A-03 161

C.1 Anzahl der Auftragsstunden für das verwendete Mengengerüst 169

Tabellenverzeichnis

2.1	Verknüpfung von Kapazitätssteuerungsverfahren mit Kriterium und Detaillierungsgrad nach Lödning	25
4.1	Anforderungen aufgrund der Produktionsplanung	59
4.2	Anforderungen für die Implementierung einer Auftragsfreigabe	62
4.3	Anforderungen an die Implementierung der Kapazitätssteuerung	65
4.4	Anforderungen an die Reihenfolgeregelung in der Baustellenfertigung	68
5.1	Umsetzung der Anforderungen aufgrund der Produktionsplanung	75
5.2	Anforderungen für die Implementierung einer Auftragsfreigabe	88
5.3	Anforderungen an die Implementierung der Kapazitätssteuerung	97
5.4	Lokale Constraints für den Teiletyp Bauwerk	101
5.5	Anforderungen an die Reihenfolgeregelung in der Baustellenfertigung	103
6.1	Eigenschaften der Baustellen im Simulationsmodell	110
6.2	Aufbau der Produktstrukturen (Muster) im Simulationsmodell	111
6.3	Analyse der Bearbeitungszeiten des Simulationsmodells	111
6.4	Zuordnung der Simulationsszenarien zum jeweils evaluierten Inhalt des Simulationsmodells	115
6.5	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 1: <i>keine Störung</i>	125
6.6	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 2: <i>verringerte Kapazität</i>	127
6.7	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 3: <i>verspätete Teilleieferung</i>	129
6.8	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 2: verringerte Kapazität (mit und ohne Rückstandsregelung)	130
6.9	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 3: <i>verspätete Teilleieferung</i> (mit und ohne Rückstandsregelung)	132
6.10	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 2: <i>verringerte Kapazität</i> (bei aktiver bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung)	133
6.11	Logistische Kennzahlen für das Störungsszenario 3: <i>verspätete Teilleieferung</i> (bei aktiver bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung)	136
6.12	Vergleich der Wirksamkeit von bestandsregelnder Auftragsfreigabe und Rückstandsregelung	137
A.1	Informationen in der Auftragsliste	155
A.2	Informationen in der Lieferliste	156
A.3	Informationen in der Tabelle Montageliste	156
A.4	Informationen in der Tabelle der lokalen Constraints	157
A.5	Informationen in der Tabelle der globalen Constraints	157
A.6	Inhalt der Prozesszeitentabelle	158
A.7	Informationen der Montagestrategietabelle	158

B.1	Pivot-Tabelle für die Validierung der Prozesszeiten	163
B.2	Pivot-Tabelle für die Validierung der Prozessgeschwindigkeiten	164
B.3	Simulationsszenarien zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine	165
C.1	Zuordnung von Simulationsszenarien und dem jeweils evaluierten Inhalt des Simulationsmodells	167
C.2	Anzahl der Produktmuster in chronologischer Reihenfolge ihrer Verwendung in den Simulationsexperimenten	168
C.3	Eigenschaften der Baustellen im Simulationsmodell	170
C.4	Definition der Parameter für die Freigabeverfahren	170
C.5	Anzahl der Mitarbeiter je Qualifikation, Schicht und Baustelle für die verringerte Mitarbeiterkapazität	170
C.6	Zusammenfassung der Verspätungen für das Störungsszenario <i>verspätete Teilelieferung</i>	171

A Datenstrukturen des Simulationsmodells

Die folgenden Abschnitte enthalten die im Simulationsmodell verwendeten Datenstrukturen. Hierzu gehören Informationen für die Simulation von Produktionsprozessen (A.1) und die Hierarchien der Blöcke (A.2).

A.1 Informationen für die Simulation der Produktionsprozesse

Die im Folgenden dargestellten Tabellen werden im Simulationsmodell für die Bereitstellung der Daten verwendet. Teilweise enthalten verschiedene Tabellen redundante Informationen. Dies ist nötig, um verschiedene Tabellen miteinander verknüpfen zu können.

Tabelle A.1: Informationen in der Auftragsliste

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Start	2012/01/31 00:00:00.0000	Zeitpunkt, zu dem der Auftrag in der Simulation erzeugt wird. Dieser liegt immer vor Beginn des Simulationszeitraums.
Aktivität	A003	Die Aktivität definiert den Bauplatz, auf dem die Bearbeitung ausgeführt wird.
IdentNr	1-a754R01-1	Eineindeutiger Bezeichner des Objekts.
Name	Bauwerk	Interpretierbarer Bezeichner für die Planer.
BE	.Modul	Definiert den Pfad, unter dem das Symbol für die Visualisierung in der Simulation abgelegt ist.
Länge	12.13	Ausdehnung des Objektes in Richtung der X-Achse des Produktkoordinatensystems.
Breite	14.28	Ausdehnung des Objektes in Richtung der Y-Achse des Produktkoordinatensystems.
Höhe	8.61	Ausdehnung des Objektes in Richtung der Z-Achse des Produktkoordinatensystems.
Anzahl	1	Menge der verwendeten Objekte.
Montagestrategie	9003	Die Montagestrategie definiert die Sequenz der auszuführenden Einzeltätigkeiten.
ParentID	1-a754R011	Ein-eindeutiger Bezeichner der übergeordneten Baugruppe.
Bauplatz	St1.1	Über den Bauplatz kann, im Fall einer starren Baustellenunterteilung, der Bauplatz definiert werden.
Teiletyp	Bauwerk	Die Typisierung wird für die Assoziation von Bauteilen und Prozessen verwendet.
NoTransport	false	Der Datensatz definiert, ob für den Transport ein Kran verwendet wird (false) oder nicht (true).
PlanRelease	2013/02/07 20:20:00.0000	Plan-Freigabezeitpunkt des Objekts, solange es ein Block ist.
PlanStart	2014/02/01 08:53:20.0000	Plan-Freigabezeitpunkt des Objekts, sobald es ein Teil ist.

Tabelle A.2: Informationen in der Lieferliste

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Lieferant	XY-AG	Für Lieferteile kann in diesem Datensatz der Lieferant hinterlegt werden.
Lieferzeit	2012/02/01 00:00:00.0000	Die Lieferzeit definiert den Plan-Liefertermin für Lieferteile. Dieser Zeitpunkt muss vor dem Plan-Starttermin liegen.
Name	Ausrüstung	Interpretierbarer Bezeichner für die Planer.
Teiletyp	Ausrüstung	Die Typisierung wird für die Assoziation von Bauteilen und Prozessen verwendet.
IdentNr	1-a75400073553715-1	ein-eindeutiger Bezeichner des Objekts.
Aktivität	A002	Die Aktivität definiert den Bauplatz, auf dem die Bearbeitung ausgeführt wird.
ParentID	1-a754R011-1	Eineindeutiger Bezeichner der übergeordneten Baugruppe.
Anzahl	1	Menge der verwendeten Objekte.
Länge	1.2	Ausdehnung des Objektes in Richtung der X-Achse des Produktkoordinatensystems.
Breite	2.3	Ausdehnung des Objektes in Richtung der Y-Achse des Produktkoordinatensystems.
Höhe	0.8	Ausdehnung des Objektes in Richtung der Z-Achse des Produktkoordinatensystems.
Gewicht	28	Definiert das Gewicht des Lieferteils.
BE	Ausrüstung.A-Material	Definiert den Pfad, unter dem das Symbol für die Visualisierung in der Simulation abgelegt ist.
Baulage	000_090_270	Die Baulage beschreibt, ob ein Objekt gegenüber seiner Einbauorientierung im Schiff für die Montage gedreht wurde. Die Winkel sind als Drehungen um die X-, Y- und Z- Achse angegeben. Drehreihenfolge ist Z-, Y-, X-Achse.
PlanStart	2012/02/01 00:01:37.0000	Der Plan-Starttermin definiert den Plan-Starttermin für Lieferteile. Dieser Zeitpunkt muss nach dem Termin Lieferzeit liegen.
ReleaseStatus	waiting for Conwip	Der ReleaseStatus beschreibt, in welchem Zustand der Freigabe sich ein Teil gerade befindet.
LängeStumpf	0	Definiert die Länge der Stumpfnah, wenn es sich bei dem Lieferteil um eine Schweißnaht handelt.
LängeKehl	0	Definiert die Länge der Kehlnah, wenn es sich bei dem Lieferteil um eine Schweißnaht handelt.
NoTransport	false	Der Datensatz definiert, ob für den Transport ein Kran verwendet wird (false) oder nicht (true).
Nennweite	0	Definiert die Nennweite, wenn es sich bei dem Lieferteil um ein Rohr handelt.

Tabelle A.3: Informationen in der Tabelle Montageliste

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Aktivität	A003	Die Aktivität definiert den Bauplatz, auf dem die Bearbeitung ausgeführt wird.
IdentNr	1-a754R011-1	Eineindeutiger Bezeichner des Objekts.
Bauwerk	1-a754R01-1	Eineindeutiger Bezeichner der übergeordneten Baugruppe (ParentID).

weiter auf der nächsten Seite

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Anzahl	1	Menge der verwendeten Objekte.
Gewicht	17	Definiert das Gewicht der zu erstellenden Baugruppe.
Teiletyp	BASIS	Der Teiletyp definiert den Typ der entstehenden Baugruppe, die im nachfolgenden Montageschritt wieder ein Teil ist. Die Typisierung wird für die Assoziation von Bauteilen und Prozessen verwendet.
PosX	0.08549	X-Position des zu montierenden Bauteils.
PosY	0	Y-Position des zu montierenden Bauteils.
PosZ	-3.001	Z-Position des zu montierenden Bauteils.
AngX	0	Drehwinkel des zu montierenden Bauteils um die X-Achse des Teils.
AngY	0	Drehwinkel des zu montierenden Bauteils um die Y-Achse des Teils.
AngZ	0	Drehwinkel des zu montierenden Bauteils um die Z-Achse des Teils.

Tabelle A.4: Informationen in der Tabelle der lokalen Constraints

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Montagestrategie	1	Die Montagestrategie definiert die Sequenz der auszuführenden Einzeltätigkeiten.
Teiletyp	Platte	Die Typisierung wird für die Assoziation des Bauteils mit dem Prozess Schritt verwendet.
Schritt	Schweißen	Schritt definiert den nach SchrittC auszuführenden Prozessschritt.
TeiletypC	Platte	Die TypisierungC wird für die Assoziation eines Bauteils mit dem Prozess SchrittC verwendet.
SchrittC	Heften	SchrittC definiert den zuerst auszuführenden Prozessschritt.

Tabelle A.5: Informationen in der Tabelle der globalen Constraints

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Globale Montagestrategie	1	Mit diesem Datensatz werden mehrere globale Constraints zu einer Gruppe zusammengefasst. Hierdurch können unterschiedliche globale Strategien definiert und ausgewählt werden.
IdentNr Bauwerk	1-a754R011-1	Eineindeutiger Bezeichner des am Prozess beteiligten Bauwerks.
IdentNr Bauteil	1-a754R0115R01-1	Eineindeutiger Bezeichner des in Prozess bearbeiteten Bauteils
Prozess	Heften	Der Prozess definiert, welche Einzeltätigkeit an Bauwerk und Bauteil auszuführen sind. Dieser Prozess darf erst ausgeführt werden, wenn ProzessC ausgeführt wurde (Randbedingung des globalen Constraints).
IdentNr BauwerkC	1-a754R011-1	Eineindeutiger Bezeichner des Bauwerks, an dem ProzessC ausgeführt worden sein muss, bevor Prozess gestartet werden kann.
TeiletypC	AH-Platte	Der TeiletypC wird für die Assoziation von ProzessC mit dem BauteilC und BauwerkC verwendet.
IdentNr BauteilC	1-a754R011551-1	Eineindeutiger Bezeichner des im ProzessC bearbeiteten Bauteils.
ProzessC	Ausrichten	ProzessC definiert den Prozess, der ausgeführt worden sein muss, um die globale Randbedingung zu erfüllen.

Die Aufgabe der Prozesszeitentabelle ist es, Regeln zu definieren, mit denen die Prozesszeiten zu errechnen sind. Diese Regeln vergleichen einen übergebenen Parameter mit einer oder mehreren der Regel festgelegten Größe(n) und geben einen anderen Parameter zurück. Für den abgebildeten Beispieldatensatz lautet die Regel - Für einen Prozess des Typs *Montieren* an einem Teil des Typs *Rohr* ist der Parameter P1 eine Zeit, mit der Dauer 5500, wenn:

- 1. der übergebene Datensatz Para1_Name (Teileart) = Aggregat ist
- 2. der übergebene Datensatz Para2_Name (Nennweite) = 10 ist

Tabelle A.6: Inhalt der Prozesszeitentabelle

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Parameter	P1	Der Datensatz definiert den Namen, unter dem der Parameter für einen spezifischen Teiletyp und Prozess aufgerufen werden kann. Parameter formulieren Regeln, die für die Bestimmung einer Kenngröße oder eines Attributs verwendet werden.
Wert	5500	Der Datensatz definiert den Wert des Parameters. Einfluss auf den Wert hat der Typ.
Datentyp	time	Der Typ des Wertes definiert, ob es sich zum Beispiel um eine Zeit oder um ein Attribut handelt.
Prozess	Montieren	Der Datensatz definiert, für welchen Prozess dieser Parameter verwendet werden kann.
Teiletyp	Rohr	Der Datensatz definiert, für welchen Teiletyp dieser Parameter verwendet werden kann.
Para1_Name	Teileart	Der Name ist ein Freitext zur detaillierteren Beschreibung des Parameters.
Para1_Operator	=	Der Operator definiert den Vergleichsoperator für die Regel.
Para1_Wert	Aggregat	Der Datensatz definiert, womit der durch Para1_Name übergebene Datensatz verglichen wird.
Para2_Name	Nennweite	Der Name ist ein Freitext zur detaillierteren Beschreibung des Parameters.
Para2_Operator	=	Der Operator definiert den Vergleichsoperator für die Regel.
Para2_Wert	10	Der Datensatz definiert, womit der durch Para2_Name übergebene Datensatz verglichen wird.

Tabelle A.7: Informationen der Montagestrategietabelle

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Montagestrategie	9001	Über die Nummer der Montagestrategie können unterschiedliche Strategien mit verschiedenen Teilen verknüpft werden. Der Teiletyp legt fest, welche spezifische Strategie an einem Objekt ausgeführt wird.
Schritt	8	Eine Montagestrategie besteht aus mehreren Schritten, die über diesen Parameter identifiziert werden. Schritte gleicher Größe werden parallel ausgeführt. Die Abarbeitung der Schritte erfolgt in aufsteigender Reihenfolge.
Prozess	Heften	Prozess definiert den jeweiligen Prozess eines Schritts.
Teiletyp	Join	Die Typisierung wird für die Assoziation von Bauteilen und Prozessen verwendet.

weiter auf der nächsten Seite

Bezeichner	Beispieldatensatz	Beschreibung
Parallel	10	Der Parameter definiert, wie oft der Prozessschritt parallel ausgeführt werden darf.
Qualifikation	SchiffbauenS1	Der Parameter definiert die ausführende Mitarbeiterqualifikation.
Anzahl_min	1	Der Parameter definiert, wie viele Mitarbeiter mindestens am Prozessschritt arbeiten müssen.
Anzahl_max	2	Der Parameter definiert, wie viele Mitarbeiter maximal am Prozessschritt arbeiten können.
Zeit	2:00:00.0000	Der Parameter definiert die Auftragszeit. Die Auftragszeit kann sowohl über diese statische Beschreibung als auch über den Parameter Algorithmus definiert werden.
Algorithmus	16	Der Algorithmus definiert die Auftragszeit über eine parametrierbare Gleichung. Die Auftragszeit kann sowohl mit einem Algorithmus als auch über die statische Beschreibung (Zeit) definiert werden. Wenn kein Algorithmus definiert ist, wird automatisch Zeit verwendet.

A.2 Hierarchie der Prozessmuster

Die folgenden Abbildungen zeigen die im Simulationsmodell verwendeten Produkthierarchien für die Blöcke A-09 (Abbildung A.1), R-01 (Abbildung A.2), V-05 (Abbildung A.3) sowie A-03 (Abbildung A.4). Diese Blöcke wurden für die Simulationsexperimente sowie in Teilen für die Validierung verwendet.

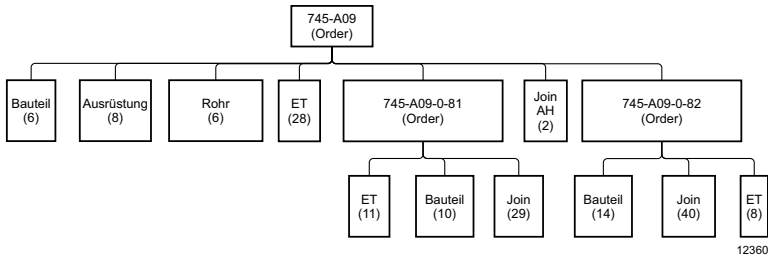
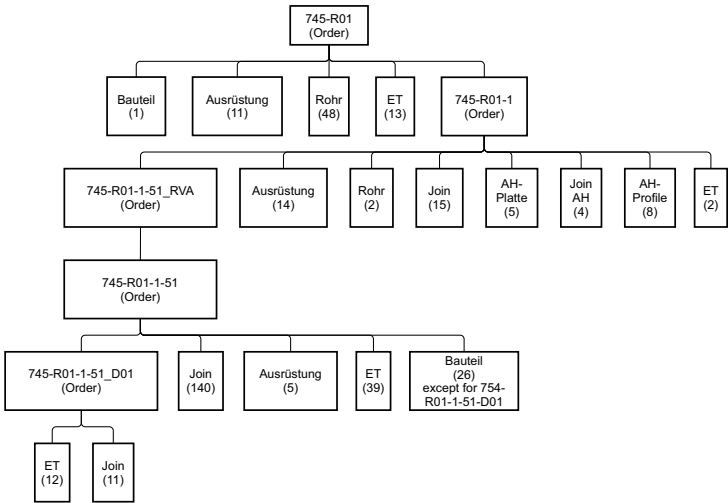
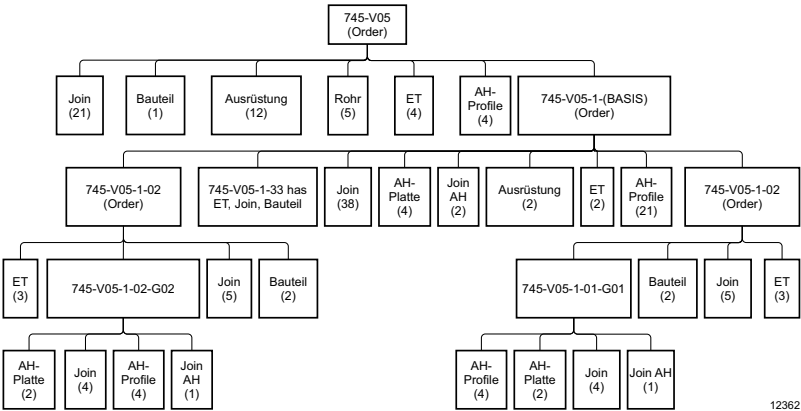


Abbildung A.1: Hierarchie des Blocks A-09



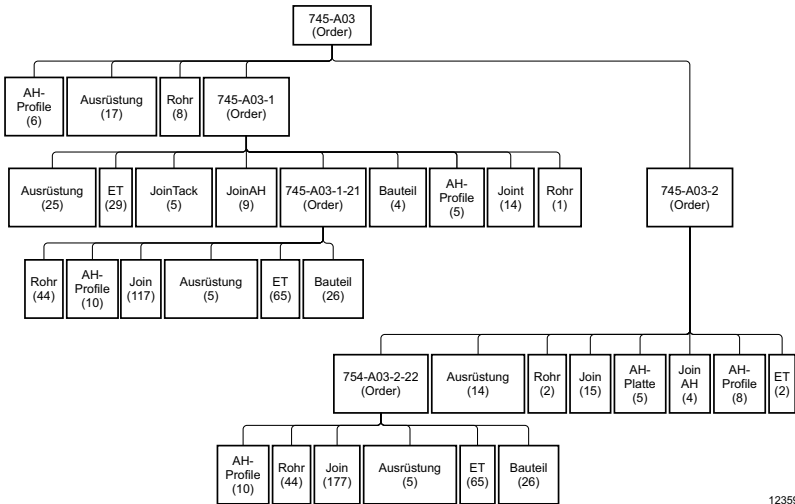
12361

Abbildung A.2: Hierarchie des Blocks R-01



12362

Abbildung A.3: Hierarchie des Blocks V-05



12359

Abbildung A.4: Hierarchie des Blocks A-03

B Validierung der Modellkomponenten

Die Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine basiert auf verschiedenen Ansätzen. Hierfür waren zunächst Eingangsdaten der Modelle bzw. Szenarien zu validieren. Die hierbei ausgewerteten Daten sind in Abschnitt B.1 gegeben. Anschließend waren Untersuchungsszenarien zu definieren, mit deren Hilfe sich die Reaktionsfähigkeiten der Steuerungsbausteine auf Störungen untersuchen ließen. Diese Szenarien stellt Abschnitt B.2 vor.

B.1 Validierung der Prozesszeiten

Alle verwendeten Prozesszeiten sind mit der folgenden Pivot-Analyse untersucht worden. Aus der Datenanalyse ist ersichtlich, dass die Bearbeitungsdauern in realistischen Bereichen liegen und keine Ausreißer bei den Extremwerten vorliegen. Da sich nicht für jeden Prozessschritt ein Datenwert aus dem Datenbestand extrahieren ließ, gibt es Prozesse mit der Dauer 0 Sekunden. In diesem Fall kann eine Arbeit ohne Ressourcenbedarf durchgeführt werden.

Tabelle B.1: Pivot-Tabelle für die Validierung der Prozesszeiten

Bauteilname	Prozess	Minimum [Sekunden]	Maximum [Sekunden]	Mittelwert [Sekunden]
AH-Platte	Auflegen	0,0	0,0	0,0
	Ausrichten	1200,0	1200,0	1200,0
AH-Profil	Auflegen	0,0	0,0	0,0
	Ausrichten	0,0	0,0	0,0
Ausrüstung	Montieren	60,0	500,0	260,0
	Schweißen	20,0	500,0	175,0
BASIS	AuflegenBasis	0,0	0,0	0,0
Bauteil	Auflegen	0,0	0,0	0,0
	Ausrichten	0,0	0,0	0,0
ET	Auflegen	0,0	0,0	0,0
	Ausrichten	0,0	0,0	0,0
Join	Heften	60,0	60,0	60,0
	Schweißen	120,0	120,0	120,0

weiter auf der nächsten Seite

Bauteilname	Prozess	Minimum [Sekunden]	Maximum [Sekunden]	Mittelwert [Sekunden]
JoinAH	Heften	60,0	60,0	60,0
	Schweißen	120,0	120,0	120,0
	Wurzeln	60,0	60,0	60,0
JoinHPQuer	Heften	60,0	60,0	60,0
	Schweißen	120,0	120,0	120,0
JoinWeld	Schweißen	60,0	60,0	60,0
Rohr	Montieren	0,0	24000,0	6050,0
	Schweißen	0,0	6000,0	861,8

Alle verwendeten Prozessgeschwindigkeiten sind mit der folgenden Pivot-Tabelle untersucht worden. Auch aus dieser Datenanalyse ist ersichtlich, dass die Bearbeitungsdauern in realistischen Bereichen liegen und keine Ausreißer bei den Extremwerten vorliegen.

Tabelle B.2: Pivot-Tabelle für die Validierung der Prozessgeschwindigkeiten

Bauteilname	Prozess	Minimum [m/sek]	Maximum [m/sek]	Mittelwert [m/sek]
AH-Platte	Auflegen	0,00240	0,00240	0,00240
	Ausrichten	0,00550	0,00550	0,00550
AH-Profil	Auflegen	0,01000	0,01000	0,01000
	Ausrichten	0,00500	0,00500	0,00500
BASIS	AuflegenBasis	0,00500	0,16000	0,10833
Bauteil	Auflegen	0,00500	0,16000	0,10833
	Ausrichten	0,00220	0,00220	0,00220
ET	Auflegen	0,01000	0,01000	0,01000
	Ausrichten	0,02500	0,02500	0,02500
Join	Heften	0,00120	0,00120	0,00120
	Schweißen	0,00024	0,00060	0,00039
JoinAH	Heften	0,00120	0,00120	0,00120
	Schweißen	0,00012	0,00120	0,00064
	Wurzeln	0,00095	0,00095	0,00095
JoinHPQuer				

weiter auf der nächsten Seite

Bauteilname	Prozess	Minimum [m/sek]	Maximum [m/sek]	Mittelwert [m/sek]
JoinWeld	Heften	0,00067	0,00067	0,00067
	Schweißen	0,00050	0,00120	0,00075
	Schweißen	0,00020	0,00050	0,00033

B.2 Szenarien zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine

Die folgende Tabelle fasst die Simulationsszenarien zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine zusammen. Hierbei liegt der Fokus auf der Beschreibung der Szenarien und nicht auf der detaillierten Darstellung der Modellparameter.

Tabelle B.3: Simulationsszenarien zur Validierung der Fertigungssteuerungsbausteine

Szenario Nr.	Freigabemethode	Kapa.-Steuerung	Information	Störung
Szenario 1	Termin	-	-	-
Szenario 2	Termin	-	-	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 3	CONWIP	-	CONWIP Anzahl 1	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 4	CONWIP	-	CONWIP Anzahl 2	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 5	Termin	-	-	keine
Szenario 6	Termin	-	-	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 7	CONWIP	-	-	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 8	Termin	aktiv	Kapa.-Steuerung flexibel	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 9	Termin	aktiv	Kapa.-Steuerung beschränkt	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 10	CONWIP	aktiv	Kapa.-Steuerung beschränkt	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 11	Termin	-	-	verzögerte Freigabe
Szenario 12	CONWIP	-	-	verzögerte Freigabe
Szenario 13	Termin	aktiv	-	verzögerte Freigabe
Szenario 14	Termin	-	-	keine
Szenario 15	Termin	-	-	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 16	Termin	-	-	verzögerte Freigabe
Szenario 17	CONWIP	-	-	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 18	CONWIP	-	Vorgriffshorizont aktiv	verzögerte Freigabe
Szenario 19	CONWIP	aktiv	-	Mitarbeiteranzahl reduziert
Szenario 20	CONWIP	aktiv	Vorgriffshorizont aktiv	verzögerte Freigabe

C Randbedingungen für die Evaluierung der Fertigungssteuerung

Um dem Leser ein klares Verständnis der durchgeführten Evaluierung zu geben, enthalten die folgenden Abschnitte die wichtigsten verwendeten Größen der Experimente. Ziel ist es jedoch nicht, die vollständige Datenbasis des Simulationsmodells zu beschreiben.

Der erste Abschnitt stellt die logistischen Kennzahlen der Produktmuster vor (Abschnitt C.1). Der zweite Abschnitt definiert das Mengengerüst der Produktmuster in ihrer chronologischen Reihenfolge sowie den berechneten Ressourcenbedarf (Abschnitt C.2). Außerdem stellt er die zur Verfügung stehenden Mitarbeiterressourcen auf den einzelnen Baustellen vor. Abschnitt C.3 beschreibt die Evaluationssszenarien. Hierzu gehören die Parameter der Steuerungsverfahren sowie die Definition der Störungsparameter für die untersuchten Störungsfälle.

C.1 Logistische Kennzahlen für die Produktmuster

In der folgenden Tabelle sind die Durchlaufzeiten und Auftragszeiten für alle drei Produktmuster aufgelistet. Hierbei erfolgt die Bearbeitung ohne Ressourcenbegrenzung. Es steht also genügend Fläche auf einer Baustelle zur Verfügung und die maximal mögliche Anzahl an Mitarbeitern bearbeitet die möglichen Arbeitsinhalte.

Die in den Simulationsexperimenten ermittelten Durchlaufzeiten können somit von den hier gelisteten Werten abweichen. Dies ist bereits für die Gesamtdurchlaufzeit über alle drei Baustellen (Baustellen 1–3) ersichtlich. Diese ergibt sich nicht aus der Summe der Durchlaufzeiten der Qualifikationen, da sich Arbeitsinhalte zwischen beiden Qualifikationen überschneiden. Die hier gelisteten Werte geben lediglich einen Hinweis auf die ungefähren Bedarfe und helfen bei der Modellinitialisierung.

Tabelle C.1: Zuordnung von Simulationsszenarien und dem jeweils evaluierten Inhalt des Simulationsmodells

Muster	Qualifikation	Baustelle 1		Baustelle 2		Baustelle 3		Baustellen 1–3		Teile
		ZDL [BKT]	ZAU [Std]	ZDL [BKT]	ZAU [Std]	ZDL [BKT]	ZAU [Std]	ZDL [BKT]	[Std]	
R-01	Schiffbauer	5	188	0	0	3	60	-	-	
	Schweißer	6	303	0	0	2	22	-	-	
	Alle	-	-	-	-	-	-	9		355
V-05	Schiffbauer	1	45	1	31	5	82	-	-	
	Schweißer	1	46	2	34	5	117	-	-	
	Alle	-	-	-	-	-	-	6		363
A-03	Schiffbauer	0	0	10	514	0	0	-	-	
	Schweißer	0	0	12	609	3	62	-	-	

weiter auf der nächsten Seite

Muster	Qualifikation	Baustelle 1		Baustelle 2		Baustelle 3		Baustellen 1–3		Teile
		ZDL [BKT]	ZAU [Std]	ZDL [BKT]	ZAU [Std]	ZDL [BKT]	ZAU [Std]	ZDL [BKT]	[Std]	
A-09	Alle	-	-	-	-	-	-	15		1036
	Schiffbauer	2	66	0	0	3	58	-		-
	Schweißer	2	82	0	0	3	70	-		-
	Alle	-	-	-	-	-	-	5		208

C.2 Der Produktionsplan

Die folgende Tabelle listet die verwendeten Produktmuster und ihre jeweilige Menge in chronologischer Reihenfolge auf.

Tabelle C.2: Anzahl der Produktmuster in chronologischer Reihenfolge ihrer Verwendung in den Simulationsexperimenten

Muster R-1	Muster V-5	Muster A-3	Muster A-9
2	-	-	-
-	-	1	-
-	1	-	-
-	-	-	1
1	-	-	-
-	-	-	2
-	2	-	-
1	-	-	-
-	-	1	-
-	1	-	-
-	-	-	2
1	-	-	-
-	-	1	-
-	2	-	-
-	-	-	1
2	-	-	-
-	1	-	-
-	-	-	1
-	2	-	-
-	-	-	2
1	-	-	-
-	-	-	1
-	1	-	-

weiter auf der nächsten Seite

Muster R-1	Muster V-5	Muster A-3	Muster A-9
2	-	-	-
-	2	-	-
-	-	2	-
-	1	-	-
-	-	-	1
1	-	-	-
-	-	-	1
1	-	-	-
-	2	-	-
2	-	-	-
-	-	-	2
-	-	1	-
2	-	-	-
-	1	-	-
1	-	-	-
-	-	-	1
-	1	-	-
1	-	-	-
-	-	-	2
2	-	-	-
24	20	8	21

Die folgende Abbildung zeigt den Umfang an Arbeitsstunden auf den jeweiligen Baustellen, wie sie sich ergeben, wenn die auszuführenden Prozesszeiten addiert werden. Zwischen diesem Bedarf und dem realen Bedarf an Mitarbeitern bestehen aufgrund von Bearbeitungsreihenfolgen, Ressourcenverfügbarkeit und weiteren Randbedingungen Unterschiede. Trotzdem ist die Übersicht ein guter Indikator für die Bestimmung der Mitarbeiteranzahl.

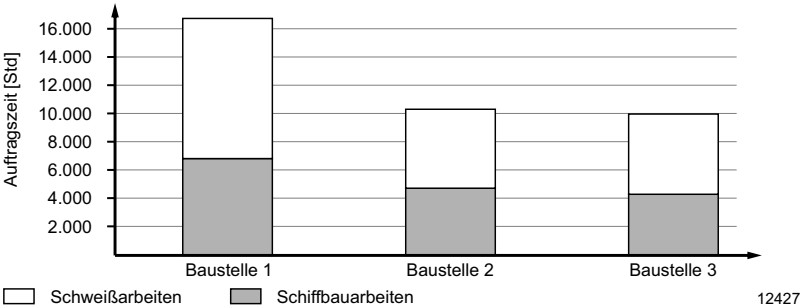


Abbildung C.1: Anzahl der Auftragsstunden für das verwendete Mengengerüst

In der folgenden Tabelle ist die Anzahl an Mitarbeitern je Qualifikation und Baustelle sowie

die Leistung einer Qualifikation je BKT bei einer Arbeitszeit von 7,2 Std gelistet. Mit diesen Mitarbeitermengen erfolgte die Evaluierung der Fertigungssteuerung anhand des Produktionsplans V16. Neben V16 wurde der Produktionsplan mit 16 weiteren Varianten an Mitarbeitern evaluiert. Auf eine Darstellung dieser Informationen wird an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle C.3: Eigenschaften der Baustellen im Simulationsmodell

Qualifikation	Schicht	Baustelle 1	Baustelle 2	Baustelle 3
Schweißer	Früh	6 [Anz]	5 [Anz]	3 [Anz]
Schweißer	Spät	6 [Anz]	5 [Anz]	3 [Anz]
Leistung	Früh+Spät	86,4 [Std/BKT]	72 [Std/BKT]	43,2 [Std/BKT]
Schiffbauer	Früh	5 [Anz]	6 [Anz]	4 [Anz]
Schiffbauer	Spät	4 [Anz]	5 [Anz]	4 [Anz]
Leistung	Früh+Spät	64,8 [Std/BKT]	79,2 [Std/BKT]	57,6 [Std/BKT]

C.3 Eigenschaften der Evaluationsszenarien

In der folgenden Tabelle sind die Prozessparameter für alle Auftragsfreigabeverfahren zusammengefasst.

Tabelle C.4: Definition der Parameter für die Freigabeverfahren

Qualifikationsgruppe	Station	Anzahl CONWIP-Stunden gering	Anzahl CONWIP-Stunden hoch
Schweißer	Station 1	80	100
Schweißer	Station 2	95	110
Schweißer	Station 3	75	95
Schiffbauer	Station 1	100	110
Schiffbauer	Station 2	90	115
Schiffbauer	Station 3	60	80

C.3.1 Störungsszenario: *verringerte Kapazität*

Die folgende Tabelle definiert den Umfang, die Baustelle und die Qualifikationsgruppe, in der die Kapazitätsreduktion stattfand.

Tabelle C.5: Anzahl der Mitarbeiter je Qualifikation, Schicht und Baustelle für die verringerte Mitarbeiterkapazität

Qualifikation	Schicht	Baustelle 1	Baustelle 2	Baustelle 3
Schweißer	Früh	6 [Anz]	3 (-2) [Anz]	3 [Anz]
Schweißer	Spät	6 [Anz]	5 [Anz]	1 (-2) [Anz]
Leistung	Früh+Spät	86,4 [Std/BKT]	57,6 [Std/BKT]	28,8 [Std/BKT]
Schiffbauer	Früh	5 [Anz]	5 (-1) [Anz]	4 [Anz]
Schiffbauer	Spät	4 [Anz]	5 [Anz]	4 [Anz]
Leistung	Früh+Spät	64,8 [Std/BKT]	72 [Std/BKT]	57,6 [Std/BKT]

C.3.2 Störungsszenario: *verspätete Teilleieferung*

In der folgenden Tabelle sind die Verspätungen der 10 Bauteilgruppen zusammenfassend beschrieben. Hierfür sind das erste und letzte Teil mit ihrem veränderten Startzeitpunkt angegeben sowie die Gesamtmenge an verspäteten Teilen.

Tabelle C.6: Zusammenfassung der Verspätungen für das Störungsszenario *verspätete Teilleieferung*

BS Nr.	Gr.Nr.	Teil	Plan-Start _{alt}	Plan-Start _{neu}	Menge an Teilen [Stk]
2	1	Teil ₁	06.03.2013	11.03.2013	
		Teil _n	07.03.2013	12.03.2013	24
2	2	Teil ₁	26.02.2013	05.03.2013	
		Teil _n	05.03.2013	12.03.2013	199
2	3	Teil ₁	06.03.2013	11.03.2013	
		Teil _n	08.03.2013	13.03.2013	40
2	4	Teil ₁	13.03.2013	20.03.2013	
		Teil _n	22.03.2013	29.03.2013	372
2	5	Teil ₁	13.03.2013	18.03.2013	
		Teil _n	20.03.2013	25.03.2013	470
2	6	Teil ₁	25.03.2013	02.04.2013	
		Teil _n	08.04.2013	16.04.2013	439
2	7	Teil ₁	23.04.2013	27.04.2013	
		Teil _n	09.05.2013	13.05.2013	469
3	8	Teil ₁	03.05.2013	08.05.2013	
		Teil _n	28.06.2013	04.07.2013	190
3	9	Teil ₁	09.08.2013	18.08.2013	
		Teil _n	09.08.2013	18.08.2013	29
3	10	Teil ₁	30.05.2013	05.06.2013	
		Teil _n	30.05.2013	05.06.2013	115

Lebenslauf

Persönliche Daten

Robert Wandt
geboren am 27. November 1978 in Rostock
ledig

Schulbildung

09/1985-07/1986 46. Oberschule Rostock Südstadt
08/1986-07/1990 Rosa-Luxemburg-Oberschule Berlin-Friedrichshain
08/1990-07/1994 Alfred-Rust-Schule Realschule Ahrensburg
08/1994-05/1996 Realschule im Zentrum am Heimgarten Ahrensburg
08/1999-05/2002 Abitur am Fachgymnasium Bad Oldesloe

Ausbildung

08/1996-07/1999 Ausbildung zum Industriemechaniker der Fachrichtung Geräte- und Feinwerktechnik

Zivildienst

08/2002-05/2003 Integrationskindertagesstätte Lebenshilfe Stormarn gGmbH

Studium

10/2003-02/2006 Technische Universität Hamburg-Harburg, Studiengang Allgemeine Ingenieurwissenschaften
02/2006-02/2009 Technische Universität Hamburg-Harburg, Studiengang Maschinenbau, Fachrichtung Fertigungstechnik, Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

03/2009-04/2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg-Harburg

München, 20.09.2014

Schriftenreihe

Band 1

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

Band 2

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

Band 3

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

Band 4

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

Band 5

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

Band 6

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

Band 7

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

Band 8

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

Band 9

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

Band 10

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2009.

Band 11

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

Band 12

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitorientierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

Band 13:

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

Band 14

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

Band 15

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

Band 16

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität, 2012.

Band 17

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

Band 18

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

Band 19

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

Band 20

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2013.

Band 21

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.