

Agentenbasiertes Auftragsmanagement für die Multiressourcen–Montage

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Detlef Frackenpohl
geboren am 21.09.1968 in Stuttgart

2002

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-P. Wiendahl

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. B. Denkena

Tag der mündlichen Prüfung: 11.11.2002

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-P. Wiendahl, Leiter des Instituts für Fabrikanlagen der Universität Hannover und geschäftsführender Gesellschafter des IPH - Instituts für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, gilt mein besonderer Dank für die enge Zusammenarbeit, durch die ich sowohl fachlich als auch persönlich sehr viel gelernt habe, und nicht zuletzt für die wohlwollende Förderung dieser Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Denkena, Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen der Universität Hannover, für die kritische Durchsicht der Arbeit und das entgegengebrachte Interesse.

Weiterhin gilt mein Dank meinen Kollegen, insbesondere aus der Abteilung Logistik für ihre kollegiale und fachliche Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt den Herren Steffen Reinsch M.Sc., Dr.-Ing. Ralf Mazikowski und Dipl.-Ing. Mario Dammann für ihre kritische Durchsicht und konstruktiven Hinweise, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Frau Swetlana Jungmann danke ich für ihre Unterstützung bei der Erstellung der Grafiken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglichten und damit die Fundamente für diese Arbeit gelegt haben.

Wenn auch an letzter Stelle genannt, so möchte ich doch vor allen anderen meiner Frau Anja und meinen Kindern für ihre mentale Unterstützung sowie für ihre Toleranz bezüglich des eingeschränkten Familienlebens danken. Ich bin sicher, dass jeder, der sich künftig an ein ähnliches Unterfangen wagt, den abendlichen Blick ins Kinderzimmer, so dort jemand wartet, als einen besonderen Quell der Kraft und des Antriebs schätzen wird. Daher widme ich diese Arbeit meinen Kindern.

Hannover, im Dezember 2002

Detlef Frackenpohl

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen	I
Kurzfassung.....	VI
Abstract	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
2 Auftragsmanagement im Kontext der PPS	6
2.1 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung.....	6
2.1.1 Produktionsplanung	7
2.1.2 Produktionssteuerung	8
2.1.3 Belegungsplanung.....	9
2.2 Auftragsmanagement als Erweiterung der PPS	15
2.3 Produktionsziele des Auftragsmanagements	17
2.3.1 Auftragsziele und deren Beurteilung.....	19
2.3.2 Arbeitssystemziele.....	22
2.3.3 Darstellung der Zielgrößen	24
3 Charakterisierung der Multiressourcen–Montage.....	34
3.1 Allgemeine Merkmale einer Multiressourcen–Montage.....	34
3.2 Merkmalsausprägungen im Rahmen der Auftragsabwicklung.....	36
3.3 Systemtheoretische Betrachtung	39
3.3.1 Offenheit - Nahtstellen zum Gesamtsystem	42
3.3.2 Vernetztheit.....	43
3.3.3 Komplexität	45
3.3.4 Fazit	46
3.4 Flexibilität.....	47
4 Agententheorie und Multiagentensysteme.....	49
4.1 Agenten – Eigenschaften und Aufbau.....	50
4.2 Multiagentensysteme	53

4.2.1	Systemarchitektur und Kommunikation	53
4.2.2	Koordination	55
4.2.3	Existierende agentenbasierte Ansätze aus dem Umfeld der PPS	61
5	Gestaltung eines agentenbasierten Auftragsmanagements für die Multiressourcen-Montage	67
5.1	Belegungsplanung als Fundament des Auftragsmanagements	68
5.2	Akteure des Multiagentensystems	69
5.3	Prozentuale Leistungsvergütung für flexiblere Verhandlungen	72
5.4	Konditionierung der Auftragsagenten	73
5.4.1	Reduzierung des Konditionierungsaufwands durch Auftragsklassen	73
5.4.2	Verhandlungsfunktionen der Auftragsagenten	77
5.5	Konditionierung der Stationsagenten	81
5.6	Kommunikation der Produktionsagenten	87
5.6.1	Kommunikation zur Bewältigung der Auftragsabwicklung	89
6	Koordination auf Basis von Verhandlungen	93
6.1	Auswahl des Verhandlungsprinzips	93
6.2	Ablauf einer Verhandlungsrunde	93
6.2.1	Initialisierung der Verhandlungsrunden und Koordination der Vertragsverhandlungen	95
6.2.2	Erstellung eines Angebots durch den Montagestationsagenten	99
6.2.3	Bewertung der Angebote durch den Auftragsagenten	101
6.3	Umgang mit Störungen	109
6.4	Regulierung des Wettbewerbs bei Ressourcenmangel oder Monopolbildung	110
7	Simulationsgestützte Evaluation des agentenbasierten Auftragsmanagements	112
7.1	Modellbildung mit Hilfe moderner Werkzeuge zur Softwareentwicklung	112
7.1.1	Produktionsagenten im Kontext der Objektorientierung	113
7.1.2	Objektorientierte Simulation	116
7.2	Einbindung des Simulationsmodells in die Systemlandschaft des agentenbasierten Auftragsmanagements	117
7.2.1	Daten und Datenstruktur	118
7.2.2	Informationsfluss	120

7.3 Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse.....	121
7.3.1 Simulationsergebnisse auf Auftragsebene	123
7.3.2 Simulationsergebnisse auf Montagestationsebene	128
7.3.3 Simulationsergebnisse bei alternativer Angebotsbewertung und geänderter Konditionierung der Auftragsagenten	131
7.3.4 Fazit	132
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	135
Anhang.....	137
Literatur	147
Lebenslauf	160

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

Allgemeine Merkmale (Index oder nachführende Bezeichnung)

ag	arbeitsvorgangbezogen
fa	fertigungsauftragsbezogen
gef	gefordert
ges	gesamt
i, j, k, l, p	allgemeine Laufvariablen
m	Mittelwert
max	maximal
min	minimal
mg	mittlerer gewichteter Wert
plan	planmäßig, geplant
proz	prozentual
rel	relativ
s	Standardabweichung
soll	Sollwert
v	Variation

Dimensionsangaben

BKT	Betriebskalendertag
Std	Stunde
%	Prozent

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	-	Parameter der Vorlaufzeit (simulationsgestützt bestimmt)
A	%	Auslastung
AB	Std	Abgang im Bezugszeitraum
b	BKT	Parameter der Vorlaufzeit (simulationsgestützt bestimmt)

B	Std	Bestand
BI	Std	idealer Bestand
c	-	Parameter der Vorlaufzeit (simulationsgestützt bestimmt)
FB	Std/BKT	Bestandsfläche
FTAN	Std*BKT	negative Abgangsterminabweichungsfläche
FTAP	Std*BKT	positive Abgangsterminabweichungsfläche
FTZN	Std*BKT	negative Zugangsterminabweichungsfläche
FTZP	Std*BKT	positive Zugangsterminabweichungsfläche
KAP	Std/BKT	Kapazität
L	Std/BKT	Leistung
LV	%	Leistungsvergütung
m	-	Anzahl Stationen
M	%	Minderung der Leistungsvergütung
n	-	Anzahl auszuwertender Ereignisse
p	-	Priorität
P	BKT	Bezugszeitraum (Periode)
R	BKT	Reichweite
\mathbb{R}	-	Menge der reellen Zahlen
T	BKT	Zeitpunkt
TA	BKT	Terminabweichung
TAA	BKT	Terminabweichung am Abgang
TAB	BKT	Bearbeitungsanfang eines Auftrages (Auftragseinstoß)
TAE	BKT	Bearbeitungsende eines Auftrages
TAR	BKT	relative Terminabweichung
TAZ	BKT	Terminabweichung am Zugang
TBE	BKT	Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges
TBEV	BKT	Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges
V	-	Vektor

w	-	Anzahl der Aufträge in der Warteschlange
z	-	Anzahl der Montagesystemdurchläufe
ZAU	Std	Auftragszeit (Vorgabezeit)
ZDA	BKT	Durchlaufzeit eines Auftrages
ZDF	BKT	Durchführungszeit eines Arbeitsvorganges
ZDL	BKT	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
ZR	Std	Rüstzeit
ZTR	BKT	Transportzeit
ZUE	BKT	Übergangszeit eines Arbeitsvorganges
ZVA	BKT	Vorlaufzeit eines Auftrages

Abkürzungen

Agent-AIM	Agentenbasiertes Auftragsmanagement in der Multiressourcen-Montage (Software)
APS	Advanced Planning and Scheduling
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BDE	Betriebsdatenerfassung
BOA	belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BTT	Bauteilträger
bzw.	beziehungsweise
CA	Computer Aided (rechnerunterstützt)
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design (rechnerunterstützte Entwicklung und Konstruktion)
CAM	Computer Aided Manufacturing (rechnerunterstützte Steuerung und Überwachung)
DAI	Distributed Artificial Intelligence
d.h.	dass heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDV	elektronische Datenverarbeitung
engl.	englisch
ERP	Enterprise Resource Planning

etc.	et cetera
evtl.	eventuell
FCFS	first come first serve
fir	Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen
FIFO	first in first out
FTS	fahrerloses Transportsystem
ggf.	gegebenenfalls
Gl.	Gleichung
Gr.	Gruppe
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
KI	künstliche Intelligenz
kompl.	komplett
lat.	lateinisch
in Anl.	in Anlehnung
MRP I	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resources Planning
min.	mindestens
NC	Numeric Control
ODBC	Open Database Connectivity
OPT	Optimized Production Technology
Portf.	Portfolio
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
s.	siehe
S.	Seite
s.o.	siehe oben
SQL	Structured Query Language
SZ	Schlupfzeit

techn.	technologisch
TU	Technische Universität
u.a.	unter anderem
U	Universität
UML	Unified Modelling Language
VDI	Verein deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VKI	verteilte künstliche Intelligenz
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Verwendete Zeichen und Schriftstile

„“	Umgangssprachliche Begriffe oder Ausdrücke im übertragenen Sinne
,’	Anglizismen
»kursiv«	Wichtige Begriffe, die näher erläutert werden; Zitate (auch auszugsweise)
<i>kursiv</i>	Wichtige Begriffe im Sinne der Arbeit

Kurzfassung

Kundenorientierung spiegelt sich aus produktionstechnischer Sicht in kurzen Lieferzeiten und einer hohen Liefertreue wider, wobei ein marktfähiger Preis vorausgesetzt wird. Speziell die Realisierung einer möglichst hohen Liefertreue lässt sich in der Montage als der letzten wertschöpfenden Stufe eines produzierenden Unternehmens maßgeblich beeinflussen. Allerdings ist diese Aufgabe besonders anspruchsvoll, weil nicht nur die montageeigene Komplexität beherrscht werden muss, sondern auch alle Störungen in der Auftragsabwicklung aus den vorgelegten Fertigungsbereichen sind hier zu kompensieren. Zusätzlich konfrontieren Kundenorientierung, Variantenvielfalt und extrem kurze Produktlebenszyklen die Unternehmen mit immer komplexeren Problemen. Diese spiegeln sich auch in der Produktionsplanung und –steuerung wider, denn die Praxis zeigt, dass die in vielen PPS-Systemen hinterlegte MRP-II-Logik nicht geeignet ist, diese Komplexität ausreichend zu beherrschen. Dies gilt besonders für Fertigungen mit stark vernetzten Strukturen, weil hier ein hohes Maß an Reaktionsfähigkeit, Flexibilität und Individualität in der Produktion gefordert ist.

Unabhängig vom Anwendungsgebiet wird im Zusammenhang mit derartigen Problemen bzw. zu ihrer Lösung häufig die Agententheorie eingesetzt. Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein dezentrales Auftragsmanagement auf Basis von Produktionsagenten zu entwickeln. Das agentenbasierte Auftragsmanagement soll dazu in der Lage sein, die Komplexität zu beherrschen und alle Möglichkeiten der Flexibilität zu nutzen.

Durch ein agentenbasiertes Auftragsmanagement wird die Gesamtkomplexität eines Unternehmens nicht reduziert, sondern der Lösungsraum wird mit Hilfe der Produktionsagenten, die auf einfachen Regeln beruhen, im Entscheidungsfall wesentlich kleiner sowohl bezüglich der möglichen Alternativen als auch der zu beachtenden Restriktionen. Auf den erhöhten Koordinations- bzw. Kommunikationsbedarf, der aus dem Einsatz der Agententechnologie resultiert, kann heute durch die Verwendung aktueller Hard- und Software adäquat reagiert werden.

Mit Hilfe der Simulation wird gezeigt, dass ein solches Auftragsmanagement aufgrund des strukturierten und methodisch unterstützten Vorgehens sehr gut geeignet ist, die Vorteile des sehr flexiblen, aber eher intuitiven Vorgehens der Praxis und der zentralen regelbasierten Verfahren in sich zu vereinen. Der simulative Vergleich mit anderen Steuerungsverfahren macht weiterhin deutlich, dass die Verteilung des Planungsrisikos „auf viele Schultern“ das agentenbasierte Auftragsmanagement zu einem robusten und flexiblen Verfahren macht, das die Individualität der einzelnen Akteure bzw. ihre Ziele besser als andere Verfahren berücksichtigt. Die übergeordneten Unternehmensziele werden hierbei ebenso gut oder gar besser erfüllt als bei anderen Steuerungsverfahren.

Schlagwörter: Fertigungssteuerung, Montage, Multiagentensysteme, Verteilte künstliche Intelligenz

Abstract

From a manufacturing point of view, customer orientation is reflected by short delivery times and high delivery performance nevertheless the price has to correspond the market requirements. The assembly, which is the last value-adding step in the process chain of a manufacturing company influences the delivery performance significantly. Due to the complexity of the assembly process this task is very challenging. All existing delays of the downstream production and the complexity of the assembly need to be compensated. In addition, the steadily increasing customer orientation, the rising variety of variants and shorter product life cycles confront the companies with continuously more complex problems. Those problems are reflected in production planning and control as well. The commonly used MRP-II logic, which is applied by many production planning and control systems, is not suitable to manage this complexity. This is especially true for production systems with a network structure, because a great amount of responsiveness, flexibility and individuality is demanded.

Without considering the field of application, the theory of agents is often used to handle, or better solve the problem described above. Aim of this work is to develop a decentral order management based on production agents. The agent-based order management intends to compensate the complexity and all the resulting possibilities of flexibility. By using an agent-based order management, the complexity of the company is not reduced. Moreover, the number of possible solutions is reduced with the help of production agents based on simple rules. These rules consider the possible alternatives and the related restrictions.

Today, it is possible to react adequately to the higher demand of coordination and communication which results on the usage of the theory of agents by using modern hard- and software. Simulation examinations show that an order management based on the theory of agents is suitable to combine the advantages of the flexible but more intuitive procedures mostly used today with the central rule-based method because it uses structured and methodical procedures.

Following the simulation analyses with other controlling methods shows that the loading of the planning risk “on many shoulders” fosters the agent-based order management to be a strong and flexible procedure, which considers the individuality of the particular operators or their objectives better than other methods. Consequently, the objectives stated above are met just as well as or even better than with other methods of production controlling.

Keywords: production control, assembly, multi-agent systems, distributed artificial intelligence

1 Einleitung

Die Entwicklung von Systemen zur Unterstützung der Produktionsplanung und –steuerung (PPS) hat sich immer an den technischen Möglichkeiten und den aktuellen Anforderungen seitens der Unternehmen orientiert. So ist es keinesfalls nur als Mangel der heute existierenden PPS- bzw. ERP-Systeme zu verstehen, dass sie die geforderte Reaktionsfähigkeit, Flexibilität etc. nicht ausreichend befriedigen können. Vielmehr ist es eine Aufforderung an die Wissenschaft, nach geeigneten Verfahren, Methoden und Algorithmen zu forschen, um diesen Problemen, insbesondere im Bereich der Fertigungssteuerung, geeignet begegnen zu können. Als in den 60er Jahren das *Material Requirements Planning* (MRP I) und später das *Manufacturing Resources Planning* (MRP II) entwickelt wurde, war die heute vorherrschende Marktsituation nicht absehbar [Mannmeusel, 1997; Melzer-Ridinger, 1994]. Kundenorientierung, Variantenvielfalt und extrem kurze Produktlebenszyklen waren in der heutigen Form nicht vorhanden. Daher kann es nicht verwundern, dass diese sukzessiv planenden Systeme die resultierenden Anforderungen hinsichtlich Produktionsplanung und –steuerung nicht ausreichend erfüllen können. Dies gilt besonders für komplexe Fertigungen mit stark vernetzten Strukturen.

1.1 Motivation

Kundenorientierung spiegelt sich aus produktionstechnischer Sicht in kurzen Lieferzeiten und einer hohen Liefertreue wider, wobei ein marktfähiger Preis vorausgesetzt wird. Die Realisierung einer möglichst hohen Liefertreue lässt sich in der Montage als der letzten wertschöpfenden Stufe eines produzierenden Unternehmens maßgeblich beeinflussen. Allerdings ist diese Aufgabe besonders anspruchsvoll, weil nicht nur die montageeigene Komplexität beherrscht werden muss, sondern auch alle Störungen in der Auftragsabwicklung aus den vorgelagerten Fertigungsbereichen sind hier zu kompensieren.

Diese Anforderungen bedingen in der Montage sowohl ein hohes Maß an Reaktionsfähigkeit und Flexibilität als auch an Entscheidungsautonomie zur Ermittlung und Durchführung geeigneter Maßnahmen. Die Voraussetzung für diese Fähigkeiten ist die Eigenständigkeit des Betrachtungsbereichs innerhalb seiner Systemgrenzen, um auf Basis der Unternehmensziele dezentral planen und steuern zu können. Der Begriff »*Dezentrale PPS-Systeme*« steht heute im Zusammenhang mit der Fertigungssteuerung oft als Synonym für ein hohes Maß an Reaktionsfähigkeit, Flexibilität und Individualität in der Produktion [Zäpfel, 1998]. Dabei spielt besonders der Punkt »*Individualität*« in der Multiressourcen–Montage eine tragende Rolle, weil zum einen die montierten Produkte aufgrund der Variantenvielfalt häufig als einzelne Projekte zu verstehen sind. Zum anderen können oder müssen abhängig von der spezifischen Variante alternative Ressourcen zur Herstellung eingesetzt werden. Diese Tatsache und die hohe Artikelvielfalt schließen eine Steuerung nach dem Zieh-Prinzip (Pull-Prinzip), wie beispielsweise die Kanban-Steuerung, aus. Allerdings zeigt die Praxis, dass auch die in vielen PPS-Systemen hinterlegte MRP-II-Logik nicht geeignet ist, einerseits die Komplexität der Multiressourcen–Montage zu beherrschen und andererseits die Individualität der einzelnen Montageaufträge zu berücksichtigen. Dies führt in der Praxis häufig

dazu, dass Mitarbeiter mit viel Aufwand versuchen, auf der Grundlage ihrer persönlichen Erfahrungen und ihres Wissens diesen Anforderungen gerecht zu werden. Ein solches Vorgehen muss als unstrukturiert bezeichnet werden, da es für Außenstehende kaum nachvollziehbar und deshalb intransparent ist. Selbst sehr erfahrene Mitarbeiter werden auf diese Art nicht in der Lage sein, den gesamten Montagebereich optimal zu berücksichtigen, sondern es werden mit großer Wahrscheinlichkeit nur partielle Suboptima erreicht.

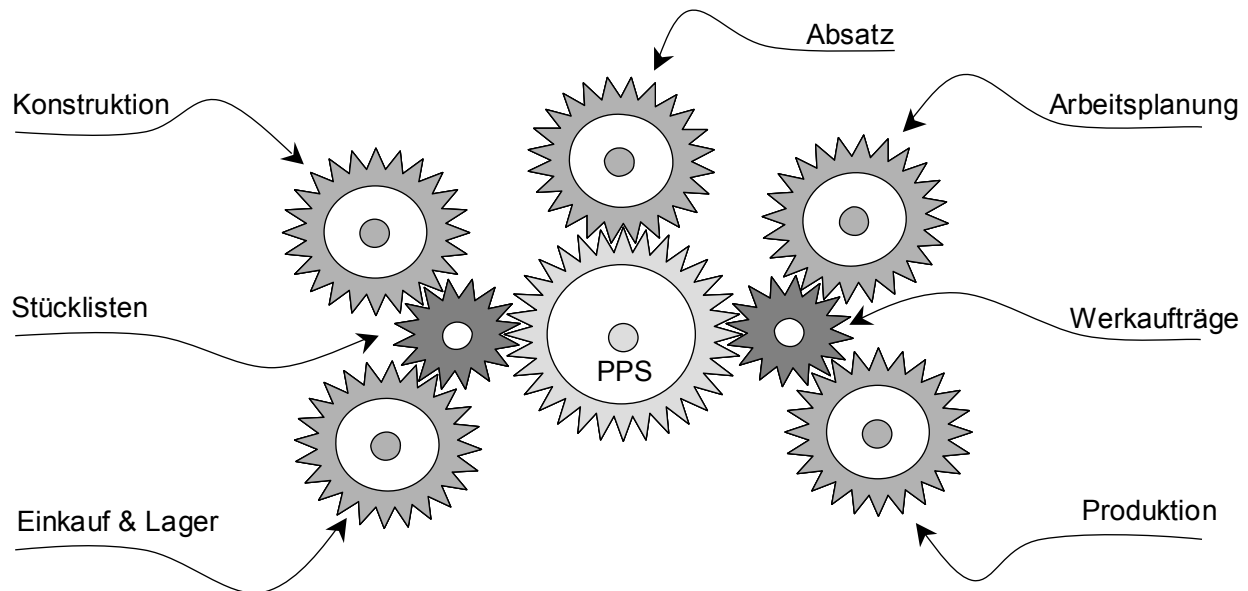


Bild 1.1 PPS-System als Zahnrad im Unternehmen [nach Kernler]

Eine logische Konsequenz aus den angeführten Argumenten wäre die Entwicklung neuer PPS-Systeme, welche die geforderten Leistungsmerkmale besser unterstützen. Allerdings haben einige mehr oder weniger gescheiterte Versuche gezeigt, dass ein solcher Ansatz eine realitätsfremde Einschätzung der Praxis darstellt, da die existierenden PPS-Systeme viel zu fest in den Unternehmensstrukturen verankert sind (siehe **Bild 1.1**) [Mannmeusel, 1997; Weigelt, 1994; Zäpfel, 1998].

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit soll es daher sein, ein dezentrales Auftragsmanagement unterhalb von bestehenden PPS-Systemen auf der Basis von Produktionsagenten zu entwickeln. Das agentenbasierte Auftragsmanagement soll dazu in der Lage sein, die Komplexität zu beherrschen und alle Möglichkeiten der Flexibilität zu nutzen. Dazu muss es sowohl die Individualität der einzelnen Montageaufträge als auch die produktionslogistischen Ziele des gesamten Montagebereichs mit Hilfe der Produktionsagenten angemessen berücksichtigen. Die Begriffe »*Reaktionsfähigkeit im Falle einer Planabweichung*« und »*Flexibilität während der Auftragserstellung*« sollen hier im Sinne von analytischer Situationsinterpretation und methodisch unterstützter Alternativenauswahl zur Entscheidungsfindung verstanden werden. Dies erzwingt weitere Funktionen, die über die der klassischen PPS-Systeme hinausgehen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese Funktionen konzipiert und prototypisch realisiert werden.

In *Kapitel 2* wird der Begriff »Auftragsmanagement« in den Kontext der Produktionsplanung und -steuerung eingeordnet (siehe **Bild 1.2**). Es wird gezeigt, dass mit einem neuen, kundenorientierten Verständnis der Produktion eine Verschiebung in der Gewichtung der produktionslogistischen Ziele einhergeht. Ein Unternehmen, das als oberstes Ziel die Kundenzufriedenheit verfolgt, muss alle Produktionsressourcen gleichwertig betrachten und ggf. neue Methoden zur Planung und Steuerung der Auftragsabwicklung einsetzen. Die Realisierung dieser Forderungen wird unter dem Begriff Auftragsmanagement zusammengefasst [Westkämper, 1999]. Weiter werden in diesem Kapitel die Produktionsziele auf Auftrags- und Arbeitssystemebene spezifiziert sowie geeignete Modelle zu ihrer Darstellung erläutert.

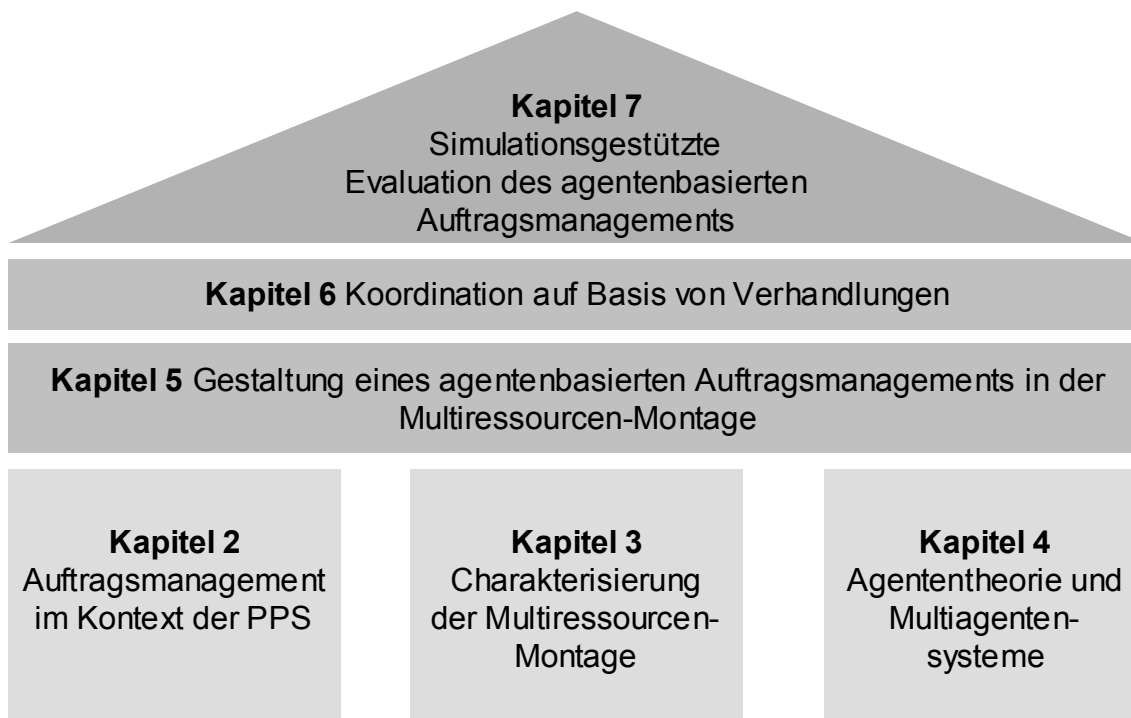


Bild 1.2 Aufbauschema der Arbeit

In *Kapitel 3* werden die Abläufe und die Systemgrenzen anhand einer konkreten Multiressourcen-Montage verdeutlicht, um daraus montagetypische Anforderungen für ein agentenbasiertes Auftragsmanagement abzuleiten. Schwerpunktmäßig werden dabei die Beherrschung der Montagekomplexität und die materialflusstechnisch sinnvolle Flexibilitätsausnutzung betrachtet [Evers, 2002]. Daher haben die Anforderungen einen allgemein gültigen Charakter und können in einem breiten Feld von Montagen Anwendung finden.

In der Vergangenheit wurde bereits auf vielfältige Weise versucht, die Defizite der klassischen PPS-Systeme zu beseitigen. Die PPS-Systeme selbst wurden zu Enterprise Resource Planning-Systemen (ERP) weiterentwickelt, um von der mengenorientierten zu einer ganzheitlichen Sichtweise zu gelangen, die alle Produktionsressourcen umfasst. Es wurden neue Module implementiert, um mit Hilfe neuer Methoden wie etwa dem Advanced Planning and Scheduling (APS) zu möglichst realistischen Plänen zu gelangen. Aus organisatorischer Sicht wurden in vielen Unternehmen Reorganisationsmaßnahmen durchgeführt, die dezentrale, schlagkräftige Einheiten geschaffen haben, um so besser auf die Turbulenzen der betrieblichen Umwelt reagieren zu können

[Vollmer, 2000]. Parunak begründet die gute Eignung von Multiagentensystemen zur Steuerung solcher Einheiten damit, dass Agenten in der Lage sind, die einzelnen Entitäten einer Produktion realitätsnah abzubilden und mit einer entsprechenden lokalen Intelligenz auszustatten [Parunak, 1994]. In *Kapitel 4* werden einige ausgewählte Multiagentensysteme und die zugrunde liegende Agententheorie vorgestellt.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Gestaltung eines agentenbasierten Auftragsmanagements (siehe *Kapitel 5*) und die Koordination auf Basis von Verhandlungen (siehe *Kapitel 6*). Das Auftragsmanagement wird hierzu in zwei hierarchisch angeordnete Ebenen gegliedert - die *Planungsebene* und die *Durchführungsebene* [vgl. Westkämper, 1999].

Die Planungsebene wird als Assistenzwerkzeug verstanden. Sie dient dazu, die anstehende Produktionssituation richtig zu interpretieren und unterstützt bei der Kapazitätsplanung und Terminierung. Zu diesem Zweck umfasst sie die folgenden Funktionen: Belegungsplanung nach Evers [Evers, 2002], Klassifizierung und Gruppierung der Montageaufträge sowie eine darauf aufbauende Konditionierung der Produktionsagenten. Die systematische Konditionierung der Produktionsagenten ist der letzte Schritt auf der Planungsebene und schließt eine individuelle Zielgewichtung ein (siehe **Tabelle 1.1**). Um alle Aufgaben der Planungsebene weitgehend automatisiert bewältigen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Software »Agent-AIM« entwickelt. Die Funktionen und Möglichkeiten dieser Software werden im Text jedoch nur insofern beschrieben, als sie dem besseren Verständnis der Arbeit dienen. Eine vollständige Übersicht über die Software findet sich im Anhang.

Tabelle 1.1 Trennung von Daten und den Ebenen für Planung und Durchführung des agentenbasierten Auftragsmanagements

Planungsebene	<ul style="list-style-type: none"> • Belegungsplanung und Terminierung • Klassifizierung und Gruppierung der Montageaufträge • Konditionierung der Produktionsagenten mit individueller Gewichtung der Produktionsziele
Externe Datenhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Stammdaten (z.B. Betriebsmittel), Strukturdaten (z.B. Arbeitspläne) • Planungsvarianten • Eingangsdaten für die Durchführungsebene • Bewegungsdaten zum Produktionsmonitoring
Durchführungsebene	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl der Eingangsdatenbasis • Auswahl des Steuerungsverfahrens • Erzeugen von Rückmeldungen

Weder auf der Planungs- noch auf der Durchführungsebene werden Daten gespeichert. Alle Daten, die benötigt oder erzeugt werden, stammen aus externen Datenquellen bzw. werden in diesen abgespeichert. Auf diese Datenquellen kann sowohl von der Planungs- als auch von der Durchführungsebene zugegriffen werden, d.h., die externe Datenhaltung stellt das Verbindungsglied zwischen beiden Ebenen dar.

Die Durchführungsebene wird durch ein Multiagentensystem repräsentiert, das die kurzfristigen operativen Aufgaben der Fertigungssteuerung in selbstorganisierender Weise löst. Die Produktionsagenten werden so konzipiert, dass sie (teil-)autonom und zielgerichtet zusammenwirken und durch eine verhandlungsbasierte Koordination im Sinne des verteilten Problemlösens die Komplexität beherrschbar und die Dynamik der Montage transparent machen. Auf diese Weise sind die einzelnen Agenten während der Verhandlungsphase innerhalb ihres Entscheidungsspielraumes völlig autonom, allerdings bleibt durch die übergeordnete Konditionierung sichergestellt, dass sie bei ihren Entscheidungen die Unternehmens- bzw. Bereichsziele, z.B. eine gleichmäßig hohe Kapazitätsauslastung, immer mitberücksichtigen.

Die tatsächliche Funktion und Leistungsfähigkeit der modellierten Multiagentengesellschaft kann nur mit Hilfe der Simulationstechnik nachgewiesen werden, da nur hier alle relevanten Einflussgrößen hinreichend genau abgebildet und im dynamischen Betrieb getestet werden können. Als Ausgangspunkt für diese Arbeit dient ein sehr detailliertes Simulationsmodell der Vormontage eines Flugzeugherstellers, das im Rahmen vorhergehender Untersuchungen bereits entwickelt und im Vergleich mit der Realität intensiv verifiziert und validiert wurde [Evers u.a., 2001]. Dieses Modell, in dem bis dato nur regelbasierte Koordinationsformen implementiert waren, ist um eine verhandlungsbasierte Koordination erweitert worden, so dass anschließend die Simulationsergebnisse hinsichtlich der produktionslogistischen Ziele mit Hilfe von FAST/pro, einer kommerziellen Software zum Produktionscontrolling, ausgewertet und verglichen werden können (siehe *Kapitel 7*). Durch die softwaretechnische Realisierung und die simulative Validierung der zuvor modellierten Produktionsagenten wurde eine sehr gute Leistungsfähigkeit nachgewiesen.

2 Auftragsmanagement im Kontext der PPS

Ein innerbetriebliches Auftragsmanagement umfasst einige Erweiterungen zu den klassischen Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung. Um diese detaillierter darstellen zu können, werden in den nachfolgenden Abschnitten die Aufgaben der PPS beschrieben. Daran anschließend werden die Besonderheiten des Auftragsmanagements vorgestellt und die produktionslogistischen Ziele für die Multiressourcen-Montage abgeleitet. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden Modelle und Verfahren zur Darstellung der Produktionsziele sowie zur Bewertung ihrer Zielerreichung erläutert. Auf diese Modelle und Verfahren wird bei der simulationsgestützten Evaluierung des hier vorgestellten agentenbasierten Auftragsmanagements in Kapitel 7.3 zurückgegriffen.

2.1 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung

Die Produktionsplanung und -steuerung hat in Bezug auf das jeweilige Unternehmen einen stark vernetzenden Charakter, da sie zur Unterstützung der Auftragsabwicklung fast alle betrieblichen Abteilungen wie Konstruktion, Vertrieb, Einkauf, Teilefertigung, Montage, Ersatzteilwesen und Versand berührt (siehe **Bild 1.1**).

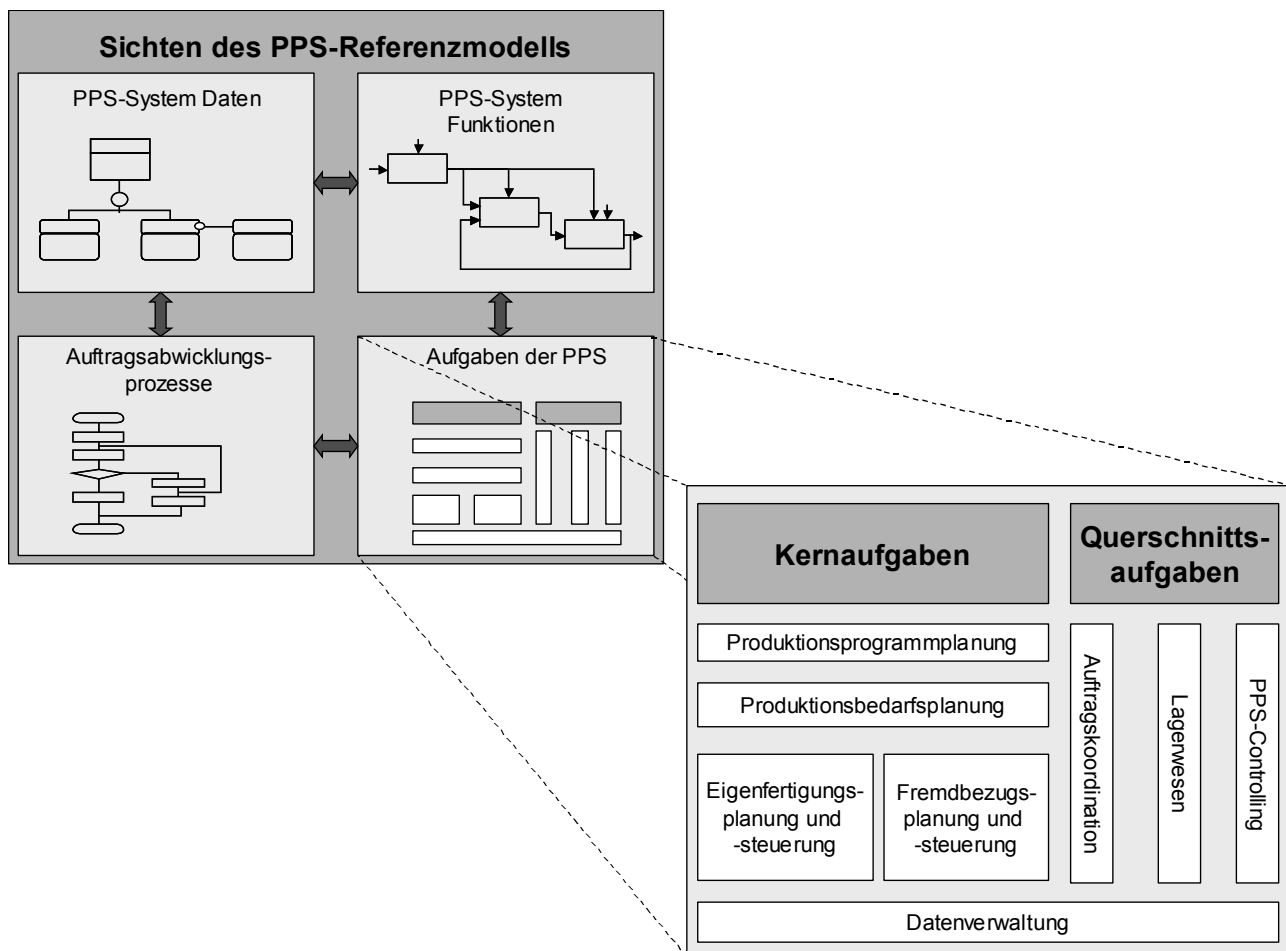


Bild 2.1 Die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (in Anl. an Much und Nicolai)

Die klassischen Aufgaben der PPS werden in dieser Arbeit anhand des Aachener PPS-Modells erläutert. Dieses Modell ist in vier Bereiche untergliedert: Aufgaben-, Prozess-, Funktions- und das Datenmodell [Much und Nicolai, 1995; Luczak, Eversheim und Schotten, 1998] (siehe **Bild 2.1**). An dieser Stelle wird nur das Aufgabenmodell näher erörtert, da die übrigen Modelle entweder sehr unternehmensspezifisch geprägt sind oder, wie das Funktionsmodell, weitgehend auf die Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung durch EDV-Systeme abzielen [Luczak, Eversheim und Schotten, 1998].

Die Grundlage des Aachener PPS-Modells bilden das Modell nach Hackstein [Hackstein, 1989] und das so genannte Y-Modell von Scheer [Scheer, 1998]. Diese Beschreibungsmodelle haben sich in der einschlägigen Literatur weitgehend durchgesetzt und die meisten Autoren beziehen sich in ihren Ausführungen mehr oder minder auf diese beiden Modelle [fir, 1996a].

Der stark vernetzten Aufgabenstruktur eines Unternehmens wird im Aachener PPS-Modell dadurch Rechnung getragen, dass es die Aufgaben in Kern- und Querschnittsaufgaben aufteilt. Die Kernaufgaben sind im Wesentlichen für die Auftragsabwicklung zuständig, während die Querschnittsaufgaben der Integration aller betroffenen Bereiche sowie der PPS-Optimierung dienen [Luczak, Eversheim und Schotten, 1998]. Das Fundament der Produktionsplanung und -steuerung bildet die Datenverwaltung, auf die zur Bewältigung aller Aufgaben zugegriffen wird.

2.1.1 Produktionsplanung

Die Produktionsplanung lässt sich in Bereiche mit lang-, mittel- und kurzfristigem Planungshorizont unterteilen, wobei die Planungsgenauigkeit mit zunehmendem Planungshorizont geringer wird [Much und Nicolai, 1995]. Die *langfristige* oder *strategische Produktionsplanung* hat einen Planungshorizont von sechs Monaten bis zu zwei Jahren. Sie soll vorausschauend die Unternehmensexistenz durch Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit sichern [Zäpfel, 1989]. Als Ergebnis wird zum einen das langfristige Produktionsprogramm festgelegt und zum anderen werden die zur Leistungserbringung notwendigen Ressourcen bestimmt.

Die *mittelfristige* oder *taktische Produktionsplanung* mit einem Planungshorizont von einigen Wochen bis Monaten schließt sich der strategischen Produktionsplanung an und verfolgt das Ziel, die Realisierbarkeit des Produktionsprogramms zu gewährleisten. Die Aufgaben setzen sich aus der Materialbedarfsplanung, der Kapazitätsbestimmung sowie der Durchlaufterminierung zusammen, wobei der Durchlaufterminierung die Annahme von unbegrenzten bzw. freien Kapazitäten zugrunde liegt. Im Ergebnis liegen periodenbezogene Eigenfertigungs- und Beschaffungsaufträge vor, die im Rahmen der *kurzfristigen* bzw. *operativen Produktionsplanung*, deren Zeithorizont am kürzesten gefasst ist, weiterbearbeitet werden.

Die *kurzfristige* oder *operative Produktionsplanung* gliedert sich in die *Eigenfertigungs-* und die *Fremdbezugsplanung* - zwei weitgehend autonome Aufgabenbereiche, wobei die Fremdbezugsplanung für die vorliegende Arbeit nicht von Relevanz ist und daher ebenso wie die anschließende *Fremdbezugssteuerung* nicht weiter erörtert wird. Die *Eigenfertigungsplanung* legt das kurzfristige

Produktionsprogramm fest, indem sie die Fertigungsaufträge unter Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Dispositionsspielraums termingerecht und arbeitsvorgangsgenau einplant. Durch die Spiegelung des Kapazitätsbedarfs an dem verfügbaren Kapazitätsangebot wird die resultierende Belastungssituation berücksichtigt. Im Zuge der Ressourcenfeinplanung kann die Planung ggf. korrigiert werden. Im Ergebnis liegen Fertigungsaufträge mit Termin- und Mengenangaben vor, für die wenigstens planerisch eine Ressourcenverfügbarkeit sichergestellt ist.

Die *operative Planungsebene* ist die letzte Ebene der Produktionsplanung [vgl. Glaser, 1991]. Die Ergebnisse der operativen Produktionsplanung werden als Eingangsdaten an die Produktionssteuerung zur Realisierung der Produktionsprozesse weitergegeben [Weingarten, 1995].

Die heute am Markt in Form von EDV-Anwendungen existierenden PPS-Systeme sind weitgehend monolithische Systeme, die aus dem MRP-I-Konzept (Material Requirements Planning) entstanden sind. Das ursprüngliche MRP-I-Konzept wurde in den 80er Jahren durch das von Oliver Wight [Wight, 1984] entwickelte MRP-II-Konzept abgelöst. All diesen PPS-Systemen ist eine sukzessive Planungsweise gemeinsam, die nach dem oben beschriebenen Ablauf vorgeht [Scheer, 1991]. Daraus folgt, dass die hierarchisch angeordneten Stufen der Programmplanung, Mengenplanung, Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Auftragsveranlassung und Auftrags- und Ressourcenüberwachung stets nacheinander durchlaufen werden und dass alle untergeordneten Stufen ebenfalls neu zu planen sind, falls die übergeordnete Stufe neu geplant wurde.

2.1.2 Produktionssteuerung

Die Aufgabe der *Produktionssteuerung* ist die Realisierung der Planvorgaben. Diese setzt sich im Einzelnen aus der Verfügbarkeitsprüfung, der Auftragsfreigabe und der Auftrags- sowie Ressourcenüberwachung [nach Zäpfel, 1989] zusammen. Der oben bereits erwähnte Dispositionsspielraum ergibt sich aus der Differenz der frühestmöglichen und spätestzulässigen Starttermine sowie der Verteilung der zu fertigenden Mengen.

Nachdem in der Feinterminierung zunächst für die gebildeten Fertigungslose die Start- und Endtermine auf Arbeitsvorgangsbasis in jedem Fertigungsbereich unter Berücksichtigung der Ecktermine ermittelt wurden und die Ressourcenfeinplanung die Verfügbarkeit der erforderlichen Kapazitäten sichergestellt hat, wird vor der Freigabe eines Fertigungsauftrags die Verfügbarkeit des Materials überprüft. Sollte die Verfügbarkeit gegeben sein, erfolgt danach die Auftragsfreigabe, die auch die Bereitstellung der Ressourcen veranlasst. Anderenfalls kann eine Neuplanung in den entsprechenden Stufen notwendig werden. Zuletzt werden die Arbeitsvorgänge den Kapazitäten zugewiesen [nach fir, 1996a].

Im laufenden Produktionsbetrieb kann es an einzelnen Kapazitäten oder Kapazitätsgruppen zu einer Warteschlangenbildung kommen, wobei die Reihenfolge der Abarbeitung einzelner Arbeitsvorgänge in der Regel nicht festgelegt ist. Die *Auftrags- und Ressourcenüberwachung* schließt eine Reihenfolgesteuerung ein, um eine optimale Abarbeitungsreihenfolge der verschiedenen Arbeits-

vorgänge zu bilden. Die Reihenfolgebildung erfolgt nach ausgewählten Kriterien mit dem Ziel, die Endtermine der Arbeitsvorgänge nicht zu gefährden.

Auf Basis von Soll-/Ist-Vergleichen oder auch der Ermittlung auftragsbezogener Kennzahlen erfolgt die Auftragsfortschrittserfassung. Bei nicht zu tolerierenden Mengen- oder Terminabweichungen wird durch eine geänderte Kapazitätsbelegung oder eine erneute Feinterminierung die Einhaltung der Auftragsziele angestrebt. Durch die Ressourcenkontrolle werden dagegen die Materialien und Kapazitäten an Maschinen, Werkzeugen, Vorrichtungen und anderen Hilfsmitteln überwacht. Bei kurzfristigen Überlastungen oder einer unausgeglichenen Auslastung der Kapazitäten wird eine Änderung der Reihenfolgesteuerung oder durch Umplanung von Aufträgen eine neue Feinterminierung angestoßen. Die Materialüberwachung kontrolliert schließlich den Materialfluss und die Bestandsentwicklung im Fertigungsbereich und stößt bei Störungen korrigierende Maßnahmen an, wenn sich z.B. durch fehlende Verfügbarkeiten Terminverschiebungen ergeben [fir, 1996a].

2.1.3 Belegungsplanung

Der Begriff *Belegungsplanung* wird in der Literatur von vielen Autoren in unterschiedlichen Zusammenhängen verwandt, so dass bis dato keine eindeutige Definition existiert [vgl. Hars und Scheer, 1991; Ruffinger, 1991].

In einer allgemeinen Beschreibung der *Belegungsplanung* setzen sich deren Aufgaben aus den Bereichen Termin- und Kapazitätsplanung sowie aus der Auftragsveranlassung und Auftrags- und Ressourcenüberwachung zusammen [vgl. Fleischmann, 1988; Garlichs, 1996; Kuhn, 1990; Zäpfel, 1989] (siehe **Bild 2.2**). Ihr Ziel ist die Sicherstellung der Realisierbarkeit der auftragsbezogenen Planung unter Berücksichtigung von Termin- und Kapazitätsaspekten. Das bedingt im Allgemeinen die gleichzeitige Reihenfolgeplanung für Aufträge bzw. Arbeitsvorgänge bezogen auf Einzelkapazitäten bzw. Kapazitätsgruppen [Glaser, 1992; Dorninger, 1990; Hackstein, 1989]. Ausgehend von einer Menge freigegebener Fertigungsaufträge wird so innerhalb eines bestimmten Zeithorizontes eine Zuordnung zwischen Aufträgen bzw. Arbeitsvorgängen und Ressourcen vorgenommen sowie eine Abarbeitungsreihenfolge festgelegt [Beckendorff, 1991; nach Hoitsch, 1993]. Jeder Arbeitsvorgang benötigt hierbei eine bestimmte Menge von Ressourcen, die aus dem Arbeitsplan bekannt ist [Baumann, 1996].

Ressourcenbelegungsprobleme lassen sich nach der Ankunftscharakteristik der Aufträge und ihrer jeweiligen Bearbeitungscharakteristik unterscheiden. Sind beide Größen vor Beginn der Planung bekannt bzw. fest vorgegeben, so wird von einem deterministischen System gesprochen. Bei stochastischen Systemen sind die Ankunftscharakteristik und die Bearbeitungscharakteristiken der Aufträge zufällig bestimmt [nach Herrmann, 1996]. In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Ankunftscharakteristik der Aufträge durch zufällige Ereignisse bestimmt ist bzw. vom PPS-System vorgegeben wird und die Bearbeitungscharakteristiken der Aufträge fest sind. Derartige Systeme werden als semideterministische Systeme bezeichnet.

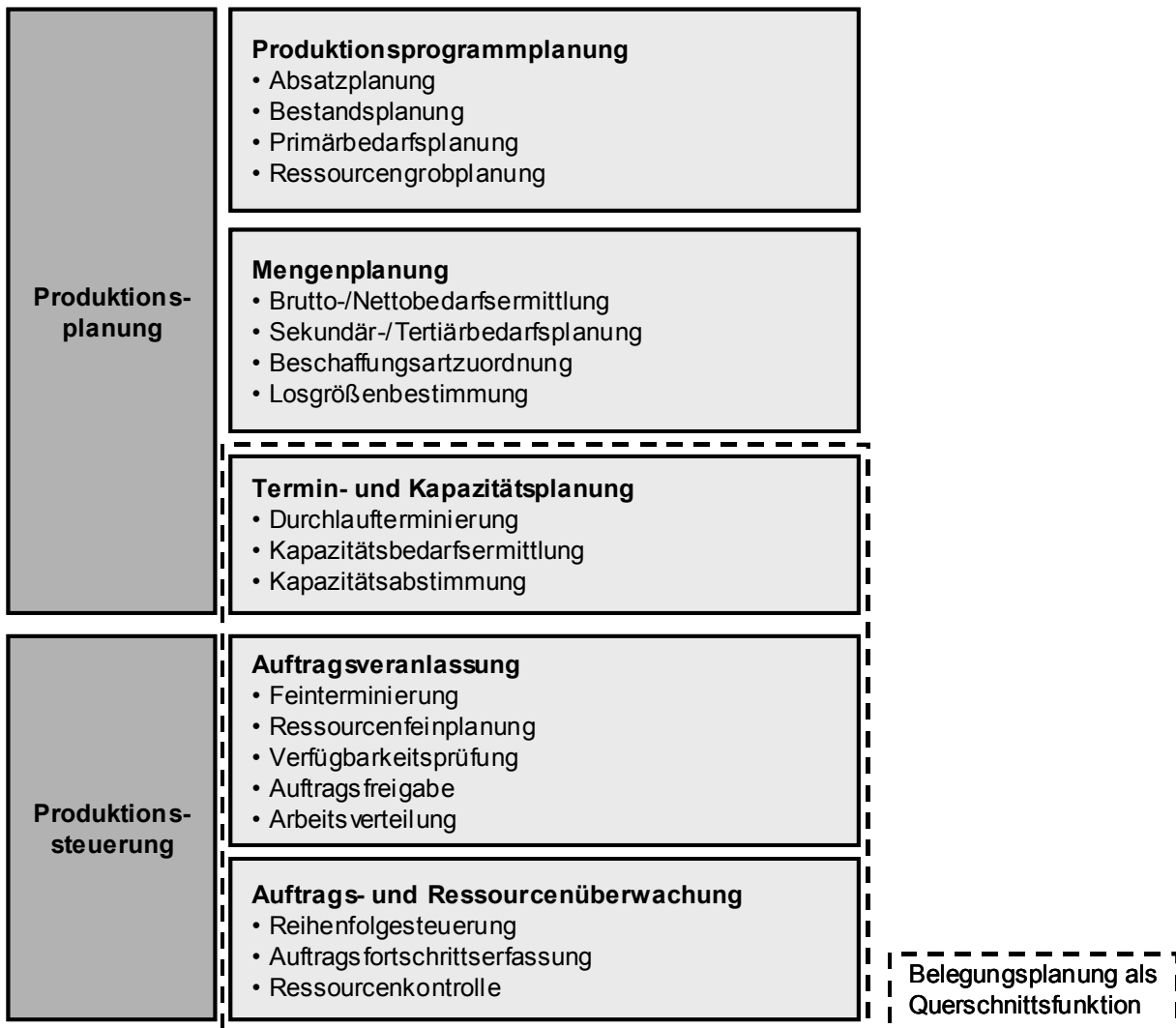


Bild 2.2 Aufgaben der Belegungsplanung [nach Evers]

Evers führt in seiner Arbeit »*Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage*« die Belegungsplanung als eine Querschnittsaufgabe der Produktionsplanung und -steuerung an [Evers, 2002]. In der vorliegenden Arbeit wird seine Auslegung zugrunde gelegt, weil er die Aufgabenabgrenzung und -beschreibung der Belegungsplanung explizit für die Multiressourcen-Montage vorgenommen hat, deren detaillierte Beschreibung in Kapitel 3 folgt. Evers gliedert die Belegungsplanung in die folgenden Schritte:

Gruppierung der Montageaufträge und -stationen

Der erste Schritt der *Auftragsgruppenbildung* ist die Clusterung der Montageaufträge anhand der Kriterien *Montagekomplexität* und *Bauteildimension*. Aufträge, die aus technologischer Sicht ähnliche Merkmalausprägungen besitzen, werden zu Auftragsgruppen zusammengefasst. Die *Wiederholhäufigkeit* eines Montageauftrags auf Artelebene legt unter Berücksichtigung eines Zeitraumes den Auftragszyklus fest. Die Wiederholhäufigkeit der Auftragsgruppe steigt entsprechend, da sie umso häufiger wiederholt wird, je mehr einzelne Aufträge in ihr zusammengefasst sind.

Die einzelnen Aufträge, die in den Auftragsgruppen zusammengefasst sind, können stark streuende Auftragszeiten haben. Um eine stärkere *Harmonisierung der Auftragszeiten* zu erreichen, werden aus den Gruppen im nächsten Schritt Teilgruppen mit ähnlichen Auftragszeiten gebildet. Durch ähnliche Auftragszeiten kann der ideale Mindestbestand an einem Arbeitssystem signifikant gesenkt werden [Nyhuis und Wiendahl, 1999].

Der letzte Teilschritt berücksichtigt das Kriterium *Auftragsstruktur*. Hierbei werden insbesondere zusammengehörende Teil- und Komplettaufträge zusammengefasst (siehe **Bild 2.3**). Diese erneute Unterteilung der Teilgruppen dient der einfacheren Koordinierbarkeit.

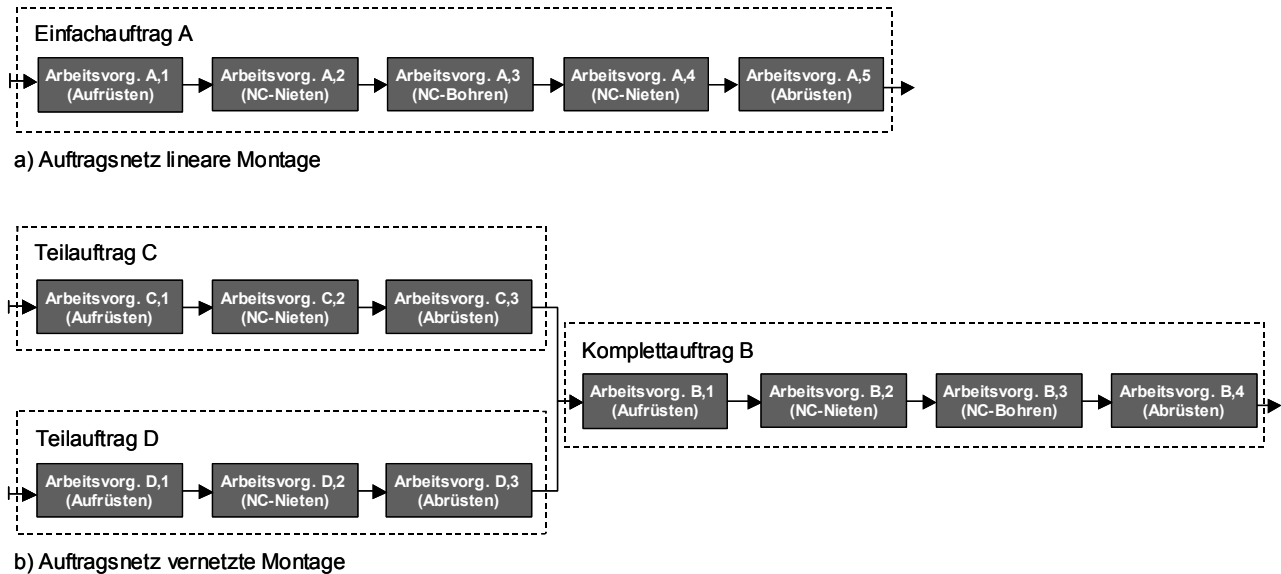


Bild 2.3 Auftragsstrukturen [nach Evers]

Die Gruppierung der Montagestationen wird anhand der Kriterien *Bearbeitungsflexibilität* und *räumliche Anordnung* vollzogen. D.h., Stationen, die technologisch gleichwertig sind und eine räumliche Nähe zueinander aufweisen, werden in Stationsgruppen zusammengefasst. Dadurch kann eine gemeinsame Warteschlange als Bestandspuffer für alle Einzelarbeitsplätze einer Stationsgruppe genutzt werden. Wie anhand der Produktionskennlinie (siehe Kapitel 2.3.3) noch gezeigt wird, lässt sich so das erforderliche Bestandsniveau erheblich senken, ohne einen Materialflussabriss zu riskieren.

Priorisierung von Belegungsalternativen

Durch die Priorisierung aller technologisch möglichen Belegungsalternativen wird die Zuordnung von bestimmten Arbeitsvorgängen zu Stationsgruppen vorgenommen. Die Skala der zu vergebenden Prioritätswerte ist dabei ein Maß, das die logistische Eignung einzelner Arbeitsvorgänge zur Bearbeitung an bestimmten Stationsgruppen beschreibt. Durch die Vergabe von Prioritätswerten soll eine logistisch optimale Arbeitsvorgangs-Stations-Kombination im Sinne einer gleichmäßigen Kapazitätsauslastung und eines gerichteten Materialflusses gewährleistet werden. Weiter soll die Flexibilität der Montage nicht eingeschränkt werden, so dass die Prioritätswerte nur den Charakter einer Empfehlung haben. Solange keine technologischen Anforderungen verletzt werden,

können einzelne Arbeitsvorgänge in Ausnahmefällen auch an niedriger priorisierten Stationsgruppen montiert werden.

Um die Prioritätswerte festzulegen, werden zunächst die Engpassstationsgruppen ermittelt. Im folgenden Schritt wird an der Engpasstechnologie eine *ABC-Analyse* der Arbeitsvorgänge zur Bestimmung der *Kapazitätsbedarfsanteile* der einzelnen Auftragsteilgruppen durchgeführt. Der Kapazitätsbedarf gibt dabei an, wie viel Kapazität die Arbeitsstation zur Verfügung stellen muss, um die Arbeitsvorgangsguppen zu bearbeiten. Hierzu werden die Soll-Stückzahlen einer Planungsperiode mit den einzelnen Auftragszeiten multipliziert. Anschließend wird für jede Arbeitsvorgangsguppe die Summe der Einzelwerte gebildet. Die so ermittelten Kapazitätsanteile werden anschließend kumuliert in einem Diagramm aufgetragen und in eine A-, B- und C-Klasse unterteilt. Arbeitsvorgangsguppen der Klasse A binden relativ viel Kapazität auf der Engpassstation, Gruppen mit dem Wert C dagegen relativ wenig (siehe **Bild 2.4**).

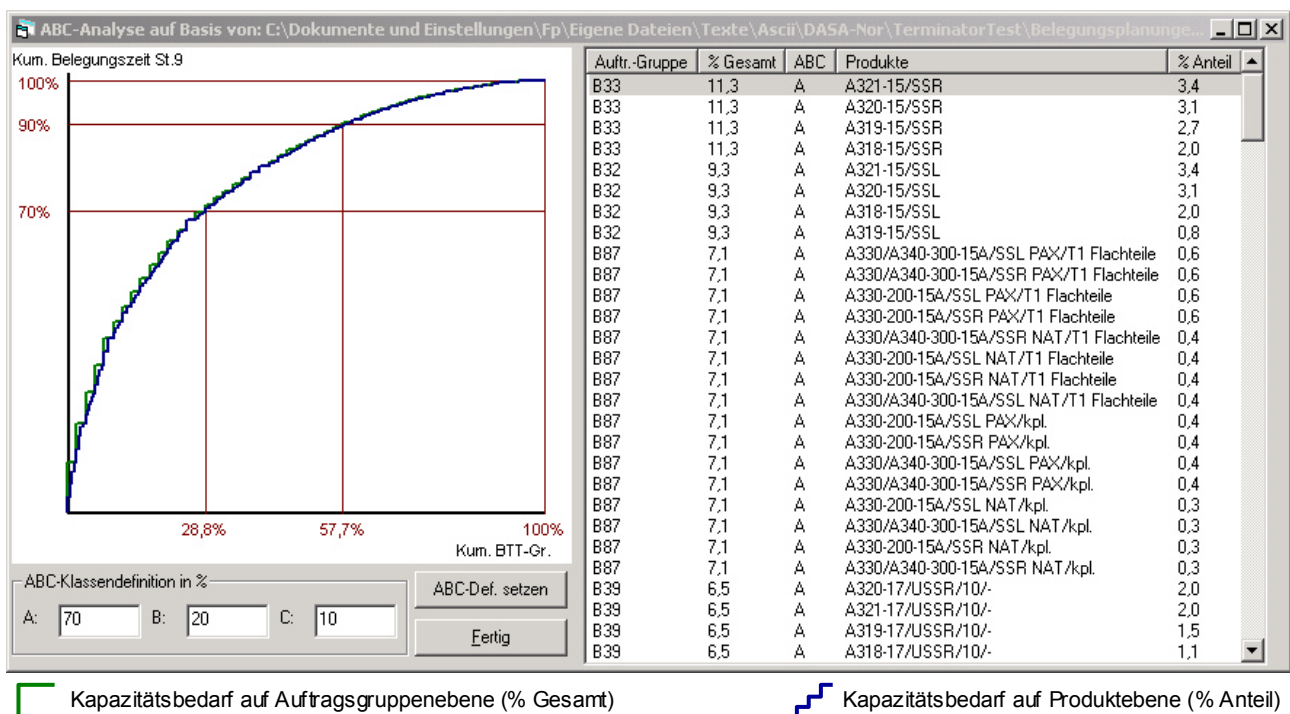
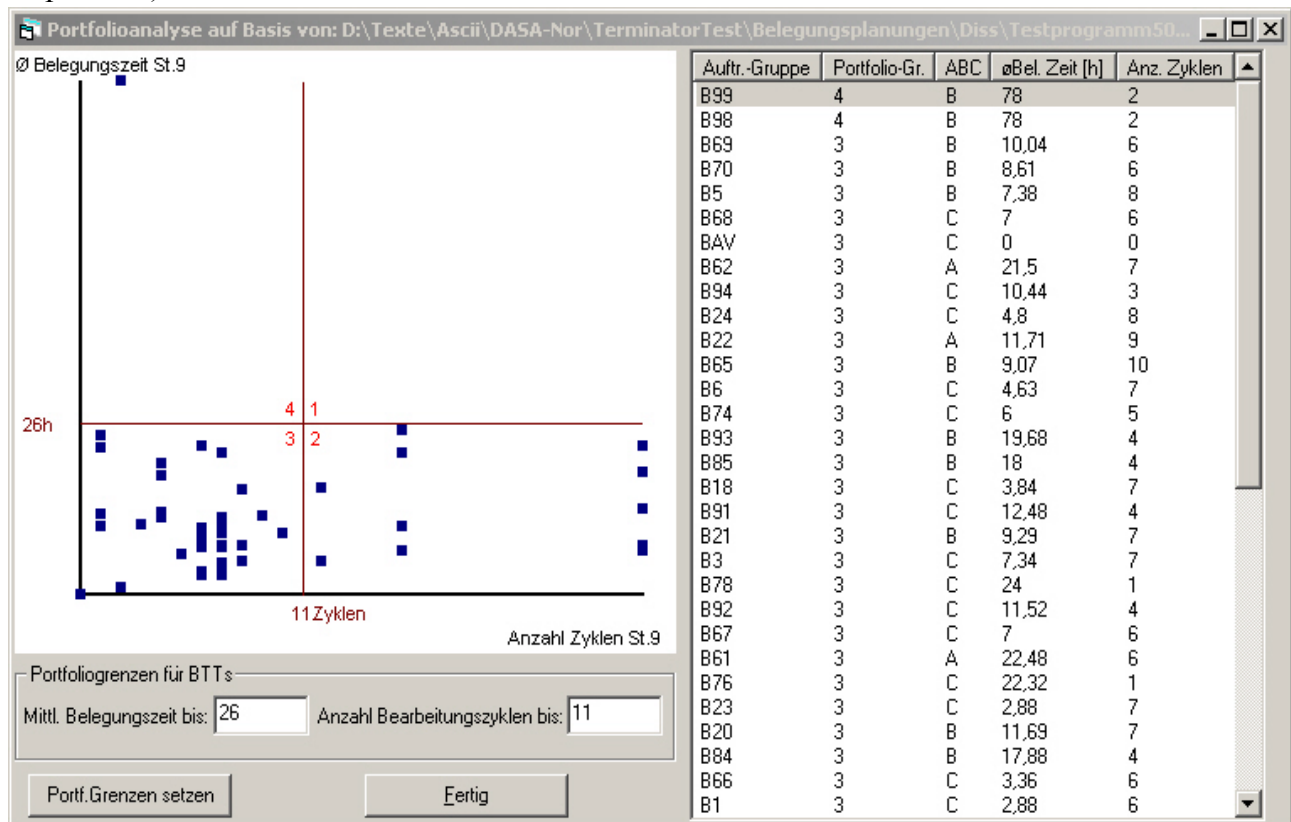


Bild 2.4 Beispielhafte Bestimmung des Kapazitätsbedarfanteils durch eine ABC-Analyse (Quelle: Agent-AIM)

Anschließend erfolgt durch eine *Portfolioanalyse* eine differenzierte Betrachtung der Auftragsgruppenkriterien *Arbeitsinhalt* und *Wiederholhäufigkeit*. Das in vier Bereiche eingeteilte Portfolio zeigt **Bild 2.5**. Die Anzahl der Arbeitsvorgänge einer Arbeitsvorgangsguppe an der Engpasstechnologie wird für die entsprechende Planungsperiode an der Abszisse abgetragen. Auf der Ordinate werden die entsprechenden Mittelwerte der Belegungszeiten je Arbeitsvorgangsguppe aufgetragen. Arbeitsvorgänge in Bereich II haben z.B. eine hohe Frequenz bei relativ geringer Belegungszeit, Arbeitsvorgänge im Bereich IV dagegen eine kleine Frequenz bei relativ hoher Belegungszeit. Arbeitsvorgänge im Bereich II fließen damit schneller und häufiger durch die Montagestation als Arbeitsvorgänge im Bereich IV. Dieses Kriterium wird daher als *Durchfluss* bezeichnet.

Für die endgültige Zuteilung von Prioritätswerten werden die Kriterien *Kapazitätsbedarfsanteil*, *Gruppenzugehörigkeit* und *Durchfluss* berücksichtigt. Es kann für eine ideale Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung solange der Prioritätswert 1 vergeben werden, wie es das Kapazitätsangebot zulässt. Danach wird der Prioritätswert 1 für die nächstbeste alternative Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung vergeben, die noch Kapazitätsreserven frei hat. Sind alle Arbeitsvorgänge durch den Prioritätswert 1 einer Station zugeordnet worden, wird allen Kombinationen, die aus Kapazitätsgründen den Wert 1 für eine alternative Zuordnung erhalten haben, der Prioritätswert 2 für die ideale Stationszuordnung verliehen. Anschließend werden Prioritätswerte (>2) für weniger geeignete Zuordnungen vergeben, wobei Kapazitätsrestriktionen nicht mehr berücksichtigt werden. Danach werden die Prioritätswerte für Nichtengpass-Zuordnungen nach dem gleichen Verfahren ermittelt. Die Höhe des Prioritätswertes richtet sich hauptsächlich nach der Anbindung an die Engpasskapazität.

Der Planauftragsdurchlauf verläuft über die Montagestationen, die für die Bearbeitung der einzelnen Arbeitsvorgänge den Prioritätswert 1 haben. Die Einhaltung des Planauftragsdurchlaufs gewährleistet eine gleichmäßige Anlagenauslastung und einen gerichteten Materialfluss (siehe Kapitel 5.4).



- Auftragsgruppe in der Portfoliodarstellung

Bild 2.5 Gegenüberstellung von Arbeitsinhalt und Wiederholhäufigkeit durch eine Portfolioanalyse (Quelle: Agent-AIM)

Durchlaufterminierung

Nachdem durch die Vergabe von Prioritätswerten die Arbeitsvorgänge den entsprechenden Arbeitsstationen zugeordnet wurden, werden für die einzelnen Arbeitsvorgänge Plantermine auf Basis einer Durchlaufterminierung ermittelt. Die Berechnung von Bearbeitungsbeginn und Bearbeitungsende erfolgt auf Basis der Kapazitätseinstellungen der Arbeitsstationen mit Prioritätswert 1. Im Gegensatz zu herkömmlichen Terminierungsverfahren berechnet Evers zusätzlich noch eine auftragsindividuelle Vorlaufzeit (siehe **Bild 2.6**).

Diese Vorlaufzeit wird gemäß **Gleichung 2.1** unter Berücksichtigung von Arbeitsinhalt und Anzahl der Arbeitsvorgänge eines Auftrages berechnet und soll die Wahrscheinlichkeit der Liefertermineinhaltung erhöhen.

$$ZVA_j = a_p \cdot ZDA_j^c + b_p \cdot z_j \tag{Gl. 2.1}$$

- mit: ZVA Vorlaufzeit eines Auftrages
 ZDA Durchlaufzeit eines Auftrages
 z Anzahl der Montagestationsdurchläufe
 a, b, c Parameter des Vorlaufs (simulationsgestützt bestimmt)
 j Auftragsindex
 p Auftragsartindex

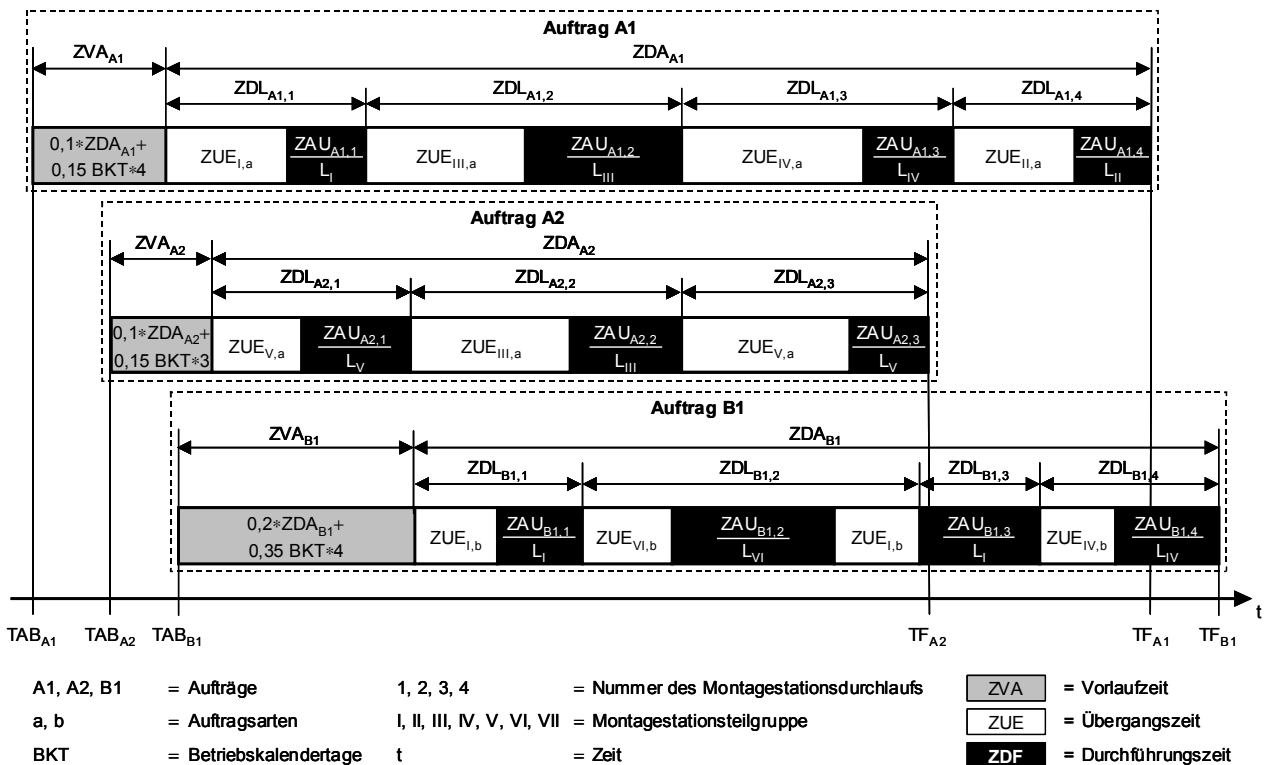


Bild 2.6 Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung [nach Evers]

Es muss allerdings kritisch angemerkt werden, dass geeignete Werte der Vorlaufparameter mit Hilfe von Simulationsuntersuchungen gewonnen werden müssen. Dies ist mit sehr viel Aufwand verbunden und muss für jede Planperiode sowie jedes neue Produktionsspektrum wiederholt

werden. Diese Kritik besteht auch dann, wenn Evers einschränkend anführt, dass dies nicht für jede Auftragsvariante, sondern nur für die verschiedenen Auftragsarten (Einzel-, Teil- oder Komplett-auftrag) durchzuführen sei.

Auftragsdurchlauf

Vom Zeitpunkt der Auftragsfreigabe an übernimmt die Montagesteuerung die Durchsetzung der Montageaufträge im Montagesystem. Um ein hohes Maß an Flexibilität zu gewährleisten, wird immer *nur* der nächste Arbeitsvorgang eines Auftrages einer Montagestation zugewiesen. Die Reihenfolge der Zuweisungen kann entweder anhand der Reihenfolgeregel FIFO oder der Schlupfzeitregel festgelegt werden. Auf Basis fester Regeln versucht die Montagesteuerung die Vorgaben der Stationspriorisierung durchzusetzen. Es werden anfangs nur Montagestationen mit dem Prioritätswert 1 akzeptiert und nur für den Fall, dass nach einer festgelegten Wartezeit immer noch keine solche Station verfügbar ist, werden auch niedriger priorisierte Stationen zugelassen.

Mit Hilfe eines Regelkreises, bestehend aus Belegungsplanung, Montage bzw. Simulation und Betriebsdatenerfassung, konnte Evers sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der logistischen Zielgrößen (siehe Kapitel 2.3) realisieren. Aufgrund der Vorlaufzeit werden die Montageaufträge jedoch tendenziell zu früh freigegeben und es kommt zu erhöhten Beständen in der Montage. Weiter führen die starren Regeln der Montagesteuerung bezüglich der Stationspriorisierung ggf. zu einer verspäteten Ausnutzung der verfügbaren Flexibilität (siehe Kapitel 3.4). Eine individuellere Entscheidungsfindung bei der Auswahl alternativ verfügbarer Stationen, welche die aktuelle Situation eines Montageauftrages zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt, wäre hier von Vorteil.

Im folgenden Text werden unter dem Begriff Belegungsplanung immer die ersten drei Schritte Gruppierung der Montageaufträge und -stationen, Priorisierung von Belegungsalternativen und Durchlaufterminierung verstanden.

2.2 Auftragsmanagement als Erweiterung der PPS

Auf Unternehmensebene wird der Begriff Auftragsmanagement häufig im Zusammenhang mit anderen Themen wie *Supply-Chain-Management* oder *Outsourcing* genannt. Der ursächlich aufgrund einer verringerten Leistungstiefe entstandene Trend zur stärkeren Integration von Kunden und Zulieferern in die betriebsinterne Prozesskette gewinnt dadurch weiter an Gewicht. Denn im Gegensatz zur herkömmlichen PPS findet eine ganzheitliche Betrachtung der Geschäftsprozesse im Sinne einer stärker ausgeprägten Kundenorientierung statt, die insbesondere die kaufmännischen Bereiche mit einschließt [Westkämper, 2002]. Westkämper beschreibt Auftragsmanagement im Allgemeinen als *»ideelles und/oder reelles Instrument zur flexiblen und wirtschaftlichen Abwicklung von Kundenaufträgen«* und das operative Auftragsmanagement im Besonderen als *»die mengen- und zeitmäßigen sowie örtlichen Zuordnungen aller benötigten Ressourcen zu den (Kunden-)Aufträgen«* [Westkämper, 1999]. Eine ähnlich gelagerte Definition gibt Lücke: *»Das Auftragsmanagement - im Sinne eines Projektmanagements bei kundenauftragsbezogener Fertigung - ist verantwortlich für die optimale Verknüpfung der Teilprozesse der Auftragsabwicklung, um die Unternehmensaktivitäten übergreifend sowohl technisch als auch*

organisatorisch zu integrieren. Es steht für die Gesamtheit der Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mittel zur Abwicklung des Auftrags als innerbetriebliches und unternehmensübergreifendes Projekt« [Lücke, 1998]. Eine produktionsnähere, wenn auch sehr allgemein gehaltene Definition findet man bei Wilksch: »Das Auftragsmanagement umfasst die Aufgaben, die zur Erreichung eines verbesserten Auftragsdurchlaufs durch die Produktion notwendig sind« [Wilksch, 1994].

Für die unternehmensübergreifenden Aufgaben bedeutet das Auftragsmanagement demnach eine Erweiterung der herkömmlichen PPS, der durch die Entwicklung von *Enterprise Resource Planning-Systemen* (ERP) bereits Rechnung getragen wurde (siehe **Bild 2.7**) [Westkämper, 1999]. Diese Systeme gehen von einer gleichwertigen Betrachtung aller Produktionsressourcen aus und stellen somit eine Abkehr der vorwiegend mengenmäßigen Betrachtung herkömmlicher Systeme dar.

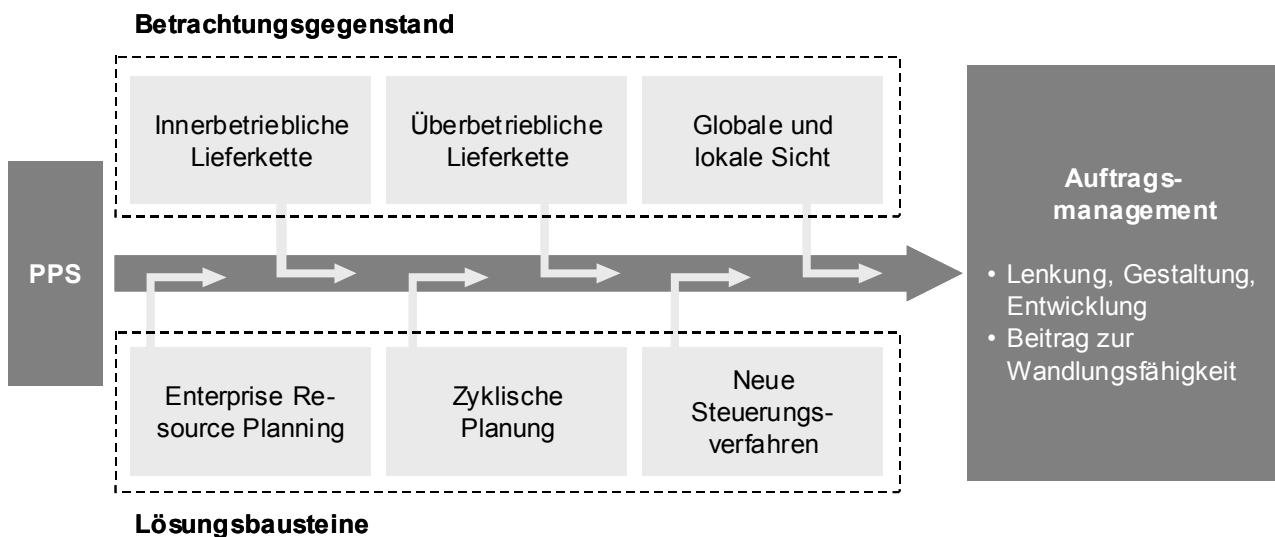


Bild 2.7 Entwicklungslinien von der PPS zum Auftragsmanagement [nach Westkämper, 1999]

In den wertschöpfenden Bereichen eines Unternehmens, die in dieser Arbeit näher erörtert werden sollen, gewinnen die Querschnittsaufgaben der PPS zunehmend an Bedeutung. Denn durch die kundenorientierte Sichtweise des Auftragsmanagements müssen alle beteiligten Bereiche optimal aufeinander abgestimmt sein, so dass die *Auftragskoordination* von besonderer Wichtigkeit ist. Weiter muss im Rahmen eines kontinuierlichen *PPS-Controllings* ein ständiger Abgleich zwischen den Soll- und den Istwerten erfolgen. Denn nur wenn Planabweichungen rechtzeitig erkannt werden, können geeignete Maßnahmen ergriffen und umgesetzt werden. Die Realisierung dieser Maßnahmen muss mit Hilfe geeigneter Steuerungsverfahren erfolgen.

Die wohl bedeutendste Auswirkung des Auftragsmanagements auf die produzierenden Bereiche eines Unternehmens zeigt sich allerdings in der notwendigen Verschiebung der Zielgewichtung der PPS von den betriebsbezogenen Zielgrößen »hohe Auslastung« und »niedrige Bestände« hin zu marktbezogenen Zielen »kurze Lieferzeit« und »hohe Liefertreue« [Wiendahl, 1996; Burmeister, 1997].

2.3 Produktionsziele des Auftragsmanagements

Der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt und die damit verbundene Verlagerung innerhalb der Zielgewichtung soll natürlich keinesfalls den Eindruck erwecken, die betriebsbezogenen Ziele seien nicht mehr existent [Wiendahl, 1999]. Ganz im Gegenteil besteht heute eine nie da gewesene Abhängigkeit zwischen den markt- und den betriebsbezogenen Zielen; denn nur Unternehmen, die sich den Zielen des Marktes adäquat anpassen, werden mittel- und langfristig überleben können. Wie bereits oben angeführt, setzen die Marktziele »hohe Liefertreue« und »kurze Lieferzeit« einen marktfähigen Preis für die angebotene Ware voraus. Dieser Preis lässt sich aber nur durch eine exzellente innerbetriebliche Wirtschaftlichkeit realisieren (siehe **Bild 2.8**) [Gläßner, 1995].

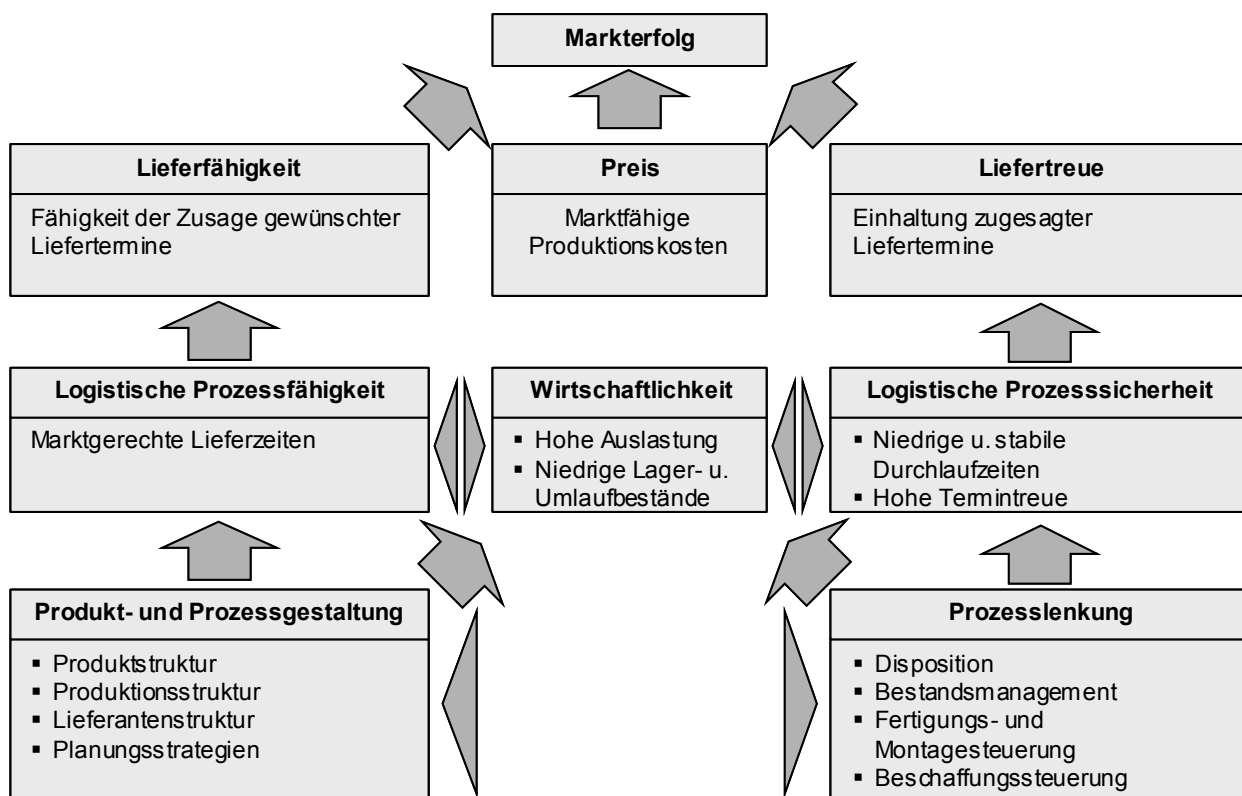


Bild 2.8 Logistische Erfolgsfaktoren von Produktionsunternehmen [nach Gläßner]

Für die produktiven Bereiche eines Unternehmens resultieren daraus nach wie vor diese beiden wesentlichen Forderungen: Zum einen ist eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Kapazitäten gewünscht, um Stillstandskosten zu vermeiden und zum anderen sollen die Kapitalbindungskosten durch niedrige Bestände an Rohmaterial sowie Halbfertig- und Fertigwaren gering gehalten werden. Dabei unterstützt die zweite Forderung zusätzlich die Minimierung des logistischen Aufwandes für Lagerung, Transport und Handhabung [Wiendahl, 1999].

Den Trend zur Verlagerung der Zielgewichtung bestätigen auch die Ergebnisse aus Unternehmensbefragungen, die bei Büdenbender, Glaser und Eversheim detailliert erläutert werden [Büdenbender, 1991; Glaser u.a., 1992; Eversheim, 1999]. In **Tabelle 2.1** sind sie mit der Rangfolge ihrer Nennung aufgeführt, wobei die Ziffer 1 das wichtigste produktionslogistische Ziel bezeichnet.

Demnach muss das Auftragsmanagement die produzierenden Bereiche und insbesondere die Montage prozessbegleitend dabei unterstützen, die (Kunden-)Aufträge möglichst termintreu mit insgesamt kurzen Durchlaufzeiten bestandsarm herzustellen. Neben diesen wesentlichen Anforderungen müssen sämtliche Hilfsprozesse wie z.B. Materialversorgung, Werkzeugbereitstellung etc. organisatorisch optimal integriert werden und in sich reaktionsschnell ablaufen können.

Mit Ausnahme einiger Aspekte der Flexibilitätsfrage, die noch eingehend in Kapitel 3.4 diskutiert wird, können alle Ziele systematisch auf Auftrags- bzw. Arbeitssystemziele zurückgeführt werden.

Tabelle 2.1 Rangfolge produktionslogistischer Ziele aus Unternehmensbefragungen

	Rangfolge bei Büdenbender	Rangfolge bei Glaser	Rangfolge bei Eversheim
Hohe Termintreue	1	1	1
Kurze Durchlaufzeit und hohe Lieferbereitschaft	2	2	2
Geringe Kapitalbindung durch Bestände	3	4	4
Hohe Flexibilität	-	5	3
Hohe Materialverfügbarkeit	4	-	5
Gleichmäßig, hohe Kapazitätsauslastung	5	3	6

Eine hohe Materialverfügbarkeit ist eine Frage der innerbetrieblichen Termintreue und somit, ebenso wie die kundenauftragsbezogene Termintreue, ein Auftragsziel. Es sei denn, es handelt sich bei den betrachteten Materialien um Rohmaterial oder Betriebsstoffe, dann wäre es ein Problem aus der Beschaffungslogistik; dies wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Etwas komplexer sind die Zusammenhänge bei den Zielgrößen *Durchlaufzeit*, *Bestand* und *Kapazitätsauslastung*. Denn einerseits kann nur durch hohe Bestände eine gleichmäßig hohe Auslastung gewährleistet werden, andererseits rufen hohe Bestände und dementsprechend viele Aufträge in den Warteschlangen vor den Kapazitäten zwangsläufig längere Durchlaufzeiten hervor. In diesem Zusammenhang spricht man auch von dem »*Dilemma der Ablaufplanung*« [Gutenberg, 1983; Glaser, 1991]. Diese Zielgrößen sollen hier unter dem Begriff »*Arbeitssystemziele*« zusammengefasst werden, da sie im Wesentlichen durch die konkrete Zielformulierung für die einzelnen Arbeitssysteme bzw. -systemgruppen beeinflusst werden.

Die Abhängigkeit zwischen den Auftrags- und den Arbeitssystemzielen ist darin zu sehen, dass lange und damit in der Regel stark schwankende Durchlaufzeiten einer hohen Termintreue entgegenstehen [Nyhuis, 1999]

2.3.1 Auftragsziele und deren Beurteilung

Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass jeder Montageauftrag eindeutig einem Kunden zugeordnet ist (siehe Kapitel 2.3.2 und Kapitel 3.2). Weiter wird vorausgesetzt, dass es keine wichtigen und weniger wichtigen Kunden gibt. Dadurch ist eine gleichrangige Behandlung aller Montageaufträge sichergestellt. Auch andere, theoretisch denkbare Gründe, die eine Priorisierung bestimmter Aufträge rechtfertigen würden, sollen hier nicht betrachtet werden. Daraus folgt, dass ein Montageauftrag nur dann dringender sein kann als ein anderer, wenn die Termin-einhaltung des einen stärker gefährdet ist als die des anderen. Diese Feststellung soll keinesfalls eine Regel zur Reihenfolgesteuerung vorwegnehmen oder gar begründen, sondern nur verdeutlichen, dass es aus Auftragsicht nur ein Ziel gibt, nämlich die Endtermineinhaltung.

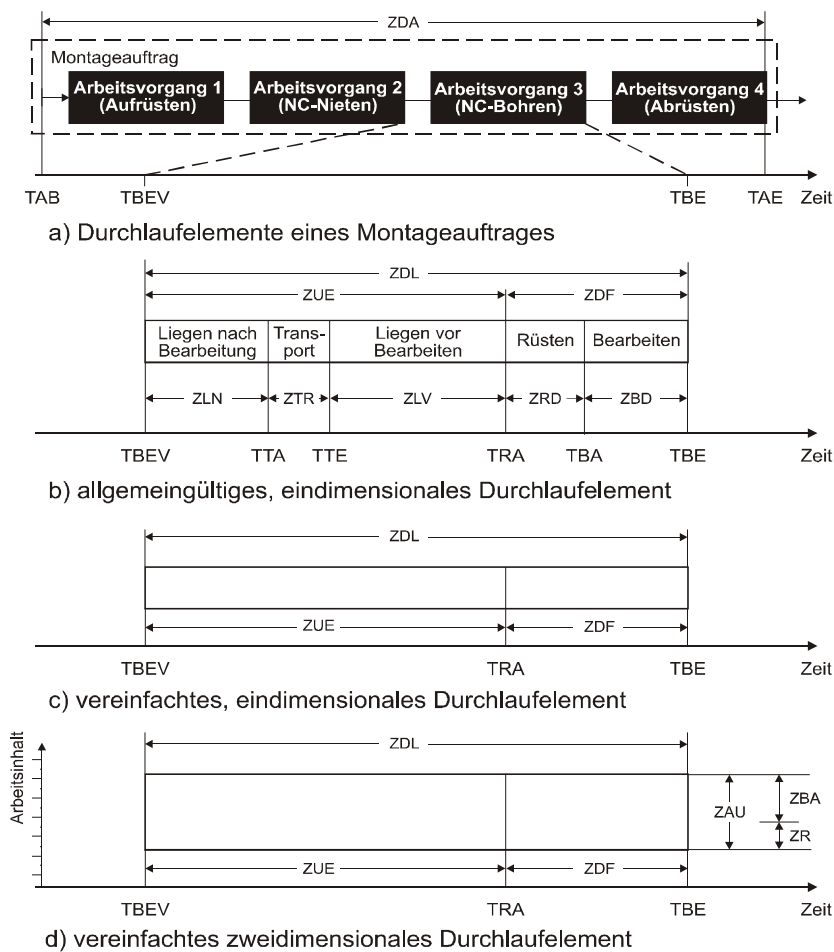


Bild 2.9 Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente [nach Bechte]

Die Grundlage der Definition der Auftragszielgrößen bildet das Durchlaufelement (siehe **Bild 2.9**). Es beschreibt die Durchlaufzeitanteile eines Arbeitsvorganges [Wiendahl, 1997]. Die Zeitspanne zwischen der Freigabe des ersten Arbeitsvorganges (TAB) und dem Abschluss des letzten Arbeitsvorganges (TAE) eines Montageauftrages ergibt die Auftragsdurchlaufzeit (ZDA). Die Auftragsdurchlaufzeit setzt sich somit aus der Summe der Durchlaufzeiten aller zugehörigen Arbeitsvorgänge zusammen, wie es in **Bild 2.9a** beispielhaft für einen Montageauftrag dargestellt ist.

Die Durchlaufzeit für einen Arbeitsvorgang entspricht gemäß **Gleichung 2.2** der Zeitspanne, die von der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Arbeitsvorganges selbst benötigt wird:

$$ZDL = TBE - TBEV$$

Gl. 2.2

mit:	ZDL	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
	TBE	Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges
	TBEV	Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges

In **Bild 2.9b** ist ein Durchlaufelement dargestellt, das zunächst nur eine Dimension - die Zeitdauer - hat und daher als „eindimensionales“ Durchlaufelement bezeichnet wird. In einer detaillierten Darstellung wird das eindimensionale Durchlaufelement in die Bestandteile Liegen nach Bearbeitung, Transport, Liegen vor Bearbeitung, Rüsten und Bearbeiten aufgeteilt, die vereinfacht zu Übergangszeit (ZUE) und Durchführungszeit (ZDF) zusammengefasst werden (**Bild 2.9c**).

Eine große Bedeutung bei der Bestimmung der Zielgrößen besitzt das zweidimensionale Durchlaufelement (**Bild 2.9d**). Es entsteht, wenn das eindimensionale Durchlaufelement um eine zweite Dimension, den Arbeitsinhalt des Auftrags, erweitert wird. Der Arbeitsinhalt wird als Auftragszeit (ZAU) bezeichnet, sie errechnet sich aus der Summe der Vorgabezeiten für den entsprechenden Auftrag an der Ressource, die durchlaufen wird. Dies kann ein einzelner Arbeitsplatz, eine Montagestation oder ein gesamtes Montagesystem sein. Die Vorgabezeiten werden dem Arbeitsplan entnommen. Falls die Ressource für die Bearbeitung eines neuen Auftrags umgerüstet werden muss, verlängert sich die Auftragszeit noch um die Rüstzeit (ZR).

Im Sinne eines kontinuierlichen PPS-Controllings genügt es nun keinesfalls, nach Fertigstellung eines Montageauftrags den Sollendtermin mit dem tatsächlichen Endtermin zu vergleichen, sondern es bedarf geeigneter Methoden, um bereits während der Montagephase die aktuelle Auftragssituation einzelner Aufträge beurteilen zu können. Denn nur dann können ggf. rechtzeitig geeignete Maßnahmen zur Gewährleistung der Termineinhaltung ermittelt und eingeleitet werden.

Zu diesem Zweck wird hier der *relative Schlupf* eingeführt. Klassischerweise berechnet man den Auftragschlupf, wie in **Gleichung 2.3** dargestellt, aus der zeitlichen Differenz von verbleibender Zeit bis zum Sollende des Auftrags (TAE) und der Summe der Auftragszeiten der restlichen Arbeitsvorgänge sowie ggf. abzüglich der verbleibenden Auftragszeit am aktuellen Arbeitssystem.

Zur Berechnung des relativen Schlupfes wird die auftragsbezogene Schlupfzeit durch die Anzahl der noch anstehenden Arbeitsvorgänge dividiert, so dass man den arbeitsvorgangsbezogenen Schlupf erhält (siehe **Gleichung 2.4**). Dieser Wert ist grundsätzlich dazu geeignet, die terminliche Dringlichkeit mehrerer Aufträge zu vergleichen und zu bewerten wie z.B. bei der Reihenfolgesteuerung auf Basis des Schlupfes. In diesem Zusammenhang hat der arbeitsvorgangsbezogene Schlupf den Vorteil, dass der Anzahl der noch anstehenden Arbeitsvorgänge Rechnung getragen wird. Bei Aufträgen mit identischem Sollendtermin und gleicher Gesamtrestdurchführungszeit wird

dementsprechend der Auftrag höher priorisiert, der die größere Anzahl an noch nicht fertig gestellten Arbeitsvorgängen hat.

$$SZ_{fa} = (TAE_{Soll} - T_{Stichtag}) - \left(\sum_{i=j}^n ZAU_i \right) - ZAU_{j-1; Rest} \quad \text{Gl. 2.3}$$

mit: SZ_{fa} auftragsbezogene Schlupfzeit
 TAE_{Soll} Sollende des Fertigungsauftrags
 $T_{Stichtag}$ Zeitpunkt der Schlupfzeitberechnung
 i Index
 j Folgenummer des nächsten anstehenden Arbeitsvorgangs
 n Anzahl aller Arbeitsvorgänge
 ZAU_i Auftragszeit des i-ten Arbeitsvorgangs
 $ZAU_{j-1; Rest}$ Restauftragszeit des aktuellen Arbeitsvorgangs

$$SZ_{ag} = \frac{SZ_{fa}}{(n-j)+1} \quad \text{Gl. 2.4}$$

mit: SZ_{ag} arbeitsvorgangsbezogene Schlupfzeit

Es fehlt aber die Möglichkeit, die aktuelle Auftragssituation im Vergleich zum geplanten Auftragsdurchlauf zu bewerten, insbesondere dann, wenn es nur einen Sollstart- bzw. Sollendtermin für den gesamten Auftrag, nicht aber für die einzelnen Arbeitsvorgänge gibt. Um diese Lücke zu schließen, wird in **Gleichung 2.6** der »prozentuale Schlupf« definiert.

Der *prozentuale Schlupf* entspricht dem aktuellen arbeitsvorgangbezogenen Schlupf, dividiert durch den arbeitsvorgangbezogenen Schlupf zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe. Zur prozentualen Darstellung muss das Ergebnis noch mit 100 multipliziert werden. Falls der aktuelle arbeitsvorgangbezogene Schlupf dem arbeitsvorgangbezogenen Schlupf zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe entspricht, hat der prozentuale Schlupf den Wert 100% und wird im Folgenden auch *Planschlupf* genannt (siehe **Gleichung 2.5**). Schlupfwerte kleiner als Null bedeuten absoluten Auftragsverzug.

$$SZ_{plan} = \frac{(TAE_{Soll} - TAB_{Soll}) - \sum_{i=1}^n ZAU_i}{n} \quad \text{Gl. 2.5}$$

$$SZ_{proz} = \frac{SZ_{ag}}{SZ_{plan}} \cdot 100 \quad \text{Gl. 2.6}$$

mit: SZ_{plan} arbeitsvorgangsbezogene geplante Schlupfzeit
 TAB_{Soll} Sollbeginn des Fertigungsauftrags
 SZ_{proz} prozentuale arbeitsvorgangsbezogene Schlupfzeit

Die Einführung des prozentualen Schlupfes hat neben der Möglichkeit zur dimensionslosen Betrachtung noch weitere Vorteile. Die aktuelle Auftragssituation im Vergleich zur Planung ist

sofort ersichtlich und die Individualität der Aufträge kann viel besser berücksichtigt werden, wie das folgende Beispiel zeigt:

Zwei Aufträge (A und B) konkurrieren um die Bearbeitung an einem Arbeitssystem. Auftrag A hat einen arbeitsvorgangbezogenen Schlupf von zwei Tagen und Auftrag B einen von drei Tagen. Im herkömmlichen Sinne wäre Auftrag A höher zu priorisieren als Auftrag B. Dementgegen könnte es aber sein, dass der prozentuale Schlupf von B bereits geringer ist als der von A, beispielsweise weil Auftrag B aufgrund eines externen Arbeitsvorganges mit sehr viel Übergangszeit geplant wurde. Die Planung von Auftrag B würde bei einer herkömmlichen Betrachtung nicht adäquat berücksichtigt.

2.3.2 Arbeitssystemziele

Der Begriff *Arbeitssystem* ist zunächst die abstrakte Bezeichnung für eine einzelne Maschine, eine Maschinengruppe, einen Unternehmensbereich oder gar eine gesamte Produktion. Im Rahmen dieser Arbeit wird unter einem Arbeitssystem eine Montagestation verstanden, wie sie in Kapitel 3 noch näher erläutert wird. Beide Begriffe werden im Folgenden synonym verwendet. Montagestationen, die technologisch gleichwertig sind, d.h. an denen im Sinne der Auftragsabarbeitung dieselben Arbeitsvorgänge durchgeführt werden können, lassen sich zu Stationsgruppen zusammenfassen. Die Zugehörigkeit zu einer Stationsgruppe bedingt im Allgemeinen keine räumliche Nähe der Montagestationen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde sie jedoch zur Bedingung gemacht, um eine materialflussgerechte Belegungsplanung (siehe Kapitel 2.1.3) zu unterstützen.

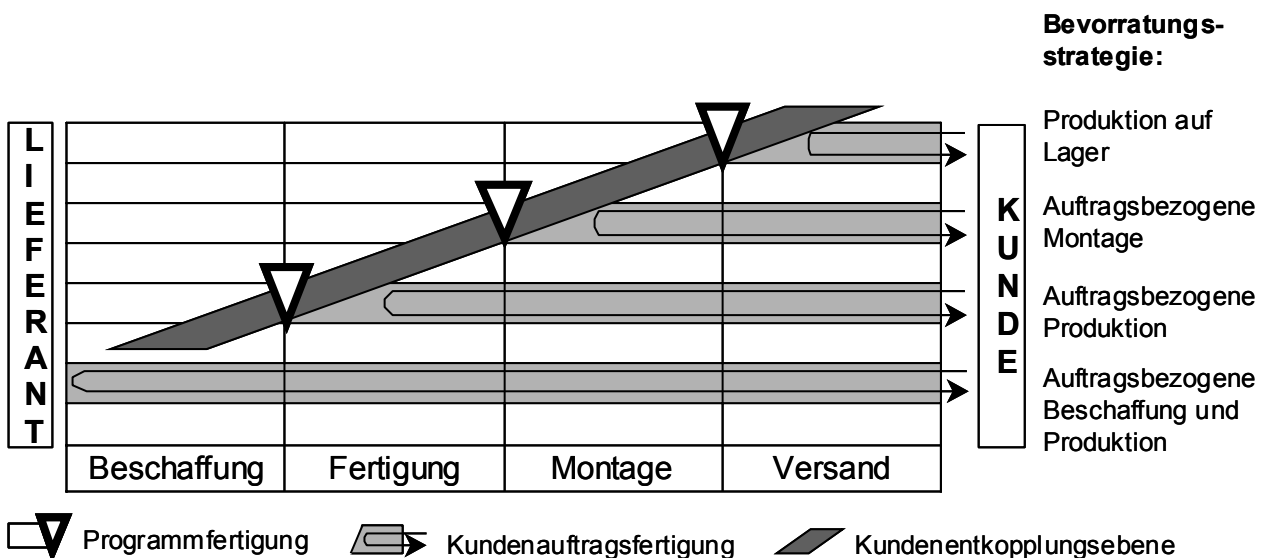


Bild 2.10 Kundenentkopplungsebene in Abhängigkeit von der Bevorratungsstrategie (in Anl. an Eidenmüller)

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben wurde, stellt die Montage in vielen Unternehmen die letzte Wertschöpfungsstufe dar, d.h., alle Aufträge sind vorab bereits bekannt und terminiert. Die jeweiligen Endtermine sind als weitgehend fix anzusehen, so dass der übliche Dispositionsspielraum nur durch eine Reduzierung der Übergangszeiten oder eine Anpassung der Kapazitäten zu reali-

sieren ist. Allerdings muss insbesondere bei der Reduzierung von Übergangszeiten berücksichtigt werden, dass Verzögerungen in den vorgelagerten Produktionsbereichen ggf. noch zu kompensieren sind.

Eine weitere Schwierigkeit zeigt **Bild 2.10**. In der Multiressourcen–Montage ist davon auszugehen, dass es einen direkten Kundenbezug gibt (siehe dazu Kapitel 3.2). Das Unternehmen kann das mittelfristige Produktionsprogramm also kaum selbst beeinflussen, da die Kunden sowohl Produkt als auch Liefertermin für den Montagebereich vorgeben. Für die Kapazitätsplanung bedeutet dies, dass sich aufgrund der Anzahl der verfügbaren Montagestationen eines bestimmten Typs und der technologischen Anforderungen an bestimmten Arbeitssystemen ggf. Engpässe ergeben, wohingegen andere Montagestationen nicht voll ausgelastet werden können. Daher muss das Ziel einer gleichmäßigen und hohen Auslastung der Kapazitäten folgendermaßen definiert werden:

- Die Planung muss das Kapazitätsangebot möglichst optimal an den Kapazitätsbedarf anpassen, indem sie den einzelnen Montagestationen die entsprechenden Schichtmodelle zuweist. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass es kaum möglich ist, an Engpässen sieben Tage in der Woche im Dreischichtbetrieb zu arbeiten, während an wenig benötigten Stationen nur fünf Tage im Einschichtbetrieb gearbeitet wird. Dies würde ohne entsprechenden Pufferbestand zwangsläufig zu Materialflussabbrissen an den Engpässen führen [vgl. Lödding, 2001].
- Da eine permanent hohe Auslastung der Kapazitäten nur an den Engpässen gewährleistet werden kann, muss zumindest eine gleichmäßige Auslastung aller Arbeitssysteme innerhalb der verschiedenen Gruppen angestrebt werden. Aus einer ungleichmäßigen Belastung der Arbeitssysteme resultieren stark schwankende Durchlaufzeiten, die sich sowohl auf die Planbarkeit des Gesamtsystems Montage als auch auf die Termintreue negativ auswirken [vgl. Nyhuis, 1999].

Die exakte Bestimmung des idealen Bestandes an den verschiedenen Arbeitssystemen hängt direkt von dem aktuellen Produktionsprogramm ab und wird im folgenden Abschnitt detailliert erläutert. Daher sollen an dieser Stelle nur einige qualitative Aussagen zum Produktionsziel »*bestandsarme Produktion*« gemacht werden.

Der von Goldratt entwickelte *Optimized Production Technology-Ansatz* (OPT) wurde im Laufe der Zeit zu einer allgemeinen Planungsphilosophie erweitert - der so genannten *Theorie of Constraints* [Goldratt, 1988; Goldratt und Cox, 1992; Dettmer, 1995; Goldratt, 1990]. Aus seinem Ansatz, der davon ausgeht, dass alle Planungs- und Steuerungsaktivitäten auf die Engpässe in der Produktion ausgerichtet sein müssen, leitet Goldratt eine allgemeine Vorgehensweise in Form von neun Regeln ab [Dochnal, 1990; Mannmeusel, 1997]. Im Rahmen der Bestandsminimierung oder besser Bestandsoptimierung soll besonders die vierte Regel betrachtet werden, die lautet: »*An hour lost at a bottleneck is an hour lost for the total system.*« Daraus folgt, dass an kapazitiven Engpässen, also Arbeitssystemen oder Arbeitssystemgruppen, die in einer festgelegten Periode das geplante Produktionsprogramm auch unter Bereitstellung ihrer maximalen Kapazität nicht oder nur kaum bewältigen können, keinesfalls Stillstandzeiten aufgrund fehlenden Materials auftreten dürfen.

Diese Forderung ist aber nur mit einem ausreichend hohen Bestandsgrad und/oder einem kontinuierlichen Materialzufluss zu erreichen. In Kapitel 2.1.3 wurde bereits erwähnt, dass durch gemeinsame Warteschlangen ein ausreichend hoher Bestand trotz eingeschränkter Puffermöglichkeiten vorgehalten werden kann (siehe **Bild 5.5** in Kapitel 5.5).

Demzufolge sind die Arbeitssystemziele eine gleichmäßige Auslastung zur Minimierung der Varianz der Durchlaufzeiten und ein möglichst niedriger Bestandsgrad, der trotzdem in jedem Fall einen Versorgungsengpass ausschließen kann.

2.3.3 Darstellung der Zielgrößen

Die Darstellung der Zielgrößen soll anhand in der Praxis verbreiteter und bewährter logistischer Modelle vorgenommen werden. Das Trichtermodell und das daraus abgeleitete Durchlaufdiagramm (siehe **Bild 2.11**) sowie die Produktionskennlinien stellen solche Modelle dar. Mit Hilfe des Durchlaufdiagramms können die dynamischen Zusammenhänge der logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Terminabweichung grafisch dargestellt werden. Durchlaufdiagramme eignen sich hervorragend für Prognosen, da sie Vergangenheits- und Zukunftsbeachtungen in einer Ansicht kombinieren können [Wiendahl, 1997]. Des Weiteren wird das Auffinden von Ursachen für Abweichungen von den Planvorgaben und das Ableiten geeigneter Steuerungsmaßnahmen weitgehend unterstützt. Auf Basis von Produktionskennlinien können die jeweiligen Betriebszustände an den Arbeitssystemen ermittelt sowie Aussagen über Idealzustände und über praktische Näherungen gemacht werden [Nyhuis, 1999].

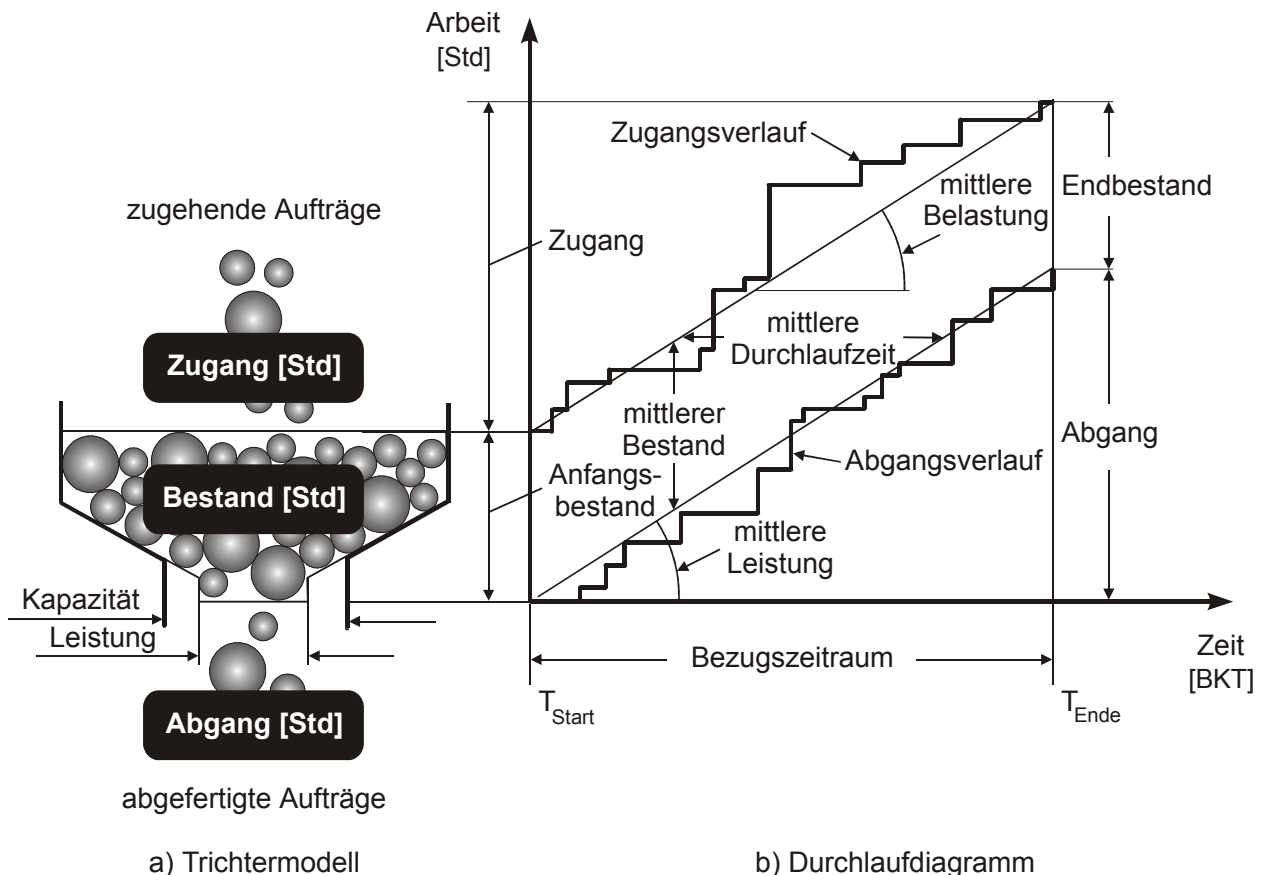


Bild 2.11 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm einer Arbeitsstation [nach Bechte]

Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Bechte geht von der Vorstellung aus, dass jede beliebige Kapazitätseinheit eines Produktionssystems als Trichter (siehe **Bild 2.11a**) dargestellt werden kann und durch die Größen *Zugang*, *Bestand* und *Abgang* in ihrem Durchlaufverhalten vollständig zu beschreiben ist [Bechte, 1984].

Die Ereignisse an einem Trichter lassen sich in ein *Durchlaufdiagramm* übertragen (siehe **Bild 2.11b**). Der *Abgangsverlauf* entsteht, indem die Arbeitsinhalte der fertig gestellten Aufträge entsprechend ihrem Rückmeldetermin beginnend am Koordinatennullpunkt kumulativ über der Zeit aufgetragen werden. Analog entsteht die *Zugangskurve*, indem anstelle der Rückmeldetermine die Zugangstermine aufgetragen werden. Der Schnittpunkt der Zugangskurve mit der y-Achse wird durch den Anfangsbestand bestimmt, der sich zu Beginn des Bezugszeitraumes an der Montagestation befindet. Die mittlere Steigung der Zugangskurve ist die mittlere Belastung, die mittlere Steigung der Abgangskurve entspricht der mittleren Leistung. Der vertikale Abstand zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve ist der Bestand und der horizontale Abstand entspricht der Durchlaufzeit.

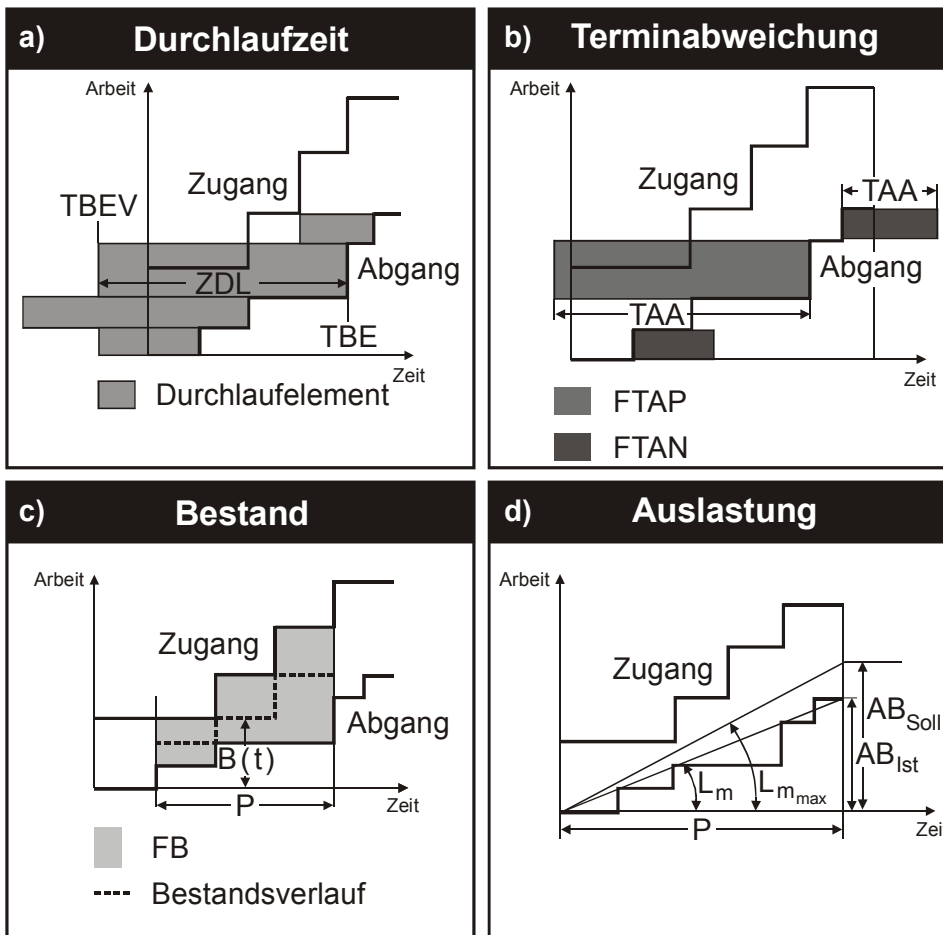


Bild 2.12 Die logistischen Zielgrößen im Durchlaufdiagramm [nach Evers]

Die mittlere Reichweite ergibt sich aus dem Verhältnis der Trichterfüllung oder auch der Bestandsfläche (vgl. **Bild 2.12c**) zum Abgang bzw. des mittleren Bestandes zur mittleren Leistung. Diese Beziehung wird als *Trichterformel* bezeichnet [Nyhuis, 1999]. Sie lautet:

$$R_m = \frac{FB}{AB} = \frac{B_m}{L_m} \quad \text{Gl. 2.7}$$

mit:	R_m	mittlere Reichweite des Bestandes
	FB	Bestandsfläche
	AB	Abgang im Bezugszeitraum
	B_m	mittlerer Bestand
	L_m	mittlere Leistung

Wird im Durchlaufdiagramm neben der Ist-Abgangskurve auch die Plan-Abgangskurve dargestellt, entspricht der vertikale Abstand dem Rückstand bzw. Vorlauf in Stunden und der horizontale Abstand dem Rückstand bzw. Vorlauf in Tagen. Dies gilt analog für die entsprechenden Zugangsverläufe.

In ihren unterschiedlichen Anwendungsformen zeigen Durchlaufdiagramme Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen auf (siehe **Bild 2.12**) und machen sie einer mathematischen Beschreibung zugänglich.

Durchlaufzeit

Bei der Berechnung der mittleren Durchlaufzeiten wird zwischen der mittleren einfachen Durchlaufzeit und der mittleren gewichteten Durchlaufzeit unterschieden. Während die mittlere einfache Durchlaufzeit eine Aussage darüber zulässt, wie lange ein Auftrag im Mittel an einer Montagestation verweilt, kann mit der mittleren gewichteten Durchlaufzeit bestimmt werden, wie lange es im Mittel dauert, bis eine Arbeitseinheit, z.B. eine Stunde, durch die betrachtete Montagestation gelaufen ist.

Die *mittlere einfache Durchlaufzeit* ergibt sich als arithmetisches Mittel der Einzeldurchlaufzeiten der Aufträge, die im Bezugszeitraum abgegangen sind:

$$ZDL_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZDL_i}{n} \quad \text{Gl. 2.8}$$

mit:	ZDL_m	mittlere Durchlaufzeit von Arbeitsvorgängen
	ZDL_i	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
	i	Arbeitsvorgangindex
	n	Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge

Die Berechnung der *mittleren gewichteten Durchlaufzeit* stützt sich auf das arbeitsbezogene, zweidimensionale Durchlaufelement (siehe **Bild 2.9d**). Der Berechnung liegt nicht die Anzahl, sondern der Arbeitsinhalt der abegangenen Aufträge zugrunde. Es wird daher jede einzelne Durchlaufzeit mit dem Arbeitsinhalt multipliziert (gewichtet), so dass eine Fläche entsteht (siehe **Bild 2.12a**), die man als gewichtete Durchlaufzeit dieses Arbeitsvorganges deuten kann. Der Mittelwert ergibt sich, indem die Summe aller abegangenen gewichteten Durchlaufzeiten durch die Summe aller Auftragszeiten dividiert wird:

$$ZDL_{mg} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZDL_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad \text{Gl. 2.9}$$

mit: ZDL_{mg} mittlere gewichtete Durchlaufzeit von Arbeitsvorgängen
 ZAU_i Auftragszeit eines Arbeitsvorganges

Terminabweichung

Die Differenz aus Ist- und Soll-Abgangstermin eines Auftrags ergibt die *Abgangsterminabweichung*. Verfrüht fertig gestellte Aufträge weisen eine negative Terminabweichung auf, verspätete Aufträge folglich eine positive. Entsprechend der gewichteten Durchlaufzeit wird auch die Terminabweichung gewichtet, so dass ein direkter Vergleich beider Größen möglich ist.

Durch die Multiplikation mit der Auftragszeit lässt sich für jeden Auftrag eine *positive* bzw. *negative Terminabweichungsfläche* berechnen (siehe **Bild 2.12b**). Die *mittlere gewichtete Terminabweichung* der Abgänge ergibt sich gemäß **Gleichung 2.10** aus der Differenz der positiven und negativen Terminabweichungsflächen, dividiert durch die Summe der Abgänge im Bezugszeitraum:

$$TAA_{mg} = \frac{FTAP - FTAN}{AB} \quad \text{Gl. 2.10}$$

mit: TAA_{mg} mittlere gewichtete Abgangsterminabweichung
 $FTAP$ positive Abgangsterminabweichungsfläche
 $FTAN$ negative Abgangsterminabweichungsfläche
 AB Abgang im Bezugszeitraum

Bei der Betrachtung von Terminabweichungen ist es empfehlenswert, die positiven und negativen mittleren Terminabweichungen getrennt zu berechnen, da eine mittlere Terminabweichung von null den Eindruck erwecken würde, dass an dem betrachteten System keine Terminabweichungen auftreten. Darüber hinaus muss zur Beurteilung der Termintreue an einer Montagestation auch die mittlere gewichtete Terminabweichung des Zugangs ermittelt werden, da Terminabweichungen am Abgang durch Terminabweichungen am Zugang verursacht werden können.

Die *mittlere gewichtete Terminabweichung* des Zugangs berechnet sich analog zu der des Abgangs:

$$TAZ_{mg} = \frac{FTZP - FTZN}{AB} \quad \text{Gl. 2.11}$$

mit: TAZ_{mg} mittlere gewichtete Zugangsterminabweichung
 $FTZP$ positive Zugangsterminabweichungsfläche
 $FTZN$ negative Zugangsterminabweichungsfläche

Die Differenz der beiden Terminabweichungen ist die *relative mittlere gewichtete Terminabweichung* (siehe **Gleichung 2.12**). Sie ist ein Indiz dafür, ob die betrachtete Montagestation die Aufträge gegenüber der Soll-Durchlaufzeit beschleunigt oder verzögert hat:

$$\text{TAR}_{\text{mg}} = \text{TAA}_{\text{mg}} - \text{TAZ}_{\text{mg}} \quad \text{Gl. 2.12}$$

mit: TAR_{mg} relative mittlere gewichtete Terminabweichung

Diese Art der Betrachtung entspricht nicht der Auftrags- oder Kundensicht; denn für den Kunden ist nur die termintreue Fertigstellung eines Montageauftrags wichtig. Vielmehr dient sie der Analyse, also dem Aufspüren von „Treibern“ der Terminabweichung.

Die Kenngrößen Durchlaufzeit und Terminabweichung können sowohl ressourcenorientiert als auch auftragsorientiert ermittelt werden. Für eine auftragsorientierte Darstellung wird das Durchlaufdiagramm als Auftragsdurchlaufdiagramm abgebildet, indem alle zweidimensionalen Durchlaufelemente eines Auftrages kumuliert über der Zeit aufgetragen werden. Auf Basis der Soll- und Ist-Durchlaufelemente lassen sich obige Kenngrößen sowohl arbeitsvorgangsbezogen als auch auftragsbezogen im Auftragsdurchlaufdiagramm vergleichen.

Bestand

Der mittlere Bestand einer Periode berechnet sich aus der Summe der Bestände an jedem Tag, dividiert durch die Anzahl der Tage in der Periode. Der mittlere Bestand ist demnach als Quotient aus Bestandsfläche im Bezugszeitraum und dem Bezugszeitraum in Tagen definiert:

$$B_m = \frac{\text{FB}}{\text{P}} \quad \text{Gl. 2.13}$$

mit: B_m mittlerer Bestand
 FB Bestandsfläche
 P Bezugszeitraum

Neben der Bestandsfläche ist im Durchlaufdiagramm auch der Bestandsverlauf über der Zeitachse abgebildet (siehe **Bild 2.12c**). Werden anstelle der Ist-Zugangskurve und der Ist-Abgangskurve die entsprechenden Plan-Kurven dargestellt, wird der Plan-Bestand aus der vertikalen Differenz zwischen Plan-Zugangskurve und Plan-Abgangskurve ersichtlich.

Auslastung

Die Leistung kann aus dem Abgangsverlauf des Durchlaufdiagramms bestimmt werden (siehe **Bild 2.12d**). Leistung ist im physikalischen Sinne definiert als Arbeit pro Zeit. Übertragen auf das Durchlaufdiagramm ergibt sich die mittlere Leistung als Quotient aus dem Abgang und der Dauer des Bezugszeitraums:

$$L_m = \frac{AB}{P}$$

GI. 2.14

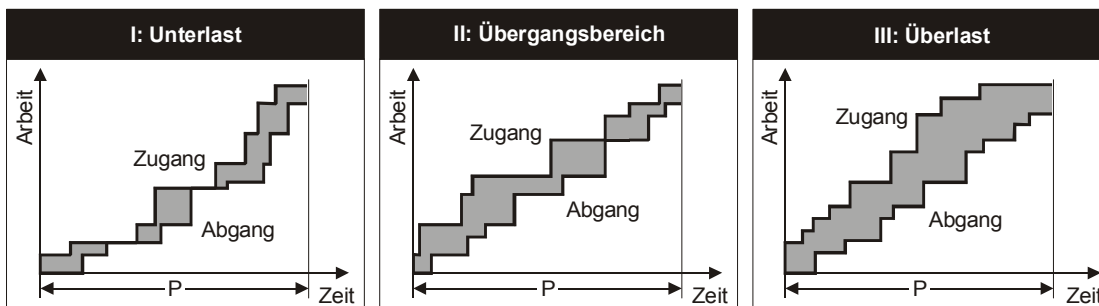
mit: L_m mittlere Leistung
 AB Abgang im Bezugszeitraum
 P Bezugszeitraum

Die Auslastung einer Montagestation wird definiert als das Verhältnis der mittleren Leistung zur *maximal möglichen Leistung*, wobei diese nicht nur durch die Stationskapazität begrenzt wird, sondern auch durch den restriktiven Kapazitätsfaktor (Betriebsmittel und/oder Personal) [Nyhuis, 1999]:

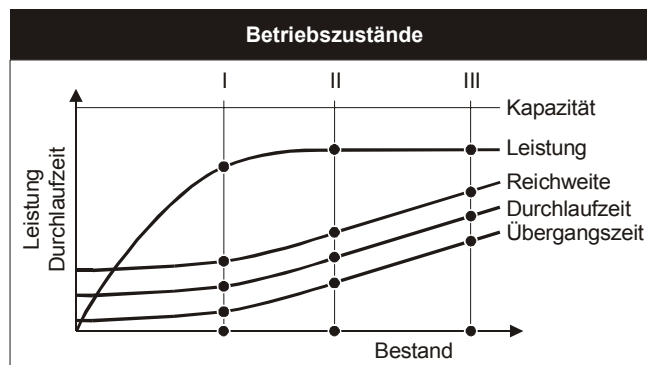
$$A_m = \frac{L_m}{L_{\max}}$$

GI. 2.15

mit: A_m mittlere Auslastung
 L_{\max} maximal mögliche mittlere Leistung



a) typische Betriebszustände an einem Arbeitssystem innerhalb einer Periode



b) Darstellung der Betriebszustände in Produktionskennlinien für eine Periode

Bild 2.13 Darstellung unterschiedlicher Betriebszustände in Produktionskennlinien
 [nach Nyhuis]

Produktionskennlinie

Die Produktionskennlinien bieten die Möglichkeit, unter den gegebenen Rahmenbedingungen sinnvoll erreichbare Leistungs-, Durchlaufzeit- und Bestandswerte zu bestimmen, um daraus realistische Zielvorgaben abzuleiten. Die unterschiedlichen Betriebszustände wie Unterlast, Überlast oder ein Zustand aus dem Übergangsbereich (siehe **Bild 2.13a**) lassen sich in Form von *Produktionskennlinien* verdichtet darstellen [Nyhuis, 1999]. Dazu werden die jeweiligen Periodenwerte

für die Leistung, Übergangszeit, Durchlaufzeit und Reichweite in Abhängigkeit vom zugehörigen Bestand aufgetragen (siehe **Bild 2.13b**).

Die *Leistungskennlinie* verdeutlicht, dass sich die Leistung einer Montagestation oberhalb eines bestimmten Bestandswertes nur noch unwesentlich ändert. Es liegt dann kontinuierlich ausreichend Arbeit vor, so dass keine bestandsbedingten Beschäftigungsunterbrechungen auftreten. Unterhalb dieses Bestandswertes kommt es jedoch zunehmend zu Leistungseinbußen aufgrund eines zeitweiligen fehlenden Arbeitsvorrates. Die Durchlaufzeit hingegen steigt oberhalb des kritischen Bestandswertes weitgehend proportional mit dem Bestand an. Bei Bestandsreduzierungen sinkt dagegen die Durchlaufzeit bis auf ein Minimum, das der mittleren Durchführungszeit der Aufträge und ggf. der Transportzeit entspricht.

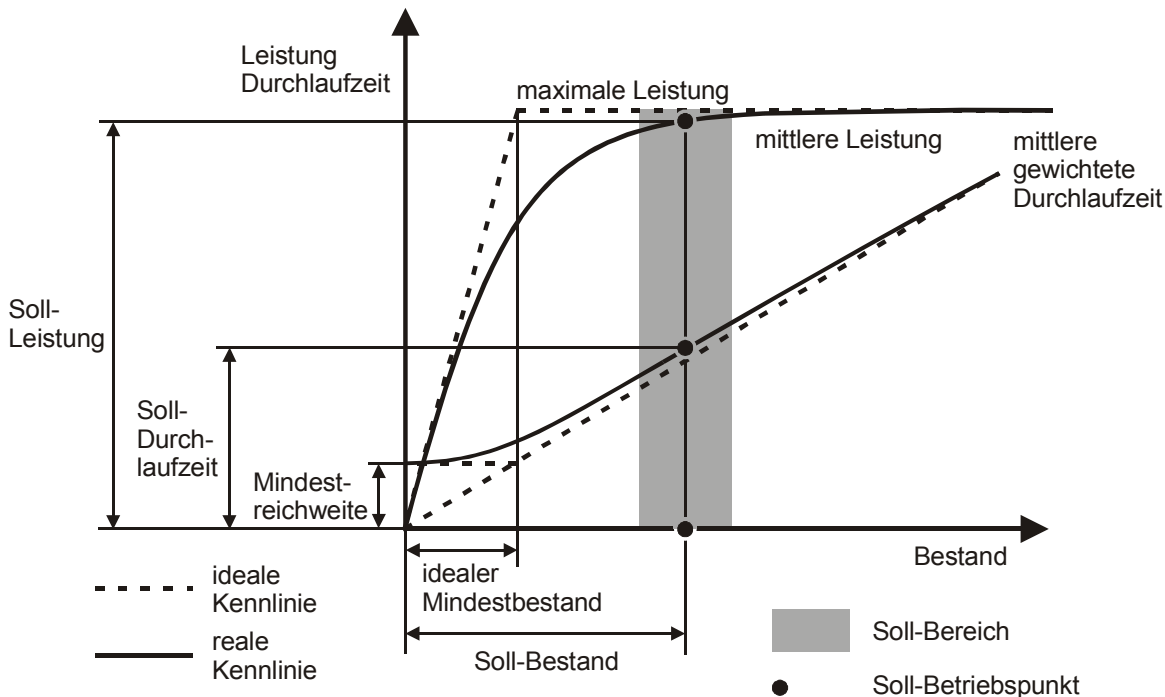


Bild 2.14 Vergleich von idealer und realer Betriebskennlinie (in Anl. an Nyhuis)

Zusätzlich ist zwischen den realen und idealen Verläufen der Kennlinien zu unterscheiden (siehe **Bild 2.14**). Die realen Verläufe weisen gegenüber den idealen Verläufen keine deutlichen Abknickpunkte auf und die Kurven nähern sich erst bei hohen bzw. niedrigen Beständen den idealen Verläufen an. Die Ursachen hierfür sind im Wesentlichen schwankende Arbeitsinhalte, die sich durch unterschiedliche Rüst- und Bearbeitungszeiten ergeben. Ein weiterer Grund ist, dass der Zugang an den einzelnen Montagestationen in der Regel durch den Abgang mehrerer Vorgängerstationen bestimmt wird und somit eine z.T. erhebliche Varianz aufweist.

Der *ideale Mindestbestand* ergibt sich aus der Summe der mittleren gewichteten Auftragszeit und der mittleren gewichteten Transportzeit jeweils dividiert durch die Summe der Auftragszeiten:

$$Bl_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (ZTR_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad \text{Gl. 2.16}$$

mit:	Bl_{\min}	idealer Mindestbestand
	ZAU_i	Auftragszeit eines Arbeitsvorganges
	ZTR_i	Transportzeit eines Arbeitsvorganges
	i	Arbeitsvorgangsindex
	n	Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge

Unter Verwendung der Gleichungen für den Mittelwert und die Standardabweichung [Sachs, 1984] lässt sich die **Gleichung 2.16** umformen zu:

$$Bl_{\min} = ZAU_m + \frac{ZAU_s^2}{ZAU_m} + \frac{\sum_{i=1}^n (ZTR_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad \text{Gl. 2.17}$$

mit:	ZAU_m	Mittelwert der Auftragszeit
	ZAU_s	Standardabweichung der Auftragszeit

Um die Variabilität verschiedener Verteilungen vergleichen zu können, ist die Bestimmung des Variationskoeffizienten hilfreich. Dieser setzt die Streuung einer Verteilung zu deren Mittelwert ins Verhältnis:

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad \text{Gl. 2.18}$$

mit:	ZAU_v	Variationskoeffizient der Auftragszeit
------	---------	--

Bei konstanter bzw. arbeitsvorgangsunabhängiger Transportzeit vereinfacht sich die **Gleichung 2.16** unter Verwendung der **Gleichung 2.17** zu:

$$Bl_{\min} = ZAU_m \cdot (1 + ZAU_v^2) + ZTR_m \quad \text{Gl. 2.19}$$

mit:	ZTR_m	Mittelwert der Transportzeit
------	---------	------------------------------

Falls davon ausgegangen werden kann, dass die Transportzeit vernachlässigbar gering ist, kann in allen Gleichungen der Transportzeitterm weggelassen werden.

Die Mindestreichweite ergibt sich gemäß der *Trichterformel* (**Gleichung 2.7**) aus dem Verhältnis von idealem Mindestbestand und maximal möglicher Leistung [Nyhuis, 1999]:

$$R_{\min} = \frac{B_{\min}}{L_{\max}} \quad \text{Gl. 2.20}$$

mit: R_{\min} Mindestreichweite
 L_{\max} maximal mögliche Leistung

Als normierte Größe gibt der mittlere relative Bestand das Verhältnis des mittleren zum idealen Mindestbestand an. Erfahrungsgemäß sollte sein Wert zwischen 2 und 3 liegen. Wenn der Betriebspunkt eines Arbeitssystems in diesem Bereich liegt, lässt sich ein guter Kompromiss aus hoher Auslastung einerseits und kurzen Durchlaufzeiten andererseits bei einem geringen Bestandsniveau erzielen:

$$B_{\text{rel}} = \frac{B_m}{B_{\min}} \quad \text{Gl. 2.21}$$

mit: B_{rel} mittlerer relativer Bestand
 B_m mittlerer Bestand

Kennzahlen zur Verdichtung aussagekräftiger Informationen

Kennzahlen sollen im Rahmen dieser Arbeit zur Verifikation des entwickelten Auftragsmanagements genutzt werden. In diesem Zusammenhang kann durch Auftragskennzahlen und Stationskennzahlen die Umsetzung der produktionslogistisch angestrebten Ziele überwacht werden. Die Stations- oder Ressourcenkennzahlen machen darüber hinaus deutlich, welche Montagestationen Engpässe darstellen und welche verfügbaren Kapazitäten durch vorgelagerte Engpässe nicht optimal genutzt werden können. Weiter ist ersichtlich, an welchen Stationen eine Bestandsreduzierung möglich ist, ohne die Auslastung nennenswert zu verschlechtern. Darüber hinaus können Montagestationen, bei denen ein Kapazitätsabgleich mit anderen überlasteten Stationen möglich ist, erkannt werden. **Tabelle 2.2** zeigt einige wichtige Kennzahlen zur Beurteilung der produktionslogistischen Zieleinhaltung im Bezug zur jeweiligen Sichtweise und den zugehörigen Objekten.

Um Kennzahlen zielgerichtet einsetzen zu können, muss man zwischen zwei Kennzahlengruppen unterscheiden:

- *Stichtagskennzahlen* beschreiben die konkrete Situation zu einem bestimmten Zeitpunkt. Bei den Stichtagskennzahlen handelt es sich insbesondere um die Kenngrößen Bestand, Rückstand und Vorlauf. Stichtagskennzahlen dienen zur Einschätzung der aktuellen Situation oder Beurteilung der Zielerreichung, wobei sie jedoch großen dynamischen Schwankungen unterliegen können. Um aber Trends oder Tendenzen feststellen zu können, müssen Stichtagskennzahlen immer in Verbindung mit Zeitraum- oder Periodenkennzahlen betrachtet werden.
- *Periodenkennzahlen* zeigen die dynamische Entwicklung von Kennzahlen über der Zeit. Auf diese Weise lassen sich sowohl positive wie auch negative Tendenzen erkennen. Durch eine entsprechende Zeitrasterung (Tag, Monat etc.) bieten sie die Möglichkeit, Zusammenhänge

zwischen verschiedenen Parametern und Einflussgrößen der Auftragsabwicklung zu erkennen und zu quantifizieren.

Tabelle 2.2 Sichtweisen und Objekte logistischer Kennzahlen

Sichtweise	auftragsorientiert		ressourcenorientiert
Objekt	Auftrag	Arbeitsvorgang	Montagestation
Kennzahl	<ul style="list-style-type: none"> • Starttermineinhaltung • Endtermineinhaltung • Vorlaufzeit • Durchlaufzeit • Durchlaufzeitabweichung • Durchlaufzeitverteilung • Arbeitsinhaltsverteilung • Anzahl Stationsdurchläufe 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangsterminabweichung • Abgangsterminabweichung • Durchlaufzeit • Durchlaufzeitabweichung • Durchlaufzeitverteilung • Übergangszeit • Durchführungszeit • Auftragszeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückstand • Vorlauf • Durchlaufzeit • Übergangszeit • Durchführungszeit • Bestand • Leistung • maximale Leistung • Auslastung • Auftragszeit • Reichweite

3 Charakterisierung der Multiressourcen-Montage

Zunächst wird die Multiressourcen-Montage in allgemeiner Form beschrieben. Damit wird gleichzeitig der Gültigkeitsbereich des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten agentenbasierten Auftragsmanagements festgelegt. Danach folgt eine differenzierte Betrachtung einzelner Montagemerkmale einer realen Multiressourcen-Montage anhand der Auftragsabwicklung. Um zu einem umfassenderen Verständnis für diese Montage zu gelangen, wird sie in Kapitel 3.3 aus systemtechnischer Sicht untersucht. Ziel dabei ist es, sowohl die Systemgrenzen genauer zu fassen als auch ein besseres Verständnis für das Systemverhalten zu erreichen. Im letzten Abschnitt werden die vorhandenen Flexibilitätspotenziale der vorliegenden Multiressourcen-Montage beschrieben und geeignete Methoden zu ihrer Erschließung erläutert. Denn der optimalen Flexibilitätsausnutzung – im Sinne von sinnvoll und gezielt – kommt in dieser Arbeit eine Schlüsselrolle zu.

3.1 Allgemeine Merkmale einer Multiressourcen-Montage

Unter dem Begriff der Montage versteht man im Allgemeinen das Aufbauen von Systemen höherer Komplexität aus Systemen niedriger Komplexität (siehe **Bild 3.1**), bei dem man ggf. in mehreren Stufen, beginnend mit Einzelteilen über Systeme wachsender Komplexität, zum Endprodukt gelangt [Arlt und Miese, 1971; Brankamp, 1975].

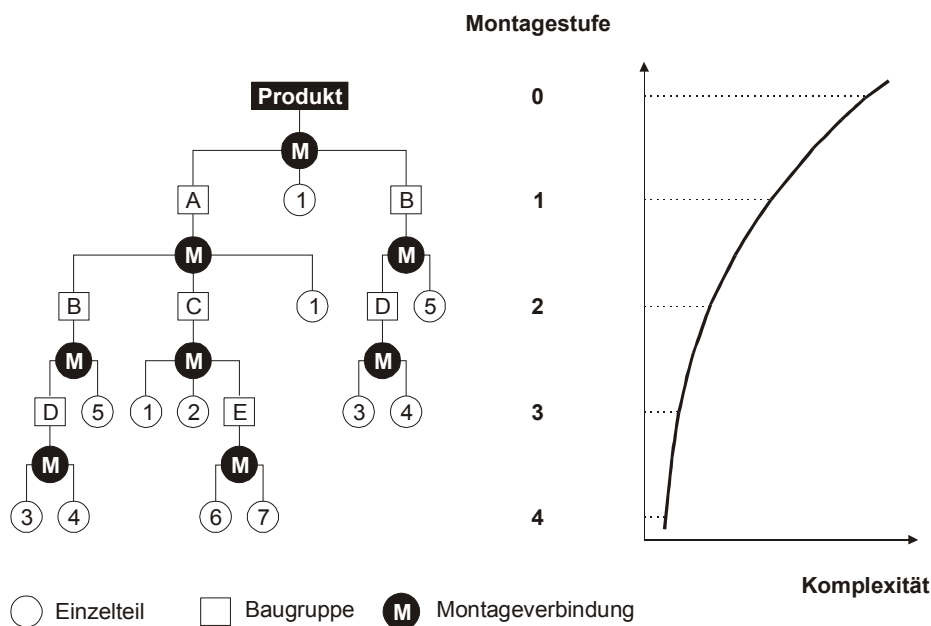


Bild 3.1 Prinzip der Montage [nach Evers]

Die funktionale Beschreibung der Montage spezifiziert dagegen, durch welche Operationen (Fügen, Kontrollieren etc.) man von einem Ausgangszustand zu einem Folgezustand gelangt. Um zu einem Produkt höherer Komplexität zu gelangen, können mehrere Operationen notwendig sein, die in der Regel in mehrere Arbeitsvorgänge gegliedert sind. Die Reihenfolge und der Zeitbedarf der verschiedenen Operationen und Arbeitsvorgänge sind festgelegt, wobei sich die Montage dadurch auszeichnet, dass viele Teile und Baugruppen zeitlich parallel zusammengefügt werden können.

Das Ziel der Montage ist demnach das Verknüpfen von Einzelteilen und/oder Baugruppen zu Endprodukten, die eine bestimmte Funktion erfüllen. Systeme, in denen solche Verbindungen durchgeführt werden, werden Montagesysteme genannt. Sie setzen sich meist aus einer Kombination verschiedener Montagestationen zusammen. Unter Montagestation versteht man eine räumliche Zusammenstellung von Handhabungs- und Montageeinrichtungen [Kalde, 1987].

Als Ressource werden alle Produktionsfaktoren bezeichnet, die im Rahmen der Fertigung oder Montage für die Herstellung der Erzeugnisse notwendig sind. Darunter fallen Personal, Betriebsmittel, sonstige Hilfsmittel und Material [fir, 1996a; Much und Nicolai, 1995].

Im Rahmen der Belegungsplanung ist »Ressource« eine allgemein gültige Bezeichnung für alle Arten von Betriebsmitteln, Material und Personen, die Engpässe werden können. Es muss zwischen konsumierbaren und nicht konsumierbaren Ressourcen unterschieden werden. Konsumierbare Ressourcen, wie z.B. jede Art von Material, werden unwiederbringlich verbraucht. Nicht-konsumierbare Ressourcen, wie z.B. Maschinen, werden nur verübergend in Anspruch genommen.

Es liegt ein Multiressourcen-Problem vor, wenn zur Ausführung eines Arbeitsvorgangs die gleichzeitige Verfügbarkeit mehrerer Ressourcen, wie Personal, Betriebsmittel und Fläche, sicherzustellen ist [Esser, 1996; Lehmann, 1992]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Durchlaufterminierung nicht nur die eingeschränkt verfügbaren Maschinen zu berücksichtigen, sondern auch die Abhängigkeiten von weiteren Ressourcen.

Als *Multiressourcen–Montage* wird innerhalb dieser Arbeit darüber hinaus ein Montageprinzip bezeichnet, in dem eine Vielzahl von Ressourcen alternativ zur Durchführung einer Montageaufgabe zur Verfügung stehen. So kann z.B. ein Arbeitsvorgang von verschiedenen Werkern an jeder beliebigen Montagestation, die zu einer Gruppe technologisch ähnlicher Stationen gehört, mit unterschiedlichen Vorrichtungen bearbeitet werden [Schimke, 1991].


Im Gegensatz zur Fertigung, in der meist eine feste Beziehung zwischen Maschinen, Fläche sowie Bedienern besteht, werden die Zuordnungen in der Montage je nach Bedarf hergestellt [Konz, 1989]. Ebenso können Material und Informationen in der Fertigung leichter als Einheit aufgefasst werden, da der Arbeitsplan und die Zeichnung das Werkstück in der Regel durch die Werkstatt begleiten, während in der Montage verschiedene Materialien zu unterschiedlichen Prozessschritten benötigt werden [Eversheim, 1989]. Dies führt dazu, dass in der Montage eine wesentlich höhere Ressourcenflexibilität als in der Fertigung beherrscht werden muss. Hinzu kommt, dass ein Montagevorgang nur abgearbeitet werden kann, wenn das zusätzlich benötigte Material bereitgestellt wurde; während in der Fertigung vom zweiten Arbeitsschritt an nur die Verfügbarkeit des Arbeitsplatzes über die Durchführbarkeit des nächsten Vorgangs entscheidet [Lehmann, 1992]. So liegen aufgrund der wechselnden Situationen in der Montage ständig sich verändernde, d.h. dynamische Randbedingungen vor [Evers, 2002].

3.2 Merkmalsausprägungen im Rahmen der Auftragsabwicklung

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird deutlich, dass sich die Methoden des entwickelten agentenbasierten Auftragsmanagements flexibel an alle Montagen, die dem oben beschriebenen Prinzip der Multiressourcen-Montage entsprechen, anpassen lassen. Nichtsdestotrotz sind sie vor dem Hintergrund einer konkreten Montage – der Vormontage eines Flugzeugherstellers – entwickelt (siehe Kapitel 5) und evaluiert (siehe Kapitel 7) worden. Deshalb ist es unumgänglich, das behandelte Montageprinzip hinsichtlich seiner Merkmale und Eigenschaften differenziert zu betrachten. Hierzu wird die Merkmalsausprägung anhand der Auftragsabwicklung in einer morphologischen Darstellung verdeutlicht (siehe **Tabelle 3.1**) [in Anl. an fir, 1996b]. Die grau hinterlegten Merkmalsausprägungen charakterisieren die Struktur der Auftragsabwicklung, die auf der zugrunde liegenden Vormontage basiert.

Tabelle 3.1 Merkmalsausprägung des betrachteten Montageprinzips (in Anl. an fir)

Merkmale der Auftragsabwicklung		Merkmalsausprägung der Auftragsabwicklung				
1	Art der Auftragsauslösung	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung innerhalb von Rahmenverträgen	kundenanonyme Vorproduktion / kunden-auftragsbezogene Endproduktion	Produktion auf Lager	
2	Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten	
3	Erzeugnisstruktur	mehnteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur		mehnteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	geringteilige Erzeugnisse	
4	Ermittlung des Erzeugnis-/Komponentenbedarfs	deterministisch auf Erzeugnisebene	teilweise deterministisch/teilweise heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Erzeugnisebene	stochastisch auf Erzeugnisebene
5	Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert		teilweise auftragsorientiert / teilweise periodenorientiert	periodenorientiert	
6	Beschaffungsart	weitestgehender Fremdbezug		Fremdbezug in größerem Umfang	weitestgehend interne Beschaffung	
7	Bevorratung	kaum Bevorratung von Bedarfspositionen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen	
8	Montageart	Einmalmontage	Einzel- und Kleinserienmontage	Serienmontage	Massenmontage	
9	Organisationsform	Baustellenmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Fließmontage	
10	Montagestruktur	hoher Strukturierungsgrad		mittlerer Strukturierungsgrad	geringer Strukturierungsgrad	
11	Kundenänderungseinflüsse während der Produktion	viele Änderungseinflüsse		gelegentliche Änderungseinflüsse	wenige Änderungseinflüsse	

 Merkmalcharakteristik des betrachteten Montageprinzips

Eine Montage mit Multiressourcen ist in der Regel sehr kapitalintensiv. Entsprechende Investitionen werden immer dann getätigt, wenn größere Stückzahlen mit hoher Sicherheit von einem oder mehreren Kunden abgenommen werden. Die Auftragsauslösung wird daher in der Multiressourcen-Montage am ehesten durch die Produktion auf Bestellung innerhalb von Rahmenverträgen erfolgen, wobei der einzelne Kunde tendenziell eher kleinere Mengen oder sogar Einzelaufträge eines standardisierten Produktes ordert.

Die technische Auftragsabwicklung wird in hohem Maße durch den organisatorischen Aufwand für die Erfüllung des Kundenauftrages geprägt. Dieser ist umso größer, je geringer der Standardisierungsgrad der Erzeugnisstruktur und je größer der Kundeneinfluss auf die Gestaltung des Erzeugnisses ist. Einzelaufträge weisen häufig einen hohen Anteil an Sonderkonstruktionen sowie einen geringen Anteil von Wiederholteilen auf und werden hier nicht weiter betrachtet. Mit zunehmendem Seriencharakter der Produktion wird dagegen der Kundenauftrag aus vorrätigen Gruppen gebildet. Im betrachteten Montageprinzip umfasst das Erzeugnisspektrum üblicherweise sowohl typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten als auch Standarderzeugnisse mit Varianten sowie in selteneren Fällen auch ohne Varianten. Hierbei sind die Montagevarianten dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit von den Kundenaufträgen unterschiedliche Montagearbeiten ausgeführt werden müssen und somit ein unterschiedlicher Ressourcenbedarf entsteht.

Im betrachteten Fall handelt es sich bei der Erzeugnisstruktur konstruktionsbedingt um mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur oder gar um geringteilige Erzeugnisse. D.h. die Erzeugnisstruktur wird durch eine geringe Strukturtiefe und -breite beschrieben, wobei nur hochpreisige Teile berücksichtigt werden. Auf Klein- bzw. Massenteile soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. Zu bemerken ist, dass die Montage mehrteiliger Produkte vernetzte Ablaufstrukturen [Groß, 1990] und eine Vielzahl unterschiedlicher zu koordinierender Ressourcen aufweist [Lehmann, 1992].

Basis der Primärbedarfsplanung sind die in den Rahmenverträgen vereinbarten Mengen und Termine, so dass der Erzeugnisbedarf je Periode deterministisch ermittelt wird. Sind Mengen und Termine der Erzeugnisse nur langfristig mit möglichen Abweichungen festgelegt, so kann der Bedarf auch heuristisch auf Erzeugnisebene ermittelt werden.

Die Auslösung des Sekundärbedarfes erfolgt einerseits periodenorientiert für diejenigen standardisierten Baugruppen, die über mehrere Rahmenaufträge aggregiert disponiert werden können, und andererseits auftragsorientiert für kundenspezifische Baugruppen. Die Beschaffung für diese Baugruppen erfolgt weitgehend intern, allerdings gibt es einige Produkte, deren Beschaffungsart in größerem Umfang durch Fremdbezug charakterisiert ist.

Da die wirtschaftliche Losgröße in den vorgelagerten Bereichen oft höher festgelegt ist als die von der Montage abgerufene Menge, muss die verbleibende Restmenge eingelagert werden [fir, 1997]. Somit wird die Bevorratung entweder direkt auf Erzeugnisebene oder auf den unteren Strukturebenen des Erzeugnisses vorgenommen.

Die Flugzeugproduktion ist im Vergleich zum Automobilbau durch viel kleinere jährliche Produktionsmengen gekennzeichnet. Allerdings sind die Produktlebenszyklen sehr viel länger, so dass sich die Montageart für den untersuchten Planungsbereich am besten mit dem Begriff Kleinserien- bis Serienmontage umschreiben lässt.

Die Form der räumlichen Zusammenfassung von Arbeitskräften und Betriebsmitteln zu montage-technischen Einheiten wird als Organisationsform der Montage bezeichnet, die nach dem Bewegungszustand der Montageobjekte in die beiden Ablaufkategorien Verrichtungsprinzip und

Fließprinzip unterteilt werden kann. Eine weitere Unterteilung dieser Organisationsformen ist durch die Betrachtung der Arbeitsplätze möglich, da diese ebenfalls entweder bewegt werden oder stationär bleiben (siehe **Bild 3.2**). Somit ergeben sich die Grundformen Baustellen-, Gruppen-, Reihen- und Fließmontage [in Anl. an Eversheim, 1989; in Anl. an Hackstein, 1989; Miese, 1972; in Anl. an Spur, 1986].

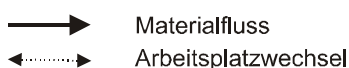
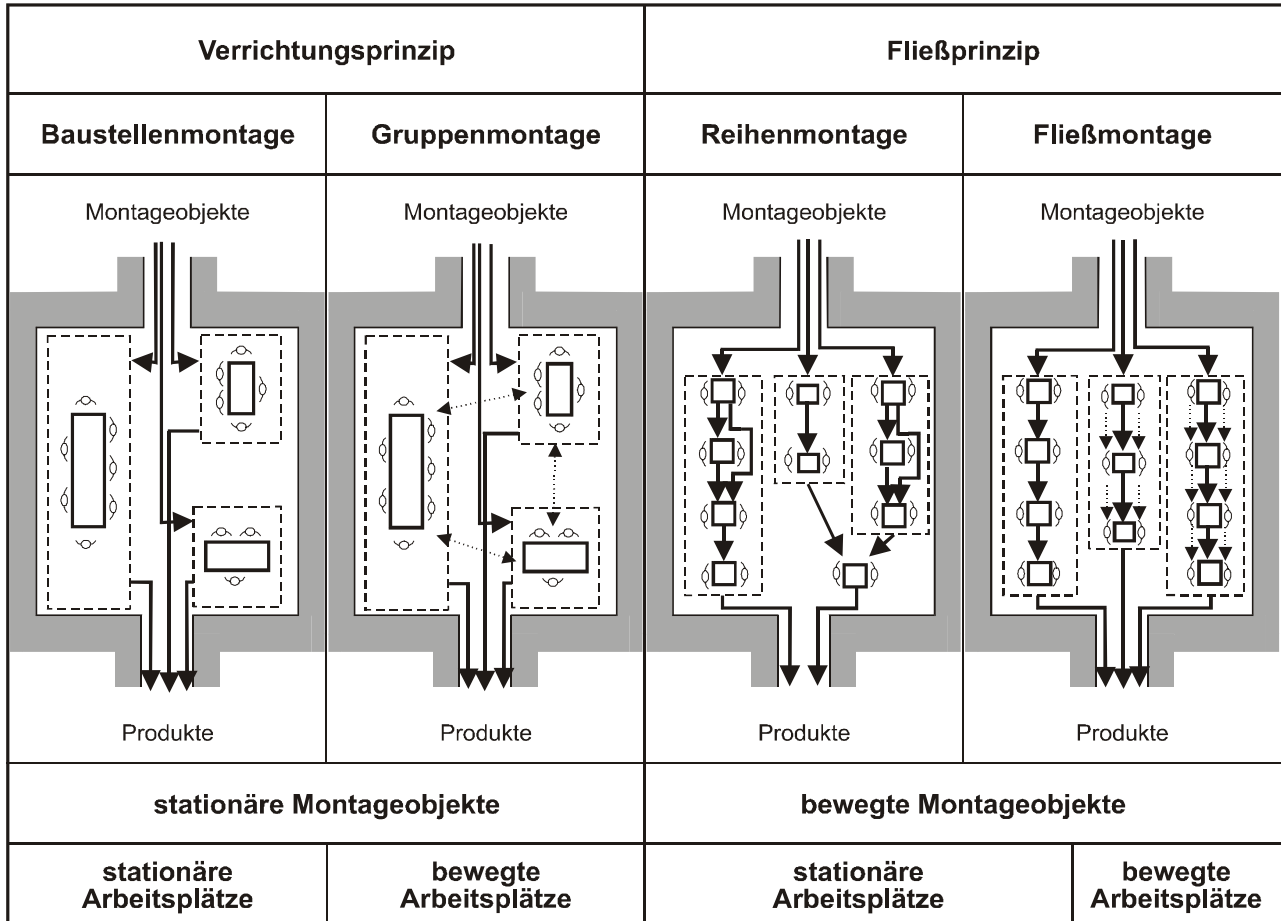


Bild 3.2 Organisationsformen in der Montage (in Anl. an Hackstein, in Anl. an Eversheim)

Die vorliegende Organisationsform ist eine Reihenmontage, in der die Montage arbeitsteilig an mehreren ortsfesten Stationen ausgeführt wird und das Montageobjekt zwischen diesen transportiert werden muss. Auch wenn die Stationen in der Reihenfolge des Montagefortschritts angeordnet sind, wird bei der Reihenmontage bei grob differenzierter Arbeitsteilung weder eine Taktzeit vorgegeben noch der Materialfluss zeitlich festgelegt. Ebenso können während des Montage-durchlaufs bei Varianten einzelne Stationen übersprungen oder auch im Sinne einer Rückführung mehrfach angesteuert werden.

Die Montageprodukte weisen eine generelle Arbeitsplanstruktur auf, in der die unterschiedlichen Arbeitsvorgangsfolgen der einzelnen Aufträge festgelegt sind. Die Aufträge durchlaufen die Montagestationen in dieser Reihenfolge, wobei für die Durchführung der Arbeitsvorgänge mehrere

Ressourcen alternativ geeignet sein können. Ein weiteres Merkmal der zugrunde liegenden Multiressourcen–Montage ist der flexible Einsatz mehrerer Arbeitskräfte an den Stationen, um den Durchsatz zu optimieren und den Materialfluss zu homogenisieren. Dieses Vorgehen ist insbesondere deshalb sinnvoll, weil die Zykluszeiten solcher Reihenmontagen oftmals im Bereich von mehreren Stunden bzw. Tagen liegen [Eversheim, 1992].

Die hier betrachtete Montagestruktur ist dadurch gekennzeichnet, dass sie einen geringen bis mittleren Strukturierungsgrad besitzt, der in der Regel 10 aufeinander folgende Arbeitsvorgänge im Montageabschnitt nicht überschreitet [vgl. Schomburg, 1980]. Die durchschnittliche Anzahl aufeinander folgender Montageprozesse sowie ihre Parallelität sind somit begrenzt.

Die Konstruktion und die Arbeitsplanung werden vorwiegend vor dem Produktionsbeginn tätig. Die Änderungseinflüsse des Kunden sind bis zu diesem Zeitpunkt vorhanden, nehmen aber nach Vertragsabschluss ab und sind während der Montage unbedeutend [nach fir, 1997].

Als weitere Besonderheit ist hier eine häufig vereinbarte Lieferabrufsystematik zu nennen, innerhalb derer der interne oder externe Kunde zu bestimmten Zeitpunkten den benötigten Erzeugnisbedarf hinsichtlich Liefertermin und -menge konkretisiert. Für das in dieser Arbeit behandelte Auftragsmanagement wird vorausgesetzt, dass eine solche Konkretisierung bereits stattgefunden hat, da es, wie oben bereits angeführt, unterhalb des bestehenden PPS-Systems eingesetzt werden soll und dementsprechend terminierte Montageaufträge existieren müssen.

Bis hierher wurden die Abläufe in der Multiressourcen–Montage inhaltlich anhand ihrer Merkmale beschrieben. Nun soll eine abstraktere Beschreibung aus systemtheoretischer Sicht erfolgen, um ein tieferes Verständnis für das Systemverhalten und die Wirkzusammenhänge zu vermitteln.

3.3 Systemtheoretische Betrachtung

Auftragsmanagement ist zweckorientiert, es dient dem Zweck, das System Montage gezielt zu beeinflussen, so dass die mengen- und zeitmäßige sowie örtliche Zuordnung aller benötigten Ressourcen im Sinne eines verbesserten (Kunden-)Auftragsdurchlaufes erfolgt. Um die Möglichkeiten der Einflussnahme bestimmen zu können, muss zum einen der äußere Rahmen des Systems Montage abgesteckt werden. Zum anderen müssen aber auch die innere Struktur und die Wirkzusammenhänge sowie die speziellen Aspekte der Systemvernetztheit, der Systemkomplexität und der Systemoffenheit detaillierter untersucht werden.

Eine allgemeine Beschreibung definiert Systeme als eine Menge von Elementen mit bestimmten Eigenschaften und Handlungsmöglichkeiten, die untereinander in Beziehung stehen [vgl. Vollmer, 2000]. Weiter bezeichnet Vollmer das Netz dieser Beziehungen als Struktur, die nicht beliebig sein kann, sondern auf den Systemzweck ausgerichtet sein muss. Diesen Anforderungen unterliegen sowohl triviale als auch komplexe (nicht triviale) Systeme. Triviale Systeme beruhen im Gegensatz zu komplexen Systemen auf einfachen »Wenn-Dann-Regeln«, d.h., solche Systeme reagieren auf eine bestimmte Eingabe immer mit der gleichen vorhersagbaren Ausgabe (siehe **Bild 3.3**). Bei komplexen Systemen ist das in der Regel nicht der Fall. Auf eine gleich bleibende Eingabe können

unterschiedliche Reaktionen erfolgen [vgl. Ulrich und Probst, 1995]. Nach diesem Verständnis stellen Unternehmen eindeutig komplexe Systeme dar. Sie sind auf Basis der Unternehmensziele grundsätzlich zweckorientiert und nicht trivial, weil beispielsweise die Lieferterminezusage je nach Systemzustand (z.B. Über- oder Unterlast) unterschiedlich ausfallen kann.

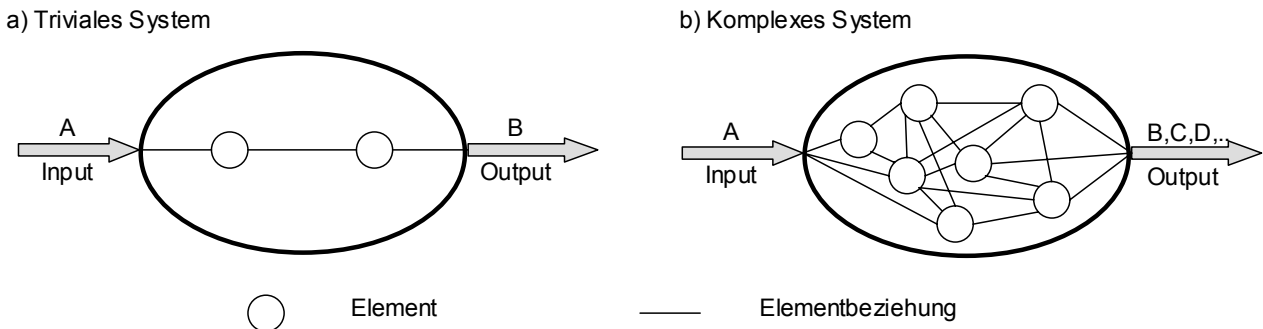


Bild 3.3 Triviales und komplexes System [nach Vollmer]

Die kleinsten Einheiten eines betrachteten Systems werden von den Elementen gebildet, die jedoch ihrerseits wieder hoch komplexe Systeme sein können (siehe **Bild 3.4**). So kann ein Unternehmen aus vielen Abteilungen, wie z.B. Fertigung und Montage etc., bestehen, die aus Unternehmenssicht als Elemente gelten können. Allerdings weisen die einzelnen Elemente für sich betrachtet unter Umständen eine komplexere Struktur auf als das übergeordnete System selbst.

Ein besonders wichtiges Charakteristikum für Systeme ist, dass man nicht allein aus den Eigenschaften der Elemente auf die Eigenschaften des gesamten Systems schließen kann, sondern dass sich die Systemeigenschaften vielmehr aus der Art und Weise der Vernetzung der Elemente ergeben. So können sich innerhalb von Systemen Subsysteme dadurch bilden, dass eine Menge von Elementen untereinander stärker vernetzt ist als mit den übrigen Elementen des Gesamtsystems. Die Voraussetzung eines umfassenden Systemverständnisses ist also eine ganzheitliche Betrachtungsweise, die auch die relevante Umwelt des betrachteten Systems mitberücksichtigt [Vester, 1991]. Allgemein versteht man unter Systemumwelt all das, was nicht zum System selbst gehört; die Spezifizierung relevante Umwelt beschränkt die gesamte Umwelt auf die Teile, die einen direkten Einfluss auf das System haben. In diesem Sinne kann die Montage auch als Subsystem eines Unternehmens verstanden werden, da die Elemente der Montage untereinander stärker verknüpft sind als beispielsweise mit den Elementen der Teilefertigung. Alle Elemente des Gesamtsystems, die nicht zum Subsystem Montage gehören, sind Teil der relevanten Umwelt des Subsystems.

Eine Typisierung von Systemen kann anhand der Art und Weise vorgenommen werden, wie die Systeme mit der Umwelt interagieren. Grundsätzlich differenziert man dabei zwischen offenen und geschlossenen Systemen. Geschlossene Systeme haben eher theoretischen Charakter, da sie keinerlei Beziehungen über die Systemgrenzen hinaus haben. Dagegen tauschen offene Systeme Energie, Materie und Informationen mit ihrer Umwelt aus. Deshalb ist es bei offenen Systemen schwieriger, die Systemgrenzen exakt zu definieren. Systemgrenzen werden häufig aufgrund der Intensität der Vernetzung einzelner Elemente oder nach dem Sinn der Betrachtung festgelegt. Dies

führt oft dazu, dass sich je nach Betrachtungsfall unterschiedliche Systemgrenzen ergeben, wie folgendes Beispiel zeigt: Im Falle einer produktionslogistischen Betrachtung kann das Pufferlager, welches die Bereiche Teilefertigung und Montage entkoppelt, mit zur Montage gehören. Es wird vom Montagepersonal betrieben und steht in ständigem Zugriff der Montage. Aus finanz-technischer Sicht ergeben sich andere Systemgrenzen. Aus dieser Perspektive gehört das Lager zur Teilefertigung, weil z.B. die kalkulatorischen Zinskosten des gelagerten Materials bis zur Entnahme durch die Montage auf die Kostenstelle Teilefertigung gebucht werden [Willke, 1991].

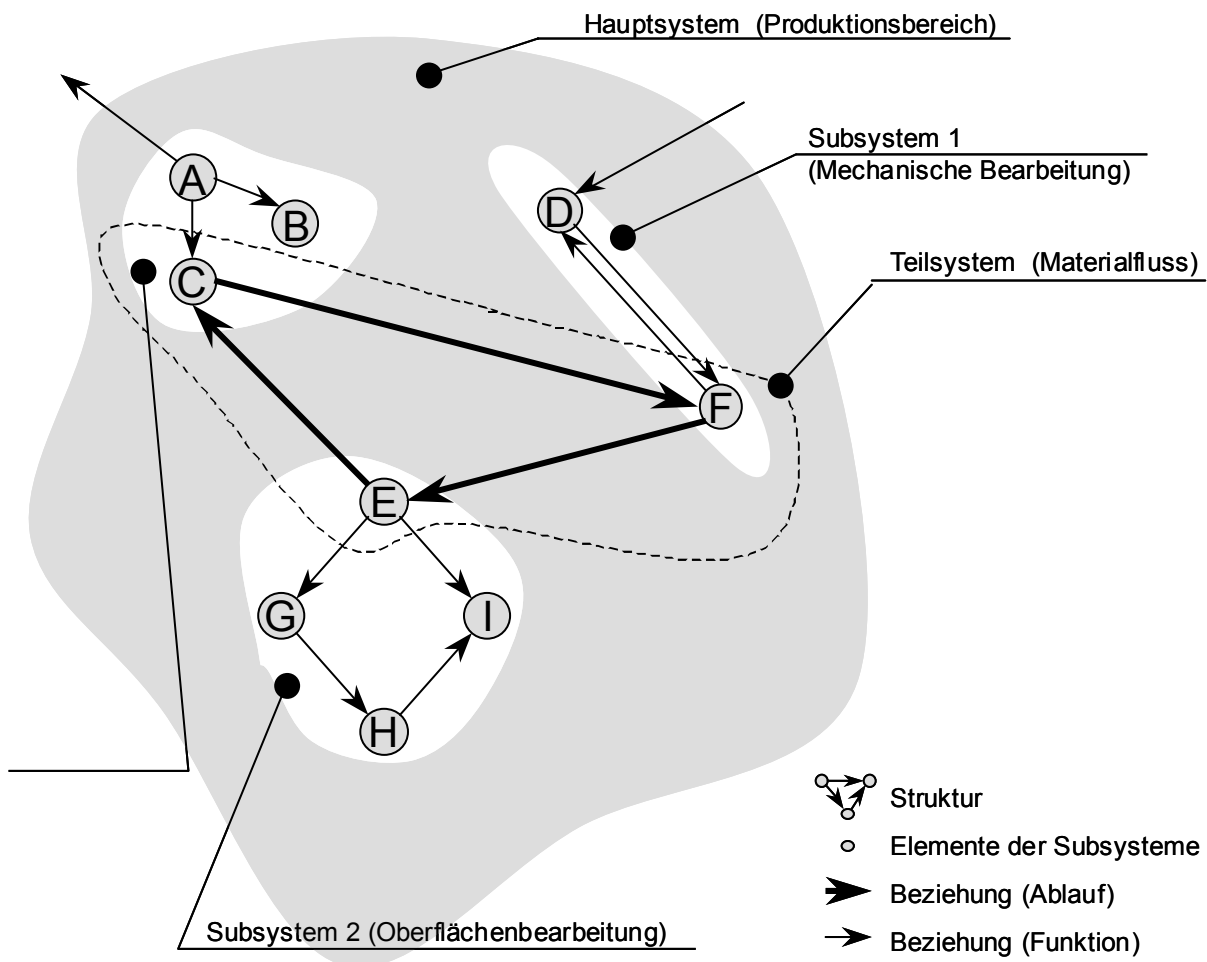


Bild 3.4 Grundbegriffe der Systemdefinition [nach Wiendahl]

Im Rahmen der Systemtheorie werden Systeme in drei Systemarten unterteilt: Ökosysteme, soziale Systeme und technische Systeme (siehe **Tabelle 3.2**). Die Systemarten unterscheiden sich jeweils in ihren Bestandteilen, ihrem Sinn und ihrer Funktionsweise.

Vor dieser Klassifizierung müssen Unternehmen und auch deren Abteilungen als soziale Systeme verstanden werden. Im Gegensatz zu technischen Systemen umfassen sie Lebewesen und sind nicht auf natürliche Art und Weise gewachsen. Vielmehr sind Unternehmen Konstrukte, die durch menschliches Handeln entstanden und von menschlichen Absichten geprägt sind; sie können sich selbst beurteilen, auf geänderte Umweltbedingungen reagieren und sich ggf. aus sich selbst heraus verändern.

Tabelle 3.2 Klassifizierung von Systemen [nach Vollmer]

	Ökosysteme	Soziale Systeme	Technische Systeme
Bestandteile	Natürliche Lebewesen und Stoffe	Menschen und Bauteile	Konstruierte Bauteile
Sinn	Natürlicher Selbstwert	Veränderliche gesellschaftliche Zwecke	Spezifische menschliche Absichten
Funktionsweise	Natürliche Wirkungskreisläufe	Gestaltbare Kreisläufe menschlichen Zusammenwirkens	Zielgerichtet konstruierte Mechanismen
Beispiel	Menschen, Tiere	Unternehmen, Orchester	Maschinen, Computer

Im Folgenden wird das soziale System »Montage« anhand der Eigenschaften »Vernetztheit«, »Komplexität« und »Offenheit« näher erörtert und gegenüber dem Gesamtsystem Unternehmen abgegrenzt.

3.3.1 Offenheit - Nahtstellen zum Gesamtsystem

Offene Systeme sind dadurch charakterisiert, dass sie mit ihrer Umwelt Materie, Informationen und Energie austauschen. Zur Entwicklung eines Auftragsmanagements ist der Energieaustausch nicht von Belang, wohl aber der Austausch von Materie und Informationen. Einzig durch den gezielten Austausch von Materie in Form von Rohmaterial als Input und fertigen Produkten als Output kann die Montage ihren Systemzweck erfüllen. Dabei ist weniger die Tatsache dessen an sich entscheidend, sondern vielmehr die Art und Weise des Austausches. Eine verspätete Anlieferung von Rohmaterial führt zu einer Beschleunigung bestimmter Aufträge zu Lasten anderer oder gar zu einer Überschreitung des zugesagten Liefertermins. Eine verfrühte Anlieferung oder eine Anlieferung in zu großer Menge macht eine Einlagerung oder eine geänderte Kommissionierstrategie notwendig.

Der Austausch von Informationen in Form von Montageaufträgen bzw. Rückmeldungen über deren Fortschritt dient der Planung und der Beurteilung der aktuellen Situation. Auf diese Weise können Systemziele definiert, die Umsetzung beurteilt und ggf. Maßnahmen zur Systemanpassung vorgenommen werden.

Auf Basis dieser Wirkungsbeziehungen zwischen dem System und seiner Umwelt sollen die physikalischen und informationstechnischen Systemgrenzen der zugrunde liegenden Montage definiert werden. Die physikalischen Systemgrenzen umfassen demnach alle Ressourcen wie Arbeitssysteme, Personal, Betriebsmittel, Material, aber auch Läger, die zur Erstellung der fertigen Produkte benötigt werden. Die informationstechnischen Systemgrenzen umfassen gewissermaßen alle datentechnischen Operationen, die im Rahmen der Produktionssteuerung und der Erweiterungen durch das Auftragsmanagement anfallen, sowie die benötigten Daten selbst. Daraus folgt: Kurz- bis mittelfristig und im Sinne des entwickelten Auftragsmanagements „überschreiten“ nur

Rohmaterial, fertige Produkte, Montageaufträge und die entsprechenden Rückmeldungen die Systemgrenzen. Das Überschreiten der Systemgrenzen von Halbfertigprodukten, z.B. zum Zwecke der Fremdvergabe einzelner Arbeitsvorgänge, ist nicht vorgesehen. Längerfristig kann es natürlich auch zu wesentlich intensiveren Ein- bzw. Rückwirkungen vom oder auf das Gesamtsystem Unternehmen kommen. So kann aufgrund einer andauernden Überlastsituation in der Montage (Rückwirkung auf das Gesamtsystem) vom Unternehmen eine zusätzliche Montagestation beschafft werden (Einwirkung auf das Subsystem).

Selbstverständlich überschreitet in der Praxis auch das Personal die Systemgrenzen, es soll im Rahmen dieser Arbeit allerdings als ein kapazitäts- bzw. flexibilitätsbegrenzender Faktor der Montage und der Arbeitssysteme verstanden werden.

3.3.2 Vernetztheit

Unter dem Stichwort Vernetztheit werden die Wirkzusammenhänge zwischen den Systemelementen inhaltlich präzise beschrieben. Dies ist im Allgemeinen sehr anspruchsvoll, weil es nur in trivialen Systemen einfache »Wenn-Dann-Wirkzusammenhänge« gibt. Diese Systeme sind leicht zu begreifen, weil Ursache und Wirkung sowohl zeitlich als auch räumlich in der Regel dicht beieinander liegen [Forrester, 1969].

In seinem Buch »Urban Dynamics« publizierte Forrester die Ergebnisse eines systemdynamischen Stadtentwicklungsmodells. Die simulativ gewonnenen Aussagen, welche seiner Meinung nach für alle komplexen Systeme gelten, hat er in sieben Punkten zusammengefasst [Forrester, 1969]:

»Complex systems have many important behavior characteristics that we must understand if we expect to design systems with better behavior. Complex systems: (1) are counterintuitive; (2) are remarkably insensitive to changes in many system parameters; (3) stubbornly resist policy changes; (4) contain influential pressure points, often in unexpected places, from which forces will radiate to change system balance; (5) counteract and compensate for externally applied corrective efforts by reducing the corresponding internally generated action (the corrective program is largely absorbed in replacing lost internal action); (6) often react to a policy change in the long run opposite to how they react in the short run; (7) tend toward low performance.«

Die angeführten Punkte sollen hier nicht im Einzelnen diskutiert werden, sondern ihre Gesamtaussage soll deutlich machen, dass die Wirkzusammenhänge in komplexen Systemen in der Regel nicht als lineare Kausalketten zwischen den Elementen verstanden werden können.

Mit dem Wirkungsdiagramm (siehe **Bild 3.5**) wurde eine leistungsfähige Darstellungsform der Wirkzusammenhänge in komplexen Systemen entwickelt [Ulrich und Probst, 1995]. Dieses Diagramm mit der vielleicht treffenderen englischen Bezeichnung »Causal loop diagram« zeigt, dass die Beziehungen zwischen den Elementen im Allgemeinen gerichtet sind, dass es Wechselwirkungen in Form von Kreisläufen geben kann und dass bestimmte Beziehungen sowohl erwünschte als auch unerwünschte Nebenwirkungen haben können. In diesem Zusammenhang unterscheidet man zwischen gleich gerichteten (im Sinne von: je mehr Ursache, desto mehr

Wirkung) und entgegengerichteten Beziehungen, wobei insbesondere in sozialen Systemen auch Beziehungen existieren können, die sich einer mathematischen Beschreibung, z.B. durch persönliches irrationales Verhalten eines Mitarbeiters, entziehen.

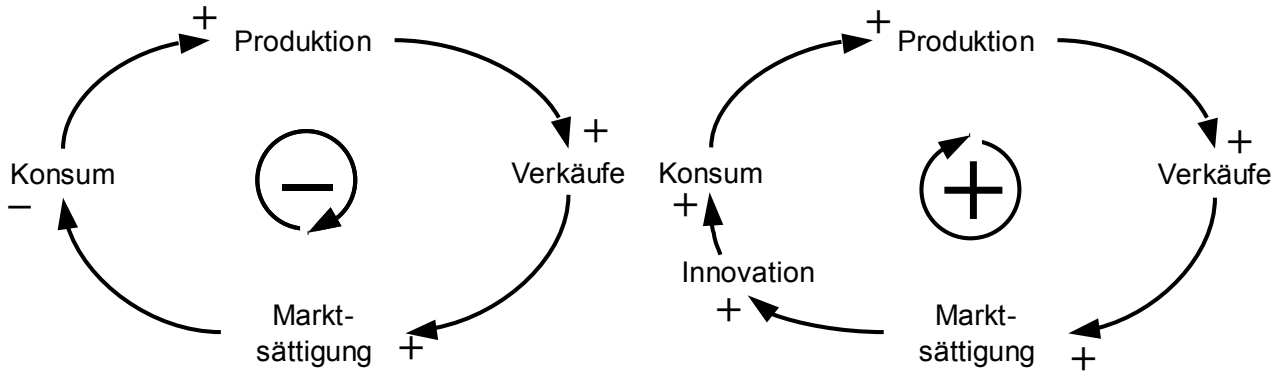


Bild 3.5 Wirkungsdiagramme [nach Ulrich und Probst]

Durch die Wechsel- und Nebenwirkungen entstehen vernetzte Strukturen, die charakteristisch für komplexe Systeme sind. Es ergeben sich Rückkopplungskreisläufe, die von entscheidender Bedeutung für das Systemverhalten sind. Die Stabilität eines Systems hängt insbesondere von der Art der Rückkopplungskreisläufe ab, da es sowohl verstärkende bzw. eskalierende als auch dämpfende bzw. stabilisierende Kreisläufe gibt. Als negatives Beispiel aus der Produktion sei hier der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung genannt (siehe **Bild 3.6**).

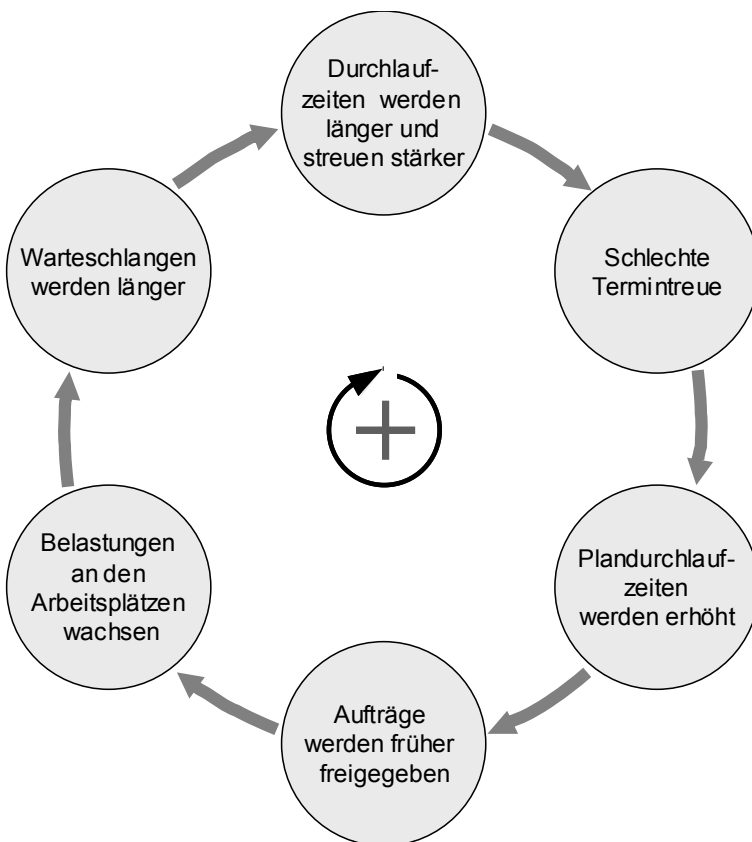


Bild 3.6 Fehlerkreis der Fertigungssteuerung (in Anl. an Kettner)

Aus systemtechnischer Betrachtung heraus sind Produktionsunternehmen und deren Abteilungen dementsprechend als Netzwerke zu verstehen, deren Elemente linear, aber auch zirkulär verbunden sein können. Die Wirkungsverläufe sind aufgrund ihrer Vielfalt kaum vorherzusagen und unter Umständen liegen Eingabe und Reaktion des Systems zeitlich weit auseinander. Im Extremfall kann sogar die kurzfristige Reaktion eine entgegengesetzte Ausprägung haben wie die langfristige. Eine Beziehung zwischen den Elementen darf jedoch nicht mit den realen Interaktionen gleichgesetzt werden, sondern das tatsächliche Interaktionsmuster hängt davon ab, welche der Beziehungen aktiviert werden.

3.3.3 Komplexität

Die Frage, ob und wann ein System komplex ist, lässt sich in letzter Konsequenz nicht eindeutig beantworten [Gell-Mann, 1994]. Dies liegt zum einen an der jeweiligen Perspektive des Betrachters: So ist z.B. die Montage aus Sicht des übergeordneten Konzerns nur eine Kostenstelle, die anhand einiger weniger Kennzahlen beurteilt wird; dem verantwortlichen Fertigungssteuerer erscheint sie dagegen äußerst komplex. Zum anderen wird der Komplexitätsbegriff in der Literatur nicht eindeutig diskutiert. Willke beschreibt die Systemkomplexität anhand verschiedener Aspekte wie sachliche, zeitliche, operative Komplexität etc., die von Ulrich und Probst sehr prägnant als *»die Fähigkeit eines Systems, in einer gegebenen Zeitspanne eine große Zahl von verschiedenen Zuständen annehmen zu können«* zusammengefasst werden [Ulrich und Probst, 1995; Willke, 1991]. In Anlehnung an Luhmann kann man Komplexität anhand der Parameter *Anzahl der Elemente*, *Anzahl der möglichen Beziehungen zwischen den Elementen* und der *Verschiedenartigkeit der Beziehungen* beurteilen, wobei insbesondere der zeitliche Aspekt, also die dynamische Entwicklung der Parameter, von großer Bedeutung ist [Luhmann, 1980].

Im Bezug auf die vorliegende Montage soll Komplexität nun keineswegs als negativ verstanden werden. Sie ist Voraussetzung für die Fähigkeit einer optimalen Einstellung auf die Umweltkomplexität. Ashby hat diese Beziehung der Systeme zueinander in sein berühmtes *»law of requisite variety«* gefasst [Ashby, 1956]. Das Problem liegt also einzig in der Beherrschung der Komplexität, wobei „der Schlüssel zum Erfolg“ normalerweise nicht in einer Verringerung der Komplexität liegt. Eine Verringerung der Komplexität hätte bestenfalls kurzfristige Vorteile und ginge zu Lasten einer langfristigen Stabilität [Fricker und Luczak, 1997].

Um die Komplexität beherrschen zu können, müssen die verantwortlichen montageinternen Komplexitätstreiber bestimmt werden. Anschließend gilt es, die wichtigsten zu ermitteln und festzustellen, ob und wie sie sich beeinflussen lassen. In Anlehnung an das Auftragsmanagement, das in Planungs- und Durchführungsebene gegliedert ist, sollen auch hier die Planungs- und die Durchführungskomplexität getrennt betrachtet werden. Die Treiber der Planungskomplexität sind in **Tabelle 3.3** mit ihren Ausprägungen und den Möglichkeiten zur Beeinflussung dargestellt. Es wird deutlich, dass es sich aufgrund der vielen Systemelemente und der enormen Vielfalt der möglichen Beziehungen zwischen den Elementen um ein extrem komplexes Planungsproblem handelt. Hinzu kommt, dass die Beeinflussbarkeit der einzelnen Komplexitätstreiber eher gering ist.

Tabelle 3.3 Treiber der Planungskomplexität

Komplexitätstreiber	Ausprägung	Beeinflussbar
Anzahl Produkte	>200	Nein
Kapazität der Montagestationen	1 bis 3 Schichten pro BKT	Ja
Alternative Montagestationen je Arbeitsvorgang	1 bis 14	Nicht im Rahmen des Auftragsmanagements
Anzahl Arbeitsvorgänge je Auftrag	3 bis 7	Nicht im Rahmen des Auftragsmanagements
Benötigte Betriebsmittel je Arbeitsvorgang	0 bis 1	Nein
Anzahl alternativ verfügbarer Betriebsmittel	1 bis 4	Nicht im Rahmen des Auftragsmanagements

Zur Bewältigung der Planungskomplexität werden nun Methoden benötigt, die ordnend auf die mannigfaltigen Planungsalternativen wirken. Diese Methoden müssen die möglichen Beziehungen hinsichtlich der Montageziele auf sinnvolle Beziehungen reduzieren. Das ist nicht als Reduzierung der Komplexität im Allgemeinen zu verstehen, da die Menge der sinnvollen Alternativen mit jedem Planungszyklus erneut bestimmt werden soll und somit situationsspezifisch angepasst wird. Einen wertvollen Beitrag dazu liefert die Belegungsplanung von Evers, die u.a. eine logistische Klassifizierung aller Montageaufträge ermöglicht. Mit Hilfe dieser Klassifizierung unterstützt Evers einen gerichteten Materialfluss sowie eine gleichmäßige Anlagenauslastung [Evers, 2002].

Die Durchführungskomplexität basiert auf der Entscheidungsautonomie der Produktionsagenten, die anhand ihrer individuellen Produktionsziele geeignete Wege suchen, die Planung durchzusetzen. Das Maß der Durchführungskomplexität kann als Resultat der Planung interpretiert werden, da die Summe der geeigneten Wege, also der operativen Handlungsalternativen, durch die Größe des zugestandenen Entscheidungsraumes festgelegt wird. In Kapitel 3.4 wird gezeigt, dass eine Beschneidung des Entscheidungsraumes in Form von planerischer Festlegung auf bestimmte Alternativen letztendlich das Gesamtsystem inflexibel macht. Deshalb müssen immer alle Alternativen offen gehalten werden. Allerdings sollen die Produktionsagenten in die Lage versetzt werden, die verschiedenen Alternativen im Hinblick auf ihre individuellen Ziele bewerten zu können (siehe Kapitel 5).

3.3.4 Fazit

Produktionsunternehmen und auch ihre Abteilungen sind offene, stark vernetzte und komplexe Systeme. Sie sind nicht von außen steuerbar und die Systemantwort auf äußere Einflüsse kann nicht vorhergesagt werden. Die interne Struktur ist nicht statisch, sondern Beziehungen zwischen den Systemelementen werden je nach Bedarf auf- und wieder abgebaut. Der Versuch, eine Struktur von außen aufzuzwingen, führt unweigerlich zu Leistungsverlusten des Systems hinsichtlich des Systemzwecks. Nur durch eine entsprechende innere Komplexität kann auf die (geforderte) Umweltkomplexität adäquat reagiert werden.

Aus diesen Gründen muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Montage von innen zu steuern und die Entscheidungsprobleme zu dezentralisieren, um die Komplexität zu beherrschen, aber nicht unzulässig zu reduzieren. Einen vielversprechenden Lösungsansatz dazu stellen agentenbasierte Systeme dar, die in selbstorganisierter Form die benötigten Beziehungen bei Bedarf herstellen und die operativen Handlungsalternativen situationsabhängig auf ihre individuellen Möglichkeiten reduzieren (siehe Kapitel 4).

3.4 Flexibilität

Flexibilität bezeichnet aus produktionswirtschaftlicher Sicht die Fähigkeit von Produktionssystemen, sich an wechselnde Produktionssituationen anzupassen [Zelewski, 1998]. Aus einem zeitlichen Kontext heraus kann man Flexibilität in die Bereiche strategische, taktische und operative Flexibilität gliedern. Im Rahmen des entwickelten Auftragsmanagements soll allerdings nur die operative bzw. kurzfristige Flexibilität betrachtet werden. Unter dem Begriff Produktionssystem (hier: Montagesystem) versteht Zelewski sowohl die realen Produktionseinheiten wie Arbeitssysteme, Material etc. als auch die Planung und Steuerung, die er als Prozesskoordination subsummiert [Zelewski, 1998]. Wie im vorigen Kapitel beschrieben wurde, sind die realen Produktionseinheiten kurzfristig kaum zu beeinflussen. Deshalb muss die nötige Flexibilität von der Prozesskoordination sichergestellt werden.

Die wechselnden Produktionssituationen entstehen in Montagesystemen durch Änderungen bei den zu produzierenden Produkten, den Produktionsanforderungen sowie den Produktionsbedingungen [vgl. Evers, 2002; vgl. Schmidt, 1992]. Dabei spielt es keine Rolle, ob die jeweiligen Einflussgrößen aus der Umwelt des Montagesystems stammen, wie z.B. bei fehlendem Rohmaterial, oder ob die Variation der Produktionssituation ihren Ursprung beispielsweise in einer Maschinenstörung im Montagesystem selbst hat.

Die verschiedenen Einflussgrößen bedingen unterschiedliche Arten der Flexibilität. Eine grundsätzliche Klassifizierung in der Multiressourcen–Montage gibt Evers, indem er quantitative, qualitative und zeitliche Flexibilitätsarten unterscheidet [Evers, 2002; in Anl. an Baumann, 1996; in Anl. an Dieckhoff, 1995; in Anl. an Stecke und Raman, 1995]. Im Folgenden sollen nur die Arten näher betrachtet werden, die aus operativer Sicht ausgeschöpft werden können.

Die quantitative Flexibilität bezieht sich auf veränderte Produktionsmengen, die sowohl eine geänderte Artikelvielfalt als auch eine Änderung der absoluten Stückzahl beinhalten können. Kurzfristig kann hierbei allerdings nur durch eine Kapazitätsanpassung auf geänderte absolute Stückzahlen reagiert werden. Der Umgang mit einer großen Artikelvielfalt, die parallel bearbeitet werden soll, ist eher eine Fragestellung der langfristigen Flexibilitätsplanung.

Im gleichen Kontext ist auch die qualitative Flexibilität zu sehen, die durch Produktumstellungen, neue Werkstoffe oder neue Anlagen erforderlich wird. Denn zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit müssen die Montagestationen mit einem maximalen Grad an Flexibilität ausgestattet werden, um mit wenig Aufwand auf neue Montagespektren oder gar neue Produkte umgestellt werden zu können. Diese Stations- und

Produktflexibilität hat einen signifikanten Einfluss auf die kurzfristige Durchlaufflexibilität, welche die Reaktionsfähigkeit bei Ressourcenausfällen beschreibt. Sie wird ermöglicht durch sich ersetzende Montageressourcen und vorhandene Alternativarbeitspläne, so dass ein Arbeitsvorgang auf mehr als einer Station durchgeführt werden kann.

Der kurzfristige Aspekt der zeitlichen Flexibilität ist die Unabhängigkeit der Arbeitsvorgänge innerhalb des Montagesystems. Die so genannte Arbeitsplanflexibilität bezieht sich auf die Möglichkeit, einen Auftrag nach mehreren technologischen Vorgangsfolgen zu montieren. Gibt es einen derartigen Freiheitsgrad, so kann im Systembetrieb abhängig vom aktuellen Systemzustand der nächste Arbeitsvorgang ausgewählt werden.

Das prinzipielle Vorhandensein und die Kenntnis der verschiedenen Flexibilitäten sind jedoch nur die Voraussetzung zur Aufdeckung von Flexibilitätpotenzialen. Um eine optimale Ausnutzung der Flexibilität im Montagebetrieb zu erreichen, nennt Zelewski zwei Koordinierungsprinzipien [Zelewski, 1998]:

- Das *Prinzip der größtmöglichen Auswahlfreiheit* (engl. »*Principle of Opportunism*«) verlangt, alle Freiheitsgrade, die in der aktuellen Produktionssituation zur Verfügung stehen, bei der Entscheidungsfindung zur Ausführung von Montageprozessen zu berücksichtigen [vgl. Fox, 1987; Fox und Kempf, 1985].
- Das *Prinzip der kleinstmöglichen Entscheidungsbindung* (engl. »*Principle of Least Commitment*«) fordert, alle vorzeitigen Festlegungen im Planungsprozess zu unterlassen, die Entscheidungen über Anpassungshandlungen in erst später erwarteten Produktionssituationen unnötig präjudizieren würden [vgl. Fox, 1987; Fox und Kempf, 1985].

Das erstgenannte Prinzip erscheint selbstverständlich und beinahe trivial. Es bedingt jedoch, dass der Entscheidungsraum nicht durch eine unzulässige Komplexitätsreduzierung eingeschränkt wird (siehe Kapitel 3.3.3) und dass eine vollständige Kenntnis aller Freiheitsgrade vorliegt. Beide Notwendigkeiten sind in der Praxis häufig nicht gegeben.

Ein agentenbasiertes Auftragsmanagement scheint geradezu prädestiniert zu sein, die Forderungen des zweiten Prinzips zu erfüllen. Die ereignisorientierte situationsabhängige Entscheidungsfindung ist schließlich eine der wesentlichen Eigenschaften von Agenten (siehe Kapitel 4). Die Forderung, *keine vorzeitigen Festlegungen zu präjudizieren*, heißt für die Planung aber auch, so weit als möglich unscharf zu planen. Welcher Auftrag tatsächlich an welcher Station montiert wird, hängt von den zum spezifischen Zeitpunkt vorhandenen Ressourcen wie freien Stationskapazitäten, verfügbaren Betriebsmitteln etc. ab. Die Wahlfreiheit zwischen allen geeigneten Ressourcen muss also unbedingt bis zur konkreten Produktionssituation bestehen bleiben. Ein vorzeitiges Reservieren ist demzufolge nicht zulässig.

4 Agententheorie und Multiagentensysteme

Die Wurzeln der Agententheorie liegen im Forschungsgebiet der »Verteilten Künstlichen Intelligenz« (VKI; engl. »Distributed Artificial Intelligence«, DAI), das seinerseits einen Ableger aus dem Wissensgebiet der »Künstlichen Intelligenz« (KI) darstellt [Martial, 1992]. Der Begriff VKI ist bis heute nicht eindeutig definiert, wenngleich es in der Literatur eine Reihe von Ansätzen dazu gibt [Collinot, 1991; Findler und Sengupta, 1991; Wooldridge und Jennings, 1995; Bond und Gasser, 1988]. Einen guten Überblick über die Teilgebiete und Facetten der VKI findet man bei Müller [Müller, 1993]. Im Rahmen dieser Arbeit wird vorrangig auf die Definition von Bond und Gasser Bezug genommen werden, welche die VKI in die konzeptionellen Hauptgebiete »Verteiltes Problemlösen« und »Multiagentensysteme« gliedert [Bond und Gasser, 1988]:

»... Distributed Problem Solving considers how the work of solving a particular problem can be divided among the number of modules, or nodes, that cooperate at the level of dividing and sharing knowledge about the problem and about the developing solution.«

»... Multiagent Systems, research is concerned with coordinating intelligent behavior among a collection of (possibly pre-existing) autonomous intelligent agents how they coordinate their knowledge, goals, skills, and plans jointly to take action or solve problems.«

Diese Unterteilung soll jedoch keinesfalls als harte Abgrenzung der beiden Hauptgebiete gegeneinander verstanden werden. Die Grenzen sind durchaus fließend und *Multiagentensysteme* können unter Umständen einen spezifischen Ansatz des *Verteilten Problemlösens* darstellen [vgl. Corsten und Gössinger, 1997].

Bestandteil aller Definitionsansätze ist das Konzept der Verteilung von Intelligenz auf eine Agentengesellschaft, in der die Agenten bis zu einem gewissen Grad autonom handeln. Dahinter verbirgt sich das Ziel, komplexe Probleme von mehreren Experten parallel bearbeiten zu lassen, um auf diese Weise Synergieeffekte bzgl. der Dauer zur Lösungsfindung und der Qualität der Lösung zu erreichen [Müller, 1993]. Dies lässt auf ein hohes Nutzenpotenzial im Hinblick auf Aufgaben aus dem Bereich Produktionsplanung und –steuerung schließen. Daher sollen Agentensysteme als Lösungsansatz für das operative Auftragsmanagement in der Multiressourcen–Montage dienen.

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften und Fähigkeiten von Agenten insbesondere vor dem Hintergrund einer softwaretechnischen Realisierung erläutert. Daran anschließend wird das Zusammenwirken mehrerer Agenten in Multiagentensystemen beschrieben, wobei schwerpunktmäßig die notwendige Kommunikation und Koordination verschiedener Systemarchitekturen diskutiert werden. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden existierende agentenbasierte Ansätze aus dem Umfeld der Produktionsplanung und –steuerung vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in Produktionsunternehmen untersucht.

4.1 Agenten – Eigenschaften und Aufbau

Im täglichen Leben begegnen uns Agenten in vielerlei Gestalt, angefangen beim Versicherungsagenten oder Rechtsanwalt, den politischen Agenten bis hin zu so genannten Web-Agenten (engl. web = Netz), die uns bei der Suche im Internet unterstützen. Sie alle handeln (lat. agens = handelnd) im Auftrage bzw. im Interesse Dritter [Meyers, 1995]. Agenten stellen gegenüber ihrer Umwelt, mit der sie in geeigneter Weise kommunizieren und interagieren können, geschlossene Einheiten dar und nutzen ihr Wissen zielführend im Sinne der Aufgabenstellung [vgl. Bechtolsheim, 1993]. Demnach können Agenten in Form von natürlichen Personen, abstrakten Konstrukten oder auch von Software existieren. In der folgenden Beschreibung wird von einer softwaretechnischen Realisierung ausgegangen.

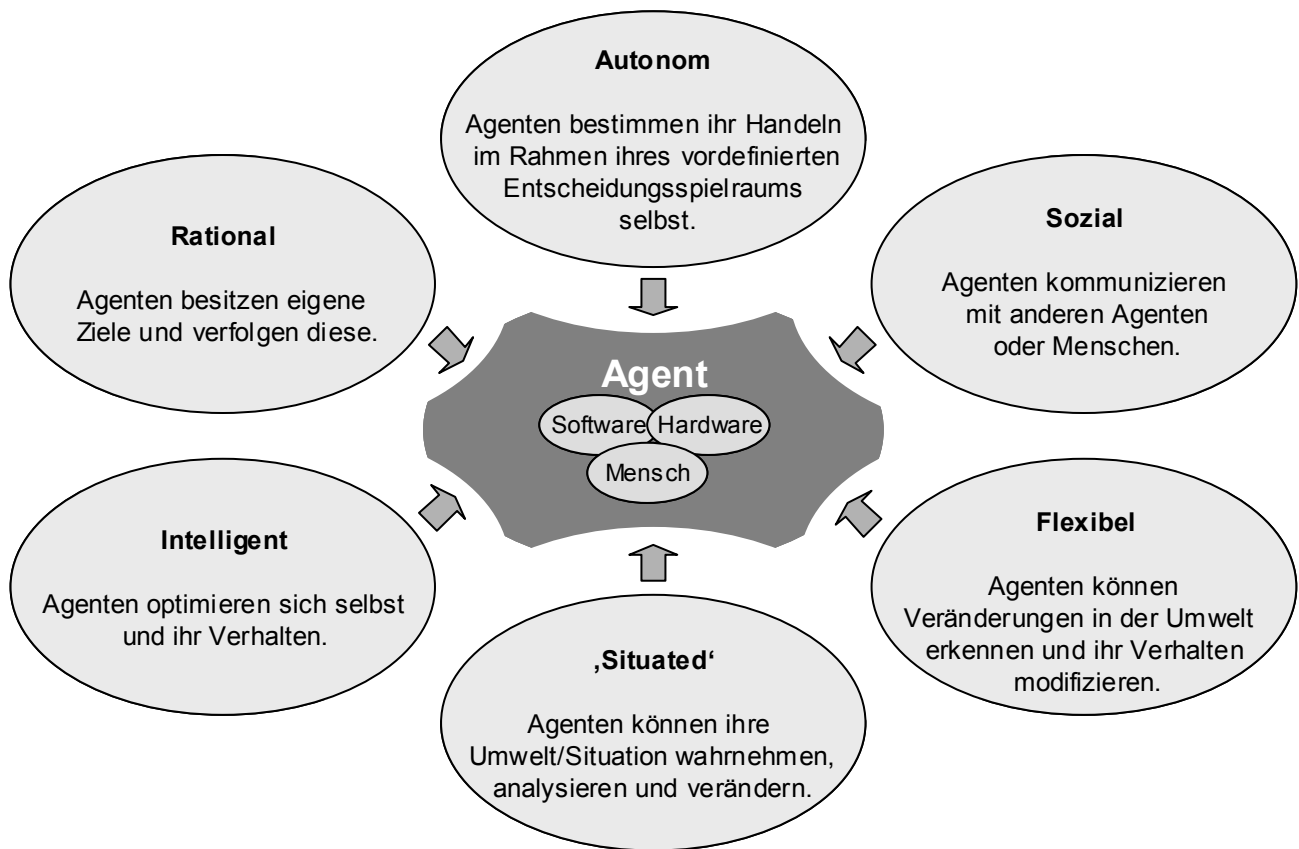


Bild 4.1 Eigenschaften von Agenten [nach Vollmer]

Der Aufbau von Agenten liegt weitestgehend im Ermessen des jeweiligen Entwicklers und ist eng an den Verwendungszweck geknüpft. Die Bandbreite reicht hier von gänzlich reaktiven bis hin zu deliberativen Agenten. Erstere agieren nach einem einfachen Reiz-Antwort-Schema, während Letztere über Wissen sowie Ziele verfügen, um ein situationsspezifisches Verhalten zu verwirklichen. Nachfolgend sind einige charakteristische Eigenschaften aufgeführt (siehe **Bild 4.1**), die in den verschiedenen Aufbaustrukturen von Agenten mehr oder minder Anwendung finden:

- *'Situating'*: Müller übersetzt das sehr treffend mit »in eine Situation geworfen« und betont dadurch den dynamischen Aspekt der Agentenumwelt [Müller, 1993]. Ein Agent muss über Sensoren und Aktoren verfügen, um seine Umwelt wahrzunehmen und diese ggf. durch

Aktionen zu verändern. Diese Aktionen können einem vordefinierten, festen Skript entsprechen (Reaktive Agenten) oder durch die Analyse der Situation (Deliberative Agenten), in der sich der Agent befindet, bestimmt werden. In zeitkritischen Umgebungen, z.B. in Echtzeitsystemen, müssen Agenten ihre Zeitaufwände für »Denken« und »Handeln« gegeneinander abwägen. D.h., bei komplexen Problemen muss man sich ggf. mit einer Abschätzung zufrieden geben, wenn eine genaue Berechnung in der geforderten Zeit nicht möglich ist [Rao und Georgeff, 1992].

- *Flexibel*: Ein Agent lebt in seiner Umwelt und muss mit den Änderungen, die er selbst und/oder andere verursacht haben, zurechtkommen. Ein deliberativer Agent kann Veränderungen in seiner Umwelt erkennen und sein Verhalten rechtzeitig modifizieren. Dies setzt eine Flexibilität im Verhalten voraus.
- *Autonom*: Der Agent ist in der Lage, sein Handeln im Rahmen seines vordefinierten Entscheidungsspielraumes selbst zu bestimmen. Allerdings ist umstritten, was das genau heißt bzw. wie es umgesetzt werden kann. Einige Autoren bezeichnen einen Agenten nur dann als autonom, wenn sein Verhalten durch seine eigene Erfahrung bestimmt ist. Andere bezeichnen einen Agenten schon als autonom, wenn er ohne oder nur mit einem geringen Eingreifen eines Menschen (oder anderer Agenten) seine Ziele erfüllen kann [Klügl, 2001; vgl. Castelfranchi und Conte, 1996]. Dieser Arbeit liegt letztere Auffassung zugrunde.
- *Sozial*: »Wann ist ein Agent als sozial zu bezeichnen?« Diese Frage wird in der einschlägigen Literatur extrem divergent diskutiert. Manche Autoren fordern, Agenten nur dann als sozial zu beschreiben, wenn sie sich ihrer sozialen Beziehungen bewusst sind [Carley und Nevell, 1994]. Andere haben die Auffassung, dass verteilte interagierende Agenten per se sozial sind [vgl. Müller, 1993]. Für die vorliegende Arbeit spielt eine genaue Definition keine Rolle, daher genügt die Feststellung, dass Agenten die Fähigkeit besitzen müssen, mit anderen zu kommunizieren.
- *Rational*: Wenn das Agentensystem ein sinnvolles kohärentes Verhalten zeigen soll, ist es wichtig, dass die einzelnen Agenten Ziele besitzen und diese verfolgen [Klügl, 2001]. Ein Agent kann als rational bezeichnet werden, wenn sein Verhalten immer optimal auf seine Ziele ausgerichtet ist. Rationalität kann auch pro-aktives Verhalten bedingen, d.h., ein Agent reagiert nicht nur auf Umwelteinflüsse, sondern er kann auch selbst die Initiative ergreifen, indem er beispielsweise aufgrund einer internen Motivation neue Aktivitäten anstößt [Wooldridge, 2000; Klügl, 2001].
- *Intelligent*: Der Versuch, Intelligenz im Allgemeinen zu definieren, gestaltet sich als äußerst schwierig und die Ergebnisse sind häufig umstritten. Psychologen sind heute der Ansicht, dass sich Intelligenz aus einer Kombination vieler Fähigkeiten zusammensetzt. Diese definitorischen Schwierigkeiten der natürlichen Welt finden sich auch in der VKI wieder, wobei Minsky das Problem noch viel grundsätzlicher beschreibt, indem er fragt: »How can intelligence emerge from nonintelligence?« [Minsky, 1986]. Deshalb sollte Intelligenz eher durch das Maß an Wissen und der inneren Komplexität der Agenten beschrieben werden. Die

niedrigste Kognitionsebene repräsentieren demnach Agenten ohne eigenes Wissen sowie mit einfachsten internen Strukturen. Am anderen Ende der Skala stehen lernfähige Agenten, die sich selbst und ihr Verhalten optimieren können.

Aus den vorangegangenen Versuchen, charakteristische Merkmale eines Agenten zu präzisieren, zeigt sich, dass es *den* Agenten im Sinne von universeller Gültigkeit nicht gibt. Viele Autoren begegnen dieser Problemstellung, indem sie die Agenten anhand ihrer Fähigkeiten klassifizieren [Corsten und Gössinger, 1997; vgl. Müller, 1993]. Sie unterscheiden dabei folgende Klassen:

- *Primitive Agenten* (reagieren lediglich auf Reize aus der Umwelt)
- *Technische Agenten* (programmgesteuert mit festen Regeln)
- *Technisch-intelligente Agenten* (flexible Reaktion auch auf unvorhergesehene Ereignisse)
- *Kognitive Agenten* (Fähigkeit zur Reflexion und Introspektion)
- *Soziale Agenten* (bewusste Interaktion und Fähigkeit zum Rasonieren)

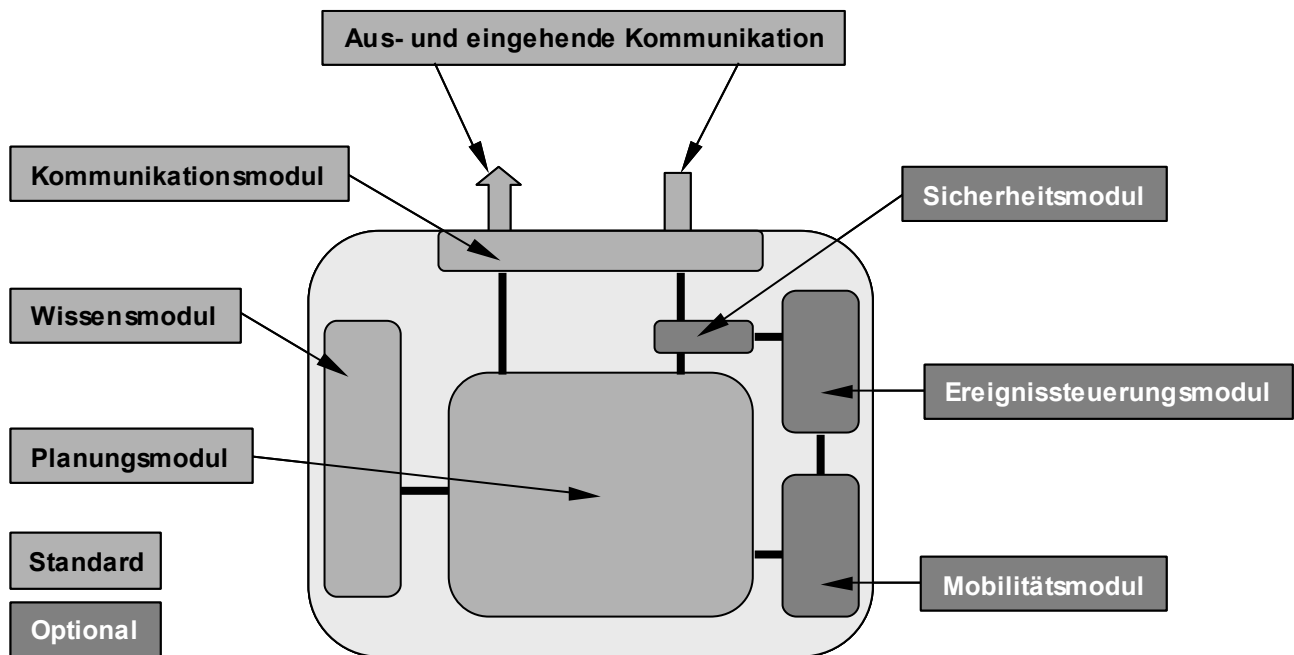


Bild 4.2 Grundstruktur und optionale Erweiterungen eines (Software-)Agenten

Diese Klassifikation macht deutlich, dass die Vielfalt der Agenten im Wesentlichen durch die Komplexität ihres inneren Aufbaus begründet ist. Daher lässt sich zumindest eine sowohl allgemein gültige als auch abstrakte Grundstruktur für Agenten angeben (siehe **Bild 4.2**). Jeder Agent einer Agentengesellschaft muss die Fähigkeit zur Kommunikation und Interaktion haben, wobei im Rahmen dieser formalen Beschreibung keine inhaltliche Trennung zwischen Interaktion und Kommunikation vorgenommen werden soll. Die Informationen werden über Sensoren bzw. Aktoren aus der Umwelt aufgenommen oder an sie abgegeben. Nachdem eine Nachricht eingegangen ist bzw. bevor sie versendet wird, werden diese Informationen in einem Kommunikationsmodul aufbereitet. Die gewonnenen Informationen werden in einem Problemlösungs- oder Planungsmodul mit Hilfe des lokalen Wissens aus dem Wissensmodul interpretiert.

In der Wissensbasis können neben Struktur- auch Erfahrungsdaten gespeichert sein. Nachdem die zur Interpretation notwendigen Methoden ausgeführt worden sind, werden entsprechende Reaktionen geplant und durchgeführt. Je nach Agententyp können die verschiedenen Module unterschiedlich komplex aufgebaut sein. Es können allerdings auch Module fehlen (primitive Agenten benötigen kein Wissensmodul) bzw. weitere Module vorhanden sein, wie beispielsweise ein Mobilitätsmodul bei mobilen Agenten.

4.2 Multiagentensysteme

In Multiagentensystemen werden die Fähigkeiten und das koordinierte Zusammenwirken mehrerer autonomer und ggf. heterogener Agenten dazu genutzt, komplexe Probleme wie beispielsweise die termingerechte Abarbeitung eines Produktionsprogramms zu lösen. Durch die Zerlegung des Gesamtproblems in Teilprobleme entstehen Teilziele, die für die einzelnen Agenten individuelle Ziele, z.B. die Einhaltung unterschiedlicher Auftragsendtermine, zur Folge haben. Zur Erfüllung ihrer Aufgaben oder zur Lösung bestimmter Probleme müssen die Agenten über ein adäquates Maß an Wissen und Problemlösungskompetenz verfügen [vgl. Zelewski, 1993]. Verteiltes Problemlösen kann sowohl in kooperativer als auch in konkurrierender Form erfolgen, wobei die Interaktionen der Agenten im Hinblick auf das Gesamtproblem zielführend koordiniert werden müssen. Aus Kooperation und Koordination resultiert je nach Systemarchitektur ein mehr oder minder intensiver Kommunikationsbedarf, der über standardisierte Prozesse abgewickelt wird. Diese Prozesse können Kommunikation sowohl im wörtlichen Sinne von »*sich gegenseitig verständigen*« umfassen als auch in Form einer einseitigen Informationsaufnahme.

4.2.1 Systemarchitektur und Kommunikation

Die Systemarchitektur von Multiagentensystemen bedingt die Kommunikation sowohl in ihrer Form als auch in Häufigkeit und Intensität. Diese Kausalität soll anhand der beiden grundlegenden Modellansätze, dem »*Shared Memory*« und dem »*Message Passing*«, deutlich gemacht werden. Die Form beschreibt hierbei die Art der Kommunikation. Sie kann von unidirektionalem Informationsaustausch (Daten lesen oder schreiben) bis hin zu aufwendigen Dialogen (z.B. Verhandlungen) reichen, wobei Letztere automatisch mit einer hohen Kommunikationsintensität verbunden sind. Die Intensität kann anhand des bewegten Datenvolumens und der Systembelastung bewertet werden. Die Häufigkeit dokumentiert die Anzahl der notwendigen Kommunikationsvorgänge, wobei jeder Dialog als einzelner Vorgang gewertet wird.

Die verschiedenen Ansätze schließen sich jedoch nicht gegenseitig aus, so dass in praktischen Anwendungen und auch in der vorliegenden Arbeit häufig ein kombinierter Ansatz verfolgt wird (siehe Kapitel 5.6).

Shared Memory (Blackboard-Systeme)

Bei diesem Verfahren greifen alle Agenten lesend und schreibend auf einen gemeinsamen Speicherbereich zu. Dieser informationstechnische Speicherbereich entspricht dem umgangssprachlichen »*Schwarzen Brett*« (engl. *Blackboard*), daher werden Systeme, die nach dem *Shared-*

Memory-Verfahren arbeiten, auch *Blackboard-Systeme* genannt [Newell, 1962]. Kommunikation entsteht dadurch, dass Informationen, die ein Agent auf das zentrale *Blackboard* schreibt, von einem oder mehreren anderen Agenten gelesen werden [Albayrak und Bussmann, 1993].

Der Austausch von Daten erfolgt dabei typischerweise ungerichtet, d.h., im Gegensatz zum *Message Passing* werden die Nachrichten ohne Adressaten auf das *Blackboard* geschrieben. Erst beim Lesen einer Nachricht entscheidet ein Agent, ob diese für ihn von Bedeutung ist bzw. ob er in der Lage ist, für das Teilproblem einen Lösungsbeitrag zu liefern. Der Vorteil ist hier, dass ein Agent den anderen nicht kennen muss. Das erlaubt ein flexibles Hinzufügen und Entfernen von Agenten. Nachteilig wirkt sich die zentrale Datenhaltung dadurch aus, dass jeder Agent das gesamte *Blackboard* ablesen und alle Nachrichten zumindest verstehen können muss [Albayrak und Bussmann, 1993]. Dieses Vorgehen erzeugt viele unnötige Lesevorgänge, durch die Ressourcen gebunden werden. Das kann zu einem zeitlichen Engpass des Systems führen. Weitere Nachteile sind zum einen die geringe Ausfallsicherheit von *Blackboard-Systemen*, da eine Störung zum Ausfall des gesamten Systems führen kann, und zum anderen, dass konventionell nur jeweils ein Agent auf einen Speicherbereich zugreifen kann, was eine parallele Problemlösung verhindert. Zudem ist das Shared-Memory-Verfahren in seiner reinen Form grundsätzlich nicht dialogorientiert.

Um den zuvor genannten Nachteilen entgegenzuwirken, gibt es Weiterentwicklungen des konventionellen *Blackboard-Systems*. Das ist zum einen die Regionalisierung des *Blackboards* und zum anderen die Einführung von Steuerungsmechanismen. Bei der Regionalisierung wird das *Blackboard* in verschiedene Regionen unterteilt, so dass ein Agent nur den ihm zugeteilten Bereich betrachten muss [Albayrak und Bussmann, 1993]. Eine Erweiterung dieser Methode stellt die expertenbasierte Aktivierung der Agenten dar, d.h., die Agenten setzen das System über ihre Fähigkeiten in Kenntnis, so dass es anschließend in der Lage ist, ihnen adäquate Aufgaben zuzuteilen. Insbesondere in komplexen Systemen besteht generell die Möglichkeit, dass sich mehrere Agenten einer Aufgabe zuwenden, dann bedarf es Steuerungsmechanismen, die entscheiden, welcher Agent in Anspruch genommen wird. Die Auswahl kann auf primitiven Regeln wie »*first come - first serve*« erfolgen oder aber auf Basis von Steuerungsmechanismen, die Qualität und Leistungsfähigkeit der Agenten beurteilen können und so den geeignetsten auswählen. Derartige Steuerungsmechanismen müssen jedoch mit einem sehr großen lokalen Wissen ausgestattet sein. Weiter besteht die Gefahr, dass die Flexibilität des Gesamtsystems eingeschränkt wird, weil in solchen Steuerungsmechanismen Strategien über den Problemlösungsablauf festgelegt sein müssen [Albayrak und Bussmann, 1993]. Bei allen Systemerweiterungen ist es nicht mehr ohne weiteres möglich, der Agentengesellschaft Agenten hinzuzufügen oder zu entnehmen, sondern das System muss davon in Kenntnis gesetzt werden, um sich auf die veränderte Situation einstellen zu können.

Message Passing

Ein weiteres häufig verwendetes Kommunikationsverfahren ist das *Message-Passing-Verfahren*. Hier wird eine Nachricht gezielt von einem Sender an einen Empfänger gesendet. Der Sender

formuliert und überträgt die Nachricht, wobei er die Adressaten, an die er Nachrichten übermitteln will, spezifizieren muss. Eine Ausnahme stellt das so genannte »*Broadcasting*« dar, bei dem die Nachricht an alle Agenten in einem Multiagentensystem gesendet wird [Albayrak und Bussmann, 1993]. Ein Kommunikationsablauf beim *Message-Passing-Verfahren* besteht aus einer Reihe solcher Nachrichtenübertragungen, bei denen die Rollen von Sender und Empfänger mehrmals wechseln können. Ein solcher Vorgang wird auch Dialog genannt. Gegenüber dem *Blackboard-Ansatz* verhält sich das *Message-Passing-Verfahren* genau gegensätzlich: Ein Agent muss hier zwar nur diejenigen Informationen bearbeiten, die für ihn bestimmt sind, auf der anderen Seite muss aber jeder Agent alle anderen Agenten kennen, mit denen er zusammenarbeiten kann. Hierdurch entsteht zusätzlicher Aufwand, wenn Agenten zum Agentennetzwerk hinzugefügt oder aus ihm entfernt werden. Denn dies muss den anderen Agenten mitgeteilt werden [Ahrens, 1998]. Ein weiterer Unterschied zum *Shared-Memory-Verfahren* ergibt sich daraus, dass sich Nachrichten auf vorangegangene Nachrichten beziehen können. Das ermöglicht zum einen das Verhandeln zwischen den Agenten, zum anderen erfordert es aber die gesamte Speicherung eines Dialogs.

Das *Message-Passing-Verfahren* bildet die Grundlage des Kontraktnetzprotokolls. Dieses Protokoll eignet sich, im Gegensatz zum dialogfreien *Shared-Memory-Verfahren*, besonders zur verhandlungsbasierten Koordination eines Multiagenten-Systems, weil die Verhandlungsdialoge bei Einigung durch einen Kontrakt abgeschlossen werden [Albayrak und Bussmann, 1993].

Fazit

Beide Verfahren erzeugen in bestimmten Situationen einen unerwünscht hohen Kommunikationsaufwand, sei es durch unnötige Lesevorgänge auf dem *Blackboard* oder durch nicht zielführende Dialoge zwischen einzelnen Agenten. Für die praktische Realisierung von Multiagentensystemen bedeutet dies, dass jeder Anwendungsfall kritisch hinsichtlich des geeigneten Verfahrens hinterfragt werden muss und ggf. heterogene Systeme entwickelt werden müssen. Im Sinne einer operativen Fertigungsauftragsabwicklung lassen sich z.B. die benötigten Stammdaten mit Hilfe der Regionalisierung von den betreffenden Produktionsagenten gezielt auslesen, die Auswahl eines geeigneten Transportmittels kann unter Verwendung eines Steuerungsmechanismus situationspezifisch erfolgen. Dem gegenüber kann eine evtl. verhandlungsbasierte Abstimmung, z.B. über die Bearbeitung eines bestimmten Arbeitsvorgangs zwischen mehreren Produktionsagenten, sehr elegant durch *Message Passing* unterstützt werden.

Die technischen Aspekte der beiden vorgestellten Kommunikationsverfahren sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert werden. Die verwendeten Übertragungsprotokolle zur fehlerfreien Nachrichtenübertragung sowie die Kommunikationssprache können als vorhanden und fehlerfrei vorausgesetzt werden [Klügl, 2001].

4.2.2 Koordination

Wenn zwei oder mehr Agenten interagieren, die jeweils nur eine begrenzte Sicht auf das Gesamtsystem haben, dann müssen sie dahingehend koordiniert werden, dass sie ihre Aufgaben kohärent

erfüllen [Durfee u.a., 1987]. In Kapitel 3.3 wurden bereits die Schwierigkeiten der Einflussnahme auf komplexe Systeme erläutert. Sie zeigen sich insbesondere darin, dass komplexe Systeme nicht oder zumindest nur bedingt von außen gesteuert werden können. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist daher in einer Koordination von innen heraus zu sehen, wie er durch verhandlungsbasierte Koordinationsformen realisiert werden kann. Hier werden alle koordinierenden Maßnahmen an die Systemelemente (hier: Produktionsagenten) delegiert.

Bei den Koordinationsverfahren lassen sich hierarchische und nichthierarchische Ansätze unterscheiden. Weigelt definiert hierarchische Ansätze als jegliche Methoden, bei denen Koordination zwangsweise erreicht wird. Bei nichthierarchischen Verfahren werden zur Koordinierung der verschiedenen Agenten Abstimmungsmechanismen angewandt, die in kooperierender oder auch konkurrierender Weise umgesetzt werden können [Weigelt, 1994]. Hierarchische Ansätze negieren also jegliche Autonomie der Produktionsagenten und wirken stark einschränkend auf die Flexibilität der betrachteten Systeme (siehe Kap. 3.4). Wie bereits mehrfach angeführt wurde, ist die Montage ein Teilsystem des Unternehmens, wodurch per se eine gewisse Hierarchie vorgegeben ist. Allerdings sollen durch das Umweltsystem »Unternehmen« nur die Handlungsgrenzen z.B. in Form von terminierten Aufträgen vorgegeben werden, die Koordination des Teilsystems »Montage« soll aus oben genannte Gründen nichthierarchisch erfolgen [vgl. dazu Vollmer, 2000].

Nichthierarchische Koordination

Die Möglichkeiten, nichthierarchische Koordination in Multiagenten-Systemen zu realisieren, sind äußerst vielfältig. Folglich ist auch der Kommunikationsbedarf bzw. die Kommunikationsintensität unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei einfachen regelbasierten Verfahren ist nur ein Minimum an Kommunikation notwendig, wohingegen bei sehr komplexen verhandlungsbasierten Varianten unter Umständen zahlreiche umfangreiche Dialoge geführt werden müssen. Weiter besteht prinzipiell die Wahl zwischen konkurrierender und kooperierender Koordinierung. Die Effektivität des eingesetzten Verfahrens hängt wesentlich vom individuellen Anwendungsfall ab. Im hier vorliegenden Fall einer Multiressourcen-Montage bietet sich jedoch die Koordination auf Basis von Verhandlungen an, da die jeweiligen Produktionsagenten in ständiger Konkurrenz zueinander stehen. Demzufolge konkurrieren Aufträge um Kapazitäten zur Bearbeitung sowie um die benötigten Betriebsmittel und die Kapazitäten wetteifern untereinander um die Bearbeitung der Aufträge. Bevor nun die verhandlungsbasierte Koordination konkret vorgestellt wird, soll noch die zentrale und die dezentrale Organisationsform für Multiagentensysteme kurz erläutert werden.

Organisationsformen

Bild 4.3 zeigt im linken Teil exemplarisch eine zentrale Organisationsstruktur. Hier soll das Agentensystem ein Gesamtproblem lösen, das aus zwei Teilproblemen besteht. Jedes Teilproblem ist wiederum aus zwei Teilunterproblemen zusammengesetzt. Die Aufgabe des Agenten 1 ist es, mit Hilfe der Teilunterlösungen der Agenten 2 bis 5 die Teillösungen zu ermitteln und diese zur Gesamtlösung zusammenzufügen. Um die einzelnen Teilunterlösungen zu erhalten, steht der Agent

1 als zentrales Strukturelement mit jedem der Agenten 2 bis 5 in direktem Kontakt. Er setzt damit die Gesamtlösung an zentraler Stelle aus allen Lösungsbestandteilen zusammen.

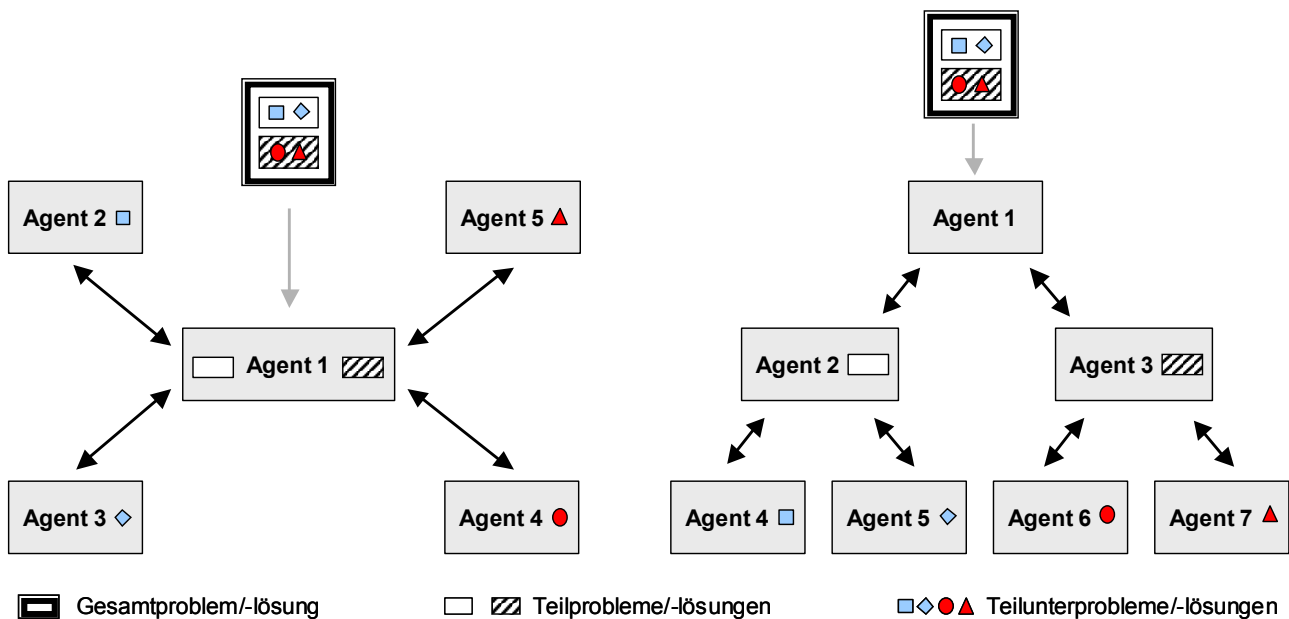


Bild 4.3 Zentrale und dezentrale Organisationsformen

Bei der dezentralen Organisationsform (siehe **Bild 4.3** rechter Teil) dagegen kommen dem Agenten 1 weniger Aufgaben zu. Er hat zwar auch hier die Aufgabe, aus den Teillösungen die Gesamtlösung zu ermitteln, doch dafür muss er lediglich die beiden Teillösungen berücksichtigen. Um diese zu erhalten, steht er nur noch mit den Agenten 2 und 3 in Kontakt. Wie die einzelnen Teillösungen aus den Teilunterlösungen entstehen, ist für ihn völlig irrelevant. Bei dieser Organisationsstruktur läuft der Problemlösungsprozess nicht mehr komplett zentral über einen Agenten, sondern die Teilprozesse werden dezentralisiert. Die Ermittlung der Teillösungen aus den Teilunterlösungen ist nun Aufgabe der Agenten 2 und 3. Diese Agenten stehen ausschließlich mit den Agenten in Kontakt, von denen sie die benötigten Teilunterlösungen erhalten.

Durch die Auswahl der Organisationsform werden somit implizit die Aufgaben und Fähigkeiten der einzelnen Agenten festgelegt. Weiter werden Rahmenbedingungen wie Rollenverteilung, Autoritätsverhältnisse und Kommunikationspfade bestimmt. Es sei jedoch noch einmal darauf hingewiesen, dass durch die Organisationsform nicht automatisch die Koordinationsform festgelegt wird. Auch wenn sich ein hierarchischer Ansatz oftmals leichter zentral organisieren lässt, können sogar extrem verzweigte Organisationen nach dem Zwangsprinzip koordiniert werden. Dagegen können Multiagentensysteme, die verhandlungsbasiert auf Grundlage des Kontraktnetzprotokolls arbeiten, sehr viel an Effektivität gewinnen, wenn sie zentrale Komponenten z.B. in Form eines Vermittlers (engl. Broker) einsetzen.

Allgemeine Merkmale von Verhandlungen

Der Begriff der Verhandlung wird von den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen intensiv diskutiert. Im Rahmen dieser Arbeit soll aber nur die Sichtweise der *Verteilten Künstlichen Intelligenz* näher untersucht werden. Eine der ersten Arbeiten auf diesem Gebiet stammt von Davis

und Smith. Sie nutzen Verhandlungen dazu, Teilprobleme in der Phase der Problemzerlegung einzelnen Problemlösern zuzuweisen [Davis und Smith, 1983]. Die Basis jeder Verhandlung bildet der Markt, der durch das Aufeinandertreffen von Leistungsanbieter und Leistungsnachfrager entsteht. Die Verhandlung selbst kennzeichnet den Prozess, bei dem durch Informationsaustausch Einigung zwischen unterschiedlichen Parteien über einen Verhandlungsgegenstand gefunden wird [Mannmeusel, 1997]. Dieser Prozess gliedert sich in die Phasen »Anbahnung«, »Vereinbarung« und »Durchführung«. Eine Verhandlung kann iterativ ablaufen, d.h., sie vollzieht sich in mehreren Verhandlungsrunden.

Bevor es jedoch zu einer konkreten Verhandlung kommen kann, muss in einer *Anbahnungsphase* sichergestellt werden, dass es mindestens zwei *Verhandlungsteilnehmer* – einen Nachfrager und einen Anbieter – gibt [vgl. Alt u.a., 1995]. Anbieter und Nachfrager werden in der vorliegenden Arbeit immer durch Maschinenagenten und Auftragsagenten repräsentiert. Dem Nachfrager kommt dabei die Aufgabe zu, den *Verhandlungsgegenstand* (z.B. die Bearbeitung eines konkreten Arbeitsvorgangs) und die *Verhandlungsvariablen* (z.B. Preis und Liefertermin) genau zu spezifizieren und diese Informationen den potenziellen Anbietern bekannt zu machen. Dies muss auf Basis eines vorher definierten Kommunikationsprotokolls, z.B. des Kontraktnetzprotokolls, geschehen. Damit ist sichergestellt, dass die Semantik der Nachricht für alle Adressaten eindeutig ist. In einem innerbetrieblichen Markt sind die Anbieter ihrerseits gezwungen, auf diese Nachrichten zu reagieren. Sie machen die Reaktion im Rahmen ihrer Entscheidungsautonomie von der aktuellen Produktionssituation abhängig. Im ungünstigsten Fall lehnen sie die Anfrage ab, anderenfalls unterbreiten sie dem Nachfrager ein Angebot.

Die verschiedenen Phasen der Angebotsplanung, insbesondere juristische Aspekte, werden in der vorliegenden Arbeit nicht näher erörtert. Denn dies ist für sich ein sehr komplexes Themengebiet, das aber im Rahmen eines innerbetrieblichen Marktes keine relevante Rolle spielt. Von Interesse ist nur der jeweilige Verhandlungsablauf, deshalb sei für Fragen zu anderen Aspekten von Verhandlungen wie Verhandlungs- und Preistheorie auf die einschlägige Literatur verwiesen [Brams, 1990; Engelbrecht-Wiggans, 1993; Güth, 1995; McAfee und McMillan, 1987; Ott, 1968].

Mehrfach wurde darauf hingewiesen, dass autonome Agenten ihre eigenen Ziele verfolgen. Demnach erachten die Agenten für jede Verhandlungsvariable einen definierten Wertebereich für zulässig. Die *Verhandlungsspanne* der einzelnen Agenten entsteht aus der Kombination dieser Wertebereiche aller Verhandlungsvariablen. Es kann also nur dann zu einer Verhandlung kommen, wenn es mindestens ein Angebot gibt, dessen Verhandlungsvariablen alle innerhalb der *Verhandlungsspanne* des Nachfragers liegen. Diese Schnittmenge der jeweiligen Wertebereiche wird auch als *Entscheidungs- oder Verhandlungsraum* bezeichnet.

Verhandlungsformen

Die *Vereinbarungsphase* dient dem eigentlichen Verhandlungsziel – nämlich der quantitativen Einigung bezüglich der Verhandlungsvariablen, um so die Verpflichtung zweier Verhandlungsteilnehmer zum Leistungsaustausch zu erreichen. Der Verhandlung kommt somit die Allokations-

aufgabe zu, die Konflikte der Agenten im Rahmen des Auftragsmanagements durch geeignete Verhandlungsformen zu lösen. Folgende typische Verhandlungsformen werden nun im Hinblick auf die Verfahrensvorschriften und die Vor- bzw. Nachteile für den Einsatz in Multiagentensystemen kurz erläutert:

- Bilaterale und multilaterale Verhandlung
- Auktionen (Englische, Holländische, Höchst- bzw. Tiefstpreis- und Vickrey Auktion)

Die *Bilaterale Verhandlung* ist durch je einen Anbieter und einen Nachfrager gekennzeichnet [vgl. Trost und Bamberg, 1995]. Grundsätzlich kann bei dieser Verhandlungsform über beliebig viele Verhandlungsvariablen verhandelt werden, in der Praxis reduziert sich dies jedoch meist auf den Preis und den Liefertermin. Die Verhandlung selbst basiert auf einer iterativen Vorgehensweise durch Angebote und Gegenangebote, wobei sie sowohl vom Anbieter als auch vom Nachfrager initiiert werden kann. Stimmen Angebot und Gegenangebot überein, kommt es zum Vertragsabschluss. Die Nachteile dieses Verfahrens liegen in den unter Umständen sehr langen Verhandlungsprozessen, die bis zum Vertragsabschluss keine Einigung garantieren, da beide Verhandlungsteilnehmer jederzeit die Verhandlung abbrechen können.

Die *Multilaterale Verhandlung* ist ebenso wie die *Bilaterale Verhandlung* eine offene Verhandlung, d.h., alle Verhandlungsteilnehmer wissen voneinander und können aufeinander reagieren. Das Verhandlungsmuster ist bei beiden Verhandlungen identisch, jedoch verstärken sich oben genannte Nachteile bei *Multilateralen Verhandlungen* noch durch die größere Anzahl von Verhandlungsteilnehmern.

Auktionen sind Verhandlungen, bei denen die Verhandlungspartner anhand von Geboten interagieren [Güth, 1995; Kräkel, 1992]. Der Anbieter versteigert eine bestimmte Leistung unter mehreren potenziellen Nachfragern, wobei nur der Preis als Verhandlungsvariable fungiert. Der prinzipielle Ablauf einer Auktion teilt sich in drei Phasen:

- Zum Auktionsstart wird ein Mindest- bzw. Höchstgebot genannt.
- Während der Auktion werden einmalig oder wiederholt Gebote abgegeben.
- Das höchste bzw. niedrigste Gebot erhält den Zuschlag oder die Versteigerung wird abgebrochen, weil keine Einigung erzielt werden konnte.

Die Informationspolitik entscheidet, ob die Gebote der Nachfrager offen oder verdeckt erfolgen. Bei offenen Geboten können die Nachfrager die Gebote ihrer Konkurrenten beobachten und darauf wechselseitig reagieren. In verdeckten Auktionen besteht diese Möglichkeit nicht und jeder Nachfrager gibt in der Regel genau ein Gebot ab. Die Preisbildung entscheidet, welchen Preis der Auktionsgewinner zu zahlen hat. In Erstpreisauktionen zahlt der Auktionsgewinner einen Betrag in Höhe seines Gebotes, in Zweitpreisauktionen hingegen nur in Höhe des zweitbesten Gebotes.

Die *Englische Auktion* ist eine offene Auktionsform. Begonnen wird die Versteigerung durch Nennung eines Höchstpreises z.B. für die Bearbeitung eines Arbeitsvorgangs, den der Anbieter (Auftragsagent) vorgibt. Im Verlauf der Auktion unterbieten die Maschinenagenten (Nachfrager)

diesen Wert so lange, bis nur noch ein bietender Maschinenagent übrig ist. Dabei müssen die Maschinenagenten untereinander kommunizieren, damit die Offenheit der Auktionsform gewahrt bleibt und jeder Maschinenagent über die gerade aktuelle Gebotshöhe informiert ist. Die Anzahl der notwendigen Auktionsschritte bis zur Selektion des besten Gebotes und der abgegebenen Gebote je Maschinenagent kann nicht vorhergesehen werden. Die *Englische Auktion* verursacht dadurch sehr hohe Kommunikations- und Koordinationsaufwände. Vorteilhaft wirkt sich dagegen aus, dass bereits nach der ersten Verhandlungsrunde eine Einigung sichergestellt ist.

Die *Holländische Auktion* ist gewissermaßen das Gegenstück zur *Englischen Auktion* und ebenfalls eine offene Auktionsform. Der Ausgangspunkt der Versteigerung ist ein Maximalpreis, den der Anbieter festlegt. Der Preis wird schrittweise gesenkt, bis ein Nachfrager bereit ist, den genannten Preis zu akzeptieren, oder ein ebenfalls vorgegebener Mindestpreis erreicht ist. Auch diese Form erfordert ein hohes Maß an Kommunikation, denn bei jedem neuen Auktionsschritt muss mit allen Auftragsagenten (hier in der Rolle des Nachfragers) kommuniziert werden, um ihnen die jeweils aktuelle Gebotshöhe mitzuteilen. Aus Sicht der Auftragsagenten reduziert sich der Kommunikationsaufwand allerdings erheblich, denn im gesamten Verlauf der Auktion wird nur genau ein Gebot abgegeben. Der wesentliche Nachteil der *Holländischen Auktion* besteht nun darin, dass letztlich keine Einigung garantiert werden kann.

Die *Höchstpreis-Auktion* bzw. *Tiefstpreis-Auktion*, die je nach Autor auch *Ein-* bzw. *Ausschreibung* genannt wird, ist eine verdeckte Auktionsform, d.h., die Gebote (nur ein Gebot je Bieter) werden für die konkurrierenden Bieter unzugänglich abgegeben. Eine Besonderheit dieser Auktionsform besteht darin, dass Maschinen- und Auftragsagent sowohl die Rolle des Anbieters als auch die des Nachfragers übernehmen können. Gewinner der Auktion ist der Auftrags-/Maschinenagent mit dem höchsten/niedrigsten Gebot. Die nicht angenommenen Gebote bleiben so lange gültig, bis sie entweder während einer erneuten Versteigerung als bestes Gebot angenommen oder vom Bieter zurückgenommen werden. Daher ist es nicht erforderlich, die betroffenen Agenten von der Nichtannahme ihrer Gebote zu informieren. Vorteilhaft ist daher der sehr geringe Kommunikationsaufwand zu bewerten. Allerdings kann eine Einigung nur für den Fall garantiert werden, dass die Bieter zur Angebotsabgabe gezwungen sind. Ein weiterer Nachteil entsteht dadurch, dass es keinen Mindestpreis gibt, sondern nur die Bieter den Preis bestimmen.

Die *Vickrey-Auktion* unterscheidet sich von der *Tiefstpreis-Auktion* nur in der Entgeltung des jeweiligen Auktionsgewinners. Derjenige Agent, der das niedrigste Gebot abgegeben hat, erhält den Zuschlag. Das zu zahlende Entgelt wird aber in Höhe des zweitniedrigsten Gebots festgesetzt. Ein besonders günstiges Gebot erhöht zwar die Zuschlagswahrscheinlichkeit, beeinflusst aber nicht die Entgeltung. Auf diese Weise werden einerseits die Verhandlungsteilnehmer gezwungen, ihren Verhandlungsspielraum auszunutzen; andererseits unterbleiben unseriöse Gebote weitgehend [Zelewski, 1993; Güth, 1982].

Die *Durchführungsphase* schließt sich der Vereinbarungsphase an und umfasst das gesamte Protokoll zur Durchführung des Leistungsaustauschs. Hierzu zählen neben der Übergabe von

Leistungspaketen auch Nachrichten zur Lenkung der Leistungsübergabe in Form von Begleitinformationen oder auch gegenläufigen Bestätigungen.

Die Bewertung hinsichtlich der Eignung der verschiedenen Verhandlungsformen kann an dieser Stelle nicht abschließend vollzogen werden, da sie wesentlich vom konkreten Betrachtungs- bzw. Einsatzfall abhängig ist. Bei komplexen Systemen, wie sie die Produktion oder die Montage eines Unternehmens darstellen, müssen insbesondere der resultierende Kommunikationsaufwand, die Kommunikationsintensität und der Koordinationsaufwand kritisch hinterfragt werden, wenn diese Systeme in Form von rechnergestützten Multiagentensystemen realisiert werden sollen.

4.2.3 Existierende agentenbasierte Ansätze aus dem Umfeld der PPS

Die folgenden Ausführungen sollen einige agentenbasierten Ansätze kurz erläutern, die auf einer ähnlichen Problemstellung beruhen wie die vorliegende Arbeit. Dadurch sollen zum einen Einblicke und Einsichten in die Vorteile von Multiagentensystemen im Zusammenhang mit Aufgaben aus dem Bereich der Produktionsplanung und -steuerung vermittelt werden. Zum anderen wird an den vorgestellten Ansätzen auch die generelle Problematik deutlich, weshalb agentenbasierte Systeme in diesem Bereich selten in der Praxis eingesetzt werden. Denn der Vorteil einer individuellen Fokussierung auf den speziellen Anwendungsfall bedingt auch den Nachteil einer individuellen Anpassung der Agenten bzw. der Agentengesellschaft. Neben allgemeinen Schwierigkeiten finden sich in den einzelnen Ansätzen aber auch spezifische Hindernisse. So ist es aus Anwendersicht kaum vertretbar, dass manche Ansätze aufgrund ihrer Modellierung und/oder ihrer zugrunde liegenden Methode nicht oder nur eingeschränkt an erweiterte oder neue Anforderungen angepasst werden können. Zusätzlich liegen die meisten Ansätze nur als Konzept oder bestenfalls als prototypische Realisierung vor. Eine wirklich marktfähige Lösung findet man kaum.

YAMS

Von Parunak wurde mit YAMS (Yet Another Manufacturing System) ein Agentensystem entwickelt, welches sich an der fertigungstechnischen Sichtweise eines traditionellen Unternehmens orientiert [Parunak, 1987]. Mehrere Hierarchiestufen, wie z.B. Fabrik, Fertigungszelle, Arbeitsstation und Maschine, werden in einem Kontraktnetz von mehreren Knoten (Agenten) repräsentiert, die alle über eine lokale Wissensbasis verfügen und intern gleich strukturiert sind. Jeder Agent besitzt einen vollständig ausgearbeiteten Teilplan, in dem ihm seine Aufgaben a priori vorgegeben werden. Alle Agenten, die potenziell in der Lage sind, eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen, werden zu Beginn der Verhandlung in Form einer Broadcast-Nachricht über die anstehende Aufgabe informiert. Daraufhin sind alle angesprochenen Agenten verpflichtet, ein Angebot auf die entsprechende Anfrage abzugeben. Der Initiator wählt dann das beste Angebot aus. Tritt der Fall ein, dass ein Agent aus bestimmten Gründen die ihm zugewiesene Aufgabe nicht erfüllen kann, so stößt er Verhandlungen mit anderen Agenten an. Derartige Verhandlungen können sich über mehrere Hierarchiestufen erstrecken.

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen unterstützt YAMS keine zeitliche Einplanung von Aufträgen, sondern dient nur der Verteilung von Aufgaben - in der Regel der Verteilung von Arbeitsvorgängen - in der Durchführungsphase des Fertigungsprozesses [Mannmeusel, 1997].

VerFlex-BB

Das von Albayrak entwickelte System VerFlex-BB (Verteilte Fertigungsleitstand-Expertensysteme auf Basis der Blackboardarchitektur) dient hauptsächlich zur Unterstützung von Mitarbeitern bei der Durchführung ihrer Aufgaben und kann somit auch als erweitertes Expertensystem bezeichnet werden [Albayrak, 1992].

Das System setzt sich aus den Teilbereichen Feinplanung, Überwachung, Störungsbehandlung und Kapazitätsanalyse zusammen. Diesen Teilbereichen wird jeweils ein Agent zugeordnet, der die entsprechenden Aufgaben übernimmt. Die Kommunikation zwischen den Agenten wird über ein Blackboard abgewickelt, welches durch einen zentralen Kontrollagenten gesteuert wird. Dieser Kontrollagent überwacht ständig die Fertigung und aktiviert situationsabhängig die für auftretende Probleme zuständigen Agenten. In der Regel kooperieren die Agenten bei der Lösung von Problemen nicht miteinander, im Störfall können sie jedoch andere Agenten aktivieren und Teilaufgaben an sie weitergeben oder von ihnen Informationen beziehen. Eine Verhandlung zwischen den einzelnen Agenten findet nicht statt [Mannmeusel, 1997]. VerFlex-BB versucht im Störfall, Ersatzmaterial oder eine freie Alternativmaschine zu finden, ohne jedoch eine Umplanung nachfolgender Operationen zu übernehmen. Eine echte reaktive Planung findet nicht statt [Henseler, 1998].

Die Lösungen, welche die Agenten bereitstellen, können vom Systembenutzer eingesehen und entweder akzeptiert oder abgelehnt werden. Das System wurde zur Unterstützung der kurz- bis mittelfristigen Planung entwickelt und entscheidet somit nicht selbst, welche Lösung einer automatisierten Produktionsabwicklung umgesetzt wird.

SOPP

Das von Dilger und Kassel entwickelte System SOPP (Selbstorganisierende Produktionsprozesse) setzt auf die Grobplanung klassischer PPS-Systeme auf. Das heißt, das System übernimmt die mit groben Eckterminen, wie z.B. Lieferterminen, versehenen Produktionsaufträge von der übergeordneten Planungsstufe und ermittelt, welcher Arbeitsvorgang zu welcher Zeit auf welcher Maschine gefertigt wird. Kassel betont, dass das System hauptsächlich für den Einsatz im Bereich der Werkstattfertigung und im Rahmen flexibler Fertigungssysteme für die Kleinserienfertigung geeignet ist [Kassel, 1998].

Die einzelnen Produktionsaufträge werden als Erstes durch einen zentralen Planungsagenten in ihre Bearbeitungs- und Transportvorgänge zerlegt und anhand von Planbearbeitungszeiten und Plantransportzeiten terminiert. Vom Planungsagenten werden die vorterminierten Vorgänge an einen Broker übergeben, der anfangs nur die Bearbeitungsvorgänge an geeignete Fertigungsagenten ausschreibt. Die Fertigungsagenten erstellen nach einem nicht genauer beschriebenen Verfahren der

Kosten- und Terminermittlung Angebote für die Bearbeitungsaufgaben und senden diese an den Broker zurück. Der Broker bestimmt anhand eines optimierenden Verfahrens die besten Angebote und reserviert diese auf den entsprechenden Fertigungsstationen. Im zweiten Schritt werden die Transportvorgänge vom Broker an die Transportagenten ausgeschrieben. Wenn ein geeigneter Transportagent gefunden wurde, werden auch die Bearbeitungsvorgänge endgültig eingeplant.

Als Kommunikationsverfahren und zur Unterstützung der Organisationsform kommt eine Mischung aus Shared-Memory- und Message-Passing-Verfahren zum Einsatz. Der Broker, der als zentrales Koordinationselement fungiert, benutzt für die Verwaltung seiner Aufgaben und seines Wissens ein in Fertigungsblackboard und Transportblackboard geteiltes Blackboardsystem. Im Gegensatz zum klassischen Blackboardverfahren werden die einzelnen Agenten aber vom Broker durch adressierte Nachrichten angesprochen. Die beteiligten Maschinenagenten verhalten sich autonom, verfolgen eigene Ziele und stehen in Konkurrenz zueinander. Das System ist demnach ein nichthierarchisches Koordinationsverfahren auf Basis marktwirtschaftlicher Ausschreibungen mit zentralen Strukturen.

Der Kritik von Vollmer, die Art der Verteilung auf die Agenten orientiere sich sehr stark an den bestehenden Hierarchien, soll noch hinzugefügt werden, dass die Aufträge keinen individuellen Vertreter in Form eines Auftragsagenten haben, der es ihnen erlaubt, individuelle Ziele zu verfolgen [vgl. Vollmer, 2000]. Sie werden grundsätzlich nach den Regeln des Brokers den Maschinenagenten zugewiesen. Weiter wird die Verhandlung immer zentral vom Broker angestoßen. Falls ein Maschinenagent keine aktuellen Aufträge verwaltet, muss er sich nach einer bestimmten Zeit beim Broker erneut bewerben. Er wird dann in den nächsten Verhandlungszyklus aufgenommen. Es ist ihm nicht möglich, sein Leistungsangebot direkt zur Verhandlung zu stellen. Zusätzlich erschwert die starre Implementierung der zwei Stufen *Bearbeitung* und *Transport* die Anwendung des Ansatzes über die angedachten Einsatzgebiete hinaus.

DEPRODEX

Unter dem Namen DEPRODEX (Dezentrale Produktionssteuerung durch Expertensysteme) hat Weigelt drei verschiedene Typen von Agentensystemen (DEPRODEX 1, 2 und 3) entwickelt [Weigelt, 1994]. DEPRODEX setzt unter der Grobplanungsebene eines klassischen MRP-II-basierten Planungszyklus (siehe Kapitel 2.1) auf. Es dient dazu, Fertigungsaufträge bzw. einzelne Arbeitsvorgänge, die mit frühesten Start- und spätesten Endterminen versehen sind, auf verschiedene Fertigungsbereiche zu verteilen oder an einzelnen Maschinen einzuplanen.

DEPRODEX 1 setzt sich aus einem Auftragsagenten und mehreren kooperierenden Maschinengruppenagenten zusammen. Ein hierarchisch angeordneter Auftragsagent koordiniert und kontrolliert die Planungen, indem er Zielvorgaben festlegt, Aufträge hinzufügt, storniert oder ändert, Neuplanungen anstößt und eine globale Plananalyse durchführt. Die Maschinenagenten versuchen nun, anhand von Prioritätsregeln und auftragstyporientierten Heuristiken die Vorgaben des Auftragsagenten bestmöglich in Feinpläne umzusetzen. Zu Beginn führt jeder Maschinengruppenagent eine Ablaufoptimierung in seinem begrenzten Fertigungsbereich durch. Anschließend

kommunizieren die Maschinengruppenagenten miteinander und führen als Erstes eine Konsistenzplanung durch, in der die Übereinstimmung der Teilpläne mit dem Gesamtplan geprüft wird. In der folgenden Planungsphase tauschen die Maschinengruppenagenten auf kooperative Weise Pufferzeiten aus, die in den lokalen Plänen auftreten, und versuchen Arbeitsgänge so zu verschieben, dass der globale Ablauf optimiert und die Durchlaufzeit verkürzt wird. Die Kommunikation erfolgt auf Basis des Shared-Memory-Verfahrens, wobei hier jeder Agent über ein eigenes Blackboard verfügt, das er in gewissen Zeitabständen nach Nachrichten absucht.

In DEPRODEX 2 kommen im Gegensatz zu DEPRODEX 1 konkurrierende Agenten zum Einsatz. Auch hier werden Grobtermine von einem PPS-System übernommen. Jeder einzelne Fertigungsauftrag wird dabei von einem ihm zugeteilten Fertigungsauftragsagenten repräsentiert. Diese Fertigungsauftragsagenten konkurrieren auf Basis von marktwirtschaftlichen Verhandlungen um die Kapazitäten der Maschinengruppenagenten. Die Maschinengruppenagenten kommunizieren anschließend nach den aus DEPRODEX 1 bekannten Koordinationsmechanismen und erstellen einen möglichen Terminplan, den sie an den Fertigungsagenten zurücksenden. Falls der entstandene Terminplan nicht akzeptabel ist, wird eine neue Verhandlung angestoßen. Ein wichtiges Merkmal dieses Ansatzes ist der Versuch, mit Hilfe von Rentabilitätsrechnungen ein Gesamt optimum des Produktionsprozesses zu erreichen.

DEPRODEX 3 ist ein System, in dem die Steuerungsaufgabe alternativ oder gleichzeitig durch kooperierende und konkurrierende Agenten bewältigt werden kann. Zum Einsatz kommen dabei die in DEPRODEX 1 und 2 entwickelten Verfahren.

Dieser Ansatz scheint durch den Einsatz autonomer Agenten und dezentraler Entscheidungskompetenz, die jedoch globale Unternehmensziele berücksichtigt, sehr flexibel einsetzbar zu sein. Dies konnte durch Simulationsstudien im Vergleich mit zentralen Steuerungsmechanismen nachgewiesen werden. Allerdings besteht die Gefahr, dass dieser Ansatz aufgrund des resultierenden Kommunikations- und Koordinationsaufwands nicht praktikabel ist. Dies beruht zum einen auf dem eingesetzten Shared-Memory-Verfahren und zum anderen auf den sehr aufwendigen Planungssynchronisationen, die bei komplexen Produktionen oder Montagen zwangsläufig notwendig werden.

PLANET-AS

Mit dem Forschungsprototypen PLANET-AS (Produktionslenkung mit nicht-hierarchischen Agentennetzwerken für auftragsorientierte Serienfertiger) hat Mannmeusel ein Systemkonzept vorgestellt, welches auf dem Kontraktnetz-Protokoll beruht [Mannmeusel, 1997]. Die beteiligten Agenten (Auftragsagenten, Bearbeitungsagenten, Lageragenten) sind dabei völlig autonome Einheiten, die sich über Verhandlungen, in denen sie eigene Ziele verfolgen, koordinieren. Als Verhandlungsprotokoll wird eine modifizierte Form der Ausschreibung angewendet.

Wie bei Vollmer (siehe unten) steht an der Spitze einer sequenziellen Verknüpfung ein Auftragsagent, der die Kundenaufträge, deren externe Liefertermine in der Regel festgelegt sind, repräsentiert. Der Auftragsagent schreibt seine Leistung an die Bearbeitungsagenten aus, welche die

erforderlichen Endprodukte eines Auftrags liefern können. Daraufhin verhandeln diese mit weiteren Bearbeitungsagenten und Lageragenten über die Erbringung von Vorleistungen.

Die Grundlage für die Entscheidung, ob ein Angebot zur Erbringung einer Leistung angenommen wird oder nicht, bildet ein so genannter Auftragswert. Dieser setzt sich aus einem auftragsabhängigen Basiswert und einem Verspätungs- und Bestandsmalus zusammen. Ziel der einzelnen Agenten ist es, die Summe der Auftragswerte zu maximieren. Das erreichen sie dadurch, dass sie die Werte des Bestands- und des Verspätungsmalus minimieren. Durch dieses Vorgehen lassen sich die Hauptziele Termineinhaltung, Bestandsreduzierung und geringe Durchlaufzeiten verfolgen. Störungen werden dadurch behoben, dass die Agenten, bei denen die Störungen auftreten, Verhandlungen für Umplanungen anstoßen.

Dieser Ansatz reduziert den Kommunikations- und den Koordinationsaufwand durch den Einsatz des Message-Passing-Verfahrens auf Basis des Kontraktnetzprotokolls und durch einen effizienten Verhandlungsablauf. Allerdings gestaltet sich das Hinzufügen oder Entfernen von Agenten ggf. sehr aufwendig. Denn jedes Mal müssen alle Verhandlungspartner von der jeweiligen Existenz bzw. dem Wegfall eines Agenten und dem zugehörigen Leistungsspektrum informiert werden. Ein weiterer kritischer Punkt ergibt sich aus der vollständigen Einplanung aller produzierbaren Aufträge. Hier liegt insbesondere bei komplexen Fertigungsstrukturen die Vermutung nahe, dass ähnliche Probleme hinsichtlich Flexibilität und Reaktionsfähigkeit auftauchen wie bei einer klassischen Planung auf MRP-II-Basis. Denn besonders in stark vernetzten Strukturen kann die vorgeschlagene Störungsbewältigung zu sehr umfangreichen Verhandlungen für Umplanungen führen. Gerade die letztgenannten Kritikpunkte gelten ebenso für den nachfolgend beschriebenen Ansatz nach Vollmer, da dieser sehr ähnlich aufgebaut ist.

Ansatz von Vollmer

Auch der Ansatz von Vollmer beruht auf einer ganzheitlichen Betrachtung der innerbetrieblichen Prozesskette. Seine Akteure nennt er Auftragsagenten, Ressourcenagenten, Serviceagenten und Kuriere, die innerhalb eines Kontraktnetzes agieren. Die Koordination erfolgt durch marktwirtschaftliche Verhandlungen zwischen den in der Regel konkurrierenden Agenten.

Der wesentliche Unterschied zum Forschungsprototypen PLANET-AS liegt in den Verhandlungen, die auf so genannten *multiplen Angeboten* basieren. Die Angebote, welche die Ressourcenagenten abgeben, liegen in Form von Preis-Liefertermin-Relationen vor. Ein Anbieter beantwortet eine Leistungsanfrage in diesem Fall nicht nur mit einem bestimmten Liefertermin und einem zugehörigen Preis, sondern mit mehreren Preis-Termin-Paarungen, aus denen sich der Nachfrager eine Zuordnung auswählen kann. Die Preise, die für eine Leistung verlangt werden, berechnen sich nach Ansätzen der Vollkosten- und der Prozesskostenrechnung und einem Gewinnaufschlag [Jost, 1996; Seicht, 1997]. Bei Nichteinhaltung von zugesagten Lieferterminen muss der Anbieter einen Teil des vereinbarten Preises in Form von Konventionalstrafen zurückerstatten. Konventionalstrafen können von den Anbietern auch bewusst in Kauf genommen werden, um lukrativere Aufträge

vorzuziehen. In diesem Fall wird, wie auch bei einer Störung, die Möglichkeit gegeben, neue Verhandlungen zur Umplanung anzustoßen.

Fazit

Die vorgestellten Ansätze stellen nur einen kleinen Ausschnitt aus einer Vielzahl von Entwicklungen aus dem Umkreis der *Verteilten Künstlichen Intelligenz* dar. Gemeinhin gilt für alle Ansätze eine Problemverschiebung, die aus der Schaffung von kleinen dezentralen Einheiten resultiert: Dort, wo monolithischen Systemen ein Mangel an Reaktionsfähigkeit und Flexibilität attestiert werden musste, steht nun das Problem des erhöhten Koordinations- und Kommunikationsaufwandes. Dies gilt insbesondere dann, wenn die entwickelten Ansätze praxistauglich sein sollen. Unter dem Begriff »Praxistauglich« wird allerdings nicht nur ein akzeptables Maß an Kommunikations- und Koordinationsaufwand verstanden, sondern ebenso die methodisch gestützte Initialisierung der Agenten und des Multiagentensystems. Dazu gehören u.a. die Bereitstellung von ausreichender Maschinen- und Personalkapazität, die Bildung von Agentenklassen mit individuell gewichteter Zielverfolgung und die Sicherstellung von nicht-leeren Verhandlungsspielräumen mit geeigneten Ober- und Untergrenzen.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen und den bereits angeführten Kritiken zeigt **Tabelle 4.1** die allgemeine Eignung der hier angesprochenen Agentensysteme für den Einsatz in Produktionsunternehmen. Diese generelle Eignung entbindet jedoch nicht von der gezielten Überprüfung für den konkreten Anwendungsfall.

Tabelle 4.1 Eignung der verschiedenen Agentensysteme für den Einsatz in Produktionsunternehmen

Agentensysteme	SOPP	VerFlex-BB	YAMS	DEPRODEX 1	DEPRODEX 2	DEPRODEX 3	Vollmer	PLANET-AS
Organisatorisch	+	-	+	0	0	0	+	+
Operativ	+	-	-	+	+	+	+	+

++ sehr gut
 + gut
 0 befriedigend
 - ausreichend
 - mangelhaft

Der Ansatz der vorliegenden Arbeit wurde entwickelt, um den generellen Mangel der existierenden Ansätze bezüglich einer methodischen Initialisierung der Agentengesellschaft zu beheben. Weiter soll die Möglichkeit einer individuellen Zieldefinition und -gewichtung die Anwendbarkeit dieses Ansatzes für alle in Kapitel 3.1 beschriebenen Multiressourcen-Montagen gewährleisten.

5 Gestaltung eines agentenbasierten Auftragsmanagements für die Multiressourcen–Montage

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Anforderungen und Probleme, die ein agentenbasiertes Auftragsmanagement in einer Multiressourcen–Montage erfüllen bzw. bewältigen muss, aus der Sicht des Auftragsmanagements, der Multiressourcen–Montage und der Agententheorie ausführlich diskutiert. Bevor nun die konkrete Ausgestaltung erläutert wird, sollen noch drei weitere Anforderungsaspekte dargestellt werden.

In der Praxis sind die Steuerungsaufgaben häufig nur mit viel Personalaufwand zu bewältigen (siehe Kapitel 1). Trotzdem werden sie oft gerade einmal befriedigend gelöst, indem nur die wichtigsten Zielvorgaben, wie z.B. die Endtermineinhaltung, erreicht werden. Eine Optimierung im Hinblick auf die unternehmensindividuellen logistischen Produktionsziele ist von vornherein auszuschließen, wenn es keine geeigneten Koordinationsmechanismen zwischen allen beteiligten Mitarbeitern gibt. Als Anspruch an ein agentenbasiertes Auftragsmanagement muss dementsprechend die Berücksichtigung der Unternehmensziele postuliert werden. Denn es ist beispielsweise nicht im Sinne des Unternehmens, einen einzelnen Auftrag liefertreu zu produzieren, sondern die Liefertreue aller Aufträge muss in einer akzeptablen Bandbreite liegen. Das Verhalten der Produktionsagenten muss also gewissermaßen *strategisch* geprägt sein. Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, steht dies nicht im Widerspruch zur ebenfalls geforderten Entscheidungsautonomie der Produktionsagenten, sondern bildet den Schwerpunkt ihrer adäquaten Konditionierung (siehe Kapitel 5.4 und 5.5).

Eine weitere wichtige Anforderung ist in der Nachvollziehbarkeit der einzelnen Vorgänge und Prozesse zu sehen, die sich nur durch eine *transparente Gestaltung* des agentenbasierten Auftragsmanagements erreichen lässt. Denn nur eine hohe Transparenz führt zu einer hohen Akzeptanz bei den betroffenen Mitarbeitern. Dies gilt insbesondere für die Entwicklung der Koordinationsmechanismen. Die einzelnen Schritte müssen logisch so aufgebaut sein, dass sie, vereinfacht gesagt, auch „mit Papier und Bleistift“ durchgeführt werden könnten (siehe Kapitel 6).

Der hier vorgestellte Ansatz wurde vollständig softwaretechnisch realisiert (siehe auch Kapitel 7). Auf Basis eines allgemein gültigen Verständnisses kann man daher von einem hohen *Automatisierungsgrad* sprechen. In einem spezielleren Sinne der *Verteilten Künstlichen Intelligenz* muss jedoch hinterfragt werden, inwieweit die im Rahmen des Auftragsmanagements anfallenden Aufgaben ohne Unterstützung bzw. Eingreifen eines Mitarbeiters ausgeführt werden können. Diesbezüglich sei auf die bereits eingeführten Planungs- und Durchführungsebenen verwiesen. Die *Planungsebene* (siehe Kapitel 5.1 bis 5.5) stellt eine Interaktionsplattform dar. Sie unterstützt den Planer systematisch dabei, die anstehende Produktionssituation zu analysieren, eine zielführende Belegungsplanung durchzuführen und die Produktionsagenten zu konditionieren. In den zugehörigen Abschnitten wird daher sowohl das methodische Vorgehen zur Planung des Multiagentensystems als auch die softwaretechnische Realisierung zur Unterstützung des Planers beschrieben. Dementgegen ist die *Durchführungsebene* vollständig automatisiert, d.h., die Kom-

munikation (siehe Kapitel 5.6) und die Koordination (siehe Kapitel 6) des Multiagentensystems sind so gestaltet worden, dass keinerlei Eingriff von Seiten der Mitarbeiter oder der Planer notwendig ist.

5.1 Belegungsplanung als Fundament des Auftragsmanagements

Die Betrachtung der Montage als eigenständiges Subsystem des Unternehmens ist eine wichtige organisatorische Maßnahme zur Beherrschung der Komplexität in Planung und Steuerung. Durch diese Dezentralisierung können die Mitarbeiter der Montage ihr Expertenwissen wesentlich effektiver einsetzen. Dies gilt insbesondere für die Belegungsplanung, denn Fragen der Kapazitätsanpassung, der Personaleinsatzplanung, der korrekten Dimensionierung von Übergangszeiten etc. können vor Ort schneller, flexibler und vor allem exakter geklärt werden. Daher werden nur die Montageaufträge aus dem übergeordneten PPS-System übernommen, alle Aufgaben des Auftragsmanagements werden lokal wahrgenommen.

In Kapitel 2.3.1 wurde die Verbindlichkeit der Endtermine erläutert. Eine realistische Belegungsplanung ist deshalb im Zusammenhang mit einem agentenbasierten Auftragsmanagement besonders wichtig, weil sie die Grundlage des gesamten Multiagentensystems bilden. Im Anschluss an die Belegungsplanung nach Evers (siehe Kapitel 2.1.3) liegen neben den bereits bekannten Stammdaten (Arbeitspläne, Stücklisten etc.) folgende Informationen für die Montageaufträge vor [Evers, 2002]:

- Klassifizierungskriterien nach
 - Technologie bezüglich Montagekomplexität und Bauteildimension,
 - Kapazitätsbedarf am Engpasssystem,
 - Durchfluss und
 - Auftragsstruktur (Einfach-, Teil- oder Komplettauftrag).
- Arbeitsvorgangsgenaue Plantermine (Freigabedatum, Sollstart, Sollende)
- Planauftragsdurchläufe (höchste Priorität) mit allen technologisch möglichen Alternativen (geringere Priorität)

Unter dem Begriff *Auftragsinformationen* werden im nachfolgenden Text sowohl die Stammdaten des Auftrags als auch die weiterführenden Informationen der Belegungsplanung zusammengefasst.

Die Planauftragsdurchläufe für die Montageaufträge erweitern die Auftragsziele um einen Materialflussaspekt. Materialflussziele sind also sekundäre Auftragsziele und dementsprechend als Erweiterung der rein terminorientierten Auftragsziele zu verstehen. Zu ihrer Bestimmung wird das aktuelle Produktionsspektrum analysiert und den vorhandenen Montagekapazitäten gegenübergestellt. Die konkrete Verteilung der Montageaufträge auf die Montagestationen erfolgt anhand der Klassifizierungskriterien. Wie in Kapitel 2.1.3 erläutert wurde, wird die Montageflexibilität dadurch keineswegs eingeschränkt, da die Planauftragsdurchläufe nur Richtlinien des Planers sind. Alle anderen Montagestationen können ebenfalls genutzt werden, wenn auch nur als Alternativen

mit geringerer Priorität. Die Planauftragsdurchläufe entsprechen also dem in Kapitel 3.3.3 geforderten ordnenden Aspekt zur Beherrschung der Komplexität.

Mit Ausnahme der Stammdaten ändern sich die Werte der Auftragsinformationen je nach Produktionsspektrum und Wiederholhäufigkeit der Montageaufträge. In ähnlicher Weise kann man auch die Montagestationsattribute in statische und dynamische gliedern. Die Werte statischer Attribute sind mittelfristig unveränderlich, wohingegen sich die Werte dynamischer Attribute von Planungsperiode zu Planungsperiode ändern können.

- Statische Attribute: Gruppenzugehörigkeit (technologisch gleichwertig und in räumlicher Nähe)
- Dynamische Attribute: Planauslastung und Kapazität

Ein weiterer überaus wichtiger Aspekt ist die Gewährleistung geeigneter Rahmenbedingungen hinsichtlich Kapazitätsbereitstellung und Planperiodenlänge. Es gilt also, mit Hilfe der Belegungsplanung eine generelle Machbarkeit des Produktionsprogramms innerhalb der Planperiode zu garantieren. Diesbezüglich muss die Durchlaufterminierung sicherstellen, dass die Planperiode länger ist als die längste Auftragsplandurchlaufzeit. Ebenso muss ein ausreichendes Kapazitätsangebot gewährleistet sein.

5.2 Akteure des Multiagentensystems

Der vorangegangene Abschnitt macht es bereits deutlich, aber an dieser Stelle soll noch einmal besonders darauf hingewiesen werden: Die Akteure des hier vorgestellten Ansatzes nehmen *keine* planerischen Aufgaben wahr, sondern dienen ausschließlich der operativen Durchführung der Montagetätigkeiten. Die Akteure sind mit Ausnahme des Koordinationsagenten von real existierenden Objekten einer Montage abgeleitet worden. Die Schlüsselfiguren sind dabei die Auftragsagenten, die Montagestationsagenten und der Koordinationsagent. Um eine Montage im Sinne einer Agentengesellschaft realistisch abbilden zu können, werden ebenso Lager-, Transport- und Vorrichtungsagenten benötigt (siehe **Bild 5.1**).

Die *Auftragsagenten* haben die Aufgabe, die Ziele eines Montageauftrages durchzusetzen. Entsprechend der in Kapitel 4.1 vorgenommenen Einteilung kann man die Auftragsagenten als *autonom*, *deliberativ*, *rational* und *technisch-intelligent* bezeichnen. Die Auftragsagenten sollen dafür sorgen, dass der jeweilige Montageauftrag möglichst pünktlich und entsprechend seiner Materialflussvorgaben gefertigt wird. Dazu analysiert er die aktuelle Produktionssituation (deliberativ) und interpretiert sie anhand seiner Zielvorgaben (rational, technisch-intelligent). Anschließend entscheidet er selbstständig (autonom), welche Maßnahmen ggf. zu ergreifen sind. Für jeden Montageauftrag wird individuell ein Auftragsagent angelegt. Dieser Agent ist so lange existent wie der Auftrag selbst, d.h. von der Freigabe bis zur Auftragsfertigstellung. Die Aufgaben des Auftragsagenten sind vielfältig und unterschiedlich anspruchsvoll. Es gehören einfache Aufgaben dazu, wie z.B. die Beschaffung des benötigten Materials sowie der Vorrichtungen oder die Veranlassung notwendiger Transporte. Aber auch aufwendigere Tätigkeiten, wie die indivi-

duelle Überwachung der Terminalsituation und die Einhaltung der Materialflussziele, gehören zum Aufgabenspektrum des Auftragsagenten. Die schwierigste und auch komplexeste Aufgabe ist jedoch die Verhandlung mit den Montagestationsagenten. Diese Verhandlungen müssen für jeden Arbeitsvorgang erneut geführt werden (siehe Kapitel 6.2).

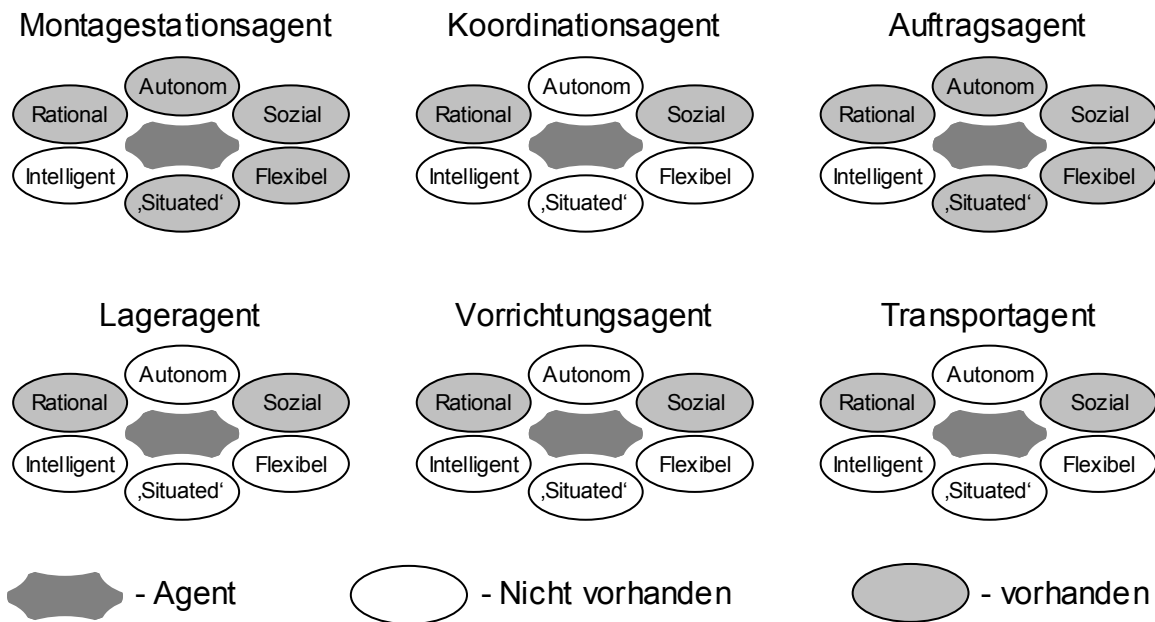


Bild 5.1 Eigenschaften der Produktionsagenten

Der *Ressourcenagent* oder *Montagestationsagent* vertritt die Interessen einzelner Montagestationen und ist genauso zu charakterisieren wie der Auftragsagent: *autonom*, *deliberativ*, *rational* und *technisch-intelligent*. Jede Montagestation wird von einem eigenen Ressourcenagenten vertreten, der konsequent und egoistisch die eigenen Ziele verfolgt. Er konkurriert sowohl mit Stationen aus anderen Stationsgruppen als auch mit Stationen der eigenen Stationsgruppe. Die Stationsagenten müssen daher so konditioniert werden, dass die übergeordneten Ziele der Montage nicht vernachlässigt werden. Die Kernfunktion des Ressourcenagenten ist es, die Montagestation mit ausreichend Arbeit zu versorgen. Dazu erstellt er auf Basis seiner aktuellen Produktionssituation Leistungsangebote für alle Arbeitsvorgänge, die in der Montagestation technologisch bearbeitet werden können.

Im Sinne eines innerbetrieblichen Marktes treten die Ressourcenagenten als Leistungsanbieter und die Auftragsagenten als Leistungsnachfrager in Erscheinung. Die Zuordnung von Angebot und Nachfrage wird durch den *Koordinationsagenten* vorgenommen. Der Koordinationsagent muss als *rational* und *technisch* beschrieben werden. Er ist weder *autonom* noch *deliberativ*. Er fungiert gewissermaßen als Auktionator, d.h., er arbeitet nach festen Regeln und nach eindeutigen Zielvorgaben. Er hat keinerlei Ermessensspielraum oder Entscheidungskompetenz. Im Falle einer Leistungsnachfrage oder eines Leistungsangebots überprüft er, ob es geeignete, d.h. technologisch mögliche, Kombinationen von Leistungsnachfrage und Leistungsangebot gibt. Anschließend informiert er die Nachfrager über die existierenden Angebote. Die Annahme oder Ablehnung dieser Angebote wird *nicht* vom Koordinationsagenten entschieden.

Die Einführung eines zentralen Koordinationsagenten könnte nun zum Anlass genommen werden, den hier vorgestellten Ansatz grundsätzlich aus dem Bereich der Kontraktnetz-Systeme auszugrenzen, da die direkte Inter-Agenten-Kommunikation zwischen Auftragsagent und Ressourcenagent vermeintlich unterbunden wird. Daher sei nochmals auf die rein vermittelnde Funktion hingewiesen, die als spezielle Ausgestaltung des Verhandlungsprotokolls verstanden werden soll [vgl. Zelewski, 1993]. Außerdem ist es praktisch kaum vorstellbar, Verhandlungen gänzlich ohne zentrale Komponente zu realisieren. Entweder müssten die Leistungsnachfragen auf Basis von Broadcast-Nachrichten (Rundruf) stattfinden oder die Verhandlungen zwischen Auftrags- und Montagestationsagent müssten zufallsgetrieben sein. Die Variante auf Basis von Broadcast-Nachrichten hat ohne Zweifel ebenfalls zentrale Aspekte, da immer alle Agenten des Systems angesprochen werden. Als unerwünschter Nebeneffekt entsteht dabei ein hoher Kommunikationsaufwand. Die zweite Variante schließt die Berücksichtigung von übergeordneten Montagezielen per se aus, da sich durch das zufällige Aufeinandertreffen von Auftrags- und Montagestationsagent bestenfalls suboptimale Produktionsabläufe erreichen lassen. Ein anderer zentraler Ansatz bestünde darin, die Produktionsagenten bereits bei ihrem Eintritt in das Multiagentensystem über potenzielle Verhandlungspartner zu informieren. Dann könnte auf weitere koordinierende Instanzen während des Montageprozesses verzichtet werden. Allerdings hat der Einsatz eines Koordinationsagenten demgegenüber einen entscheidenden Vorteil: Das Hinzufügen bzw. Entfernen von Produktionsagenten in oder aus dem Multiagentensystem ist problemlos möglich. Denn der Koordinationsagent muss ohnehin von der Existenz der jeweiligen Agenten und ihren Leistungs- bzw. Anforderungsprofilen Kenntnis haben, um geeignete Kombinationen für Verhandlungen bilden zu können. Falls dem Multiagentensystem zu einem beliebigen Zeitpunkt Agenten hinzugefügt oder aus ihm entfernt werden sollen, muss nur der Koordinationsagent davon unterrichtet werden. Anderenfalls müsste mit großem Aufwand ermittelt werden, für welche Produktionsagenten diese Informationen wichtig sein könnten, und jeder einzelne müsste entsprechend instruiert werden.

Der *Transportagent* ist ein Dienstleistungsagent. Er überprüft, ob ein Transport gültig ist, und stellt ggf. ein geeignetes Transportmittel bereit. Ein Transport ist gültig, wenn es zwischen dem Transportstart und dem Transportziel eine direkte oder indirekte Verbindung gibt und ein geeignetes Transportmittel für das Transportgut vorhanden ist. Ein geeignetes Transportmittel kann den Transport nach Möglichkeit direkt durchführen. Falls mehrere solcher Transportmittel verfügbar sind, wählt der Transportagent das Transportmittel mit dem kürzesten Anfahrweg aus. Die Fähigkeiten des Transportagenten sind die eines *technischen* Agenten, d.h., er funktioniert programmgesteuert auf Basis fester Regeln.

Das gilt auch für den *Vorrichtungsagenten*, der die zur Montage benötigten Vorrichtungen verwaltet. Auf Anfrage ermittelt er die jeweils notwendige Vorrichtung und informiert über die aktuelle Verfügbarkeit. In der hier betrachteten Montage sind die Vorrichtungen ein limitierender Faktor. Da die Vorrichtungen extrem teuer und aufgrund ihrer Größe zusätzlich schwer zu lagern sind, müsste schon ein kontinuierlicher Mangel vorliegen, bevor eine weitere Anschaffung in Erwägung gezogen würde. Der Limitierung wird in dieser Arbeit bereits bei der Konditionierung der Auftragsagenten Rechnung getragen (siehe Kapitel 5.4). In weiterführenden Arbeiten könnte

die Bereitstellung von Transport- und Vorrichtungskapazität aber auch als eine verhandelbare Leistung aufgefasst werden, die auf Basis der hier vorgestellten Methode und einer weiteren Detailierung der Transport- und Vorrichtungsagenten ebenfalls verhandlungsbasiert koordiniert werden könnte.

Jedes Produktions- und Rohmateriallager wird von einem *Lageragenten* repräsentiert. Bevor die Bearbeitung eines bestimmten Arbeitsvorgangs von einem Auftragsagenten nachgefragt wird, muss erst mit Hilfe der Lageragenten sichergestellt werden, dass das benötigte Material tatsächlich verfügbar ist. Falls dies der Fall ist und dieses Material abgerufen wird, reserviert der Lageragent das Material und gibt den konkreten Lagerort bekannt. Anderenfalls wird der Nachfrager sofort informiert, sobald das Material eingetroffen ist. Obwohl dieses Verhalten eine gewisse Eigeninitiative suggeriert, ist der Lageragent trotzdem nur ein *technischer* Agent, der rein programmgesteuert arbeitet.

5.3 Prozentuale Leistungsvergütung für flexiblere Verhandlungen

Eine häufig vorgebrachte Kritik gegenüber Agentensystemen ist die *organisatorische Inflexibilität*. Unter Flexibilität wird hier nicht die Fähigkeit verstanden, auf Störungen oder Planabweichungen zu reagieren, sondern es wird ausgedrückt, inwieweit sich das System an Veränderungen von Randbedingungen etc. anpassen lässt. Diese Kritik liegt zu einem großen Teil in der Natur der Sache; denn schließlich ist es ein entscheidender Vorteil von Agentensystemen, natürliche Elemente realitätsnah und dementsprechend individuell abbilden zu können. Auch der Ansatz der vorliegenden Arbeit ist speziell auf die Anforderungen einer Multiressourcen–Montage zugeschnitten worden. Allerdings kann der Arbeit für den Bereich Montage eine organisatorische Flexibilität zugesprochen werden, da es prinzipiell möglich ist, beliebig viele Ressourcen zu berücksichtigen. Diese Ressourcen können bei der Verhandlungsführung in Form von Verhandlungsvariablen relevant sein, so dass mit einer großen Anzahl möglicherweise unterschiedlicher Verhandlungsvariablen zu rechnen ist. Dies können sowohl quantitative Verhandlungsvariablen wie Preis und Termin als auch qualitative Verhandlungsvariablen sein. Um mehrere Angebote geeignet vergleichen zu können, deren Verhandlungsvariablen sehr wahrscheinlich unterschiedliche Werte annehmen, bedarf es eines gemeinsamen Bewertungskriteriums für alle Verhandlungsvariablen.

Der Verhandlungsgegenstand ist in produktionsbasierten Agentensystemen zumeist eine Leistung, wie z.B. Montageleistung, Transportleistung etc. Für die Erbringung dieser Leistung ist eine entsprechende Leistungsvergütung zu entrichten. Die konkrete Höhe der Leistungsvergütung ist das Ergebnis der Verhandlung, falls die Verhandlungspartner zu einer Einigung gefunden haben. Als gemeinsames Bewertungskriterium bietet sich daher die Leistungsvergütung an. So kann der angebotene Wert einer jeden Verhandlungsvariable mit einem Bonus oder Malus bezüglich der Leistungsvergütung belegt werden. Um zu einer besseren Vergleichbarkeit im Sinne standardisierter Verhandlungen zu kommen und die Anpassungsfähigkeit an verschiedene Montagen zu unterstützen, ist es sinnvoll, nicht auf Basis absoluter, sondern prozentualer Werte zu verhandeln. Auf diese Weise können selbst rein qualitative Kriterien wie z.B. die Auftragsart bewertet werden.

Der Richt- oder Standardwert jeder Verhandlung ist eine hundertprozentige Leistungsvergütung. Die Verhandlungspartner können nun situationsabhängig die Höhe ihres Angebots bzw. ihrer Forderung festlegen, indem sie die aktuelle Ausprägung ihrer Verhandlungsvariablen mit einem *prozentualen* Bonus oder Malus bewerten. Wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, ergibt sich bei prozentualer Bewertung die Möglichkeit, Auftragsagenten für unterschiedliche Produkte identisch zu konditionieren. Außerdem ist die inhaltliche Trennung von Kostenrechnung und Auftragsmanagement vorteilhaft. Einerseits ist durch die Einführung einer prozentualen Leistungsvergütung die Allgemeingültigkeit des Ansatzes sichergestellt. Andererseits kann die monetäre Bewertung der prozentualen Leistungsvergütung bei Bedarf für jeden Anwendungsfall explizit vorgenommen werden. Die prozentuale Leistungsvergütung kann demzufolge eine Schnittmenge aus betriebswirtschaftlicher und logistischer Betrachtung darstellen [vgl. Kotschenreuther, 1991].

5.4 Konditionierung der Auftragsagenten

Unter dem Begriff Konditionierung versteht man laut Fremdwörterbuch im Allgemeinen »das Ausbilden bedingter Reaktionen bei Mensch oder Tier, wobei eine Reaktion auch dann eintritt, wenn anstelle des ursprünglichen Auslösereizes ein zunächst neutraler Reiz tritt« [Duden-Fremdwörterbuch, 1997]. Der erste Teil der Definition kann ohne Einschränkungen auf alle Agenten im hier vorgestellten Sinne übertragen werden, da dieser Teil selbst für primitive Agenten gilt. Um den zweiten Teil ebenfalls übernehmen zu können, bedarf es einer einschränkenden Definition für einen neutralen Reiz, da im hier entwickelten Multiagentensystem keine kognitiven oder gar sozialen Agenten implementiert wurden, die in der Lage wären, sich selbst zu reflektieren und sich lernend weiterzuentwickeln (vgl. Kapitel 4.1). Daher muss ein neutraler Reiz zumindest strukturell und formell bereits bekannt sein. Beispielsweise muss eine Agentengesellschaft mit dem Ausfall einzelner Montagestationsagenten prinzipiell vertraut sein, um darauf auch dann adäquat reagieren zu können, wenn der konkrete Auslöser, z.B. eine ungeplante Maschinenstörung, bisher unbekannt war.

Erst eine individuelle Konditionierung versetzt die Agenten eines Multiagentensystems in die Lage, ihre eigenen Interessen zu vertreten. Wobei es sich streng genommen nicht um ihre eigenen Interessen handelt. Vielmehr sind es die Interessen des Systemgestalters, die dieser den Agenten bei der Gestaltung des Multiagentensystems zuordnet. Im Folgenden wird gezeigt, wie eine solche Konditionierung methodisch und systemtechnisch unterstützt werden kann.

5.4.1 Reduzierung des Konditionierungsaufwands durch Auftragsklassen

Die Variantenvielfalt heutiger Fertigungen mit mehreren hundert Artikeln und Tausenden von Aufträgen lässt eine individuelle Konditionierung der einzelnen Auftragsagenten als eine praktisch unlösbare Aufgabe erscheinen. Dies scheidet zum einen am immensen (Personal-)Aufwand, der für ein solches Vorhaben notwendig wäre, und zum anderen an der Komplexität der Aufgabe. So müsste für jeden Auftragsagenten ein eigenes Verhalten definiert werden, das sich zielführend im Sinne des Unternehmens gegen das Verhalten anderer Auftragsagenten abgrenzen lässt. Auch eine automatisierte softwaretechnische Lösung ist nicht möglich, da eine individuelle Konditionierung

je nach Auftragspektrum und Planungsperiode anders ausfallen muss. Daraus resultiert die Notwendigkeit, die Aufträge so zusammenzufassen, dass sie von identisch konditionierten Auftragsagenten vertreten werden können. Es müssen also Auftragsklassen gebildet werden, deren zugehörige Auftragsagenten im Hinblick auf die Zielverfolgung das gleiche Verhalten aufweisen sollen.

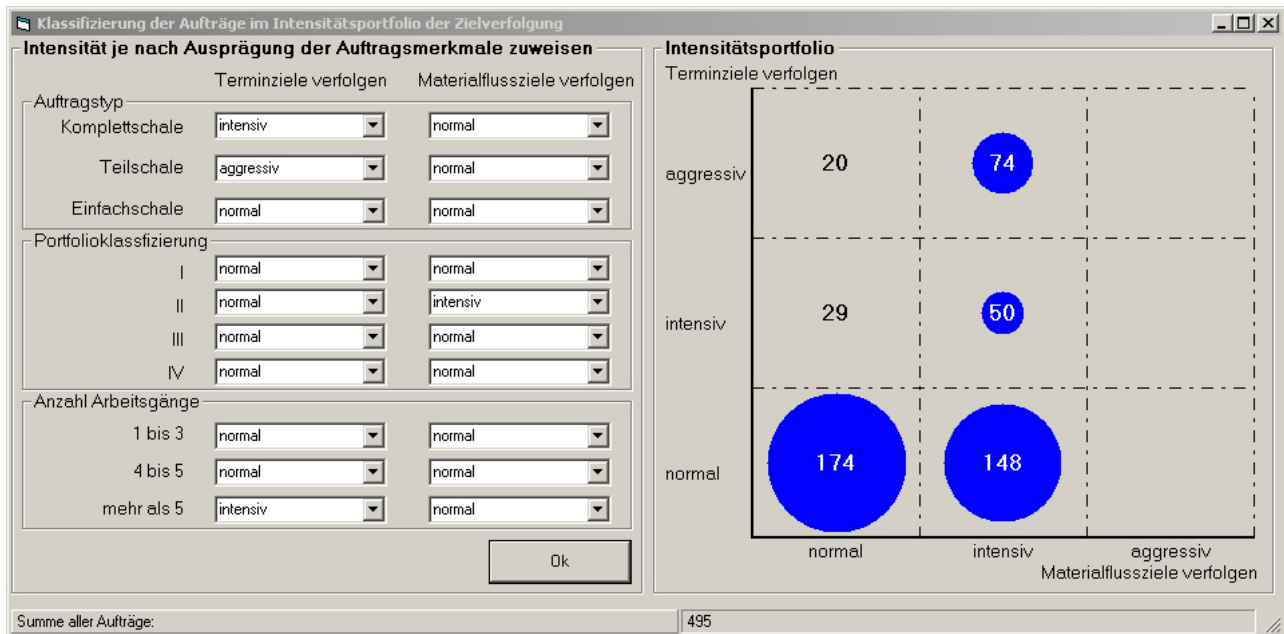


Bild 5.2 Intensität der Auftragszielverfolgung (Quelle: Agent-AIM)

Zu diesem Zweck wird die Intensität, mit der die einzelnen Auftragsziele verfolgt werden sollen, qualitativ in mehrere Intensitätsstufen eingeteilt. Im vorliegenden Fall sind dies die Stufen *normal*, *intensiv* und *aggressiv*, wobei *normal* die Grundeinstellung ist und *aggressiv* die höchste Intensitätsstufe darstellt. Je nach Anwendungsfall können es aber auch mehr oder weniger Stufen sein. Nun wird für jeden Auftrag festgelegt, mit welcher Intensitätsstufe das jeweilige Auftragsziel verfolgt werden soll. Um nicht ein ähnlich komplexes Problem zu erzeugen, wie es oben beschrieben wurde, wird hierzu eine Matrix aus den Auftragszielen *Termin* und *Materialfluss* und den Werten der Auftragsattribute *Auftragstyp*, *Portfolioklassifizierung* und *Anzahl Arbeitsgänge* gebildet, wie sie in **Bild 5.2** dargestellt ist. Die Matrix kann durch weitere Auftragsziele und/oder weitere Auftragsattribute beliebig erweitert werden, wobei man sich aus Gründen der Übersichtbarkeit unbedingt auf die wesentlichen Ziele und Attribute des jeweiligen Einsatzbereichs beschränken sollte. In die Zellen der Matrix wird nun die Intensität der Zielverfolgung eingetragen. Die planerische Aufgabe besteht darin, festzulegen, welcher Wert eines Auftragsattributs eine bestimmte Zielverfolgungsintensität rechtfertigt. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist, dass die Grundmenge, die klassifiziert werden soll, aus beliebig vielen Aufträgen bestehen kann. Der Gruppierungsaufwand ist in jedem Fall identisch.

Bei der Klassifizierung kommen einerseits logische Gesichtspunkte zum Tragen, andererseits aber auch Erfahrung und Intention des Planers. Die folgenden Beispiele haben keineswegs den Anspruch universeller Gültigkeit. Sie basieren auf der dieser Arbeit zugrunde liegenden Montage,

auch wenn viele Überlegungen auf andere Fertigungen übertragbar sind. Sie sollen zeigen, wie man durch analytische Schlussfolgerungen zu quantifizierbaren Intensitäten der Auftragszielverfolgung gelangt, die sich im Sinne einer individuellen Auftragsagentenkonditionierung geeignet voneinander abgrenzen lassen.

Der *Auftragstyp* oder die *Auftragsstruktur* ist in Komplett-, Teil- und Einfachaufträge gegliedert. Jeder Montageauftrag ist durch eines dieser Merkmale gekennzeichnet. In Bezug auf die Materialflussziele lässt sich keine allgemein gültige Erklärung für eine unterschiedlich intensive Zielverfolgung finden. Daher ist die Einstellung bei allen drei Merkmalen identisch vorzunehmen. Weiter sollte die schwächste Intensitätsstufe gewählt werden, da für dieses Auftragsziel sonst keine Abstufung aufgrund anderer Attribute mehr möglich ist. Demgegenüber ist die Frage der Terminzielverfolgung differenzierter zu betrachten. Komplettaufträge sind von einem oder mehreren Teilaufträgen abhängig. Es besteht also die Gefahr, dass sich der Auftragsstart des Komplettauftrags verzögert, falls einer der Teilaufträge nicht pünktlich fertig wird. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass Komplettaufträge auch dann noch termintreu fertig gestellt werden, sollten sie ihre Terminziele *intensiv* verfolgen. Mit einer *aggressiven* Terminzielverfolgung der Teilaufträge lassen sich die Risiken einer Planterminabweichung und die negativen Folgen für Komplettaufträge weitgehend vermeiden. Ein weiterer Grund für eine aggressive Terminzielverfolgung bei Teilaufträgen ist darin zu sehen, dass ein verspäteter Teilauftrag auch vergebene „Mühen“ der zugehörigen Teilaufträge bedeutet. Diese müssen dadurch unnötig lange in der Montage zwischengepuffert werden und bilden unerwünschte Bestände. Wenn eine Verfügbarkeit des benötigten Rohmaterials vorausgesetzt werden kann, unterliegen die Einfachaufträge keinen externen Einflüssen, die Intensität der Terminzielverfolgung kann daher *normal* eingestellt werden. Der Planer kann diese Einstellungen aufgrund seiner Erfahrung und der Kenntnis des aktuellen Produktionsprogramms ändern, beispielsweise weil einige anstehende Aufträge an einer bestimmten Stationsgruppe besonders gut zu montieren sind, obwohl sie technologisch auch an anderen Stationsgruppen gefertigt werden könnten. Das würde zu einer *intensiven* Materialflusszielverfolgung dieser Aufträge führen.

Ein weiteres Beispiel zielt verstärkt auf die Einhaltung eines möglichst gerichteten Materialflusses ab. In einer Montage darf man diesbezüglich nicht das Bild eines künstlich angelegten Kanals vor Augen haben, wie es beispielsweise einer getakteten Fertigungsstraße entspräche, sondern eher das eines natürlichen Flusslaufs mit Hauptstrom und Nebenarmen. So genannte Hauptströme - also standardisierte Abläufe - lassen sich dadurch erreichen, dass Aufträge mit einer großen Wiederholungshäufigkeit besonders bei der Einhaltung ihrer Planauftragsdurchläufe unterstützt werden. Wie in Kapitel 2.1.3 erläutert wurde, entsprechen Aufträge mit einer hohen Frequenz in der *Portfolio-klassifizierung* den Bereichen I und II. Derartige Aufträge sollten ihre Materialflussziele zumindest *intensiv* verfolgen, im Gegensatz zu Aufträgen aus den Bereichen III und IV, denen aufgrund ihres geringeren und unregelmäßigeren Vorkommens eine *normale* Materialflusszielverfolgung zugeordnet werden sollte. Diese Einstellung ist auch im Hinblick auf die Verfügbarkeit der benötigten Vorrichtungen vorteilhaft, denn durch standardisierte Abläufe entstehen gut planbare Zyklen, die wiederum die pünktliche Bereitstellung der Vorrichtungen sicherstellen können. Es

kann sinnvoll sein, die Portfoliobereiche I und II noch differenzierter zu betrachten. Da bei Aufträgen aus dem Bereich II, die durch kurze *mittlere Belegungszeiten* gekennzeichnet sind, eine Abweichung vom Planauftragsdurchlauf zu einem ungünstigen Verhältnis von Transportaufwand zu Bearbeitungsaufwand führen kann. Dies würde sogar eine *aggressive* Verfolgung der Materialflussziele rechtfertigen.

Das Auftragsattribut *Anzahl Arbeitsgänge* ist bisher noch nicht eingeführt worden. Es teilt die Montageaufträge in Gruppen mit wenigen (hier: 1 bis 3), mittelmäßig vielen (hier: 4 bis 5) und sehr vielen (hier: mehr als 5) Arbeitsvorgängen. Durch eine unterschiedlich intensive Terminzielverfolgung kann der Verhandlungsaufwand bei der Auftragsdurchführung berücksichtigt werden. Mit Verhandlungsaufwand ist hier nicht der Aufwand für eine Verhandlung gemeint, sondern die Anzahl von Verhandlungen, die erfolgreich geführt werden müssen. Ein Montageauftrag mit wenigen Arbeitsvorgängen muss sich viel seltener gegenüber seinen Mitbewerbern durchsetzen als ein Auftrag mit sehr vielen Arbeitsgängen. Dies kann dadurch ausgeglichen werden, dass Montageaufträge mit vielen oder sehr vielen Arbeitsvorgängen ihre Terminziele *intensiv* oder gar *aggressiv* verfolgen. Hierbei ist eine unterschiedliche Behandlung jedoch nur dann sinnvoll, wenn ein entsprechend differenziertes Produktionsprogramm vorliegt. Dies muss für jede Planungsperiode vom Planer beurteilt und entschieden werden.

Nach den Regeln der Kombinatorik lassen sich aus den drei Intensitätsstufen und den beiden Auftragszielen, Termin- und Materialflussziele, neun Gruppen bilden, die im rechten Teil von **Bild 5.2** anhand eines Portfolios dargestellt sind. Dies unterstreicht noch einmal, dass es sich bei der Wahl der Auftragsziele und der Abstufung der Intensitäten unbedingt auf das Wesentliche zu beschränken gilt. Aus fünf Intensitätsstufen und drei Zielen ergäben sich bereits 125 verschiedene Gruppen. Die Schwierigkeit bestünde dabei weniger in der sinnvollen Zuordnung von Intensitätsstufe zu Auftragsattribut und Auftragsziel, sondern im resultierenden Aufwand für die Konditionierung der Auftragsagenten. Denn im ungünstigsten Fall, wenn jede Gruppe zumindest mit einem Auftrag belegt wäre, müssten 125 individuelle Auftragsagenten konditioniert werden. Die Zuordnung der Aufträge zu den Gruppen erfolgt nach den Prinzipien der Mengenlehre, wobei die Spalten der Matrix oder-verknüpft und die Zeilen und-verknüpft sind (siehe **Bild 5.4**). D.h., ein Auftrag verfolgt z.B. seine Terminziele *aggressiv*, wenn entweder sein Attribut *Auftragstyp* oder sein Attribut *Portfoliobereich* oder sein Attribut *Anzahl Arbeitsgänge* auf den Wert *aggressiv* gesetzt wurde. Auf die gleiche Art wird bestimmt, mit welcher Intensität der Auftrag die Materialflussziele verfolgen soll. Die tatsächliche Intensität der Zielverfolgung wird immer von der höchsten Intensitätsstufe bestimmt, die für eines der Auftragsattribute gesetzt wurde. Für den Fall einer *normalen* Materialflussziel- und einer *aggressiven* Terminzielverfolgung würde der Auftrag von der Gruppe *normal-aggressiv* repräsentiert, die im *Intensitätsportfolio* oben links dargestellt ist (siehe **Bild 5.2**, rechter Teil; bei der Gruppenbeschreibung wird immer erst der Bereich auf der Abszisse und dann der Bereich auf der Ordinate genannt). Jede Gruppe repräsentiert nun eine Anzahl von Aufträgen, die im Hinblick auf die Zielverfolgung das gleiche Verhalten aufweisen sollen und demnach von identisch konditionierten Auftragsagenten vertreten werden können.

Im nächsten Schritt muss überprüft werden, ob die vorgenommene Gruppierung zielführend sein kann. Dazu wird die Verteilung der Aufträge auf die Gruppen anhand des Intensitätsportfolios analysiert. Die Anzahl der Mitglieder einer Gruppe kann qualitativ anhand der Größe der Kreisflächen bestimmt werden, wobei der Radius der Kreise proportional zur Anzahl der zugehörigen Aufträge ist, oder aber anhand der absoluten Werteangabe in der jeweiligen Kreismitte. Zur grundsätzlichen Überprüfung der Zweckmäßigkeit einer Verteilung ist die Kreisflächenbetrachtung besser geeignet, da sie auf einen Blick einen Gesamteindruck verschafft. Die Grenzen von einer wahrscheinlich zielführenden Verteilung zu einer sicher nicht zielführenden sind fließend. Daher können hier auch nur einige anzustrebende bzw. zu vermeidende Formen der Verteilung angeführt werden. Anzustreben ist eine Verteilung, deren Schwerpunkt im Bereich *normal-intensiv*, *normal-normal* oder *intensiv-normal* liegt, so dass die Mehrzahl der Aufträge ihre Ziele mit *normaler* oder höchstens eines davon mit *intensiver* Intensität verfolgt. Dadurch gewinnen die extremen Positionen im Wettbewerb an Gewicht und können sich besser gegen die Allgemeinheit durchsetzen. Ungünstig ist es, wenn es keine ausreichende Verteilung gibt und sich nahezu alle Aufträge in einer Gruppe wiederfinden, denn dadurch würde das Ziel einer individuellen Auftragsagentenkonditionierung verfehlt. Gänzlich zu vermeiden sind Verteilungen, bei denen der Schwerpunkt im Bereich *aggressiv-aggressiv* liegt. Zum einen negiert eine derartige Verteilung ebenso das Ziel der individuellen Auftragsagentenkonditionierung, zum anderen hätten Aufträge mit geringerer Intensität fast keine Möglichkeit mehr, ihre Ziele durchzusetzen, weil sie ständig von den aggressiveren verdrängt würden.

Im Ergebnis liegen nach diesem Schritt Auftragsgruppen vor, die im Hinblick auf ihre Zielverfolgung qualitativ beschrieben sind. Die zugehörigen Aufträge einzelner Gruppen können von identisch konditionierten Auftragsagenten vertreten werden, obwohl sie in der Regel unterschiedliche Produkte repräsentieren. Die Software unterstützt den Planer bei der Erstellung geeigneter Auftragsgruppen, indem sie die Auswirkungen jeder Intensitätsstufenänderung sofort im Intensitätsportfolio darstellt. Dadurch kann der Planer die Qualität seiner Einstellungen jederzeit beurteilen und ggf. korrigieren. Die qualitative Beschreibung hat jedoch nur eine ordnende Funktion im Sinne der Komplexitätsbeherrschung und ist für die Realisierung eines Multiagentensystems, dessen Kern eine verhandlungsbasierte Koordination bildet, nicht ausreichend. Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie der Planer konkrete Auftragsagenten für die maximal neun logisch und qualitativ abgestuften Gruppen konditionieren kann.

5.4.2 Verhandlungsfunktionen der Auftragsagenten

Eine individuelle Konditionierung muss die Auftragsagenten in die Lage versetzen, die jeweilige Produktionssituation analysieren und die Ergebnisse anhand einer Zielfunktion bewerten zu können, um anschließend eine entsprechende Maßnahme einzuleiten. Das nachfolgende Beispiel soll dies verdeutlichen:

Ein Auftragsagent erhält von einem Montagestationsagenten ein Angebot für die Bearbeitung des anstehenden Arbeitsvorgangs mit Angabe der geforderten Leistungsvergütung und mit dem Termin

des frühesten Bearbeitungsbeginns. Um dieses Angebot analysieren und bewerten zu können, muss es dem Auftragsagenten möglich sein, auf die Ergebnisse der Belegungsplanung zuzugreifen und seine Umweltsituation wahrzunehmen. Denn nur dann kann er seine individuelle Terminalsituation und die Priorität der anbietenden Montagestation bestimmen. Des Weiteren benötigt der Auftragsagent Zielfunktionen für jede Verhandlungsvariable, um die Leistungsvergütung zu ermitteln, die er maximal für dieses Angebot entrichten würde. Jede Zielfunktion legt dabei fest, um wie viel Prozent die Standardleistungsvergütung aufgrund des angebotenen Termins oder der Priorität anzuheben oder abzusenken ist. Auf Basis der Kenntnis von angebotener und geforderter Leistungsvergütung kann der Auftragsagent nun Maßnahmen zur Annahme oder Ablehnung des Angebots einleiten.

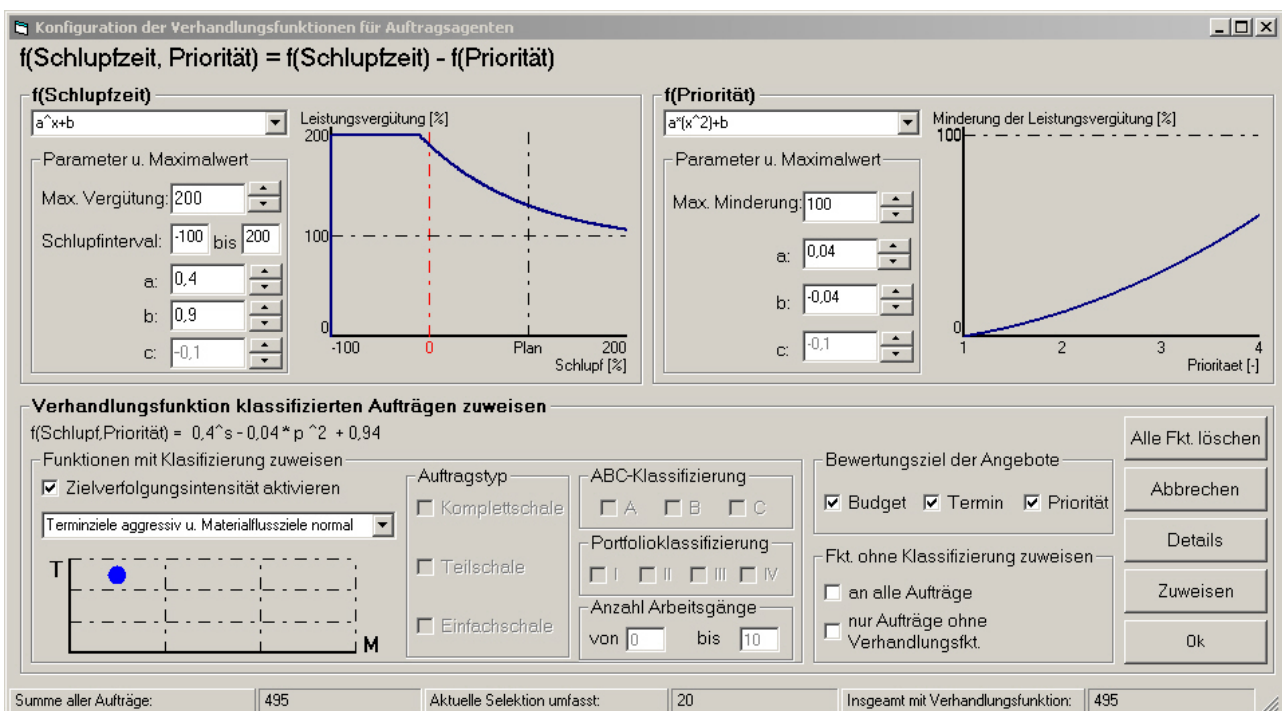


Bild 5.3 Konditionierung der Auftragsagenten (Quelle: Agent-AIM)

Da die Zielfunktionen die Auftragsagenten und Montagestationsagenten dazu befähigen, Verhandlungsentscheidungen zu treffen, werden sie im Folgenden auch Verhandlungsfunktionen genannt.

Die Auftragsziele setzen sich aus Terminzielen und Materialflusszielen zusammen. Daher besteht die Verhandlungsfunktion aus einem Teil zur Bewertung der Terminalsituation und einem Teil zur Bewertung der Materialflusssituation (siehe **Bild 5.3**). Zur Bewertung der Terminalsituation wird der prozentuale arbeitsvorgangbezogene Schlupf verwendet, wie er in Kapitel 2.3.1 definiert wurde. Dadurch kann jederzeit festgestellt werden, ob ein Auftrag beschleunigt oder verzögert wurde. Auf diese Weise wird der Individualität der einzelnen Aufträge Rechnung getragen, denn an dieser Stelle gilt es nicht wie bei einer herkömmlichen Schlupfsteuerung, aus einer Menge von Aufträgen den dringlichsten herauszufiltern, sondern es soll dem Auftragsagenten die Möglichkeit gegeben werden, die Dringlichkeit seines Auftrages zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu bestimmen, um daraus sein Verhalten z.B. bei der nächsten Verhandlung abzuleiten. Dies könnte zwar ebenso auf Basis der absoluten Werte geschehen, doch dann müsste jeder Auftrag gesondert betrachtet werden,

weil je nach Terminierung bei einem Auftrag drei Tage und bei einem anderen Auftrag nur zwei Tage 100% Schlupf entsprechen (siehe Kapitel 2.3.1). Demzufolge ist eine prozentuale Betrachtung unerlässlich, wenn mehrere Auftragsagenten auf Basis von Auftragsgruppen gemeinsamen konditioniert werden sollen.

Die Bewertung der Terminalsituation erfolgt mit Hilfe einer mathematischen Funktion, wobei der prozentuale Schlupf die unabhängige Variable darstellt. Der resultierende Funktionswert ist die Obergrenze der Leistungsvergütung, die in dieser Situation entrichtet werden würde. Die maximale Obergrenze kann aber auch vom Planer bewusst auf einen bestimmten Wert begrenzt werden, d.h., wenn der mathematische Funktionswert größer wäre als der eingestellte Wert, wird er auf den eingestellten Wert reduziert. Aus logischen Gesichtspunkten ist ein Funktionsverlauf für die Bewertung der Terminalsituation sinnvoll, der eine umso höhere Leistungsvergütung zulässt, je geringer der Schlupf wird (siehe **Gleichung 5.1**).

$$Lv_s = a_1^s + b_1 \quad \text{Gl. 5.1}$$

mit:	Lv_s	Leistungsvergütung in Prozent
	a_1	frei wählbarer Parameter ($a_1 \in A$ und $A = \{x 0 < x < 1, x \in \mathbb{R}\}$)
	s	Schlupf in Prozent
	b_1	frei wählbarer Parameter ($b_1 \in \mathbb{R}$)
	\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen

Zur Bewertung der resultierenden Materialflusssituation werden die Prioritäten der Montagestationen ausgewertet, die Angebote für die Bearbeitung des Auftrages gemacht haben. Dazu wird anhand des Planauftragsdurchlaufs festgestellt, welchen Prioritätswert eine anbietende Montagestation hat (siehe Kapitel 2.1.3 Belegungsplanung). Per Definition ist festgelegt, dass der Funktionsteil zur Berücksichtigung der Stationspriorität als Minderung der Leistungsvergütung in die Gesamtfunktion eingeht. Daher sollte eine Funktion gewählt werden, deren Verlauf *keine* Minderung ausweist, falls eine Montagestation den optimalen Prioritätswert *Eins* hat, und eine umso stärkere Minderung, je größer der Prioritätswert ist. Je nachdem, wie intensiv die Materialflussziele verfolgt werden sollen, bieten sich hierfür lineare Funktionen oder auch Funktionen höherer Ordnung (siehe **Gleichung 5.2**) an.

$$M_p = a_2 \cdot p^m + b_2 \quad \text{Gl. 5.2}$$

mit:	M_p	Minderung der Leistungsvergütung in Prozent
	a_2	frei wählbarer Parameter ($a_2 \in A$ und $A = \{x 0 < x, x \in \mathbb{R}\}$)
	p	Priorität einer Montagestation ($p \in P$ und $P = \{1, 2, 3, 4\}$)
	m	frei wählbarer Exponent ($m \in M$ und $M = \{x 1 \leq x, x \in \mathbb{R}\}$)
	b_2	frei wählbarer Parameter ($b_2 \in \mathbb{R}$)

Die natürliche Untergrenze der prozentualen Leistungsvergütung ist mit null Prozent festgelegt, daher muss der maximale Wert der prioritätsbasierten Minderung kleiner sein als die schlupf-basierte Obergrenze der Leistungsvergütung (siehe **Gleichung 5.3**).

$$Lv_{ges} = Lv_s - M_p \quad \text{Gl. 5.3}$$

mit: Lv_{ges} Gesamtleistungsvergütung in Prozent ($Lv_{ges} \in L$ und $L = \{x | 0 \leq x, x \in \mathbb{R}\}$)

Ein wichtiger Aspekt ist die grafische Darstellung der Funktionsteile in **Bild 5.3**. Auf diese Weise ist es für den Planer möglich, die Auftragsagenten gewissermaßen intuitiv zu konditionieren. Denn zum einen ist es schwierig, die gewünschten Funktionsverläufe nur mit Hilfe der mathematischen Gleichungen zu bestimmen. Und zum anderen ist im Sinne der späteren Verhandlungen weniger die konkrete Parametrisierung der einzelnen Funktionen wichtig, sondern vielmehr die differenzierende Abgrenzung der einzelnen Verhandlungsfunktionen gegeneinander. Es gilt also, der qualitativen Beschreibung der Auftragszielverfolgung *normal*, *intensiv* und *aggressiv* einen entsprechenden (Teil-)Funktionsverlauf für jedes Auftragsziel zuzuordnen. Auf diese Weise lassen sich die neun Felder des Intensitätsportfolios durch die Kombination der drei Funktionen für die Terminzielverfolgung mit den drei Funktionen zur Materialflusszielverfolgung abdecken (siehe **Bild 5.4**). Durch das hier beschriebene Vorgehen reduziert sich das Problem, unter Umständen Auftragsagenten für mehrere tausend Aufträge einzeln konditionieren zu müssen, auf die Aufgabe, neun Auftragsgruppen mit geeigneten Verhandlungsfunktionen zu versehen. Hierbei wird die menschliche Vorstellungskraft von der Software durch „sprechende“ Namen der Auftragsgruppen und die grafische Darstellung ihrer Lage im Portfolio unterstützt (siehe **Bild 5.3** unten links). Für jeden Bereich des Intensitätsportfolios sind im Programm Standardfunktionen hinterlegt, die der Planer als Basis nutzen kann (siehe **Bild 5.4**). Die Standardfunktionen werden eingeblendet, sobald der Planer eine neue Auftragsgruppe, z.B. *Terminziele aggressiv* u. *Materialflussziele normal*, selektiert. Änderungen des Planers an diesen Standardfunktionen bleiben während eines Planungszyklus erhalten, so dass zur Verifizierung der zugeordneten Verhandlungsfunktionen beliebig zwischen den Auftragsgruppen gewechselt werden kann.

Um diese Vorteile optimal ausnutzen zu können, ist es sinnvoll, bei der Konditionierung gerichtet vorzugehen. Eine Möglichkeit besteht darin, zu Beginn die Auftragsagenten für Aufträge mit der geringsten Zielverfolgungsintensität (*normal-normal*) zu konditionieren. Im nächsten Schritt wird die Zielverfolgungsintensität eines Auftragsziels gemäß den Intensitätsstufen um eine Stufe erhöht. Dies wird wiederholt, bis die höchste Stufe erreicht ist. Anschließend wird die Zielverfolgungsintensität des anderen Auftragsziels um eine Stufe erhöht. Abschließend würden bei diesem Vorgehen die Auftragsagenten der Auftragsgruppe (*aggressiv-aggressiv*) konditioniert (siehe **Bild 5.4**). Eine andere Möglichkeit wäre, bei der letztgenannten Auftragsgruppe zu beginnen und bei der Auftragsgruppe mit der geringsten Zielverfolgungsintensität (*normal-normal*) zu enden. Auf diese Weise werden immer Auftragsagenten benachbarter Auftragsgruppen konditioniert. Unabhängig davon, in welcher dieser Reihenfolgen die Auftragsagenten konditioniert werden, kann bei diesem Verfahren jeweils ein Funktionsteil unverändert bleiben und die Variation der einzelnen

Funktionsteile muss immer nur in ab- oder aufsteigender Zielverfolgungsintensität vorgenommen werden. Dadurch wird eine sinnvolle Abgrenzung der Verhandlungsfunktionen verschiedener Intensitätsstufen zusätzlich unterstützt.

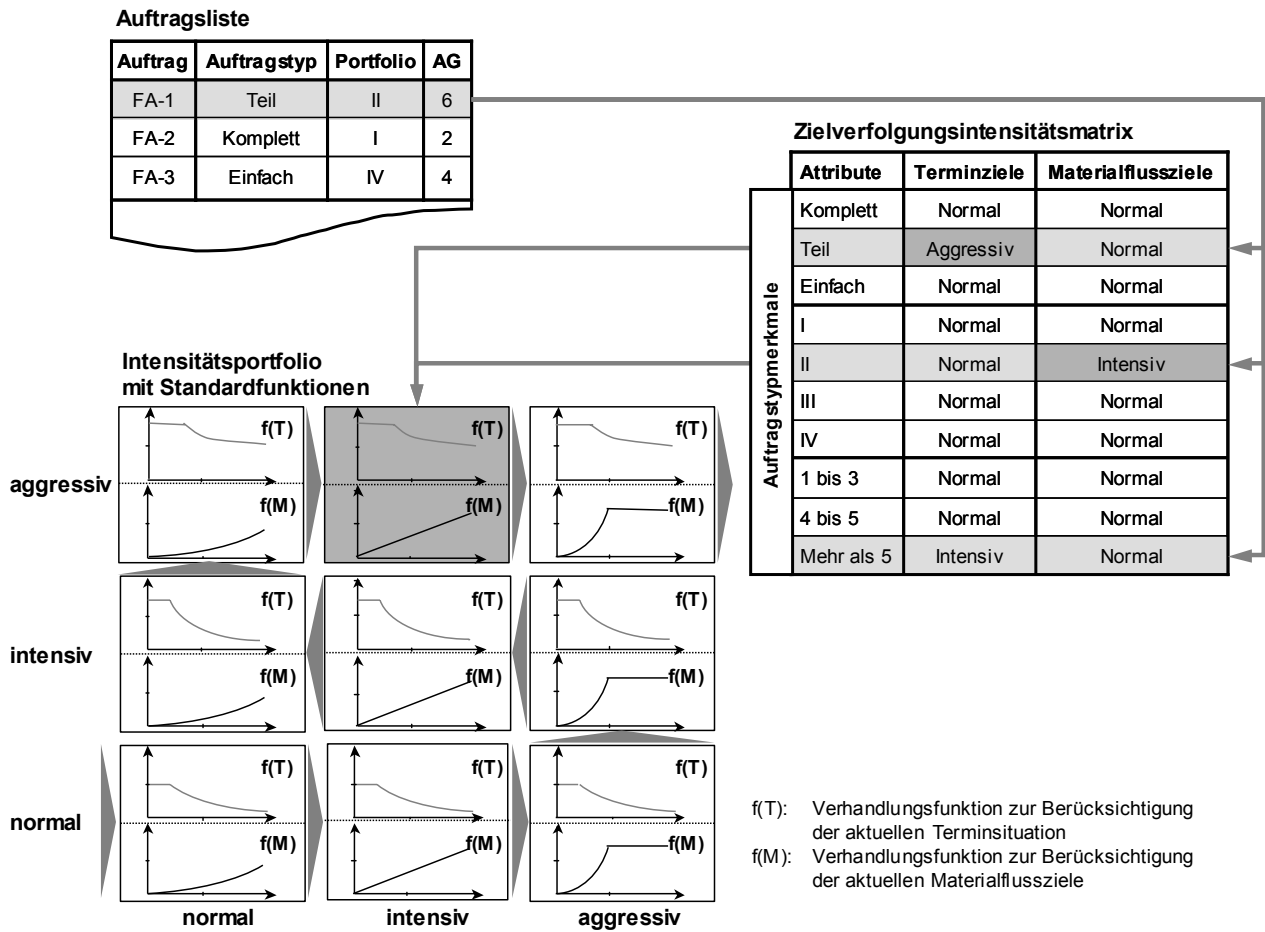


Bild 5.4 Intensitätsportfolio mit qualitativen Beispielen für Verhandlungsfunktionen

Wie es im unteren Teil von **Bild 5.3** dargestellt ist, bleibt es dem Planer freigestellt, die Gruppen auf Basis des Intensitätsportfolios zu verwenden oder eigene Auftragsgruppierungen zu bilden, um deren Auftragsagenten bestimmte Verhandlungsfunktionen zuzuweisen. Häufig ist sogar ein gemischtes Vorgehen sinnvoll, beispielsweise wenn der Planer aufgrund seiner Erfahrung in Ausnahmefällen ganz bestimmte Auftragsgruppen oder gar einzelne Aufträge individuell gewichten möchte oder muss. Dadurch bietet die vorgestellte Methode einerseits ein Maximum an Auftragsindividualität und andererseits wirkt sie ordnend auf die Komplexität, ohne sie unnötig zu reduzieren. Weiter befriedigt sie trotz individueller Zielgewichtung den strategischen Anspruch an die Auftragsagenten zur Berücksichtigung der Unternehmensziele, da die Einteilung der Aufträge in die Intensitätsgruppen auf strategischen Überlegungen basiert.

5.5 Konditionierung der Stationsagenten

Aus der Perspektive des Gesamtsystems Montage muss eine zeitlich gleichmäßige Auslastung aller Arbeitssysteme innerhalb der verschiedenen Gruppen angestrebt werden. Nur so lassen sich stark schwankende Durchlaufzeiten vermeiden, die sich sowohl auf die Planbarkeit als auch auf die

Termintreue negativ auswirken (siehe Kapitel 2.3.2). Die Konditionierung der einzelnen Stationsagenten muss also neben einer individuellen Zielverfolgung die Berücksichtigung der Montageziele sicherstellen.

Eine Grundvoraussetzung dafür ist, dass alle Stationen einer Stationsgruppe von identisch konditionierten Stationsagenten vertreten werden. Durch diese Maßnahme wird erzwungen, dass sich alle Stationsagenten einer Gruppe bei gleicher Wahrnehmung der Umweltsituation und identischem innerem Zustand kongruent verhalten. Dies bedeutet konkret, dass zwei Stationsagenten bezüglich der Bearbeitung eines bestimmten Arbeitsvorganges dieselben Angebote unterbreiten müssen. Dies ist weder als Einschränkung der Verhandlungsfähigkeit noch als Individualitätsverlust der einzelnen Stationsagenten zu sehen, sondern dient lediglich der Herstellung von Chancengleichheit in einem verhandlungsbasierten Agentensystem. Denn im operativen Montagebetrieb ist es sowohl aus logistischen als auch aus monetären Gesichtspunkten nicht zielführend, den Deckungsbeitrag einzelner Stationen zu Lasten anderer Stationen einer Gruppe zu maximieren. Dies gilt jedoch nur für Stationsagenten, die Montagestationen *einer* Gruppe vertreten. Die Stationsagenten *verschiedener* Gruppen müssen aus nachfolgend beschriebenen Gründen differenziert konditioniert werden.

Da der Stationsagent nur seine individuellen Ziele kennt, muss sich die geforderte Berücksichtigung der übergeordneten Montageziele aus der Art und Weise ergeben, wie er seiner Kernaufgabe nachkommt, die zugehörigen Montagestationen mit Arbeit zu versorgen. Ebenso wie Auftragsagenten muss ein Stationsagent dazu die jeweilige Produktionssituation analysieren können, um die Ergebnisse anhand einer Zielfunktion zu bewerten und eine entsprechende Maßnahme, z.B. Reduzierung der geforderten Leistungsvergütung, einzuleiten. Der Zielfunktion fällt in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle zu. Denn sowohl die Bewertung der Produktionssituation als auch die daraus abgeleitete Maßnahme hängen direkt von ihr ab. Demzufolge muss der Verlauf der Zielfunktion so geartet sein, dass die übergeordneten Montageziele automatisch mitverfolgt werden.

Wie in Kapitel 5.2 dargestellt wurde, konkurrieren die einzelnen Stationsagenten um die Bearbeitung bestimmter Arbeitsvorgänge. Die Intensität, mit der sich ein Stationsagent um die Bearbeitung bemüht, wird durch die Höhe der geforderten Leistungsvergütung beschrieben und hängt vom aktuellen Arbeitsvorrat der zugehörigen Montagestation ab. Dieser Arbeitsvorrat wird als Auftragsdirektbestand bezeichnet und nicht in Stunden, sondern in Stück (Anzahl der Aufträge in der Warteschlange der Montagestation) angegeben. Dadurch können auch Montagestationen aus verschiedenen Stationsgruppen von identisch konditionierten Stationsagenten vertreten werden (vgl. dazu Kapitel 5.4.2). Ein weiterer Grund ist das *Prinzip der kleinstmöglichen Entscheidungsbindung* zur Erhaltung einer größtmöglichen Flexibilität. Denn aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungszeiten könnten bei einer reichweitenorientierten Angabe des Direktbestandes Montageaufträge früher als nötig fest zugewiesen werden (siehe Kapitel 3.4) [vgl. Lödding, 2001]. Bei einer ausreichenden Transportkapazität muss aber nur der nachfolgende Auftrag fest zugewiesen sein. Dieses Prinzip präjudiziert also eine begrenzte Warteschlangenlänge der einzelnen Montagestationen und die Bildung gemeinsamer Warteschlangen. Speziell an den Eng-

pässen kann die zugelassene Länge der direkten Warteschlangen sehr kurz sein, da eine kontinuierliche Versorgung der Montagestation mit Arbeit durch eine gemeinsame Warteschlange sichergestellt ist (siehe **Bild 5.5**).

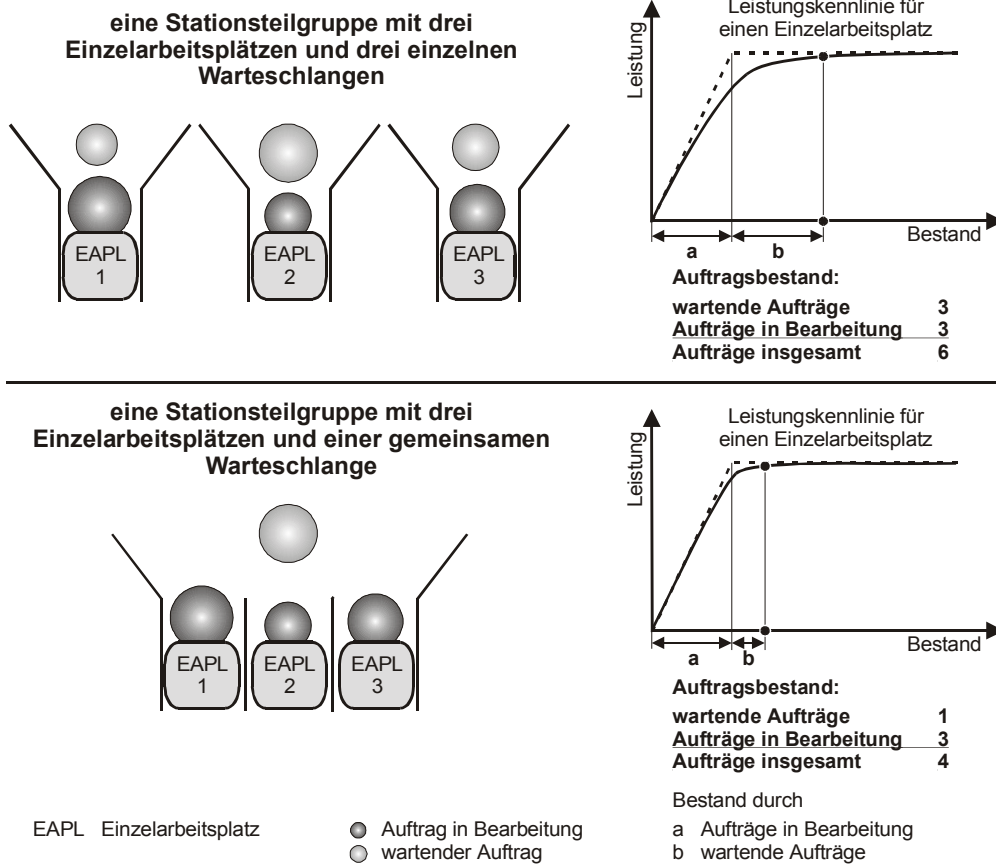


Bild 5.5 Gemeinsame Warteschlangen zur Bestandssenkung [nach Nyhuis]

An Nicht-Engpässen ist mittelfristig kein erhöhter Bestand zu erwarten, daher spielt die zulässige Warteschlangenlänge an den betreffenden Montagestationen nur eine untergeordnete Rolle. Wie bereits mehrfach angeführt wurde, kann nur über die Bearbeitung von Aufträgen verhandelt werden, die theoretisch sofort begonnen werden können, d.h., das benötigte Rohmaterial muss verfügbar sein oder der vorige Arbeitsvorgang muss bereits abgeschlossen sein. Aus diesen Gründen steht eine etwas verfrühte Zuweisung einzelner Arbeitsvorgänge an Nicht-Engpässen in keinem Widerspruch zu den Produktionszielen der Montage, sondern dient einer Flexibilisierung der innerbetrieblichen Transportlogistik.

Kurze Warteschlangen an den Engpässen setzen flexible Transportkapazitäten voraus. Das benötigte Material für einen neu zugewiesenen Arbeitsvorgang muss zeitnah, d.h. im Normalfall sofort nach der Materialanforderung, zu den Montagestationen transportiert werden, um einen Materialflussabbruch zu vermeiden. Anderenfalls wird das Zeitfenster, in dem die Transporte stattfinden können, größer, wenn an Nicht-Engpässen die zulässige Länge der Warteschlangen erhöht wird und die Arbeitsvorgänge dadurch früher zugewiesen werden können. Auf diese Weise kann die Versorgung der Engpässe bedarfsgerecht erfolgen, wohingegen die Materialtransporte zu den Nicht-Engpässen kurzzeitig hinten angestellt werden können. Das *Prinzip der kleinstmöglichen*

Entscheidungsbindung kann an den Nicht-Engpässen zu Gunsten der Transportkapazitäten gelockert werden.

Die Laufvariable der Ziel- oder Verhandlungsfunktion der Stationsagenten ist die Anzahl der Arbeitsvorgänge, die sich in der direkten Warteschlange befinden. In einer Verhandlung ist für die Auftragsagenten jedoch nicht nur die geforderte Leistungsvergütung, sondern auch der frühestmögliche Bearbeitungsstarttermin bzw. Liefertermin von Interesse. Dieser Termin wird anhand des im Auftragsvorrat gebundenen Stundenvolumens und des Schichtkalenders der jeweiligen Montagestation berechnet.

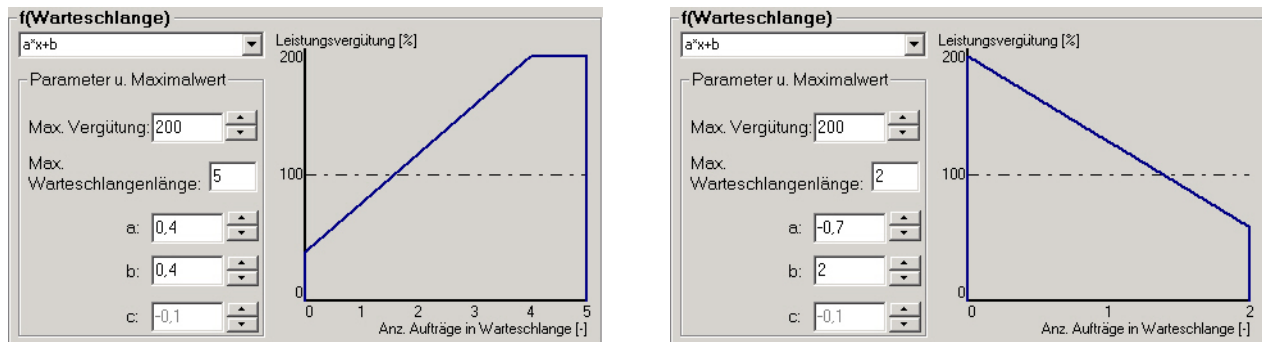


Bild 5.6 Proportional steigender und abfallender Verlauf einer Verhandlungsfunktion (Quelle: Agent-AIM)

Zur Festlegung konkreter Funktionsverläufe und der zulässigen Warteschlangenlänge bedarf es noch einiger weiterer Überlegungen.

Nicht-Engpässe sind dadurch definiert, dass sie in einer bestimmten (Planungs-)Periode mehr Kapazität zur Verfügung stellen können, als zur vollständigen Bearbeitung des anstehenden Produktionsprogramms benötigt wird. Betrachtet man derartige Stationsgruppen, so ist der Auftragsvorrat aufgrund der Dynamik des Montageprozesses nicht konstant, sondern schwankend. Zeitweilig können weniger Aufträge vorliegen, als Montagestationen zu dieser Gruppe gehören. In diesem Fall könnte ein neu eintreffender Auftrag aus kapazitiver Sicht sofort bearbeitet werden. Anderenfalls könnten aber auch mehr Aufträge vorliegen, die dann im Sinne der übergeordneten Montageziele gleichmäßig auf die zugehörigen Montagestationen verteilt werden müssten. Dies würde ein Funktionsverlauf unterstützen, bei dem sich die geforderte Leistungsvergütung proportional zur Anzahl an Aufträgen in der direkten Warteschlange einer Montagestation verhält (siehe **Bild 5.6** linker Teil). Dann würde automatisch die Montagestation mit dem kleinsten Auftragsvorrat das günstigste Angebot für die Bearbeitung eines bestimmten Arbeitsvorgangs unterbreiten (siehe **Gleichung 5.4**). Im Ergebnis ist dadurch das Niveau der verschiedenen Warteschlangen innerhalb einer Stationsgruppe nahezu gleich (siehe Kapitel 7.3.2).

Ein solcher Verlauf wäre grundsätzlich auch für Engpässe geeignet. Andererseits sind dringende Aufträge bereit, eine hohe Leistungsvergütung zu bezahlen, wenn sie dafür schneller bearbeitet werden. Die Verhandlungsfunktion der Stationsagenten müsste also derart gestaltet werden, dass sie für den ersten Auftrag eine hohe Leistungsvergütung fordert (siehe **Bild 5.6** rechter Teil). Um

einen Materialflussabriss zu vermeiden, sollte die geforderte Leistungsvergütung für den nächsten Auftrag geringer ausfallen, da es dann eine größere Anzahl potenzieller Nachfrager gibt. Einen geeigneten Funktionsverlauf beschreibt **Gleichung 5.5**.

$$Lv_{\text{gef}} = a \cdot w^m + b \quad \text{Gl. 5.4}$$

mit:	Lv_{gef}	geforderte Leistungsvergütung
	a	frei wählbarer Parameter ($a \in A$ und $A = \{x 0 < x, x \in \mathbb{R}\}$)
	w	Anzahl der Aufträge in der direkten Warteschlange
	m	frei wählbarer Exponent ($m \in M$ und $M = \{x 0 < x, x \in \mathbb{R}\}$)
	b	frei wählbarer Parameter ($b \in \mathbb{R}$)

$$Lv_{\text{gef}} = a^w + b \quad \text{Gl. 5.5}$$

mit:	a	frei wählbarer Parameter ($a \in A$ und $A = \{x 0 < x < 1, x \in \mathbb{R}\}$)
------	-----	--

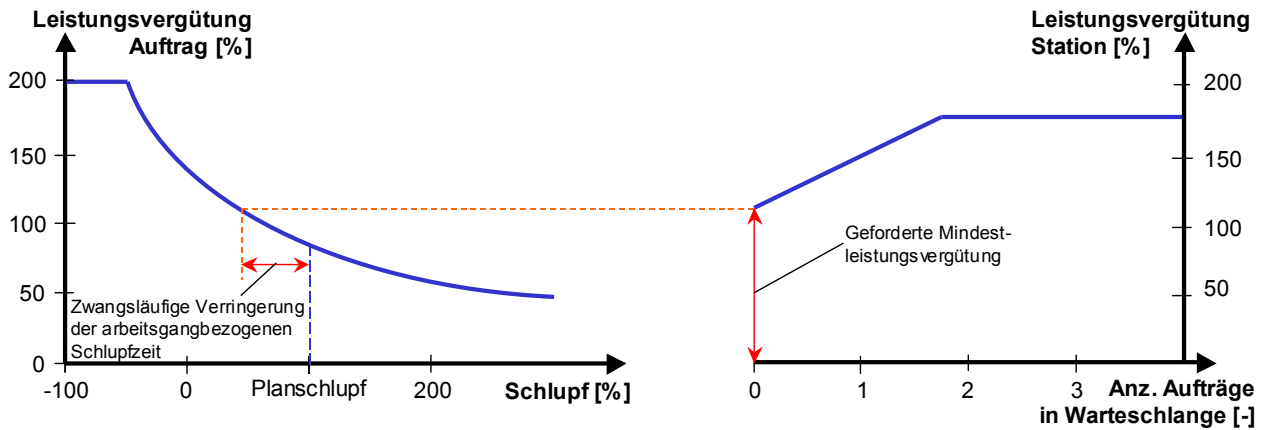
Bei einer derartigen Verhandlungsfunktion werden dringende Aufträge vorgezogen, weil weniger dringende Aufträge die hohe Leistungsvergütung aufgrund ihrer Verhandlungsfunktion nicht aufbringen dürfen. Die zulässige Warteschlangenlänge sollte auf zwei Aufträge begrenzt werden, weil dadurch einerseits die Materialversorgung der einzelnen Montagestationen gesichert ist und andererseits die maximale Flexibilität durch eine gemeinsame Warteschlange erhalten bleibt. Bei Nicht-Engpässen ist dieses Vorgehen nicht zielführend, denn die Aufträge werden erst bearbeitet, wenn ein Auftrag so dringend ist, dass er die geforderte Leistungsvergütung akzeptiert. Da bei einem solchen Funktionsverlauf die geforderte Leistungsvergütung für weitere Aufträge geringer ist, belegen die übrigen Aufträge erst die restlichen Plätze in der Warteschlange dieser Montagestation. Die übrigen Stationen bekommen erst Arbeit zugewiesen, wenn das gleiche Phänomen erneut auftritt. Das führt zu einer ungleichmäßigen Stationsauslastung und unnötig langen sowie schwankenden Durchlaufzeiten der Montageaufträge.

Weitere Gründe dafür, Stationsagenten für verschiedene Stationsgruppen differenziert zu konditionieren, können technologische Kriterien sein. So unterscheiden sich zwei Stationsgruppen ggf. nur dadurch, dass die eine modernere Technologien einsetzt als die andere und dadurch weniger störanfällig ist. Der Planer kann nun die Verhandlungsfunktionen so definieren, dass die Stationsagenten der neueren Montagestationen günstigere Angebote unterbreiten, um eine höhere Frequenzierung dieser Stationsgruppe zu erreichen. Da dies sehr spezielle Gründe sind, die je nach betrachteter Montage anders gelagert sein können, sollen sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden.

Bei der Bestimmung des konkreten Funktionsverlaufs wird der Planer ebenfalls grafisch unterstützt (siehe **Bild 5.6**). Falls ein besonderer Funktionsverlauf der geforderten Leistungsvergütung gewünscht ist, ein maximaler Funktionswert aber nicht überschritten werden soll, kann der Planer den Wert für die maximale Leistungsvergütung begrenzen. Zur Unterstützung der Flexibilitäts-

konzepte kann die zulässige Länge der Warteschlangen eingestellt werden. Eine Zuweisung bestimmter Verhandlungsfunktionen an mehrere Gruppen z.B. an alle Nicht-Engpässe ist möglich, aber aus oben genannten Gründen unterbindet die Software die Zuweisung von Verhandlungsfunktionen an einzelne Stationen.

a) Auftragsverzögernde Konditionierung der Produktionsagenten



b) Unbrauchbare Konditionierung der Produktionsagenten

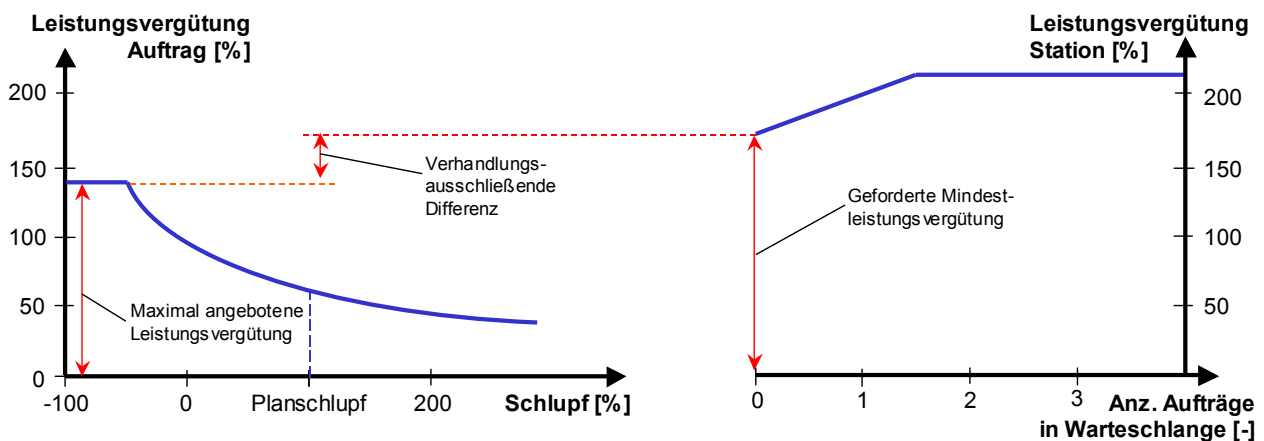


Bild 5.7 Plausibilitätsprüfung der Verhandlungsfunktionen

Im Hintergrund überprüft das Programm ständig die Plausibilität der Verhandlungsfunktionen aller Produktionsagenten. Es wird getestet, ob durch die jeweiligen Funktionsverläufe sinnvolle Verhandlungen unterstützt werden bzw. ob zumindest ein theoretischer Verhandlungsraum garantiert werden kann. Im ersten Fall wird der Anwender benachrichtigt, sobald die Verhandlungsfunktionen der Auftragsagenten so definiert wurden, dass Angebote von Montagestationen zum Plantermin nicht akzeptiert werden können, weil die geforderte Mindestleistungvergütung der Stationsagenten zu diesem Termin oberhalb der angebotenen Leistungsvergütung der Auftragsagenten liegt (siehe **Bild 5.7a**). Dies gilt unabhängig vom Prioritätswert der Montagestationen, so dass der Anwender entscheiden kann, ob er entsprechende Anpassungen an den Verhandlungsfunktionen vornehmen möchte oder nicht. Denn nur für den Fall, dass sich diese Konstellation bei allen in Frage kommenden Montagestationen einstellt, reduziert sich die arbeitsgangbezogene Schlupfzeit zwangsläufig. Andererseits wird festgestellt, ob die geforderte Mindestleistungvergütung der Montagestationsagenten kleiner ist als die maximale Leistungsvergütung der Auftragsagenten (siehe **Bild 5.7b**). Hierbei werden die technologischen

Mindestanforderungen, wie sie im Arbeitsplan definiert sind, berücksichtigt, d.h., es werden alle möglichen Verhandlungspartner analysiert. Der Planer wird benachrichtigt, sobald er Funktionsverläufe definiert hat, die eine Bearbeitung eines bestimmten Arbeitsvorganges ausschließen. Dies ist besonders im Hinblick auf eine vollständig automatisierte Durchführungsebene wichtig, da es dort auf keinen Fall zu systematischen Blockaden kommen darf.

5.6 Kommunikation der Produktionsagenten

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Möglichkeiten zur interaktiven Definition der Verhaltensmuster der Produktionsagenten beschrieben. Weiter wurden die Produktionsagenten den Aufträgen und Montagestationen zugewiesen. Im Folgenden bilden die Interessenten (Aufträge, Montagestationen, Lager etc.) und ihre Agenten eine Einheit. Im Sinne der Systemtheorie repräsentieren diese Einheiten eigene Subsysteme, so dass im Folgenden die Bezeichnungen des Interessenten und des Agenten synonym für das Subsystem verwendet werden.

Wie bereits mehrfach angeführt wurde, ist der erhöhte Koordinationsaufwand ein wesentlicher Kritikpunkt an dezentralen Fertigungssteuerungskonzepten und ein häufiger Grund dafür, dass Multiagentensysteme in der Praxis nicht eingesetzt werden. Da Kommunikation ein grundlegendes Mittel für die Koordination darstellt, muss sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität der notwendigen Kommunikation durch intelligente Koordinationsmechanismen und die Auswahl geeigneter Kommunikationsverfahren minimiert werden.

Im Sinne einer Reduzierung des gesamten Kommunikationsaufkommens wird im hier vorgestellten Ansatz grundsätzlich kein reines Shared-Memory-Verfahren eingesetzt. Ebenso werden kommunikationsintensive Verhandlungsprotokolle nur für den Fall eingesetzt, dass eine verbindliche Einigung zwischen Auftrags- und Montagestationsagenten notwendig ist. Durch die Einführung des Koordinationsagenten können in diesem Zusammenhang Broadcast-Nachrichten (Nachrichten an alle Agenten des Multiagentensystems) jedoch ausgeschlossen werden. Die konkreten Kommunikationsbeziehungen innerhalb des Multiagentensystems und das jeweils eingesetzte Kommunikationsverfahren zeigt **Bild 5.8**. Eine wesentliche Aussage dieses Bildes ist, dass die Informationen zwischen den Produktionsagenten ausschließlich direkt mit Hilfe des Message-Passing-Verfahrens ausgetauscht werden. Darüber hinaus lassen sich zwei unterschiedliche Formen der Kommunikation zwischen den Produktionsagenten erkennen. Zum einen die kontraktnetzbasierende Kommunikation zwischen Auftrags-, Montagestations- und Koordinationsagent, die in Kapitel 6 detailliert erläutert wird, und zum anderen die Kommunikation der Auftrags- und Montagestationsagenten mit dem Lager-, Transport- und Vorrichtungsagenten. Diese Agenten sind singular und statisch, d.h., sie existieren während des gesamten Lebenszyklus der Agentengesellschaft und sie haben feste Adressen. Den Aktionen dieser Agenten geht immer eine Kommunikation mit anderen Agenten voran, d. h. nur Auftrags- und Montagestationsagenten können von sich aus bestimmte Aktionen gezielt initiieren (siehe auch Kapitel 5.2). Dabei ist es vorteilhaft, dass z.B. der Lageragent keinen der Auftragsagenten kennen muss, sondern nur die Auftragsagenten müssen die Adresse des Lageragenten in ihrer lokalen Wissensbasis gespeichert

haben. Falls ein Auftragsagent in einem Lager nach einem bestimmten Teil suchen möchte, muss die Nachricht an den Lageragenten wenigstens folgende Informationen beinhalten:

- Die momentane Adresse des Auftragsagenten,
- eine identifizierende Bezeichnung des gesuchten Teils und
- evtl. den Status, in dem sich das gesuchte Teil befinden muss.

Der Lageragent kann mit Hilfe der Adresse des Auftragsagenten die Anfrage beantworten, nachdem er das oder die Lager durchsucht hat. Im Anschluss an den Dialog kann der Lageragent die Adresse des Auftragsagenten wieder „vergessen“. Allerdings kann diese Form des Dialogs auch mehr als zwei Agenten betreffen. In diesen Fällen entstehen Informationsketten, die sich z.B. über einen Montagestationsagenten, den Transportagenten und den Lageragenten erstrecken.

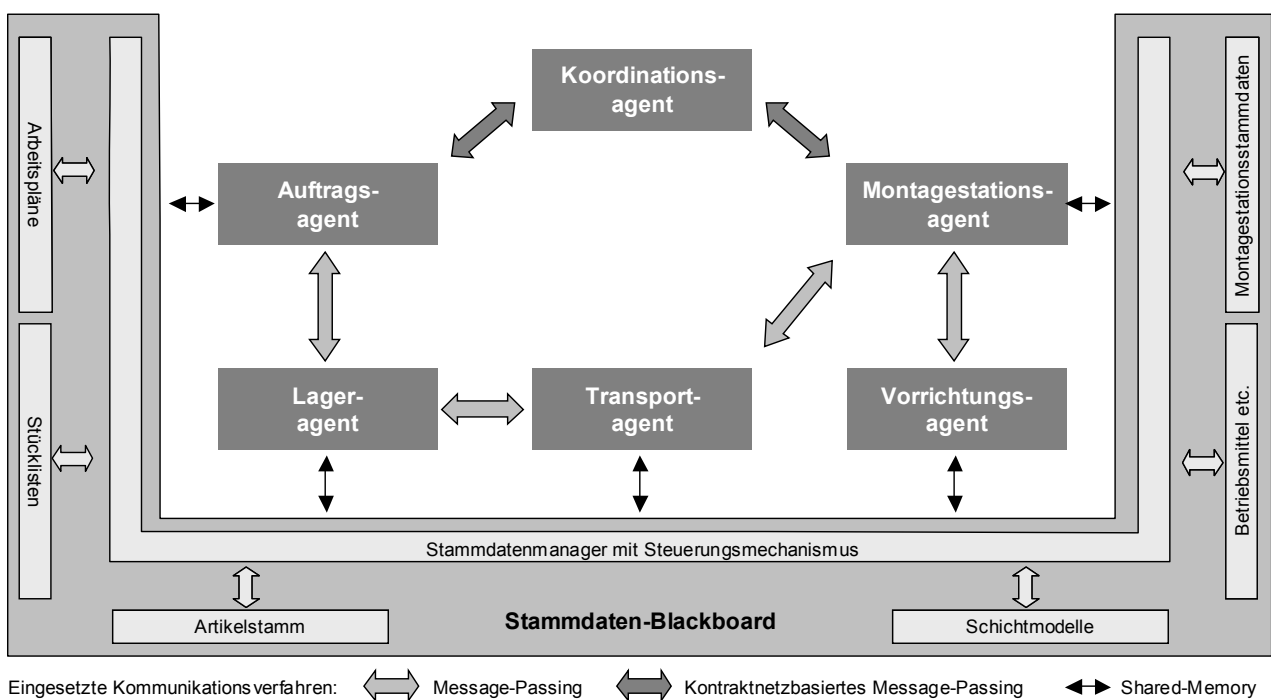


Bild 5.8 Kommunikationsbeziehungen zwischen den Produktionsagenten und mit dem Stammdaten-Blackboard

Des Weiteren zeigt **Bild 5.8** das so genannte Stammdaten-Blackboard. Dieses Blackboard wurde entwickelt, um Probleme mit Datenredundanzen zu vermeiden, welche insbesondere im Zusammenhang mit dezentralen Fertigungssteuerungskonzepten eine bedeutende Rolle spielen. Dabei ist heute aufgrund der überproportionalen Hardware-Entwicklung, insbesondere bezüglich der Speicherkapazität, weniger die erhöhte Datenmenge entscheidend. Viel verheerender können Fehler aus unvollständigen Datenänderungen sein. Daher speichert dieses Blackboard in verschiedenen Regionen alle Daten, die sonst redundant als individuelles Wissen in den Produktionsagenten selbst abgelegt werden müssten. Der Zugriff auf diese Daten erfolgt durch das Shared-Memory-Verfahren, wobei ein spezieller Steuerungsmechanismus die geforderten Informationen bereitstellt (siehe **Bild 5.8**). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll auf eine detaillierte Beschreibung der Kommunikationsvorgänge zwischen den Produktionsagenten und

dem Stammdaten-Blackboard verzichtet werden, weil diese Form der Datenhaltung und des Datenzugriffs heute dem Stand der Technik entsprechen.

Diese bisher nur abstrakt beschriebenen Kommunikationsvorgänge sollen im Folgenden anhand von zwei konkreten Kommunikationsabläufen detaillierter erläutert werden, weil diese Abläufe den Kern der Kommunikation im Rahmen der Auftragsabwicklung repräsentieren. Ihre Beschreibung dient zum einen dem besseren Verständnis für die Abläufe innerhalb der betrachteten Multiressourcen-Montage und zum anderen wird durch sie nochmals die Notwendigkeit einer möglichst effektiven Kommunikation unterstrichen.

5.6.1 Kommunikation zur Bewältigung der Auftragsabwicklung

Im Rahmen der Auftragsabwicklung ist es die Aufgabe einer Fertigung oder einer Montage, ein vorgegebenes Produktionsprogramm möglichst planmäßig abzuwickeln. Diesbezüglich stellt die Fertigstellung eines einzelnen Arbeitsvorgangs in dem hier vorgestellten agentenbasierten Ansatz ein zentrales Ereignis dar. Denn einerseits muss der Auftragsagent die Bearbeitung des nächsten Arbeitsvorgangs sicherstellen, falls noch ein weiterer Arbeitsvorgang ansteht (siehe **Bild 5.9**), und andererseits muss der Montagestationsagent die Montagestation erneut mit Arbeit versorgen, falls es die kapazitive Situation der Montagestation zulässt (siehe **Bild 5.10**).

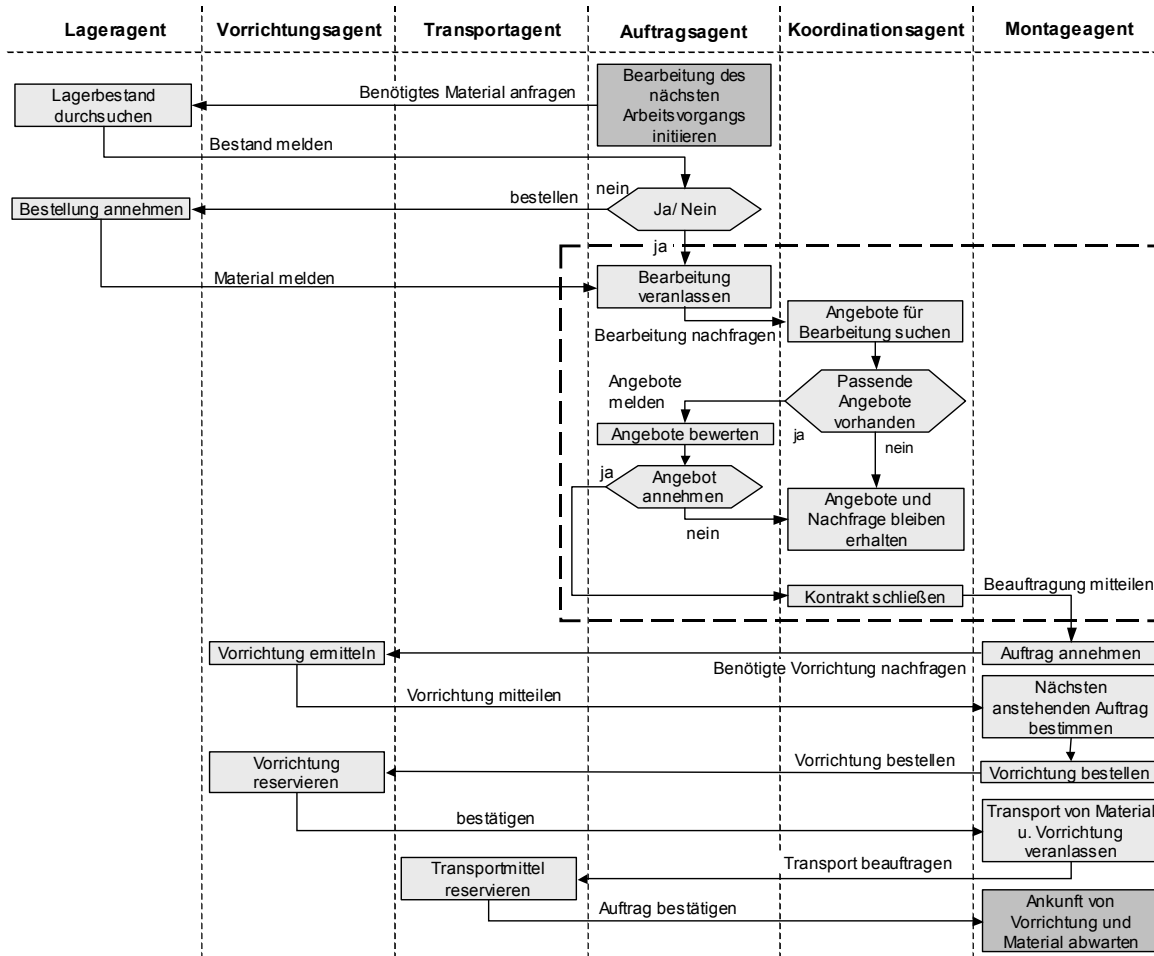


Bild 5.9 Auftragsagent initiiert einen Kommunikationsablauf

Die in **Bild 5.9** dunkel-grau hinterlegte Startaktion »*Bearbeitung des nächsten Arbeitsvorgangs initiieren*« des Auftragsagenten kann sowohl durch die Freigabe eines neuen Auftrags als auch durch die oben beschriebene Beendigung eines Arbeitsvorgangs an einer Montagestation ausgelöst werden. Bevor jedoch um die eigentliche Bearbeitung nachgesucht werden kann, muss erst die Verfügbarkeit des benötigten Materials sichergestellt werden. Zu diesem Zweck fragt der Auftragsagent beim Lageragenten mittels des Message-Passing-Verfahrens nach, ob die benötigten Materialien, bei denen es sich sowohl um Rohmaterial als auch um vormontierte Baugruppen handeln kann, bereits vorrätig sind. Falls dies der Fall ist, reserviert der Lageragent die gewünschte Menge dieser Materialien für den Auftragsagenten und meldet ihm den Bestand zurück, anderenfalls wird ein *Null-Bestand* zurückgemeldet. Für das fehlende Material wird dann vom Auftragsagenten eine Bestellung an den Lageragenten gesandt. Der Auftragsagent muss nun solange warten, bis das bestellte Material vorrätig ist. Erst wenn er vom Lageragenten die Bestätigung erhält, kann er die Bearbeitung des Arbeitsvorgangs veranlassen, indem er beim Koordinationsagenten verbindlich um die Bearbeitung nachfragt. Der Koordinationsagent als Vermittler zwischen Angeboten der Montagestationsagenten und Nachfragen der Auftragsagenten sucht nun nach passenden Angeboten für die Bearbeitung. Als *passend* gelten Angebote von Montagestationsagenten, deren zugehörige Montagestationen technologisch in der Lage sind, den nachgefragten Arbeitsvorgang zu bearbeiten. Falls derartige Angebote existieren, werden sie dem Auftragsagenten zur Bewertung übermittelt. Wenn der Auftragsagent ein Angebot positiv bewertet und die Annahme desgleichen dem Koordinationsagenten mitteilt, ist dies ebenfalls verbindlich, das heißt, der Vertrag zwischen Montagestationsagent als Anbieter und Auftragsagent als Nachfrager wird im Sinne des Kontraktnetzprotokolls geschlossen und ist von beiden Vertragspartnern einzuhalten. Wenn der Auftragsagent kein Angebot annimmt oder der Koordinationsagent kein passendes Angebot findet, bleiben sowohl Angebot als auch Nachfrage erhalten. Für den Auftragsagenten bedeutet dies, dass er nun solange warten muss, bis er vom Koordinationsagenten über neue passende Angebote unterrichtet wird. Der Kommunikationsablauf endet dann bereits an dieser Stelle. Anderenfalls wird der entsprechende Montagestationsagent vom Koordinationsagenten in Form einer Beauftragung über das Zustandekommen des Kontrakts informiert.

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass hier nur die Kommunikationsabläufe erläutert werden sollen, eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Prozesse in den gestrichelt umrandeten Bereichen von **Bild 5.9** und **5.10** folgt im nächsten Kapitel.

Sobald der Montagestationsagent einen neuen Auftrag oder genauer die Bearbeitung eines einzelnen Arbeitsvorgangs eines Auftrages angenommen hat, informiert er sich, nun wieder mittels des einfachen Message-Passing-Verfahrens, beim Vorrichtungsagenten über eventuell benötigte Vorrichtungen. Im nächsten Schritt bestimmt der Montagestationsagent den nächsten zu fertigenden Auftrag in seiner Warteschlange, der sich noch nicht in Bearbeitung befindet. Nur für diesen Auftrag werden die benötigten Vorrichtungen bestellt, um eine möglichst kurze Belegungszeit dieser Vorrichtungen zu garantieren. Der Vorrichtungsagent nimmt dann eine Reservierung für diese Bestellung vor und bestätigt sie dem Montagestationsagenten. Im Anschluss

daran beauftragt dieser den Transportagenten mit dem Transport des benötigten Materials und der Vorrichtungen. Der Transportagent bestätigt den Auftrag und reserviert ein passendes Transportmittel. Obwohl auch dieser Dialog eine Beauftragung und eine Auftragsbestätigung umfasst, kommt trotzdem das klassische Message-Passing-Verfahren zum Einsatz, da der Transportagent rein regelbasiert arbeitet und demnach keinen Entscheidungsspielraum besitzt (siehe Kapitel 4.1 und 5.2). Das heißt, er reserviert das passende Transportmittel und sobald ein solches frei wird, erteilt er diesem den entsprechenden Transportauftrag. Falls der gesamte Kommunikationsablauf nicht bereits aufgrund von nicht passenden Angeboten oder der Ablehnung aller Angebote vorzeitig abgebrochen wurde, stellt das »Abwarten auf die Ankunft von Material und Vorrichtung« des Montagestationsagenten die Endaktion dar.

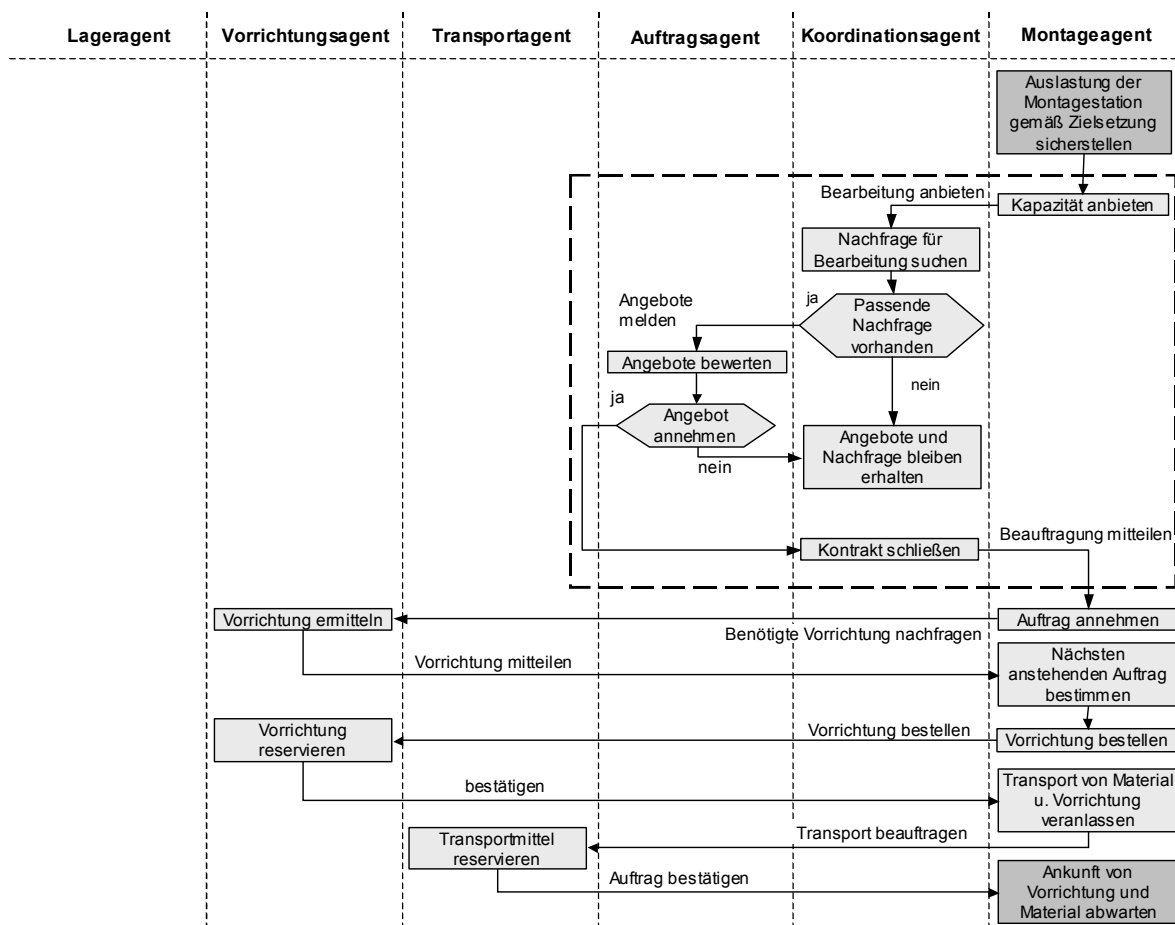


Bild 5.10 Montagestationsagent initiiert einen Kommunikationsablauf

Der zweite wesentliche Kommunikationsablauf für die Auftragsabwicklung ist in **Bild 5.10** dargestellt und wird, wie bereits oben angedeutet, vom Montagestationsagenten durch die Startaktion »Auslastung der Montagestation gemäß Zielvorgabe sicherstellen« initiiert, indem er dem Koordinationsagenten Kapazität für die Bearbeitung weiterer Arbeitsvorgänge verbindlich anbietet. Der Koordinationsagent sucht nun äquivalent zu den in **Bild 5.9** beschriebenen Abläufen nach passenden Bearbeitungsnachfragen. Sobald er eine passende Nachfrage gefunden hat, übermittelt er dem entsprechenden Auftragsagenten das Bearbeitungsangebot, damit dieser es bewerten kann.

An dieser Stelle lässt sich bereits ein Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes erkennen: Durch den Einsatz des Koordinationsagenten konnten die wichtigsten Kommunikationsabläufe weitgehend standardisiert werden, so dass sie unabhängig vom Initiator (Auftrags- oder Montagestationsagent) weitgehend identisch ablaufen. Nebenläufige Dialoge, die zu Inkonsistenzen führen können und die Kommunikationshäufigkeit erhöhen, sind dadurch ausgeschlossen. Die Effektivität der Kommunikation gründet sich also sowohl auf der zielgerichteten Auswahl der Kommunikationsverfahren als auch auf der effizienten Gestaltung der Kommunikationsabläufe und bildet somit die Basis für eine verhandlungsbasierte Koordination von Auftrags- und Montagestationsagenten.

6 Koordination auf Basis von Verhandlungen

Im hier vorgestellten Multiagentensystem finden die Verhandlungen über die Bearbeitung einzelner Arbeitsvorgänge auf einem innerbetrieblichen Markt statt und alle Verhandlungsteilnehmer, Auftragsagenten und Montagestationsagenten, unterstehen den übergeordneten Zielen der Montage. Demzufolge können die Marktmechanismen in ihrer reinen Form umgesetzt werden. Marktwidriges Verhalten wie beispielsweise Kartellabsprachen sind ausgeschlossen und ein faires Verhandlungsverhalten ist bei allen Verhandlungsteilnehmern vorauszusetzen.

6.1 Auswahl des Verhandlungsprinzips

Die oben angeführten Voraussetzungen äußern sich sowohl in der Angebotserstellung (siehe Kapitel 6.2.2) als auch in der späteren Angebotsbewertung (siehe Kapitel 6.2.3). Im Rahmen der Angebotserstellung verlangt ein Ressourcenagent seiner Verhandlungsfunktion entsprechend für eine Dienstleistung genau den Preis, der seiner augenblicklichen Auslastungssituation angepasst ist. Das hat den Vorteil, dass man das Grundprinzip der Ausschreibung bzw. Einschreibung verwenden kann, weil alle eingehenden Angebote zwangsläufig preisoptimiert sind. Damit lassen sich Auktionen vermeiden, die erst durch mehrere Iterationsschleifen zu akzeptablen Preisen und Terminen kommen. Auf diese Weise wird zusätzlich die Kommunikationshäufigkeit und die Kommunikationsintensität reduziert.

Eine andere Möglichkeit bestünde darin, das Vickrey-Auktionsverfahren einzusetzen. Dabei bekäme das niedrigste Angebot den Zuschlag, es müsste aber die zweitniedrigste Preisforderung entrichtet werden (siehe Kapitel 4.2.2). Die Montagestationsagenten könnten die Differenz zwischen gefordertem und entrichtetem Preis als zusätzliche Prämie für sich verbuchen. Es wurde bewiesen, dass die Montagestationsagenten auf diese Weise ebenfalls dazu gebracht werden könnten, realistische Preise zu fordern [Zelewski, 1993; Güth, 1982]. Bei rein preisbezogenen Verhandlungen hat dieses Verfahren den Vorteil, dass auch externe Anbieter, die nicht vom Unternehmen kontrolliert werden können, problemlos an den Verhandlungen teilnehmen könnten. Allerdings gibt es neben dem erhöhten Kommunikationsaufwand einen wesentlichen Nachteil: Bei der Vickrey-Auktion kann nur die geforderte Leistungsvergütung als Verhandlungsvariable berücksichtigt werden. Eine situationsgerechte Beurteilung der Angebote ist nicht möglich. Der Auftragsagent bewertet die Angebote jedoch nicht nur anhand der geforderten Leistungsvergütung, sondern ebenso anhand des angebotenen Termins und der Priorität der Montagestation. Aus der Sicht des Auftragsagenten kann also durchaus eine höhere Preisforderung aufgrund des angebotenen Termins und der Priorität der anbietenden Station das günstigere Angebot repräsentieren. Durch die situationsgerechte Angebotsbewertung relativiert sich auch der oben angeführte Vorteil einer problemlosen Einbindung externer Anbieter.

6.2 Ablauf einer Verhandlungsrunde

Die Verhandlungen werden in so genannten »Verhandlungsrunden« durchgeführt, die sowohl von den Auftrags- als auch von den Montagestationsagenten angestoßen werden können. Wie in Kapitel

5.6.1 beschrieben wurde, wird in beiden Fällen, entweder durch ein Bearbeitungsangebot oder durch eine Bearbeitungsnachfrage, dem Koordinationsagenten erneuter Verhandlungsbedarf signalisiert, so dass er umgehend eine neue Verhandlungsrunde startet. Dies soll jedoch nicht den Eindruck erwecken, es würde jeweils nur ein Auftrag um Bearbeitung nachfragen oder nur eine Montagestation ihre Bearbeitungsleistung anbieten. Ganz im Gegenteil führt der Koordinationsagent eine Liste (Arbeitsvorgangsliste) mit allen Arbeitsvorgängen, die aktuell zur Bearbeitung anstehen, und eine weitere Liste (Stationsliste) mit Montagestationen, die aufgrund ihrer Auslastungssituation in der Lage sind, noch weitere Aufträge anzunehmen. Diese Listen umfassen in der Regel mehrere Einträge, beispielsweise weil bei tagesgenauer Auftragsfreigabe zum Freigabezeitpunkt schlagartig viele Aufträge um Bearbeitung nachsuchen oder weil Verhandlungsrunden nicht erfolgreich beendet wurden. Das allgemein gültige Verhandlungsproblem oder genauer die Koordinationsaufgabe ist demnach als *m:n-Beziehung* zu beschreiben. Für *m* Aufträge, die bearbeitet werden wollen, stehen *n* Stationen zur Verfügung. Der sicherlich häufige Fall, dass ein spezieller Auftrag bearbeitet werden muss oder nur eine Station verfügbar ist, stellt demnach im Sinne einer universell einsetzbaren Methode nur den Sonderfall einer *1:n-Beziehung* dar.

Das Verhandlungsproblem ist vollständig gelöst, wenn jede Nachfrage durch ein entsprechendes Angebot befriedigt werden kann und dadurch eine so genannte »Markträumung« erreicht wird. Zu diesem Zweck veranstaltet der Koordinationsagent eine »Bearbeitungs-Ausschreibung«, d.h., er schreibt die Arbeitsvorgänge der Arbeitsvorgangsliste der Reihe nach zur Bearbeitung an alle technologisch möglichen Montagestationen der Stationsliste aus. Dadurch werden die Bearbeitungsnachfragen und die Bearbeitungsangebote der Auftrags- und Montagestationsagenten nach einem marktähnlichen Prinzip zusammengeführt. Es kann jedoch, unabhängig vom eingesetzten Verhandlungsprinzip, niemals eine vollständige Markträumung garantiert werden, so dass je nach Verhältnis von Angebot zu Nachfrage sowohl mit unbefriedigten Bearbeitungsnachfragen als auch mit Bearbeitungsangeboten gerechnet werden muss.

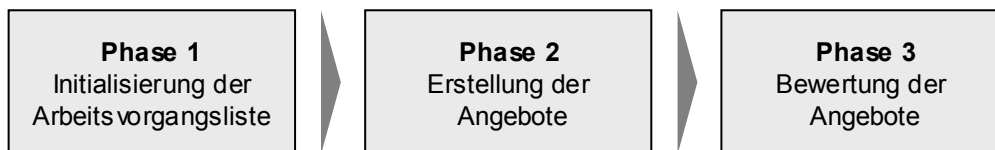


Bild 6.1 Genereller Ablauf einer Verhandlungsrunde

Um optimale Voraussetzungen für die anstehende Verhandlungsrunde zu schaffen, muss der Koordinationsagent vor Verhandlungsbeginn eine Initialisierung der Arbeitsvorgangsliste vornehmen (siehe **Bild 6.1**). Ziel ist es, in dieser Phase die Reihenfolge, in der die einzelnen Arbeitsvorgänge zur Bearbeitung ausgeschrieben werden, anhand bestimmter Kriterien derart festzulegen, dass sie im Einklang mit den Unternehmenszielen steht. Durch diese Rangfolge zwischen den Arbeitsvorgängen werden die Marktchancen der einzelnen Arbeitsvorgänge maßgeblich mitbestimmt (siehe Kapitel 6.2.1). Erst dann kann die Erstellung (Phase 2) und die Bewertung (Phase 3) der einzelnen Angebote erfolgen. Im Falle einer positiven Angebots-

bewertung erfolgt die Angebotsannahme bzw. die Schließung des Kontrakts zwischen Auftrags- und Montagestationsagent. Dieser Schritt repräsentiert keine eigene Phase, weil er einerseits nur bei einer positiven Angebotsbewertung erfolgt und andererseits einen reinen Formalismus darstellt. Denn sowohl Nachfrage als auch Angebot sind aufgrund des Kontraktnetzprotokolls verbindlich. Daher sind für den Vertragsabschluss keine weiteren Koordinationsaufgaben oder kommunikationsintensive Dialoge notwendig, sondern es genügt, den Montagestationsagenten von der Annahme seines Angebots zu unterrichten.

6.2.1 Initialisierung der Verhandlungsrunden und Koordination der Vertragsverhandlungen

Die Gründe für eine unvollständige Markträumung können verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist es wahrscheinlich, dass sich die Anzahl der Bearbeitungsangebote von der Anzahl der Bearbeitungsnachfragen unterscheidet (siehe Kapitel 6.2), und zum anderen kann die situationsabhängige Bewertung der Bearbeitungsangebote durch die Auftragsagenten dazu führen, dass bestimmte Angebote abgewiesen werden. Welche Angebote keinen Abnehmer finden bzw. welche Nachfragen nicht befriedigt werden können, hängt neben der individuellen Konditionierung der Produktionsagenten stark von der Reihenfolge und der Form ab, in der die Ausschreibungen vom Koordinationsagenten vorgenommen werden. Hierzu bieten sich prinzipiell verschiedene Varianten an, die im Folgenden kurz erläutert und im Hinblick auf die Einhaltung der Unternehmensziele bewertet werden.

Variante 1: Die Befriedigung möglichst vieler Nachfragen durch gezieltes Zuweisen der Angebote

Dieses Ziel ist keine Reihenfolgebildung im eigentlichen Sinne mehr, denn der Koordinationsagent müsste entscheiden, welchem Auftragsagenten welches Angebot zugewiesen wird. Dadurch würde zum einen das Verhandlungsprinzip außer Kraft gesetzt und zum anderen würde auf diese Weise die Entscheidungskompetenz den Produktionsagenten entzogen und stattdessen dem Koordinationsagenten zugesprochen. Diese Re-Zentralisierung wäre eine Verletzung der angestrebten Autonomie der Auftrags- und Montagestationsagenten und ist daher konzeptionell ungeeignet.

Ein weiterer Grund, der gegen die Verwendung dieser Variante spricht, ist, dass das resultierende Optimierungsproblem ggf. nicht eindeutig lösbar ist. Denn solange zumindest die Preisautonomie beibehalten wird, ist dem Koordinationsagenten die akzeptierte Leistungsvergütung der Auftragsagenten für die verschiedenen Angebote unbekannt. Außerdem kann sie aus den oben genannten Gründen von Angebot zu Angebot unterschiedlich sein. Um die beste Lösung zu ermitteln, müssten erst mit viel (Rechen-)Aufwand alle möglichen Lösungen berechnet werden. Anschließend könnte auf Basis optimierender Verfahren die endgültige Lösung bestimmt werden, wobei alle gültigen Lösungen anhand bestimmter Kriterien, z.B. zur Berücksichtigung der Unternehmensziele, bewertet werden müssten. Dieses Vorgehen ist also sowohl aufgrund des notwendigen Aufwands als auch aus konzeptionellen Gründen nicht für die Praxis geeignet.

Variante 2: First Come First Serve – Alle Nachfragen werden gemäß der Reihenfolge ihres Eintreffens ausgeschrieben

Diese Reihenfolgeregel würde bedeuten, immer den ersten Eintrag in der Arbeitsvorgangsliste auszuschreiben und jede neue Bearbeitungsnachfrage hinten an die Liste anzufügen. Diese Regel hat verschiedene Vorteile. Zum einen ist sie sehr einfach zu realisieren und zum anderen wirkt sie stark schwankenden sowie langen Durchlaufzeiten entgegen, weil sie keinerlei Reihenfolgevertauschung zulässt. Aber gerade der letzte Punkt ist bezüglich des operativen Produktionsbetriebs und mit Blick auf die Unternehmensziele kritisch zu sehen. So ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass ein sehr dringender, aber in der Arbeitsvorgangsliste hinten stehender Auftrag nicht zur Ausschreibung kommt, weil die verfügbaren Kapazitäten bereits von weniger dringenden Aufträgen belegt wurden. Solche Situationen entstehen immer dann, wenn die geforderten Leistungsvergütungen der verfügbaren Montagestationsagenten so niedrig ausfallen, dass sie auch von den in der Liste vorstehenden weniger dringenden Aufträgen entrichtet werden können. Das heißt, selbst wenn ein Auftrag aufgrund seiner Terminalsituation eine sehr hohe Leistungsvergütung für die Bearbeitung des anstehenden Arbeitsvorgangs aufbringen würde, könnte er diesen Vorteil nicht einsetzen.

Daher ist diese aus strategischer Sicht durchaus anzustrebende Variante für den operativen Produktionsbetrieb, insbesondere für die kurzfristige Entscheidungsfindung der Anlagenbelegung, nicht optimal geeignet.

Variante 3: Schlupfzeit – Alle Nachfragen werden gemäß ihrer terminlichen Dringlichkeit ausgeschrieben

Diese Variante verfolgt das Ziel, den absolut dringlichsten Arbeitsvorgang zuerst ausschreiben zu lassen. Dazu wird die Arbeitsvorgangsliste aufsteigend nach dem arbeitsvorgangsbezogenen Schlupf der einzelnen Arbeitsvorgänge sortiert (siehe Kapitel 2.3.1 **Gleichung 2.4**). Bei der Reihenfolgebildung werden keine Auftragsprioritäten z.B. für Eilaufträge oder Aufträge für wichtige Kunden beachtet. Derartige Aufträge können durch eine spezielle Konditionierung der Auftragsagenten z.B. in Form einer besonders aggressiven Terminzielverfolgung explizit berücksichtigt werden. Falls bei der Sortierung der Arbeitsvorgangsliste mehrere Arbeitsvorgänge aufgrund ihrer Schlupfzeit den gleichen Listenplatz belegen müssten, werden diese aufsteigend anhand ihres Auftragsfreigabetermins sortiert. Dadurch werden zusätzlich die Auftragsdurchlaufzeiten so gering wie möglich gehalten.

Diese Reihenfolgebildung kommt besonders den Unternehmenszielen entgegen, den Terminverzug aller Aufträge in einer tolerierbaren Bandbreite zu halten. Erst in der Phase *Angebotsbewertung* hat der Auftragsagent die Möglichkeit und die Aufgabe, auf die individuelle Terminalsituation eines einzelnen Auftrags zu reagieren (siehe Kapitel 6.2.3).

Die Wissenschaftsgebiete des *Operation Research* und der *Künstlichen Intelligenz* bieten neben den in den Varianten 1 bis 3 beschriebenen Möglichkeiten noch eine Vielzahl alternativer Verfahren zur Ermittlung der optimalen Zuordnung oder Reihenfolgebildung an [Müller-Mehrbach,

1992; Zimmermann, 1986]. Allerdings eignet sich an dieser Stelle keines ähnlich gut wie die in Variante 3 erläuterte Schlupfzeitregel, wenn sowohl der in der Praxis vertretbare (Rechen-)Aufwand als auch die Unternehmensziele gleichermaßen berücksichtigt werden sollen. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit die Initialisierungsphase mit Hilfe der Schlupfzeitregel durchgeführt.

Praktische Durchführung der Initialisierungsphase

Eine neue Bearbeitungsnachfrage würde bei einem klassischen Einsatz der Schlupfzeitregel jedes Mal eine vollständige Aktualisierung der Arbeitsvorgangsliste erfordern. Im Anschluss daran müsste jeder Arbeitsvorgang erneut ausgeschrieben und verhandelt werden. Dazu wäre jedoch selbst bei einer mittleren Anzahl von Arbeitsvorgängen (<100) und Montagestationen (<20) ein zu großer Kommunikationsaufwand nötig. Um sowohl diesen Aufwand zu reduzieren als auch die Anzahl der Verhandlungsteilnehmer nicht unzulässig einzuschränken, wurde das nachfolgend beschriebene Derivat der klassischen Schlupfzeitregel entwickelt (siehe **Bild 6.2** grau hinterlegt).

Falls ein Auftragsagent eine Verhandlungsrunde durch eine erneute Bearbeitungsnachfrage auslöst (Schritt 1a), wird ermittelt, auf welcher Stationsgruppe der anstehende Arbeitsvorgang planmäßig, d.h. mit Priorität *Eins*, bearbeitet werden soll (Schritt 2a). Der Arbeitsvorgang wird mit Angabe der Planstationsgruppe an die Arbeitsvorgangsliste des Koordinationsagenten angefügt (Schritt 3). Anschließend werden aus der Gesamtliste alle Aufträge selektiert, die technologisch ebenfalls an dieser Stationsgruppe montiert werden können, wobei sämtliche Prioritätswerte berücksichtigt werden (Schritt 4). Falls ein Montagestationsagent durch ein Bearbeitungsangebot die Verhandlung angestoßen hat (Schritt 1b), wird die zugehörige Stationsgruppe ermittelt und die Stationsliste entsprechend aktualisiert (Schritt 2b). Anschließend wird mit Schritt 4 wie oben beschrieben fortgefahren, wobei nun alle Arbeitsvorgänge der Arbeitsvorgangsliste selektiert werden, die auf der Stationsgruppe der auslösenden Montagestation montiert werden können. Im nachfolgenden Schritt 5 wird nur die Selektion aus Schritt 4 nach der arbeitsvorgangsbezogenen Schlupfzeit sortiert. Auf diese Weise ist einerseits die Anzahl der Aufträge, die neu verhandelt werden müssen, erheblich gesenkt und andererseits ist die Anzahl der Verhandlungsteilnehmer nicht unzulässig reduziert worden, denn alle relevanten Konkurrenten nehmen an der Verhandlungsrunde teil. Auch der anfangs beschriebene Fall einer *1:n-Beziehung* wird bei dieser Vorgehensweise erfasst.

Mit Durchführung von Schritt 5 ist die Initialisierungsphase abgeschlossen; die weiteren in **Bild 6.2** dargestellten Schritte dienen der Koordination von Angebotserstellung, Angebotsbewertung und Auftragsabschluss.

Koordination der Vertragsverhandlungen

Mit Schritt 6 und 7 wird die Phase der Angebotserstellung eingeleitet (siehe Kapitel 6.2.2), das heißt, es werden alle technologisch möglichen Stationen aus der Stationsliste vom Koordinationsagenten aufgefordert, für den dringlichsten Arbeitsvorgang ein Angebot abzugeben. Da grundsätzlich alle in Frage kommenden Montagestationen aus der Stationsliste aufgefordert werden, ein Angebot abzugeben, muss diese Liste nicht sortiert werden. Die eingegangenen

Angebote leitet der Koordinationsagent an den entsprechenden Auftragsagenten weiter (Schritt 8 und 9). In der Phase der Angebotsbewertung bewertet dieser die Angebote (siehe Kapitel 6.2.3) und teilt dem Koordinationsagenten umgehend mit, ob und welches Angebot er angenommen hat (Schritt 10 und 11). Falls ein Angebot angenommen wurde, streicht der Koordinationsagent sowohl den Arbeitsvorgang als auch die Montagestation aus der jeweiligen Liste (Schritt 12) und unterrichtet den Montagestationsagenten von der Annahme seines Angebots (Schritt 13). Dadurch ist der Kontrakt zwischen Auftrags- und Montagestationsagent automatisch geschlossen. Anschließend wird der nächste Arbeitsvorgang ausgeschrieben. Eine Verhandlungsrunde endet, wenn der Koordinationsagent alle Arbeitsvorgänge aus der eingeschränkten Arbeitsvorgangsliste ausgeschrieben hat (Schritt 14).

An dieser Stelle wird noch ein weiterer Vorteil deutlich, der sich aus der Einführung eines Koordinationsagenten ergibt. Die Montagestationsagenten müssen nicht über abgelehnte Angebote informiert werden, da die erneute Aufforderung, ein Angebot abzugeben, automatisch bedeutet, dass die vorige Verhandlungsrunde abgeschlossen wurde. Die Montagestationen bleiben also so lange in der Liste, bis eines ihrer Angebote angenommen wird. Dieser Vorteil erscheint zunächst unbedeutend. Er wirkt sich jedoch in zweierlei Hinsicht positiv aus. Zum einen reduziert sich der Kommunikationsaufwand um den sonst notwendigen Dialogteil der Angebotsablehnung und zum anderen können die Montagestationsagenten jederzeit ein gültiges Angebot machen, weil der Koordinationsagent die Reihenfolge und die Abläufe der Verhandlungsrunden vorgibt. Ohne Koordinationsagent könnte ein Montagestationsagent von einem Auftragsagenten um ein Angebot gebeten werden, obwohl er bereits einem anderen Auftragsagenten ein Angebot gemacht hat. Solange er nicht weiß, ob das erste Angebot angenommen wird oder nicht, ist jedes weitere Angebot unseriös.

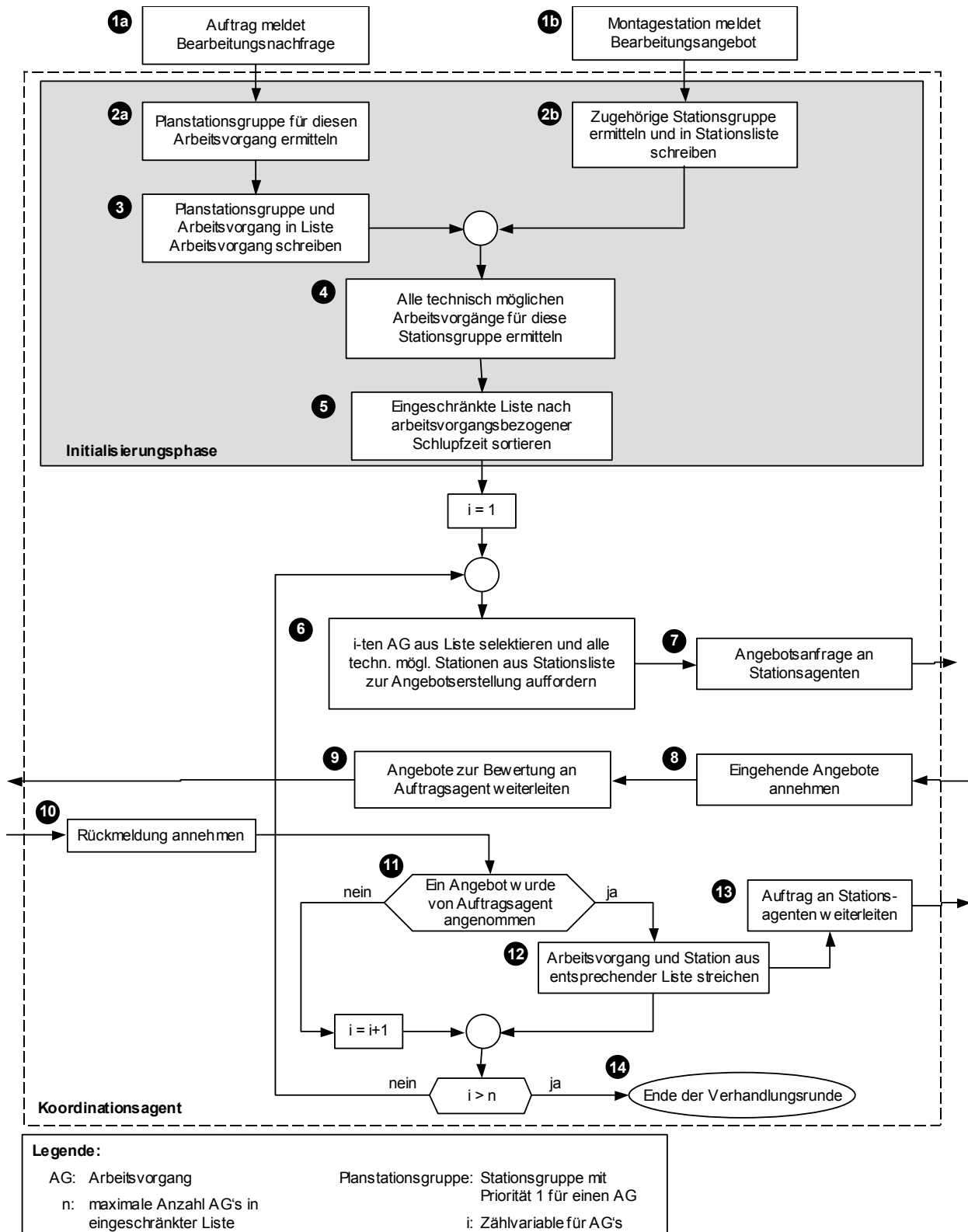


Bild 6.2 Ablauf einer Verhandlungsrunde

6.2.2 Erstellung eines Angebots durch den Montagestationsagenten

Ein ganz wesentlicher Unterschied des hier vorgestellten Ansatzes zu vielen planenden Verfahren ist darin zu sehen, dass die Auftragsagenten keine Angebote zu einem *bestimmten* Termin einfordern, sondern Angebote mit Angabe des *frühestmöglichen* Termins. Dadurch entstehen an

den Montagestationen keine „geplanten“ Belegungslücken, die ggf. nicht mehr gefüllt werden können, so dass zumindest planungsbedingte Kapazitätsverluste auszuschließen sind. Die Auftragsagenten benötigen also von den Maschinenagenten neben der geforderten Leistungsvergütung auch noch die Informationen, wann mit der Bearbeitung frühestens begonnen werden bzw. wann die Bearbeitung frühestens abgeschlossen sein könnte, um u.a. darauf aufbauend ihr Angebot zu kalkulieren. Wenn die Montagestationsagenten ihre Angebote auf Basis des frühesten Liefertermins berechneten, hätte das den Vorteil, dass auch unterschiedliche Schichtmodelle, Personalverfügbarkeit etc. mitberücksichtigt werden könnten. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen:

Montagestation A kann zwar früher mit der Bearbeitung beginnen als Montagestation B, hat aber weniger Personal verfügbar, so dass Montagestation B die Bearbeitung trotzdem eher abschließen könnte.

Allerdings müsste den Montagestationsagenten bei Angabe des frühesten Liefertermins der Arbeitsinhalt des zu verhandelnden Arbeitsvorgangs bekannt sein. Im Gegensatz dazu kann der frühestmögliche Bearbeitungsbeginn allein auf Basis des aktuellen Direktbestandes (Arbeitsinhalt in Stunden, der tatsächlich verfügbaren Aufträge an einer Montagestation) angegeben werden. Der wesentliche Vorteil ist darin zu sehen, dass dieser Termin für alle Angebote identisch ist, d.h., sobald eine Montagestation beim Koordinationsagenten um weitere Arbeit nachfragt, ist dieser Termin aufgrund des aktuellen Direktbestandes dem Schichtmodell und den Kapazitätseinstellungen an dieser Montagestation bekannt. Den frühesten Liefertermin müsste der Koordinationsagent für jeden Arbeitsvorgang erneut anfragen, was einen erhöhten Kommunikationsaufwand bedeuten würde. Außerdem steht innerhalb einzelner Stationsgruppen nicht zu erwarten, dass die einzelnen Montagestationen verschiedene Schichtmodelle fahren oder über eine stark differierende Personalstärke verfügen. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Fall des oben angeführten Beispiels eintritt, ist dementsprechend eher gering.

Ein weiterer Grund dafür, die Angebote ohne die Angabe des konkreten Arbeitsvorgangs anzufordern, ist, dass auf diese Weise strategische Angebote von vornherein ausgeschlossen werden können. Hierbei wird dem Maschinenagenten durch das Attribut »*strategisch*« unterstellt, nicht alle Nachfragen gleich zu behandeln, wie es bereits in Kapitel 2.3.1 gefordert wurde, sondern individuelle Präferenzen zu setzen und beispielsweise für Aufträge mit möglichst kleinem Arbeitsinhalt günstiger anzubieten, weil dann die Chancen höher sind, dem nächsten Anfrager einen früheren Bearbeitungsstart vorschlagen zu können. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, möglichst große Arbeitsinhalte zu bevorzugen, um die Montagestation möglichst lange auszulasten und ein günstigeres Verhältnis von Bearbeitungs- zu Rüstzeit zu erreichen. Derartige Strategien würden bestenfalls lokale Optima erzeugen und bestimmte Aufträge zusätzlich verzögern oder beschleunigen. Dies wäre nicht im Sinne der Unternehmensziele. Daher wurde ein Verfahren realisiert, bei dem die Stationsagenten nicht wissen, wofür sie ihr Angebot abgeben. Sie müssen letztendlich nur Angaben zur geforderten Leistungsvergütung und dem frühestmöglichen Bearbeitungsstarttermin machen.

In Kapitel 5.5 wurde erläutert, dass die Montagestationsagenten die zu fordernde Leistungsvergütung nicht auf Basis des im Direktbestand gebundenen Stundenvolumens berechnen, sondern anhand der Anzahl an Aufträgen, die sich in der Warteschlange befinden. Bei der Angebotserstellung wird dieses Stundenvolumen jedoch in Form des frühestmöglichen Bearbeitungsstarts berücksichtigt. Verschiedene Montagestationen, die aufgrund ihres Auftragsdirektbestandes in Stück die gleiche Leistungsvergütung fordern müssen, können die Leistung aufgrund ihres unterschiedlichen Auftragsdirektbestandes in Stunden nur zu unterschiedlichen Terminen anbieten. Es ist nun an den Auftragsagenten, die verschiedenen Angebote zu bewerten. Dies unterstreicht noch einmal den operativen Fokus auf eine möglichst hohe Kundenorientierung.

6.2.3 Bewertung der Angebote durch den Auftragsagenten

Diese Aufgabe des Auftragsagenten besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt müssen die Angebote in gültige und ungültige Angebote unterteilt werden. Falls gültige Angebote existieren, erfolgt im zweiten Schritt deren eigentliche Bewertung.

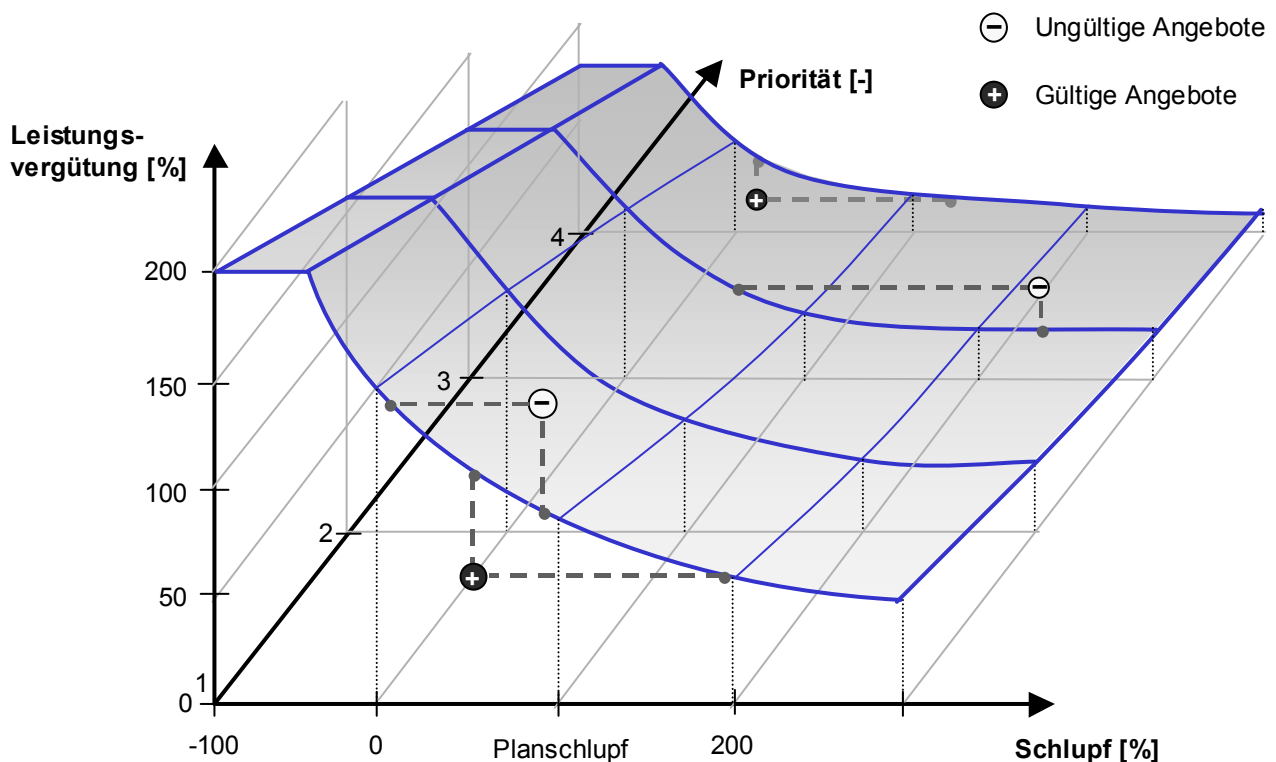


Bild 6.3 Qualitative Darstellung einer Verhandlungsfunktion

Der erste Schritt erfolgt anhand der Verhandlungsfunktion des Auftragsagenten (siehe **Gleichung 5.3**). Wie in **Bild 6.3** dargestellt ist, müssen gültige Angebote unterhalb oder auf der Fläche liegen, die sich aus der grafischen Darstellung der Funktionsverläufe ergibt (zur besseren Übersicht wird der Koordinatenursprung verschoben dargestellt.). Die Fläche selbst repräsentiert dabei den Wert der Leistungsvergütung, der bei einer entsprechenden Ausprägung der Verhandlungsvariablen (prozentualer Schlupf und Priorität der Montagestation) höchstens entrichtet werden dürfte. Eine

Besonderheit des hier vorgestellten Verfahrens ist darin zu sehen, dass der Montagestationsagent durch sein Angebot nur zwei der Verhandlungsvariablen des Auftragsagenten beeinflussen kann, nämlich die geforderte Leistungsvergütung und den frühesten Bearbeitungsstarttermin. Für den Auftragsagenten ist zur Verfolgung seiner Materialflussziele zudem noch die Priorität der Montagestation wichtig, die sich aus dem Planauftragsdurchlauf der Belegungsplanung ergibt. Diese Informationen sind nur den Auftragsagenten zugänglich, d.h., die Stationsagenten können von sich aus nicht beurteilen, wie ihr Angebot letztendlich bewertet wird. Auf diese Weise wird die Erstellung strategischer Angebote zusätzlich gehemmt.

Damit die Angebote in die Verhandlungsfunktion eingesetzt bzw. in die Grafik eingetragen werden können, wird zunächst der prozentuale Schlupf (siehe **Gleichung 2.6**) zum Zeitpunkt des Bearbeitungsstarttermins der jeweiligen Angebote berechnet. Anschließend lässt sich für jedes Angebot auf Basis der Wertepaarung prozentualer Schlupf und Priorität der Montagestation die zulässige Leistungsvergütung berechnen. Für den Fall, dass die zulässige Leistungsvergütung größer ist als die geforderte Leistungsvergütung, ist das entsprechende Angebot gültig.

Im Folgenden soll auf die dreidimensionale Darstellung, wie sie in **Bild 6.3** verwendet wurde, verzichtet werden, da sie die Übersicht und den Erkenntnisgewinn eher einschränkt. Zur weiteren Erläuterung der verschiedenen Aspekte der Angebotsbewertung werden jeweils nur die Dimensionen dargestellt, welche die betrachteten Größen repräsentieren.

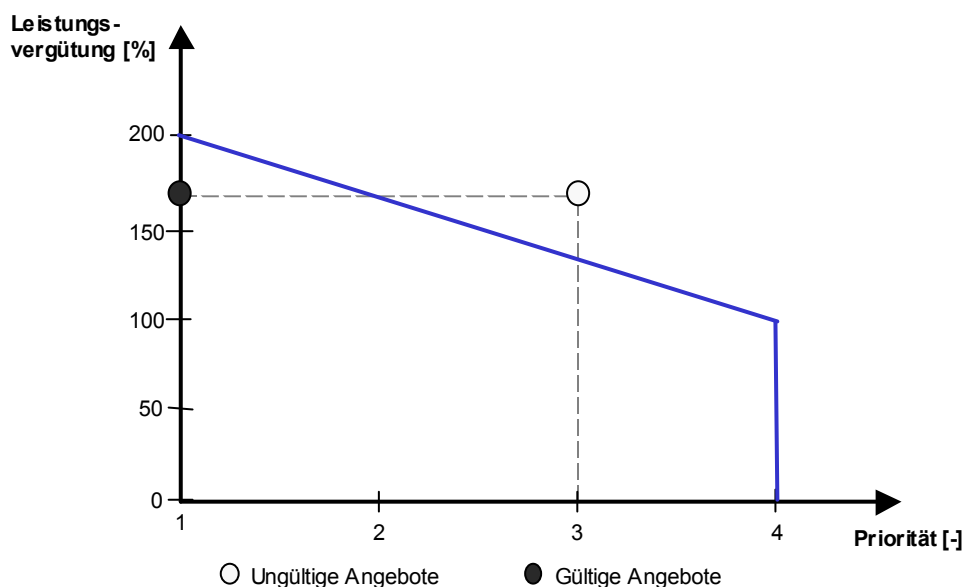


Bild 6.4 Gültige und ungültige Angebote aufgrund der Priorität der Montagestation

Die Einhaltung der Planauftragsdurchläufe gewährleistet einen weitgehend gerichteten Materialfluss und eine gleichmäßige Stationsauslastung. Darum ist es unmittelbar ersichtlich, dass die zulässige Leistungsvergütung für Angebote von Montagestationen abgesenkt wird, die nicht optimal im Materialfluss liegen (vgl. Kapitel 5.4). In **Bild 6.4** sind dieser Funktionsverlauf und zwei Angebote dargestellt. Die Angebote haben die Prioritätswerte *Eins* und *Drei* und sind

bezüglich der geforderten Leistungsvergütung sowie des frühesten Bearbeitungsstarttermins identisch. Die Einteilung in gültige und ungültige Angebote ist entsprechend einfach.

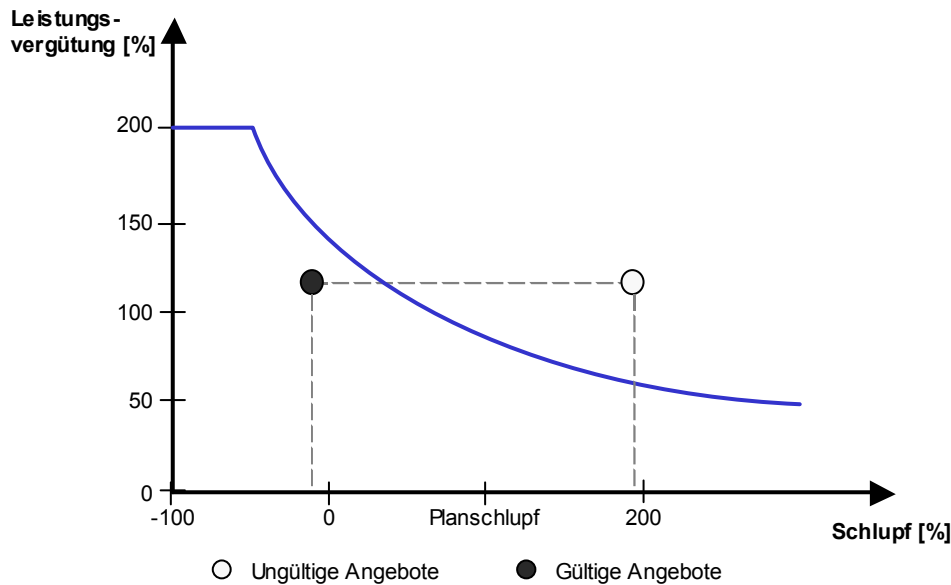


Bild 6.5 Gültige und ungültige Angebote aufgrund des prozentualen Schlupfes

Wie in Kapitel 5.4.2 erläutert wurde, ist für die Bewertung der Terminalsituation ein Funktionsverlauf sinnvoll, der eine umso höhere Leistungsvergütung zulässt, je geringer der Schlupf wird (siehe **Bild 6.5**). Ähnlich wie im vorangegangenen Beispiel sollen auch hier zwei Angebote vorliegen, die dieselbe Leistungsvergütung für unterschiedliche Termine bei identischer Priorität fordern. Aus der reinen Auftragsicht wäre selbstverständlich der frühere Termin der bessere. Wie in **Bild 6.5** dargestellt ist, liegt dieses Angebot oberhalb der Verhandlungsfunktion, so dass der Auftragsagent diesen Preis aufgrund des noch hohen Schlupfes nicht akzeptieren würde. Dieses Verhalten erklärt sich nur durch die übergeordneten Montageziele, denn es ist nicht erstrebenswert, an einem Auftrag wertschöpfende Tätigkeiten vorzunehmen, um ihn dann im ungünstigsten Fall fertig montiert liegen zu lassen, bis der Kunde ihn haben will. Außerdem könnte die Akzeptanz des früheren Termins in späteren Verhandlungsrunden terminlich dringendere Aufträge daran hindern, diese Montagestation zu belegen.

Da in den beiden vorangegangenen Beispielen davon ausgegangen wurde, dass jeweils nur ein Angebot gültig ist, impliziert die Einteilung in gültig und ungültig bereits die Bestimmung des günstigsten Angebots. Eine ungleich schwierigere Entscheidung muss getroffen werden, wenn beide Angebote gültig sind oder weitere gültige Angebote vorliegen. Dabei hängt die Bewertung der gültigen Angebote und die Bestimmung des günstigsten Angebots stark von den übergeordneten Zielen der Montage ab. Aus den Verhandlungsvariablen Schlupf, Leistungsvergütung und Priorität des Auftragsagenten lassen sich drei Grundvarianten zur Bestimmung des günstigsten Angebots ableiten:

Terminoptimierte Bestimmung des günstigsten Angebots

Die terminoptimierte Auswahl des günstigsten Angebots verfolgt das Ziel, die Aufträge möglichst pünktlich fertig zu stellen. Diese Zielverfolgung bietet sich insbesondere für kundenauftragsbezogene Produktionsbereiche wie den hier betrachteten Montagebereich an. Dabei wird aus oben genannten Gründen sowohl die verspätete als auch die verfrühte Auftragsfertigmeldung negativ bewertet. Zur Bestimmung des günstigsten Angebots wird aus allen gültigen Angeboten dasjenige ausgewählt, welches den absolut kürzesten Abstand zu einer Geraden hat, die parallel zur Ordinate verläuft und die Abszisse bei 100% Schlupf (Planschlupf) schneidet (siehe **Bild 6.6a**).

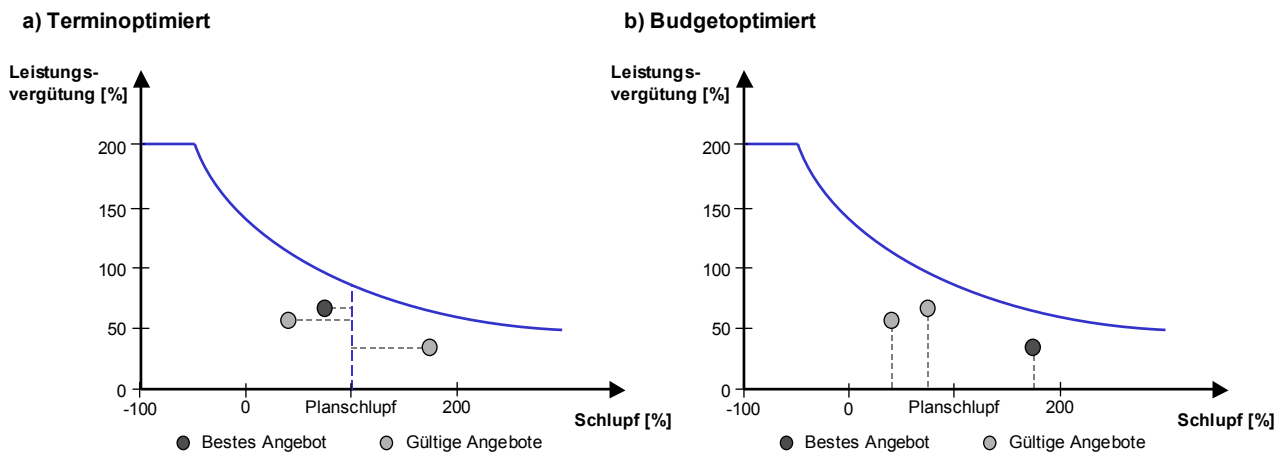


Bild 6.6 Termin- und budgetoptimierte Bestimmung des günstigsten Angebots

Budgetoptimierte Bestimmung des günstigsten Angebots

Obwohl die Aufträge nicht explizit mit einem definierten Budget ausgestattet sind, lässt sich auf diese Weise das Ziel realisieren, die Aufträge möglichst günstig zu montieren. Diese Variante ist besonders dann geeignet, wenn ohne direkten Bezug zum Kundenauftrag in möglichst großen Stückzahlen in ein Lager produziert wird. Dazu wird aus den gültigen Angeboten das Angebot ausgewählt, welches die niedrigste Leistungsvergütung fordert (siehe **Bild 6.6b**).

Materialflussoptimierte Bestimmung des günstigsten Angebots

Dieses Ziel soll nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden, denn es steht zu erwarten, dass nur in wenigen Fällen Montagestationen mit schlechten Prioritätswerten für einen bestimmten Auftrag gültige Angebote unterbreiten können. Daher dienen solche Angebote weitgehend als Kapazitätsausgleich sowie zur Flexibilitätssteigerung der Montage und werden nur in Ausnahmefällen genutzt. Die Selektion des günstigsten Angebots erfolgt bei dieser Variante durch die Bestimmung des Angebots, dessen Montagestation den besten Prioritätswert hat.

Falls der Planer für die Verhandlungsfunktionen der Auftragsagenten einen Funktionsverlauf gewählt hat, wie er in Kapitel 5.4.2 beschrieben wurde, sind in der Regel mehrere Angebote von Montagestationsagenten zu erwarten, deren zugehörige Montagestation den Prioritätswert *Eins* hat. Deshalb ist die Kombination dieses Ziels mit anderen Zielen ein sinnvoller Ansatz, so dass bei

sonst gleichwertigen Angeboten ein gerichteter Materialfluss durch die Auswahl des Angebots der höher priorisierten Montagestation erreicht wird.

Bestimmung des günstigsten Angebots auf Basis kombinierter Ziele

Die angeführten Basisziele lassen sich kombinieren, so dass eine Variante, die verschiedene Ziele berücksichtigt, unter dem Begriff »Kürzester Vektor« eingeführt werden soll. Dabei werden die Beträge der Vektoren vom *idealen Punkt* zu den *aktuellen Angeboten* berechnet. Diese Vergleichsvektoren berechnen sich nach den Gesetzen der Vektoraddition bzw. -subtraktion aus der entsprechenden Differenz der Vektoren vom Koordinatenursprung zum jeweiligen Angebot und dem Vektor vom Koordinatenursprung zum idealen Punkt. (siehe **Bild 6.7** und **Gleichung 6.3**).

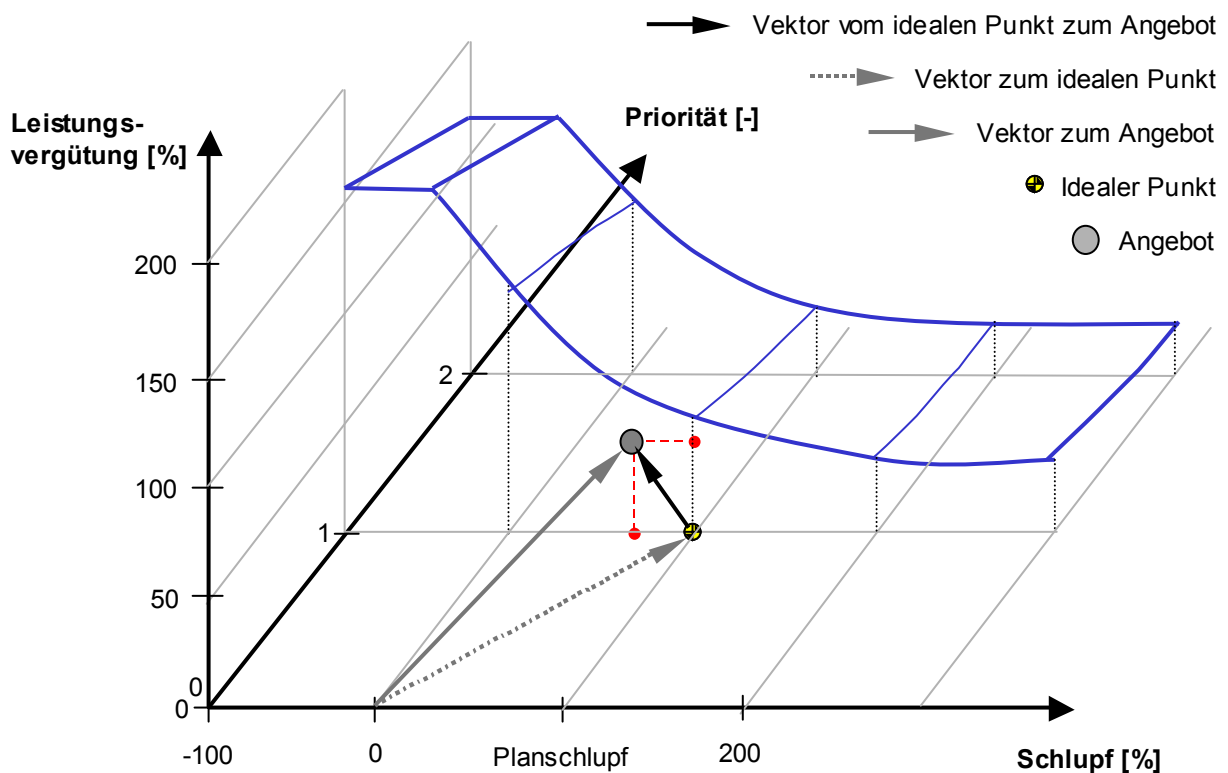


Bild 6.7 Grafische Darstellung eines Vektors vom idealen Punkt zu einem Angebot

Eine vektorielle Darstellung der Angebote und des idealen Punktes zeigen **Gleichung 6.1** und **Gleichung 6.2**.

$$\vec{v}_{\text{Angebot}_i} = \begin{pmatrix} v_{x_A} \\ v_{y_A} \\ v_{z_A} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 6.1}$$

- mit \vec{v}_{Angebot} Vektor vom Koordinatenursprung zum aktuellen Angebot
- v_{x_A} x-Komponente von $\vec{v}_{\text{Angebot}_i}$ (hier: prozentualer Schlupf)
- v_{y_A} y-Komponente von $\vec{v}_{\text{Angebot}_i}$ (hier: Prioritätswert der Montagestation)
- v_{z_A} z-Komponente von $\vec{v}_{\text{Angebot}_i}$ (hier: geforderte Leistungsvergütung)
- i Nummer zur Identifizierung des aktuellen Angebots

$$\vec{v}_{\text{idealer Punkt}} = \begin{pmatrix} v_{x_{i.P.}} \\ v_{y_{i.P.}} \\ v_{z_{i.P.}} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 6.2}$$

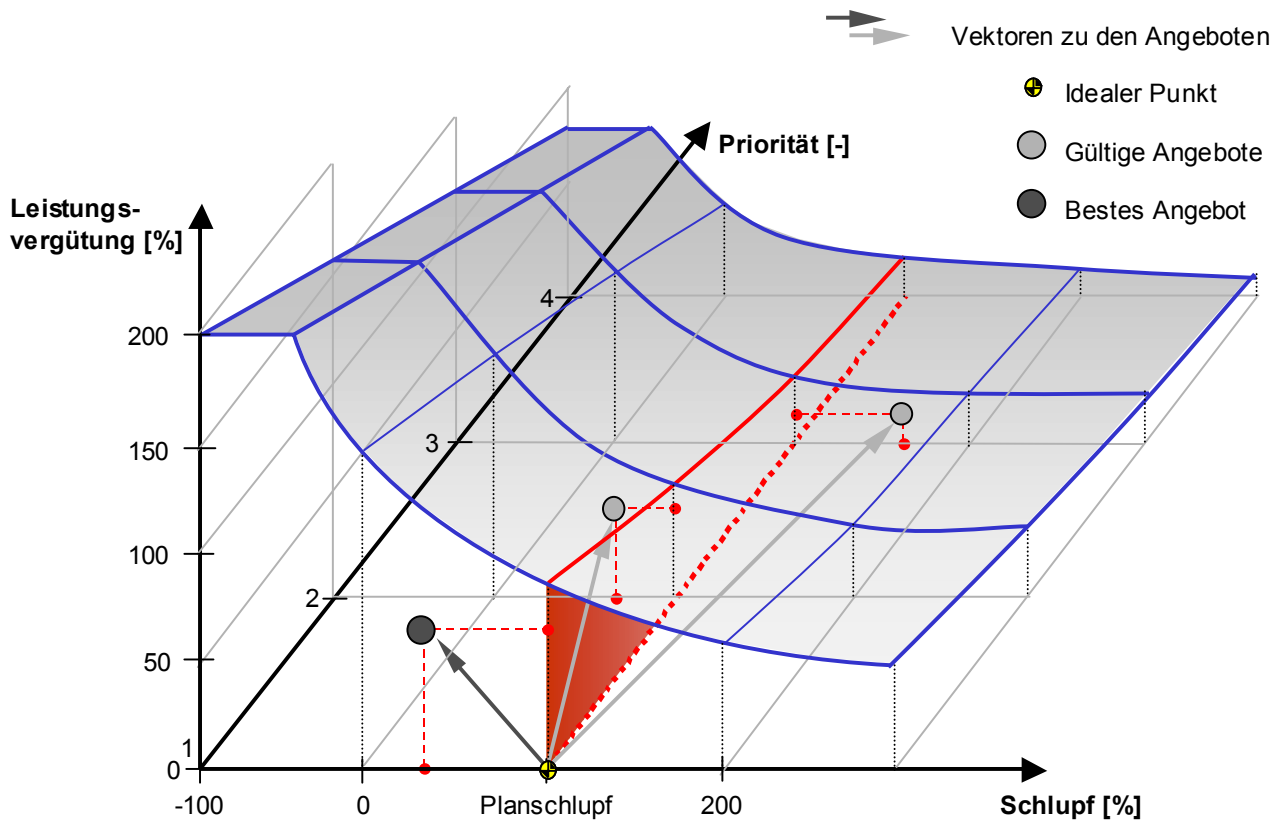
- mit $\vec{v}_{\text{idealer Punkt}}$ Vektor vom Koordinatenursprung zum idealen Punkt
- $v_{x_{i.P.}}$ x-Komponente von $\vec{v}_{\text{idealer Punkt}}$ (hier: Planschlupf = 100%)
- $v_{y_{i.P.}}$ y-Komponente von $\vec{v}_{\text{idealer Punkt}}$ (hier: 1)
- $v_{z_{i.P.}}$ z-Komponente von $\vec{v}_{\text{idealer Punkt}}$ (hier: 0%)

Demnach ergibt sich der Vergleichsvektor vom idealen Punkt zu den einzelnen Angeboten gemäß **Gleichung 6.3**.

$$\vec{v}_{\text{Vergleich}} = \vec{v}_{\text{Angebot}_i} - \vec{v}_{\text{idealer Punkt}} \quad \text{Gl. 6.3}$$

- mit $\vec{v}_{\text{Vergleich}}$ Vektor vom idealen Punkt zu einem Angebot

Durch den anschließenden Vergleich der Beträge wird das Angebot zum günstigsten Angebot bestimmt, bei dem der Betrag dieses Vektors am niedrigsten ist (siehe **Gleichung 6.5**). Mit anderen Worten liegt dieses Angebot am dichtesten am *idealen Punkt* (siehe **Bild 6.8**). Die Koordinaten dieses Punktes sind in x-Richtung der *Planschlupf*, in y-Richtung der Prioritätswert *Eins* und in z-Richtung die geforderte (fiktive) Leistungsvergütung *Null*. Das bedeutet, ein ideales Angebot würde die Bearbeitung exakt zum Plantermin beginnen, die zugehörige Montagestation hätte auf Basis des Planauftragsdurchlaufs den Prioritätswert *Eins* und der Montagestationsagent würde für die Bearbeitung des anstehenden Arbeitsvorgangs keine Leistungsvergütung fordern.


Bild 6.8 Vektorielle Bestimmung des günstigsten Angebots aus kombinierten Zielen

Die Länge dieses Vektors berechnet sich nach **Gleichung 6.4**

$$|\vec{v}_{\text{Vergleich}}| = \sqrt{(v_{x_A} - v_{x_{i.P.}})^2 + (v_{y_A} - v_{y_{i.P.}})^2 + (v_{z_A} - v_{z_{i.P.}})^2} \quad \text{Gl. 6.4}$$

Das beste Angebot muss die Bedingung aus **Gleichung 6.5** erfüllen.

$$|\vec{v}_{\text{Vergleich}}| \stackrel{!}{=} \min \quad \text{Gl. 6.5}$$

Falls nicht alle Ziele kombiniert werden sollen, reduzieren sich die Vektoren jeweils auf die Komponenten der kombinierten Zielgrößen. Diese Art der Angebotsbewertung lässt prinzipiell beliebig viele Verhandlungsvariablen zu. Allerdings kann man die Lösungsfindung im n-dimensionalen Raum nicht mehr grafisch darstellen.

Robustheit der Angebotsbewertung

Dieser Aspekt der Angebotsbewertung umfasst zum einen die Frage, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Leistungserbringung im dynamischen Montagebetrieb mit den angebotenen Leistungen übereinstimmt. Denn nur bei einer hohen Wahrscheinlichkeit ist eine detaillierte Angebotsbewertung sinnvoll. Zum anderen muss untersucht werden, inwieweit die vorzeitige Kenntnis einer Nichteinhaltung des günstigsten Angebots zur Selektion eines alternativen Angebots geführt hätte. Dazu muss die Größenordnung der Abweichungen für die Verhandlungsvariablen bestimmt werden, die sich nach Annahme eines Angebots noch ändern können. Anschließend kann

eine Abschätzung gegeben werden, mit welchen Toleranzen bei der Angebotsbewertung zu rechnen ist.

Die Bewertung der Angebote erfolgt immer gegen eine feste Achse oder einen festen Punkt (idealer Punkt) im Raum. Die geforderte Leistungsvergütung und die Priorität der Montagestation können zum Zeitpunkt der Angebotserstellung exakt ermittelt werden. Einzig der frühestmögliche Bearbeitungsstarttermin muss anhand des aktuellen Direktbestandes in die Zukunft prognostiziert werden. Da an den Montagestationen keine Reihenfolgevertauschung im Direktbestand zugelassen ist, ist die Verschiebung des zugesagten Termins nur durch eine Störung der Montagestation zu begründen. Wobei Störungen an sich eine Ausnahme darstellen und kurze Störungen, die bei einer Montage, wie sie in Kapitel 3 beschrieben wurde, im Vergleich zur Auftragsdurchlaufzeit nicht ins Gewicht fallen, einen großen Teil der Störungen ausmachen. Man kann also insgesamt von einer sehr hohen Umsetzungswahrscheinlichkeit bezüglich der Angebote und ihrer Realisierung ausgehen.

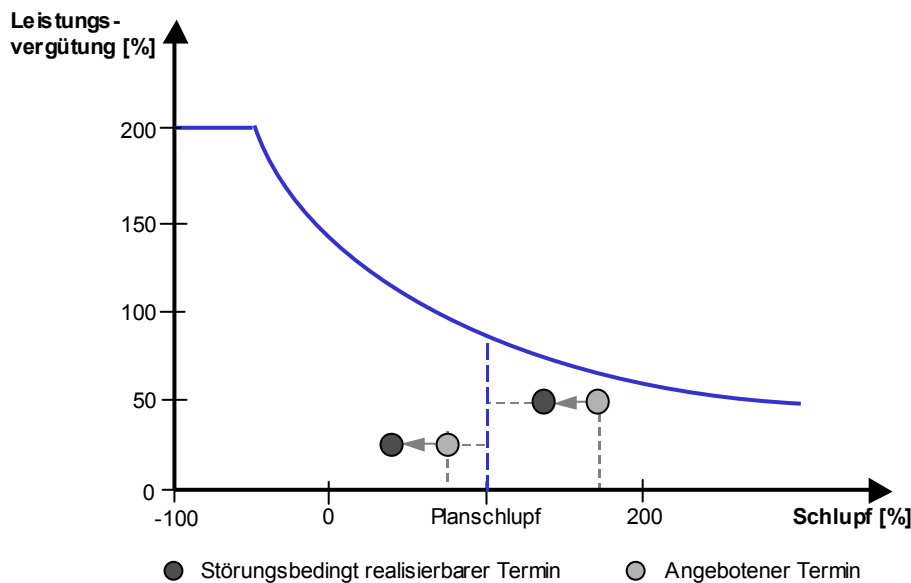


Bild 6.9 Störungsbedingte Verringerung des prozentualen Schlupfes

Die Übergangszeit zwischen zwei Arbeitsgängen und damit auch die geplante Schlupfzeit liegen normalerweise im Bereich von Tagen, die Dauer typischer Maschinenstörungen beträgt aber nur Minuten oder Stunden. Weiter geht der Bearbeitungsstarttermin in Form des prozentualen Schlupfes je nach Bewertungsvariante höchstens linear in die Bewertung der Angebote ein. Daher würde die vorzeitige Kenntnis einer störungsbedingten Terminänderung die Bewertung des Angebots in der Regel nur geringfügig beeinflussen. In jedem Fall verursachen Störungen eine Verringerung des prozentualen Schlupfes, so dass die Frage, ob ein anderes Angebot dadurch bei der Bewertung besser abschneiden würde, von dessen Lage und der Lage des ursprünglichen Angebots abhängt. Dieser Sachverhalt ist in **Bild 6.9** anhand von zwei Angeboten grafisch dargestellt. Das Angebot rechts des Planschlupfes wird aufgrund der Störung sogar noch besser, wohingegen sich das linke Angebot verschlechtert. Auf jeden Fall würde die Auswahl einer

Angebotsalternative keine wesentlichen Vorteile für den Auftrag bringen. Das hier vorgestellte Verfahren zur Bewertung von Bearbeitungsangeboten kann also als robust bezeichnet werden.

6.3 Umgang mit Störungen

Die Robustheit des Verfahrens zeigt sich auch im Umgang mit Störungen, die in der Praxis sowohl personelle, z.B. durch Krankheit, als auch technische Ursachen haben können. Fehlteile müssen hier nicht beachtet werden, da die Auftragsagenten erst dann in eine Verhandlung eintreten, wenn alle benötigten Teile verfügbar sind. Das hier vorgestellte Verfahren zum Umgang mit Störungen setzt voraus, dass die in Kapitel 5.5 empfohlenen Verhandlungsfunktionen zumindest qualitativ realisiert wurden.

Falls eine Montagestation gestört wird, meldet der Montagestationsagent diesen Vorfall zunächst dem Koordinationsagenten. Dieser sperrt die Montagestation in der Stationsliste, indem er den Status der Station auf *gestört* setzt. Die Montagestation nimmt dann so lange nicht an Verhandlungen teil, bis der Stationsagent dem Koordinationsagenten das Störungsende meldet. Im nächsten Schritt muss festgelegt werden, wie mit den Aufträgen aus dem Direktbestand dieser Montagestation zu verfahren ist. Dabei muss zwischen Engpass-Stationen und Nichtengpass-Stationen unterschieden werden.

An Engpässen wurde die zulässige Warteschlange sehr kurz eingestellt, um unter anderem eine maximale Flexibilität zu erreichen. Falls eine solche Station gestört wird, ist in der Regel ein Auftrag in Bearbeitung und ein oder zwei weitere warten im Direktbestand. Da es sich um einen Engpass handelt, ist zu erwarten, dass die Situation an alternativ verfügbaren Montagestationen ähnlich ist. Eine Stornierung der Aufträge aus dem Direktbestand der gestörten Montagestation würde also lediglich dazu führen, dass die Auftragsagenten dieser Aufträge erneut in Verhandlungen treten müssten. Da alle Belegungsalternativen voraussichtlich bereits belegt sind, hieße das, so lange zu warten, bis eine Station weitere Aufträge annehmen kann. Und selbst wenn sich die stornierten Aufträge aufgrund ihrer Dringlichkeit gegenüber den anderen Aufträgen aus der gemeinsamen Warteschlange durchsetzen könnten, würden sie dennoch den letzten Platz im Direktbestand der Alternativstation einnehmen. Solange die Bearbeitungszeit und Stördauer annähernd die gleiche Größenordnung besitzen, ist eine störungsbedingte Auftragsstornierung nicht gerechtfertigt. Für die Aufträge brächte eine Stornierung keinerlei Vorteile mit sich, sondern würde nur zusätzlichen Kommunikations- und Koordinationsaufwand verursachen.

An Nichtengpass-Stationen stellt sich die typische Montagesituation jedoch anders dar. Es ist weder in einer gemeinsamen Warteschlange noch im Direktbestand der einzelnen Montagestationen zu erwarten, dass ein großer Auftragsbestand vorliegt, so dass die Aufträge im Direktbestand im Falle einer Störung sehr wohl storniert werden können, da damit gerechnet werden kann, kurzfristig eine alternative Montagestation zu finden. An den Nichtengpass-Stationen ist somit der zusätzliche Kommunikations- und Koordinationsaufwand gerechtfertigt.

Für die Auftragsagenten sind in beiden Fällen keine weiteren Maßnahmen nötig, da sie sich mit Hilfe ihrer Verhandlungsfunktionen sofort auf die neue Terminsituation einstellen können. Im Gegensatz zu zentralen Ansätzen sind also keinerlei Neu- oder Umplanungen nötig.

6.4 Regulierung des Wettbewerbs bei Ressourcenmangel oder Monopolbildung

Eine zentrale Regulierung des Wettbewerbs bei Ressourcenmangel oder Monopolbildung wie auf realen Märkten muss in dem hier vorgestellten Multiagentensystem aus den nachfolgend beschriebenen Gründen nicht vorgenommen werden.

Ressourcenmangel tritt in der Regel nur an Engpässen auf. Die entsprechenden Montagestationsagenten könnten erhöhte Preise verlangen, welche die Auftragsagenten ggf. aufgrund ihrer Terminsituation akzeptieren müssten. Diesem Verhalten ist allerdings nur so lange Erfolg beschieden, wie die Nachfrage größer ist als das Angebot. Zusätzlich wäre ein solches Verhalten nicht im Sinne der Montageziele und sollte durch eine entsprechende Konditionierung der Stationsagenten, wie sie in Kapitel 5.5 vorgeschlagen wird, bei der Systemgestaltung unterbunden werden. Falls der Systemgestalter diesen Montagestationsagenten aus bestimmten Gründen jedoch Verhandlungsfunktionen zuweist, die auf eine Maximierung des Deckungsbeitrages ausgelegt sind, müssen die Auftragsagenten mit Hilfe ihrer Verhandlungsfunktionen darauf adäquat reagieren können. Zu diesem Zweck wurde die *maximale Obergrenze der Leistungsvergütung* in den Verhandlungsfunktionen der Auftragsagenten eingeführt. Sie kann für Aufträge mit verschiedener Intensität der Terminzielverfolgung unterschiedlich sein (vgl. Kapitel 5.4.2). Dadurch werden Angebote von Stationsagenten selbst bei hohem Bedarf ab einem bestimmten Preisniveau von allen Auftragsagenten abgelehnt. Erst wenn die geforderte Leistungsvergütung unter dieses Niveau absinkt, können wieder erfolgreiche Verhandlungen stattfinden. Wie in Kapitel 6 beschrieben wurde, beginnen dann die terminlich dringlichsten Aufträge mit den Verhandlungen, so dass nicht die Gefahr besteht, dass Aufträge mit aggressiver Terminverfolgung die übrigen Aufträge vom Markt verdrängen. Die generelle Existenz eines Verhandlungsraumes wurde für jeden Auftrag gegenüber jeder technologisch möglichen Montagestation bereits auf der Planungsebene während der Konditionierung sichergestellt. Dieses Verhalten der Auftragsagenten kann als kooperierend angesehen werden, obwohl sich die Agenten dessen nicht bewusst sind.

Eine Montagestation, die auf einen bestimmten Bearbeitungsschritt das Monopol hat, kann auch bei geringer Nachfrage erhöhte Preise verlangen, weil die Auftragsagenten grundsätzlich keine Alternative haben. Der Planer kann solche Stationen dazu benutzen, seine strategischen Ziele bezüglich der Terminverfolgung zu unterstützen, indem er ihnen eine Verhandlungsfunktion zuweist, die ab einer bestimmten Anzahl von Aufträgen in der Warteschlange kontinuierlich steigende Leistungsvergütungen fordern. Dadurch werden je nach aktuellem Preisniveau nur noch Aufträge mit einer intensiven bzw. aggressiven Terminverfolgung oder sehr dringende Aufträge in der Lage sein, die geforderte Leistungsvergütung zu entrichten. Durch die Möglichkeit, die *maximale Obergrenze der Leistungsvergütung* in den Verhandlungsfunktionen der Auftragsagenten frei einzustellen, kann bestimmten Aufträgen in solchen Situationen eine bessere Verhandlungsposition eingeräumt werden. Bildlich gesprochen kann dieses Nadelöhr dazu beitragen, die

Aufträge in eine strategisch gewollte Reihenfolge zu bringen. Allerdings wird auch in diesem Fall ab einem bestimmten Preisniveau kein Angebot mehr akzeptiert. Dadurch wird verhindert, dass zu viele Aufträge der Montagestation vorzeitig fest zugewiesen werden. Auf diese Weise wird das *Prinzip der kleinstmöglichen Entscheidungsbindung* unterstützt, in dem gefordert wird, die Aufträge so spät wie möglich zuzuweisen (siehe Kapitel 3.4). Dadurch können Aufträge, die erst später in der Arbeitsvorgangsliste des Koordinationsagenten auftauchen, kurzfristig bearbeitet werden, falls ihre Dringlichkeit dies fordert.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde dargestellt, dass der in dieser Arbeit entwickelte agentenbasierte Ansatz in der Lage ist, flexibel auf die operativen Anforderungen einer Montage zu reagieren. Ebenso wurden die Maßnahmen zum Umgang mit Störungen in der Produktion erläutert. Weiter wurde gezeigt, wie auch spezielle Produktionssituationen, z.B. Ressourcenmangel oder Monopolbildung, bewältigt werden können. Mit der folgenden simulationsgestützten Evaluation soll zum einen die generelle Funktion dieses Ansatzes im dynamischen Betrieb nachgewiesen und zum anderen seine Leistungsfähigkeit im Vergleich mit dem Steuerungsverfahren nach Evers unter Beweis gestellt werden.

7 Simulationsgestützte Evaluation des agentenbasierten Auftragsmanagements

Die Simulation kommt zum Einsatz, wenn sich ein System in seinen dynamischen Eigenschaften zwar ausreichend genau beschreiben lässt (Bedingung für die Simulation), sich aber mit mathematisch-analytischen Verfahren keine Lösung zur Optimierung des Systems ermitteln lässt. Allerdings darf hieraus nicht der Schluss gezogen werden, man erhalte durch den Einsatz der Simulation per se eine in Bezug auf das Problem optimierte Lösung. Denn die Simulation ermittelt keine Lösungen, sondern zeigt lediglich die Konsequenzen bestimmter Planungsvarianten oder Entscheidungsalternativen auf [Zell, 1992; Mosim, 1999]. Gegenüber analytischen Verfahren bietet die Simulation jedoch eine Reihe von Vorteilen:

- Es sind erheblich komplexere Zusammenhänge als mit analytischen Mitteln beschreibbar.
- Simulationsmodelle können flexibel an veränderte Datenkonstellationen angepasst werden.
- Bisher nur theoretisch existierende Systeme können untersucht werden.
- Bei Änderung der Zielsetzung können Simulationsmodelle mit geringem Zeitaufwand angepasst und untersucht werden.
- Das dynamische Verhalten eines Systems kann untersucht werden.

Die Grundlage der Evaluation des hier vorgestellten agentenbasierten Auftragsmanagements bildet ein bestehendes Modell der zugrunde liegenden Multiressourcen-Montage. Dieses detaillierte Modell wurde intensiv verifiziert und anhand eines Vergleichs mit der Realität erfolgreich validiert [Evers u.a., 2001]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde es um die agentenbasierten Kommunikations- und Koordinationsmechanismen erweitert. Auf diese Weise lassen sich die komplexen Abläufe im dynamischen Betrieb realitätsnah abbilden, so dass die Leistungsfähigkeit des Multiagentensystems untersucht werden kann.

7.1 Modellbildung mit Hilfe moderner Werkzeuge zur Softwareentwicklung

Wie in Kapitel 4 erläutert wurde, haben Agenten individuelle Eigenschaften, die ihr Verhalten bestimmen. Das Verhalten der verschiedenen Agenten und ihre Interaktionen sind wiederum für das Gesamtverhalten des Multiagentensystems verantwortlich. In der Softwareentwicklung finden sich ähnliche Formulierungen unter dem Begriff »Objektorientierte Programmierung«. Wobei unter diesem Begriff sowohl die Analyse und das Design als auch die eigentliche Realisierung der Software subsummiert sind. Die Analogie von Agententheorie und Objektorientierung sowie deren mächtige Entwicklungswerkzeuge Klassenbildung, Kapselung und Vererbung haben dazu geführt, dass die Konzeption des vorliegenden Multiagentensystems auf Basis des objektorientierten Ansatzes vorgenommen wurde.

Die teilweise berechtigte Kritik hinsichtlich der Anwendbarkeit des *objektorientierten Ansatzes* für Agentensysteme ist im Rahmen dieser Arbeit zu vernachlässigen [Bechtolsheim, 1993; Ferber,

2001]. Denn mit Hilfe des Simulationsmodells soll nur die Leistungsfähigkeit des Multiagentensystems im Vergleich zu herkömmlichen Steuerungsverfahren nachgewiesen werden. Reale Probleme wie asynchrone Nachrichtenverarbeitung oder Mehrprozessorfähigkeit sind in diesem Zusammenhang nicht von Bedeutung.

7.1.1 Produktionsagenten im Kontext der Objektorientierung

Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte des *objektorientierten Ansatzes* und deren Eignung zur Entwicklung von Agentensystemen anhand einiger Beispiele kurz erläutert. Für die grafische Darstellung wird die *Unified Modelling Language* (UML) eingesetzt. Für detailliertere Ausführungen oder einen Vergleich mit herkömmlichen prozeduralen Vorgehensweisen sei jedoch auf die entsprechende Literatur verwiesen [Booch, 1994; Kühnel, 2001; Oestereich, 1998; Rumbaugh u.a., 1993].

Objekt

G. Booch definiert ein Objekt nach menschlichem Verständnis als

- ein greifbares und/oder sichtbares Ding,
- etwas, das intellektuell wahrnehmbar ist, oder
- etwas, worauf sich unser Denken oder Handeln bezieht [Booch, 1994].

Demnach ist eine Maschine ein Objekt. Sie hat eine eindeutige physikalische Abgrenzung gegen ihre Umwelt sowie bestimmte Eigenschaften (Farbe, Gewicht, Baujahr etc.) und ein bestimmtes Verhalten (Produzieren, Stören, Rosten etc.). Prinzipiell kann man diese Beschreibung direkt in die objektorientierte Softwareentwicklung übertragen. Allerdings ist es vom konkreten Anwendungsfall abhängig, ob etwas als eigenständiges Objekt aufgefasst werden muss oder nur als eine Eigenschaft eines anderen Objekts. Eine Stadt kann sowohl eine Eigenschaft z.B. als Geburtsort einer Person (Objekt), als auch selber ein Objekt mit Eigenschaften wie Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte usw. sein. Dieser Hintergrund führt zu folgender Definition: »*Ein Objekt hat einen Status, ein Verhalten und eine Identität; die Struktur und das Verhalten ähnlicher Objekte sind in ihrer gemeinsamen Klasse definiert (siehe Bild 7.1); die Begriffe Instanz und Objekte sind austauschbar*« [Booch, 1994]. Dadurch wird der Begriff »Objekt« abstrakter gefasst, so dass nicht nur physikalische Dinge als Objekte verstanden werden können, sondern beispielsweise auch Situationen, Projekte etc.

Der *Status* beschreibt die (statischen) Eigenschaften, deren Werte sich (dynamisch) ändern können. Das heißt, eine Maschine kann zu einem Zeitpunkt gestört und zu einem anderen in Betrieb sein, währenddessen sich ihre Eigenschaft *Farbe* normalerweise nicht ändert. Unter *Verhalten* versteht man die Art und Weise, wie ein Objekt auf Statusänderungen und/oder Nachrichten nach außen hin agiert bzw. reagiert. Die *Identität* definieren Khoshafian und Copeland folgendermaßen: »*Identität ist die Eigenschaft, die ein Objekt von allen anderen Objekten unterscheidet*« [Khoshafian u. Copeland, 1986].

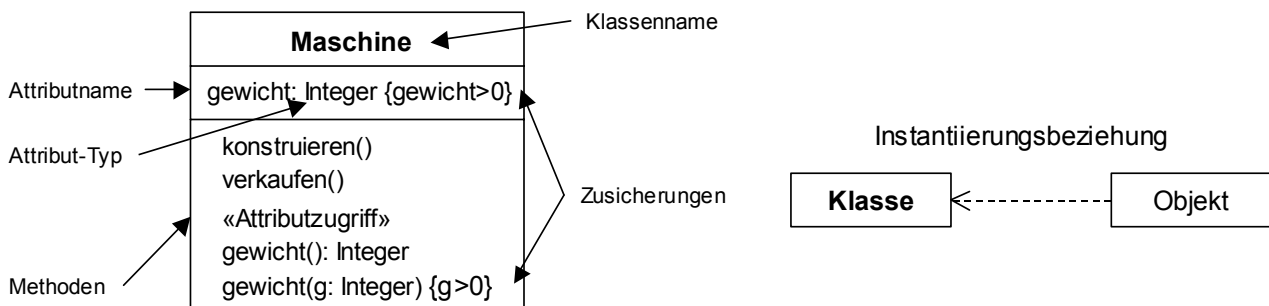


Bild 7.1 Klasse und Instanz (in Anl. an Oestereich)

Nach dieser Beschreibung bietet es sich an, Agenten als Objekte zu modellieren. Besonders identisch konditionierte Agenten, die sich nur dadurch unterscheiden, dass sie im Interesse verschiedener Aufträge oder Montagestationen agieren, lassen sich auf Basis gemeinsamer Klassen mit geringem Aufwand realisieren.

Klassen

Unter einer *Klasse* versteht man eine Menge von Objekten, die eine gemeinsame Struktur und ein gemeinsames Verhalten aufweisen. Um bei den bereits erwähnten Maschinen zu bleiben, gehören sowohl eine Presse, eine Drehmaschine als auch eine Fräse zur Klasse der Maschinen. Auf einem genaueren Detaillierungsgrad (siehe Vererbung) stellt eine Presse selber eine Klasse dar, weil es verschiedene Pressen mit gleichem Verhalten und gleicher Struktur gibt.

Ein besonders wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Modellierung eines Agentensystems wird bei der objektorientierten Programmierung unter dem Begriff »Kapselung« zusammengefasst. Dieser Begriff umschreibt ein Prinzip, bei dem die Klassen bzw. ihre Instanzen nach außen hin nur die Eigenschaften und Methoden offenbaren, die für die Umwelt bzw. für die Erfüllung ihrer Aufgaben wichtig sind. Alle internen Eigenschaften und Verhaltensweisen bleiben verborgen und für externe Zugriffe unzugänglich. Analog dazu offenbaren die Agenten ihrer Umwelt jeweils nur ihre Kommunikationsschnittstelle, um Nachrichten anzunehmen oder zu versenden, wohingegen die Planungs- und Problemlösungsmodule, die z.B. zur Angebotsbewertung dienen, im Verborgenen bleiben.

Zwischen Klassen können verschiedene Beziehungen modelliert werden. Zum weiteren Verständnis der vorliegenden Arbeit werden allerdings nur die »Vererbung«, die »Assoziation« und die »Aggregation« benötigt, daher soll auf andere Beziehungen an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Vererbung

Von *Vererbung* spricht man, wenn eine Klasse die Struktur und/oder das Verhalten teilt, die in einer oder mehreren anderen Klassen definiert wurden. Je nachdem, ob eine Klasse von einer oder mehreren Klassen erbt, handelt es sich um Einfach- oder Mehrfachvererbung. Diese Methode wird in **Bild 7.2** durch die sogenannten Diskriminatoren 1 und 2 dargestellt. Bei Einfachvererbung nennt man die vererbende Klasse *Oberklasse* und die erbende Klasse *Unterklasse*. Analoges gilt für die

Mehrfachvererbung. Es entsteht also eine Hierarchie zwischen Unter- und Oberklassen, wobei die Unterklasse das Geerbte sowohl erweitern als auch einschränken kann. Die Möglichkeit, Vererbungen zu definieren, ist ein entscheidender Vorteil objektorientierter Softwareentwicklung gegenüber der prozeduralen Vorgehensweise, denn notwendige Änderungen müssen nur einmal in der Oberklasse vorgenommen werden [Booch, 1994].

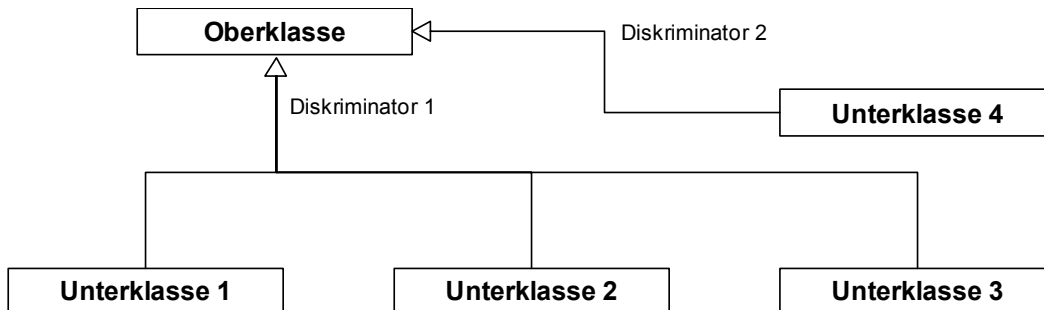


Bild 7.2 Vererbung (in Anl. an Oestereich)

In **Bild 4.2** wurden die Grundstruktur von Produktionsagenten und deren optionale Erweiterungen dargestellt. Überträgt man dieses Bild auf die Objektorientierung, dann würde man die Grundstruktur in einer Oberklasse *Agent* implementieren, von der alle anderen *Agentenklassen* erben. Die optionalen Erweiterungen werden erst in den Unterklassen hinzugefügt, wobei prinzipiell in beliebig vielen Stufen vererbt werden kann. Die gewünschten Strukturen und Verhaltensweisen können dadurch sehr einfach und flexibel erzeugt werden (vgl. **Bild 5.9** und **Bild 5.10**).

Assoziation

Eine *Assoziation* stellt eine Verknüpfung zwischen (normalerweise) zwei Klassen dar (siehe **Bild 7.3**). Auf der niedrigsten Spezifizierungsstufe wird nur die semantische Abhängigkeit der Klassen dargestellt, ohne dass die Richtung oder die exakte Art zu erkennen ist. Dies kann durch eine genauere Darstellung der Beziehungen spezifiziert werden. So lassen sich durch Angabe der so genannten Kardinalität 1:1, 1:n und n:m Beziehungen erstellen.

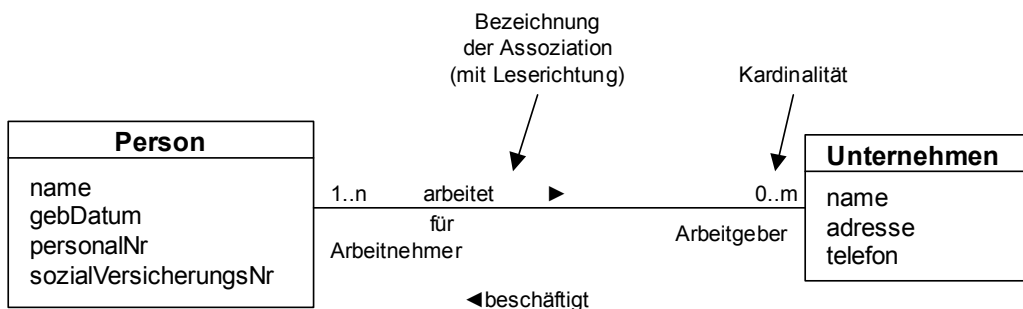


Bild 7.3 Assoziation (in Anl. an Oestereich)

Im vorliegenden Multiagentensystem besteht beispielsweise zwischen der Klasse *Koordinationsagent* und der Klasse *Auftragsagent* eine 1:m Beziehung, d.h., der *Koordinationsagent* steht in Verbindung mit allen *Auftragsagenten*. Dagegen besteht zwischen den Klassen *Montagestation* und *Montagestationsagent* eine 1:1 Beziehung, denn jeder *Montagestationsagent* vertritt genau eine

Montagestation. Eine n:m Beziehung besteht z.B. zwischen der Klasse *Transportmittel* und der Klasse *Montageauftrag*, da jeder Auftrag von verschiedenen Transportmitteln transportiert werden kann. Die exakteste Spezifizierungsstufe beschreibt zusätzlich noch den Inhalt der Verknüpfung. So kann die Beziehung zwischen den Klassen *Auftragsagent* und *Koordinationsagent* inhaltlich, z.B. durch *Bearbeitung nachfragen*, beschrieben werden.

Aggregation

Die *Aggregation* gibt eine Ganzes/Teil-Hierarchie an, die es ermöglicht, von der Gesamtheit (Aggregat) zu ihren Bestandteilen zu gelangen; das impliziert die Aggregation als eine spezielle Art der Assoziation (siehe **Bild 7.4**).

Aggregations-Beziehungen zwischen Klassen haben eine direkte Parallele zu Aggregations-Beziehungen zwischen Objekten, die diesen Klassen entsprechen [Booch, 1994]. Die Aggregations-Beziehung zwischen der Klasse der Auftragsagenten und der Klasse der Verhandlungsfunktionen entspricht also exakt der Aggregations-Beziehung zwischen zwei Objekten dieser Klassen. Die Ganzes/Bestandteil-Beziehung ermöglicht es, selbst sehr komplexe Strukturen modular abbilden zu können. Dadurch können die Modelle auch zu späteren Zeitpunkten noch mit relativ geringem Aufwand verändert oder erweitert werden, wie es im vorliegenden Fall durch die Erweiterung des Modells um die in Kapitel 5.2 beschriebenen Agenten geschehen ist.

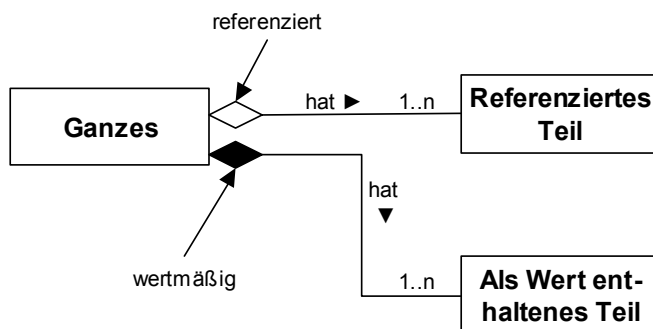


Bild 7.4 Aggregation (in Anl. an Oestereich)

7.1.2 Objektorientierte Simulation

Die Popularität des Begriffs »Objektorientierung« hat auch auf dem Gebiet der Simulationstechnik dazu geführt, dass es mittlerweile eine Vielzahl von Anbietern für Simulationssoftware auf Basis des objektorientierten Ansatzes gibt. Dadurch stehen auch hier die Vorteile objektorientierter Programmiersprachen wie die Erstellung wieder verwendbarer Softwaremodule, die Beschleunigung der Erstellung fehlerarmer Software und die Verringerung der kognitiven Distanz zwischen Anwendungsprogrammierer und Anwender durch die Bereitstellung von Bausteinbibliotheken zur Verfügung. Durch die Nutzung generischer bzw. erweiterbarer Bausteine wird eine große Flexibilität erreicht und die Starrheit problemspezifischer Simulationsmodelle kann überwunden werden.

Aus diesen Gründen wurde die Realisierung des Simulationsmodells mit dem Programm eM-Plant[®] der Firma Tecnomatix vorgenommen. Dieses Programm ist zwar nicht in der Lage, Objektmodelle direkt einzulesen und daraus automatisch ein Simulationsmodell zu generieren, aber es besteht die Möglichkeit, eigene Klassen anzulegen und diese in einer Klassenbibliothek zu hinterlegen. Dadurch lassen sich flexible und erweiterbare Strukturen realisieren, so dass in diesem Simulationsmodell die Steuerungsverfahren *First in – First out*, *Schlupfzeitregel* sowie die hier vorgestellte *verhandlungsbasierte Agentensteuerung* implementiert werden konnten. Durch die Verwendung des identischen Modells für die Simulation der verschiedenen Steuerungsverfahren ist die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse sichergestellt. Eine (auch ungewollte) Variation anderer Stellgrößen zwischen den einzelnen Simulationsläufen ist damit ausgeschlossen.

7.2 Einbindung des Simulationsmodells in die Systemlandschaft des agentenbasierten Auftragsmanagements

Ein großer Schritt zur Unterstützung der Flexibilität und der modularen Denkweise ist die Trennung von Anwendung und Daten. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Konzept konsequent umgesetzt. Die Planungs- und Durchführungsebene sowie das nachgelagerte Monitoringsystem zur Analyse der Simulationsergebnisse sind durch Datenschichten voneinander entkoppelt (siehe **Bild 7.5**). Diese Datenschichten bestehen aus relationalen Datenbanken oder aus Dateien mit speziell definierten Datenformaten. Auf diese Weise kann in Zukunft sehr einfach die Durchführungsebene in Form eines Simulationsmodells durch eine reale Fertigung ersetzt oder ergänzt werden, wie es in **Bild 7.5** angedeutet ist.

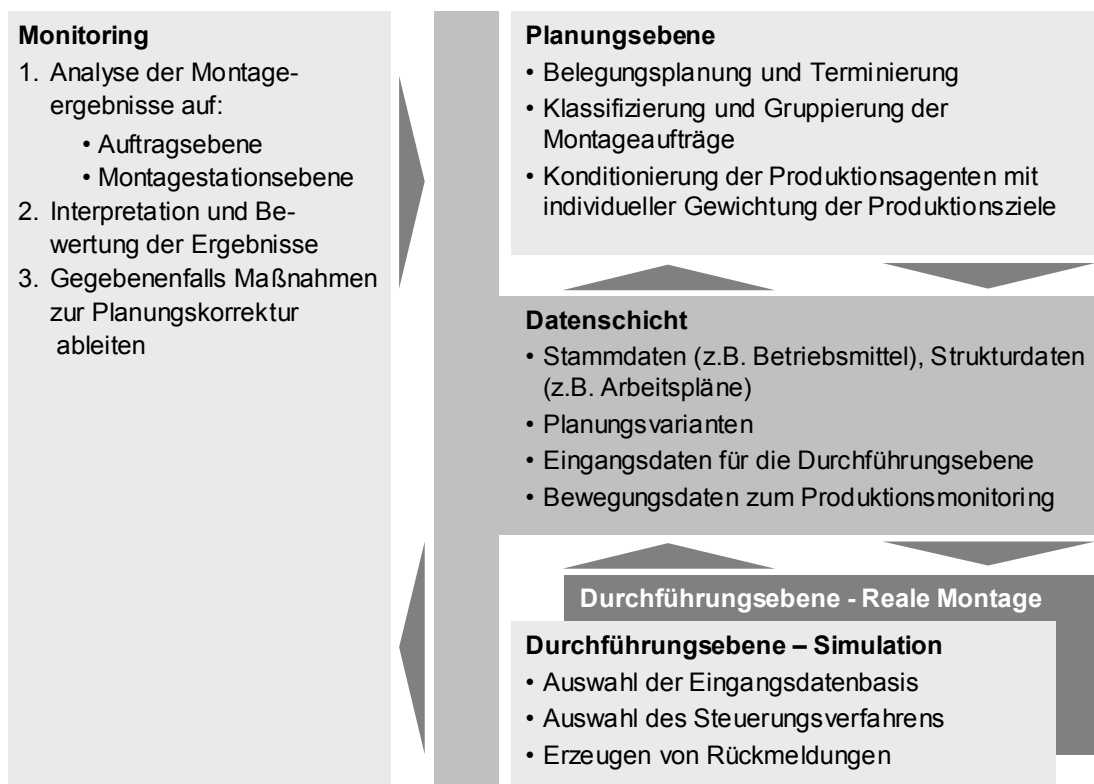


Bild 7.5 Entkopplung von Planungs- und Durchführungsebene sowie des Monitorings durch eine Datenschicht

7.2.1 Daten und Datenstruktur

Alle notwendigen Daten werden in relationalen Datenbanken hinterlegt, die über Schnittstellen mit der Planungsebene und der Durchführungsebene in Form des Simulationsmodells verbunden sind. Durch die externe Datenhaltung können alle relevanten Informationen für die Durchführung von Simulationsläufen bereitgestellt werden, ohne dass spezielles Expertenwissen über die Simulationssoftware notwendig ist.

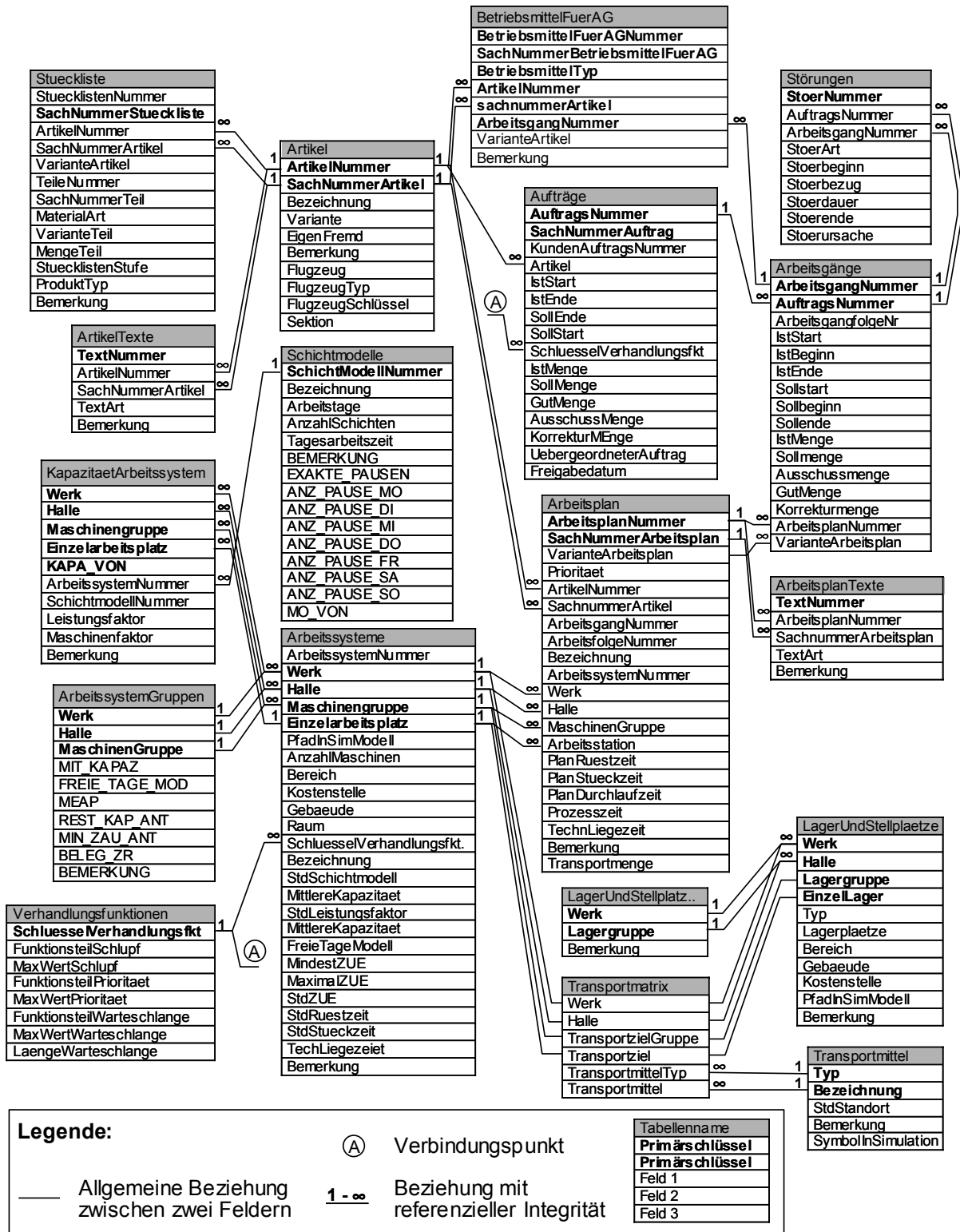


Bild 7.6 Strukturierte Darstellung der benötigten Daten (ohne Systemtabellen etc.)

Relationale Datenbanken gewährleisten eine strukturierte, redundanzfreie Datenablage, wie sie in **Bild 7.6** vereinfacht dargestellt ist. Die Entwicklung solcher Datenbanken kann auf Basis des *Entity-Relationship-Modells* nach Chen erfolgen [Chen, 1976; Barker, 1992]. Die Zugriffsrechte einzelner Benutzer auf die Datenbasis können detailliert spezifiziert werden. Weiter erleichtern die implementierten Such- und Ordnungsalgorithmen den Überblick selbst über große Datenbestände. Ein besonderer Vorteil fast aller am Markt verfügbaren relationalen Datenbanken ist ein standardisierter Datenzugriff mit der Bezeichnung »*Open Database Connectivity*« (ODBC) [Mendoza, 1993; Kofler, 1998]. In Verbindung mit der *Structured Query Language* (SQL) als Zugriffs- und Beschreibungssprache für Datenbanken können die Daten aus anderen Anwendungen heraus nahezu beliebig abgefragt und/oder geändert werden [Abts u. Mülder, 1998; Oracle, 1988].

Die zur Planung und Durchführung notwendigen Daten können entsprechend ihrer Art in »*Grunddaten*« und »*Bewegungsdaten*« unterschieden werden. Die Grunddaten haben eine mittel- bis langfristige Gültigkeit und lassen sich in »*Stammdaten*« und »*Strukturdaten*« aufteilen. Die Stammdaten dienen zur Erfassung der Eigenschaften der Systemelemente, während die Strukturdaten die Beziehungen zwischen den Systemelementen beschreiben. Die Bewegungsdaten umfassen dagegen alle Daten, die häufigen Veränderungen unterworfen sind oder nur eine kurzfristige Relevanz haben.

Stammdaten sind:

- Betriebsmittel (Montagestationen, Vorrichtungen, Lager-/Fördermittel etc.)
- Stations-/Personalkapazitäten (Schichtkalender und Schichtmodelle)
- Montageaufträge
- Arbeitsvorgänge
- Agenteninformationen
- Artikel bzw. Produkte

Als Strukturdaten bezeichnet man:

- Stücklisten
- Arbeitspläne

Das Ergebnis eines Simulationslaufes sind die Bewegungsdaten:

- Arbeitsvorgangsmeldungen
- Störungs- und Unterbrechungsmeldungen

Diese Einteilung der Daten findet sich auch auf Datenbankebene weitgehend wieder. Allerdings sind hier aus Gründen der Datenbankgestaltung zum Teil verschiedene Daten in einer Tabelle zusammengefasst [Chen, 1976; Barker, 1992]. So sind beispielsweise in der Tabelle *Aufträge* Stammdaten zu den einzelnen Montageaufträgen enthalten, z.B. in den Spalten *Artikel*, *SollStart*

und *SollEnde*, aber auch ein Teil der zugehörigen Bewegungsdaten in den Spalten *IstStart* und *IstEnde* (siehe **Bild 7.6**).

Die Arbeitspläne enthalten alle notwendigen Arbeitsvorgänge mitsamt der erforderlichen Abarbeitungsreihenfolge, für jeden Arbeitsvorgang die Montage- und alle Alternativmontagestationen sowie die Vorgabezeiten. In einem Schichtkalender werden für den Untersuchungszeitraum die Arbeitstage mit der verfügbaren Kapazität für jede Station festgelegt. Die verfügbare Tageskapazität jeder Ressource wird entsprechend den Schichtmodellen errechnet. Personelle und maschinelle Verfügbarkeiten werden aus den Vergangenheitsdaten in die Zukunft prognostiziert und finden durch Leistungsfaktoren ihre tagesgenaue Berücksichtigung bei der Kapazitätsberechnung.

Die als Planungsbasis dienenden und anschließend in den Versuchsläufen benutzten Daten wurden sehr genau überprüft und aufbereitet, da Simulationsergebnisse wertlos oder irreführend sind, wenn die Datenbasis fehlerhaft ist.

7.2.2 Informationsfluss

Zur Erstellung einer Belegungsplanung werden die benötigten Grunddaten via ODBC aus einer beliebigen Datenbank gelesen, die der in **Bild 7.6** gezeigten Struktur entspricht. Die Möglichkeit, frei auf verschiedene Datenbanken zugreifen zu können, befähigt den Anwender, Planungsszenarios auf Basis unterschiedlicher Datenbasen zu erstellen. Falls keine Veränderungen an der Originaldatenbank vorgenommen werden sollen, können Nutzer mit den entsprechenden Berechtigungen beispielsweise diese Datenbank kopieren und ihre Versuche anhand dieser Kopie durchführen.

Um den Planungsaufwand so gering wie möglich zu halten, können die verschiedenen Belegungsplanungen in einem eigenen Datenformat abgespeichert werden. Beim Öffnen einer solchen Datei wird die Verbindung zur entsprechenden Datenbank automatisch wieder hergestellt. Zum Testen der Leistungsfähigkeit der Agentensteuerung können nun Vorlagen erstellt werden, die als Planungsgrundlage dienen und an das jeweilige Planungsziel angepasst werden können. Diese Planungsvarianten können anschließend wieder unter einem eigenen Namen abgespeichert werden.

Die Bestimmung des Kundenbedarfs kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen. Zum einen können die Montageaufträge über eine ASCII-Schnittstelle direkt aus dem PPS-System übernommen werden, wenn die Auswirkungen des tatsächlichen Produktionsprogramms auf die Montage getestet werden sollen. Die zweite Möglichkeit besteht darin, zukünftige Szenarien oder Alternativen vom Planer selbst erstellen zu lassen, indem er auf der Planungsebene ein Produktionsprogramm festlegt. Beide Varianten können auch kombiniert werden. So lässt sich beispielsweise die dynamische Kapazitätsgrenze der Montage dadurch ermitteln, dass an ein bestehendes Produktionsprogramm aus dem PPS-System weitere Aufträge vom Planer angefügt werden.

Falls eine bestimmte Planung simuliert werden soll, werden die aktuellen Plandaten in die verbundene Datenbank geschrieben. Der Anwender muss vor einem Simulationslauf nur noch die gewünschte Datenquelle und das Steuerungsverfahren auswählen. Die benötigten Daten werden dann vom Simulationsmodell ebenfalls über eine ODBC-Verbindung in das Modell eingelesen und anschließend simuliert.

Während der einzelnen Simulationsläufe werden die Bewegungsdaten wie Rück- und Störmeldungen mitprotokolliert. Diese Datensammlung entspricht in der Realität einer Betriebsdatenerfassung. Im Anschluss an einen Simulationslauf können diese Daten gezielt aufbereitet und in einem definierten Format als Textdatei abgespeichert werden. Diese Textdateien können mit der kommerziellen Monitoringsoftware FAST/pro[®] eingelesen werden. Die enthaltenen Daten werden von FAST/pro[®] aufbereitet und in einer weiteren Datenbank abgespeichert, so dass ein umfassendes Auswerten der Daten z.B. zu Vergleichszwecken auch zu einem späteren Zeitpunkt noch möglich ist.

7.3 Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse

Wie bereits mehrfach erwähnt, wurde das vorliegende Simulationsmodell anhand einer realen Montage verifiziert und validiert. Dadurch konnte ein sehr hoher Übereinstimmungsgrad nachgewiesen werden; die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den real erzielten Produktionswerten bewegten sich im einstelligen Prozentbereich [Evers, 2002]. Evers konnte mit Hilfe des Modells nachweisen, dass sich die realen Produktionsergebnisse unter Anwendung der von ihm entwickelten Belegungsplanungsmethode noch verbessern lassen. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse des hier vorgestellten Ansatzes mit denen verglichen, die sich aus dem Ansatz von Evers ergeben.

Als Voraussetzung für vergleichbare Ergebnisse müssen die Ausgangsbedingungen für alle Simulationsläufe identisch sein; einzig die eingesetzten Steuerungsverfahren und die verfahrensspezifischen Parameter dürfen variiert werden. Konkret bedeutet dies, dass sowohl das Produktionsspektrum in Form der terminierten Montageaufträge als auch die Anzahl der eingesetzten Montagestationen mit ihrer jeweiligen Kapazitätseinstellung exakt übereinstimmen müssen. Als Datenbasis für die verschiedenen Simulationsläufe wurde eine Periodenlänge von etwa einem Monat zugrunde gelegt. In dieser Periode wurden 491 Montageaufträge mit 2213 Arbeitsgängen simuliert. Zur Bewältigung dieses Produktionsspektrums werden 5 verschiedene Montagestationstypen (Typ 7 bis Typ 13 in **Bild 7.7**) benötigt. Diese verteilen sich auf 11 Montagestationsgruppen mit insgesamt 30 Montagestationen. Die vorgelagerten Stationen vom Typ 3 und 4 sowie die nachgelagerten Stationen vom Typ 14 und 15 sind reine Handarbeitsplätze und dienen der Arbeitsvorbereitung sowie der Nacharbeit. Diese Stationen wurden bei allen Simulationsläufen nicht betrachtet. Weiterhin sind für bestimmte Arbeitsvorgänge spezielle Vorrichtungen notwendig. Hierfür stehen 107 Bauteilträger zur Verfügung, die in 53 technisch identischen Gruppen zusammengefasst sind. Die Terminierung der Montageaufträge war bei allen Simulationsläufen dieselbe. Allerdings wurde nicht kapazitätsorientiert terminiert, sondern es wurden bewusst Phasen mit Über- und Unterlast an den Montagestationen erzeugt. Weiter wurden

einzelne Aufträge so terminiert, dass der jeweilige Sollendtermin (geplanter Fertigstellungstermin eines Auftrags) allein aufgrund der reinen Montagezeit nicht einzuhalten ist. Auf diese Weise wurden die verschiedenen Steuerungsverfahren zwangsläufig mit schwierigen Produktionssituationen, wie z.B. einem Ressourcenmangel, konfrontiert.

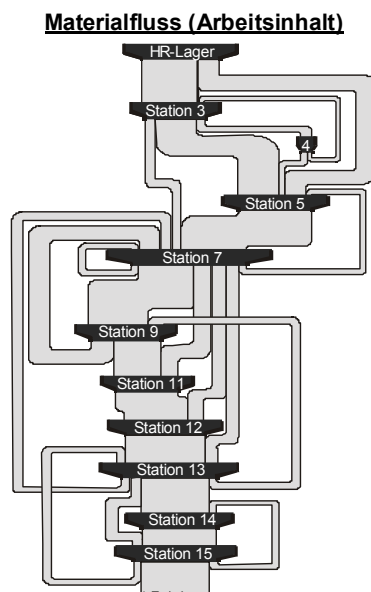
Das Ziel der Simulationsuntersuchungen war es, die Leistungsfähigkeit des hier entwickelten Ansatzes im Bezug auf die Umsetzung der Unternehmensziele nachzuweisen. In der hier betrachteten kundenauftragsbezogenen Montage ist dies im Wesentlichen die Termintreue gegenüber dem Kunden. Da einer hohen Termintreue bei marktgerechten Lieferzeiten eine möglichst gute Planbarkeit der Montageaufträge voransteht, wurden hier auf Auftragsebene zum einen die Termineinhaltung und zum anderen die Abweichung von der Planauftragsdurchlaufzeit miteinander verglichen. Auf Montagestationsebene wurden die verschiedenen Steuerungsverfahren dahingehend aneinander gemessen, wie gleichmäßig sie die Arbeit auf die technisch möglichen Stationsgruppen verteilen bzw. wie gleichmäßig die Verteilung der Arbeit innerhalb dieser Gruppen erfolgt. Denn im operativen Produktions- bzw. Simulationsbetrieb ist die Auslastung der einzelnen Stationsgruppen hauptsächlich vom jeweiligen Produktionsspektrum abhängig und kann an dieser Stelle kaum noch beeinflusst werden. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden die Ergebnisse der Stationsgruppen vom Typ 7 und der zugehörigen Montagestationen herangezogen, weil an ihnen die komplexesten Steuerungsprobleme zu lösen sind. Denn einerseits werden diese Stationen von den meisten Aufträgen durchlaufen und andererseits weisen sie zusätzlich einen hohen Anteil von Aufträgen auf, die diese Stationen mehrfach durchlaufen müssen (siehe **Bild 7.7**). Um bei signifikanten Abweichungen von der Planauftragsdurchlaufzeit möglichst effektive Maßnahmen ergreifen zu können, gilt es festzustellen, ob auf Montagestationsebene *Treiber der Durchlaufzeitabweichung* existieren. Die Berechnung diesbezüglicher Kennwerte wurde auf Basis aller Montagestationen vorgenommen.

Untersuchungszeitraum

- Beginn: 04.01.xx
- Ende: 02.02.xx

Aufträge (Station 7 bis 13)

- **Arbeitsplanstruktur**
 - 280 Auftragsvarianten
 - 196 Einfachauftragsvarianten
 - 50 Teilauftragsvarianten
 - 34 Komplettauftragsvarianten
 - 1.320 Arbeitsvorgangsvarianten
 - 6.580 Belegungsvarianten
- **durchzuführende Aufträge**
 - 491 Montageaufträge
 - 335 Einfachaufträge
 - 94 Teilaufträge
 - 62 Komplettaufträge
 - 2.213 Arbeitsvorgänge



Ressourcen (2 Montagehallen)

- **Handmontagestation Typ 7**
 - 10 sich ersetzende Stationen
 - 2 Gruppen techn. identischer Stationen
- **NC-Nietstation Typ 9**
 - 14 sich ersetzende Stationen
 - 5 Gruppen techn. identischer Stationen
- **NC-Bohrstation/Handmontagestation Typ 11**
 - 2 techn. identische Stationen
- **NC-Nietstation Typ 12**
 - 3 sich ersetzende Stationen
 - 2 Gruppen techn. identischer Stationen
- **Handmontagestation Typ 13**
 - 1 Station
- **Vorrichtung**
 - 107 Bauteilträger
 - 53 Gruppen techn. identischer Bauteilträger

Bild 7.7 Struktur des betrachteten Montagesystems [nach Evers]

Evers hat seine verfahrensspezifischen Parametereinstellungen mit Hilfe von sehr vielen Simulationsläufen sukzessive optimiert, so dass seine Ergebnisse hinsichtlich der von ihm gesetzten Produktionsziele vermutlich nahe an die theoretisch möglichen Grenzen gelangt sind. Es kann also nicht das Ziel sein, diese Ergebnisse noch einmal maßgeblich zu verbessern, sondern lediglich ähnlich gute Werte zu erhalten. Wenn dies realisiert werden kann, ist der Nachweis über die Funktion und Leistungsfähigkeit des agentenbasierten Auftragsmanagements erbracht. Wobei der wesentliche Vorteil im Gegensatz zum sukzessiven Vorgehen bei Evers darin zu sehen ist, dass die Produktionsagenten hier nur einmalig konditioniert werden müssen. Anschließend passen sie sich automatisch und individuell an die jeweilige Produktionssituation an.

7.3.1 Simulationsergebnisse auf Auftragsebene

Zunächst soll in diesem Kapitel die Auftragsendtermineinhaltung der beiden Steuerungsverfahren miteinander verglichen werden. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass eine schlechte Termintreue gegenüber dem Kunden oftmals mit einer schlechten Auftragsstarttermineinhaltung, z.B. aufgrund von fehlendem Rohmaterial, zu begründen ist. Im Rahmen dieser Arbeit ist dieser Effekt jedoch zu vernachlässigen, weil mit Hilfe des Simulationsmodells sichergestellt ist, dass für alle Einfach- und Teilaufträge das benötigte Rohmaterial termingerecht bereitgestellt wird (vgl. Kapitel 2.1.3). Lediglich bei den Komplettaufträgen kann es in Folge von nicht rechtzeitig fertig gestellten Teilaufträgen zu verzögerten Auftragsstartterminen kommen. Allerdings machen die 62 Komplettaufträge nur knapp 13% der 491 Montageaufträge aus (siehe **Bild 7.7**). Weiter resultiert ein unterschiedliches Maß der Auftragsstartterminverschiebung bei Komplettaufträgen nur aus der Leistungsfähigkeit der Steuerungsverfahren, so dass die ausschließliche Betrachtung der Auftragsendtermine hier zulässig ist. Diesbezüglich zeigt der Vergleich von **Bild 7.8** und **Bild 7.9**, dass mit Hilfe der Produktionsagenten eine Verbesserung der Endtermineinhaltung erreicht werden konnte. Die Anzahl der Aufträge, die zu früh fertig gestellt wurden, konnte deutlich reduziert werden, weil die Auftragsagenten in solchen Situationen nur sehr niedrige Forderungen bezüglich der Leistungsvergütung akzeptieren. Ein Auftrag bleibt also eher auf einer niedrigeren Wertschöpfungsstufe liegen, als dass er zu früh bearbeitet wird und, im ungünstigsten Fall komplett montiert, im Lager wartet, bis der Kunde ihn abrufen.

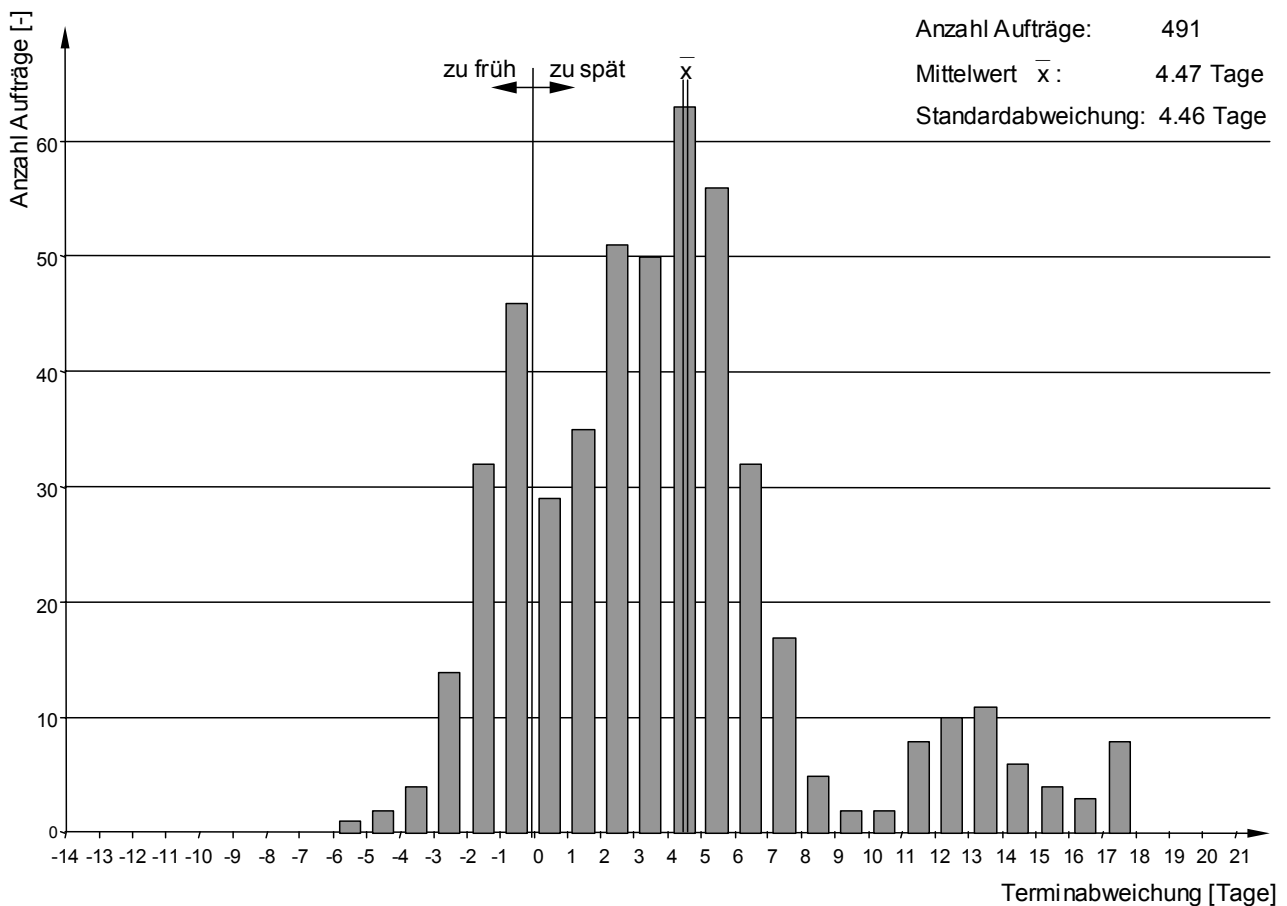


Bild 7.8 Endtermineinhaltung mit agentenbasiertem Auftragsmanagement

Ebenso konnte der maximale Terminverzug von 21 auf 18 Tage verringert werden, obwohl die Schlupfzeitregel insbesondere zur Minimierung des Terminverzuges entwickelt worden ist. Der wesentliche Grund hierfür liegt wieder in der individuellen Vertretung des Auftrages durch seinen Auftragsagenten. Denn dort, wo die Schlupfzeitregel nur den absoluten arbeitsvorgangbezogenen Schlupf der einzelnen Aufträge vergleicht, berücksichtigt der Auftragsagent die individuelle Produktionssituation seines Auftrages auf Basis des prozentualen Schlupfes. Je nach Bewertung der Dringlichkeit ist der Auftragsagent bereit, auch sehr hohe Forderungen zu akzeptieren. Dadurch kann er sich zum einen gegenüber seinen Mitbewerbern selbst bei wenigen Angeboten behaupten und zum anderen steigert er seine Flexibilität, weil die Anzahl der gültigen Angebote ansteigt, so dass der Auftragsagent aus einer größeren Auswahl das günstigste Angebot selektieren kann. Bei der Schlupfsteuerung im Allgemeinen verliert sich dieser Vorteil, weil grundsätzlich allen Aufträgen alle Montagestationen zur Verfügung stehen und nicht die Aufträge bevorzugt werden, die aufgrund ihrer individuellen Situation vorrangig behandelt werden müssten. Im speziellen Fall der Schlupfsteuerung nach Evers gibt es feste Regeln zur alternativen Montagestationsbelegung (siehe Kapitel 2.1.3), die der Dynamik des Montagebetriebs nur eingeschränkt gerecht werden, so dass die geforderte Flexibilität zwar grundsätzlich besteht, aber ggf. nicht optimal genutzt wird.

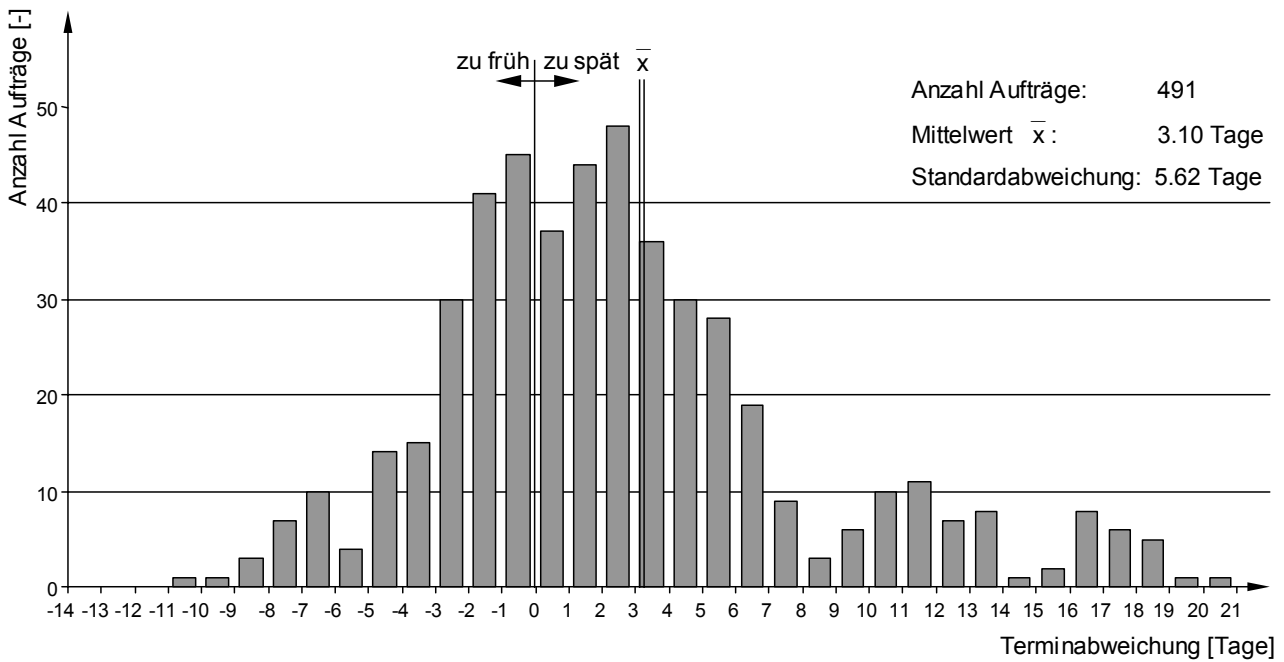
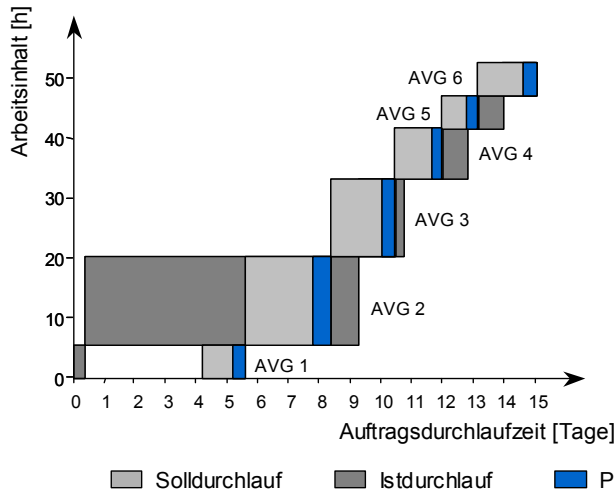


Bild 7.9 Endtermineinhaltung mit Anwendung des Steuerungsverfahrens nach Evers

Der Mittelwert der Terminabweichung ist im Vergleich zum Steuerungsverfahren nach Evers insgesamt etwas schlechter geworden, weil sowohl die Anzahl der Aufträge, die zu früh fertig gestellt wurden, als auch deren Maß der Terminabweichung stärker reduziert wurden, als dies bei den verspäteten Aufträgen möglich war. Dementgegen konnte die Standardabweichung der Endterminabweichung deutlich reduziert werden. Ein Vorteil, der sich besonders im Hinblick auf die Planbarkeit des Systems auswirkt.

a) Verzögerter Auftrag im Einzelauftragsdurchlaufdiagramm



b) Beschleunigter Auftrag im Einzelauftragsdurchlaufdiagramm

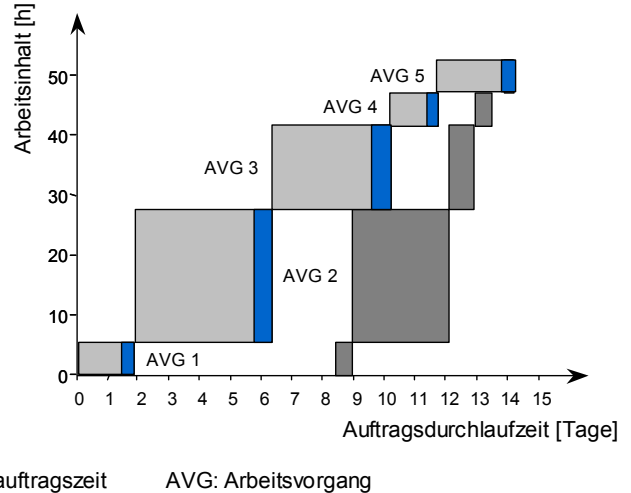


Bild 7.10 Geregelter Auftragsdurchlauf durch den Einsatz von Produktionsagenten

Die erhöhte Einhaltung der Auftragsendtermine ist auch ein Indiz dafür, dass einerseits Aufträge, die zu früh freigegeben wurden, verzögert werden und andererseits Aufträge, die zu spät begonnen wurden, soweit wie möglich beschleunigt werden. Diesbezüglich zeigt **Bild 7.10a** einen Auftrag im Einzelauftragsdurchlaufdiagramm (vgl. Kapitel 2.3.3), der erst am Tag Vier hätte begonnen werden sollen, aber bereits am Tag Null begonnen wurde, wobei die Zeitachse nur der Übersicht

halber am Tag Null beginnt. Bei diesem Auftrag muss es sich zum einen um einen Komplettauftrag handeln, denn sonst hätte das Simulationsmodell eine vorzeitige Auftragsfreigabe verhindert, und zum anderen muss die Montagestation, die den Arbeitsvorgang AVG 1 bearbeitet hat, sehr niedrig ausgelastet gewesen sein, denn sonst wäre die geforderte Leistungsvergütung höher ausgefallen, als dass der Auftragsagent sie in einer solchen Situation akzeptiert hätte. Dagegen müssen die Montagestationen, an denen die Bearbeitung des Arbeitsvorgangs AVG 2 technologisch möglich war, höher ausgelastet gewesen sein, denn hier ist der Auftrag solange liegen geblieben, bis er terminlich dringend war und die geforderte Leistungsvergütung aufgrund seiner Verhandlungsfunktion akzeptieren konnte. Das umgekehrte Verhalten zeigt der Auftragsdurchlauf in **Bild 7.10b**, denn dieser Auftrag wurde später als geplant gestartet. Dadurch war er von Beginn an so dringend, dass er auch sehr hohe Forderungen bezüglich der Leistungsvergütung akzeptieren konnte. Auf diese Weise hat er sich gegenüber seinen Mitbewerbern durchgesetzt und die Zeitspannen für die Bearbeitung der einzelnen Arbeitsvorgänge soweit verkürzt, dass er trotz des verspäteten Starts noch termingerecht fertiggestellt wurde.

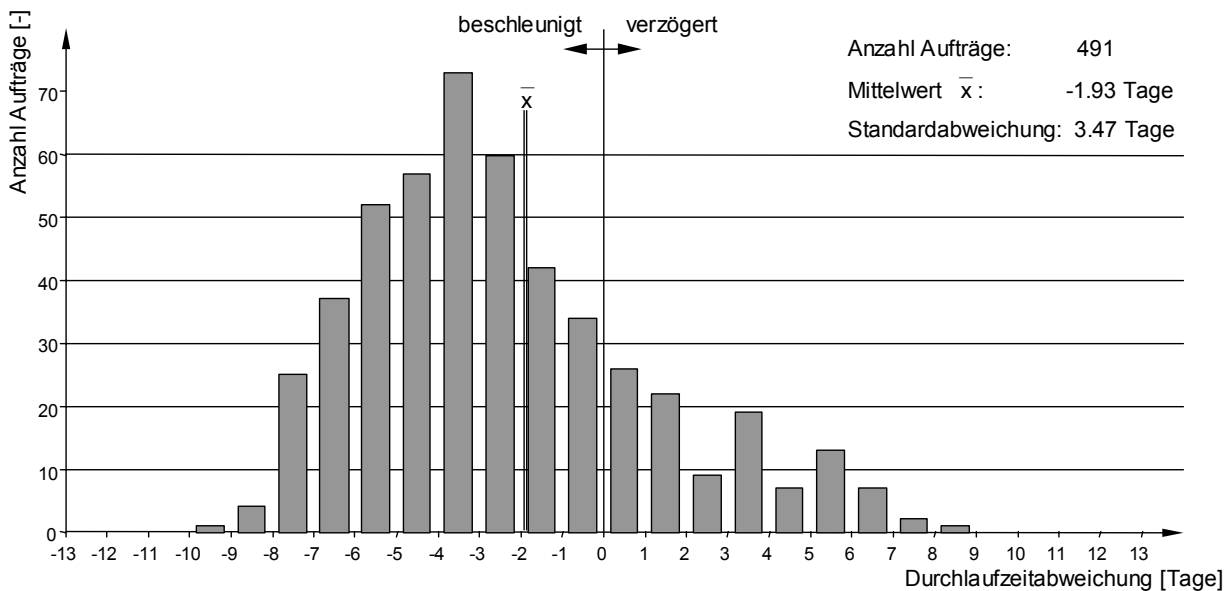


Bild 7.11 Plandurchlaufzeitabweichung mit agentenbasiertem Auftragsmanagement

Die erhebliche Verringerung der Durchlaufzeitabweichung, wie sie **Bild 7.11** und **Bild 7.12** zu entnehmen ist, stellt zwar – solange die Liefertermine eingehalten werden – keinen direkten kundenorientierten Nutzen dar, wohl aber wird dadurch ebenfalls die Planbarkeit der Montageaufträge gesteigert. Denn auf diese Weise steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Lieferterminzusagen, die den Kunden gegenüber gemacht wurden, tatsächlich eingehalten werden können. Weiter lassen sich die Pufferzeiten zwischen Auftragsendtermin in der Montage und Liefertermin zu Gunsten der bestandsbedingten Kapitalbindungskosten und der benötigten Lagerkapazität reduzieren. Auf einen Vergleich der absoluten Durchlaufzeiten wird an dieser Stelle verzichtet, weil die Streuung dieser Werte allein aufgrund der geplanten Durchlaufzeiten sehr groß ist. Dies liegt zum einen an der unterschiedlichen Anzahl der notwendigen Arbeitsvorgänge, aber auch an der zur Montage benötigten Technologie, die ebenfalls von Montageauftrag zu Montageauftrag variiert und einen stark schwankenden Zeitaufwand begründet.

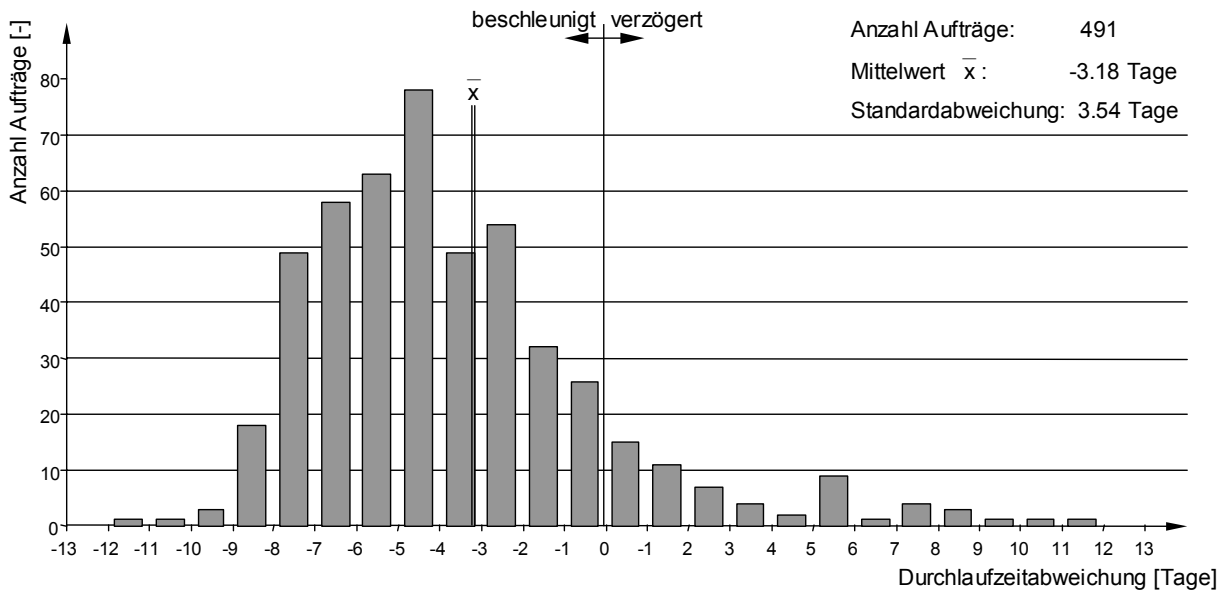


Bild 7.12 Plandurchlaufzeitabweichung mit Anwendung des Steuerungsverfahrens nach Evers

In Kapitel 5.1 wurde der Planauftragsdurchlauf als sekundäres Auftragsziel eingeführt. Die Zuordnung einzelner Arbeitsvorgänge zu bestimmten Montagestationen erfolgt dabei nach der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Vorgehensweise. Ziel ist es, einen möglichst hohen Anteil aller Aufträge nach dem Planauftragsdurchlauf (Prioritätswert 1) abzuwickeln und Montagestationen mit einem niedrigeren Prioritätswert nur in Ausnahmefällen zu belegen. Der Vergleich der Schlupfsteuerung nach Evers und dem agentenbasiertem Auftragsmanagement ist in **Tabelle 7.1** dargestellt und zeigt bei der Schlupfsteuerung einen höheren Anteil an Arbeitsvorgängen, die auf Montagestationen mit dem Prioritätswert 1 gefertigt wurden. Allerdings wurde die Priorisierung der Montagestationen im Rahmen der Belegungsplanung nur eingeführt, um durch einen gerichteten Materialfluss eine gleichmäßige Anlagenauslastung und eine hohe Verfügbarkeit der benötigten Betriebsmittel zu gewährleisten. All dies dient jedoch in letzter Konsequenz nur dem Ziel, das termin- und mengenmäßige Anforderungsprofil an die Montage kundengerecht zu bewältigen. Und die obigen Ergebnisse haben bezüglich der Termintreue und der Durchlaufzeitabweichung gezeigt, dass mit dem Einsatz von Produktionsagenten gleichwertige oder gar bessere Leistungen erzielt werden können als mit der reinen Schlupfsteuerung. Demnach lässt sich ein Rückgang der Arbeitsvorgänge, die an Montagestationen mit Prioritätswert 1 bearbeitet wurden, als bessere Ausnutzung der bestehenden Flexibilität deuten.

Tabelle 7.1 Einhaltung der Materialflussziele

	Priorität 1		Priorität 2		Priorität 3		Priorität 4	
	Anzahl [-]	Anteil [%]	Anzahl [-]	Anteil [%]	Anzahl [-]	Anteil [%]	Anzahl [-]	Anteil [%]
Schlupfsteuerung	2058	93	66	3	55	2,5	34	1,5
Agentenbasiert	1881	85	133	6	22	1	177	8
Differenz	177	8	-67	-3	33	1,5	-143	-6,5

7.3.2 Simulationsergebnisse auf Montagestationsebene

Das Ziel der Konditionierung der Montagestationsagenten ist neben der Gewährleistung einer adäquaten Leistungsvergütung im Wesentlichen, eine gleichmäßige Auslastung aller Montagestationen einer Gruppe sicherzustellen. Ebenso wie bei der Bewertung der Simulationsergebnisse auf Auftragsebene gelten die Ergebnisse, die mit der Schlupfsteuerung nach Evers erreicht wurden, als anzustrebender Vergleichszustand. Die Frage, inwieweit dieses Ziel erreicht wurde, soll aus den in Kapitel 7.3 beschriebenen Gründen anhand der Montagestationen aus den Stationsgruppen vom Typ 7 untersucht werden. Allerdings wird die Bestimmung der Kennwerte für die relative Terminabweichung an den Montagestationen am Schluss dieses Kapitels auf Basis aller Montagestationen vorgenommen.

Der Kennzahlenvergleich für die betrachtete Periode in **Tabelle 7.2** zeigt erwartungsgemäß, dass sich die Kennwerte der Montagestationen für die beiden Steuerungsverfahren auf Gruppenebene kaum unterscheiden. Ein interessanter Aspekt im Zusammenhang mit der erhöhten Anzahl von Arbeitsvorgängen, die an Montagestationen mit dem Prioritätswert 4 bearbeitet wurden, zeigt sich in der geringfügigen Harmonisierung der Auslastung zwischen den Stationsgruppen Gr7/4bis7/12 und Gr7/3bis7/8. Durch die etwas bessere Ausnutzung der verfügbaren Flexibilität konnten bei der verhandlungsbasierten Agentensteuerung im gleichen Zeitraum etwa 120 Stunden mehr abgearbeitet werden als bei der Schlupfsteuerung nach Evers. Dies entspricht einer Erhöhung der Auslastung um 1,2%. Allerdings muss gesagt werden, dass bei der Schlupfsteuerung die mittleren Durchlaufzeiten und die mittleren Bestände an den Montagestationen insgesamt niedriger sind, weil beispielsweise verfrühte Aufträge sofort bearbeitet werden, wenn Kapazität vorhanden ist. Es fehlt der in Kapitel 7.3.1 beschriebene verzögernde Effekt.

Tabelle 7.2 Produktionskennzahlenvergleich auf Basis der Montagestationsgruppen vom Typ 7

	Agentenbasiertes Auftragsmanagement		Schlupfsteuerung nach Evers	
	Gr7/3bis7/8	Gr7/4bis7/12	Gr7/3bis7/8	Gr7/4bis7/12
Anzahl bearbeiteter Arbeitsvorgänge [-]	399	310	370	344
Mittlere gewichtete Durchlaufzeit [Tage]	2	3,3	1	2,7
Mittlere ungewichtete Durchlaufzeit [Tage]	1,2	2,2	0,6	1,5
Auslastung [%]	77,6	75,7	73,9	77,0
Kumulierter Abgang [Stunden]	3462	4192	3286	4250
Mittlerer Bestand [Stunden]	169	371	76	252
Mittlere Auftragszeit [Stunden]	8,7	13,5	8,9	12,4

Die in **Bild 7.13** dargestellten Produktionskennlinien zeigen jedoch beispielhaft, dass die Bestände auch beim agentenbasierten Steuerungsverfahren auf einem sehr günstigen Niveau liegen. Auf dieser Detaillierungsstufe lassen sich die Produktionssituationen der einzelnen Montagestationen innerhalb einer Montagestationsgruppe sehr anschaulich miteinander vergleichen. So zeigen die Produktionskennlinien in **Bild 7.13**, dass die geforderten Produktionsziele auch an den einzelnen Montagestationen erreicht wurden, da ihre Betriebspunkte in der betrachteten Periode annähernd identisch positioniert sind. Weiter ist positiv anzumerken, dass die Betriebspunkte im angestrebten Bereich (in **Bild 7.13** grau hinterlegt) liegen. Dieser Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass die bestandsbedingten Auslastungsverluste gering und die Durchlaufzeiten niedrig sind.

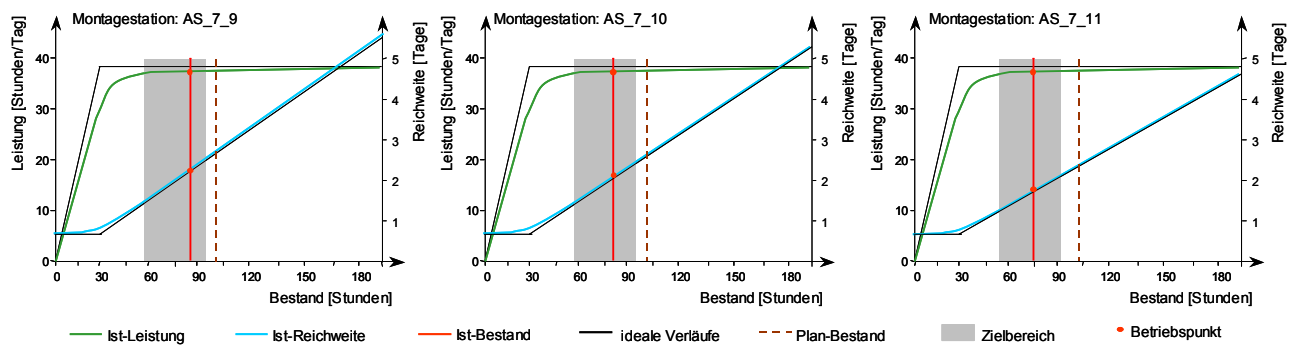


Bild 7.13 Produktionskennlinien der Montagestationen 7/9 bis 7/11 bei Anwendung des Agentenbasierten Auftragsmanagement

Ein weiterer Vorteil dieser Darstellungsform ergibt sich aus dem Vergleich von geplantem und tatsächlichem Betriebspunkt, da man auf diese Weise die Qualität der Planung abschätzen kann. Liegt der geplante Betriebspunkt rechts vom realen Betriebspunkt, dann war der tatsächliche Bestand im Mittel niedriger als der geplante Bestand. Da davon auszugehen ist, dass bei der Planung die Montagestationskapazitäten korrekt angenommen worden sind und die Ist-Leistung nur unwesentlich geringer als die Plan-Leistung war, sollte bei zukünftigen Planungen die Planübergangszeit an solchen Montagestationen reduziert werden. Analoges gilt, wenn der geplante Betriebspunkt links vom realen Betriebspunkt liegt.

Alle diese auf den Mittelwert der Periode bezogenen Betrachtungen haben allerdings einen rein statischen Charakter und sagen nichts über die dynamischen Schwankungen an den Montagestationen aus. Wenn die Produktionssituation eines Produktionsunternehmens über den Verlauf der Zeit analysiert werden soll, eignet sich dazu insbesondere das Durchlaufdiagramm. Hier lassen sich die Größen verfügbare Kapazität, tatsächliche Leistung und Bestand über der Zeit beobachten. Zu diesem Zweck zeigt **Bild 7.14** die Durchlaufdiagramme der Montagestationen aus **Bild 7.13**, um die Dynamik an diesen Stationen bei Anwendung des agentenbasierten Auftragsmanagements und der Schlupfsteuerung nach Evers vergleichen zu können. Da die jeweiligen Abgangs- und Bestandskurven bei der verhandlungsbasierten Agentensteuerung nahezu gleich verlaufen, ist bewiesen, dass die Agentensteuerung wie geplant funktioniert (siehe **Bild 7.14a**). Allerdings sind die Kurvenverläufe bei der Schlupfsteuerung nur geringfügig schlechter (siehe **Bild 7.14b**). Das

bedeutet, dass auch mit den starren Regeln der Schlupfsteuerung die Forderung nach einer gleichmäßigen Montagestationsauslastung ähnlich gut erfüllt wird.

Der Verlauf der geplanten Arbeitsvorgangfertigestellung an den Arbeitssystemen macht noch einmal die schlechte Terminplanung deutlich. Zu Beginn der Periode wurde ein höherer Abgang geplant, als überhaupt Kapazität verfügbar war, wohingegen die Planabgangskurve gegen Ende der Periode viel zu flach verläuft.

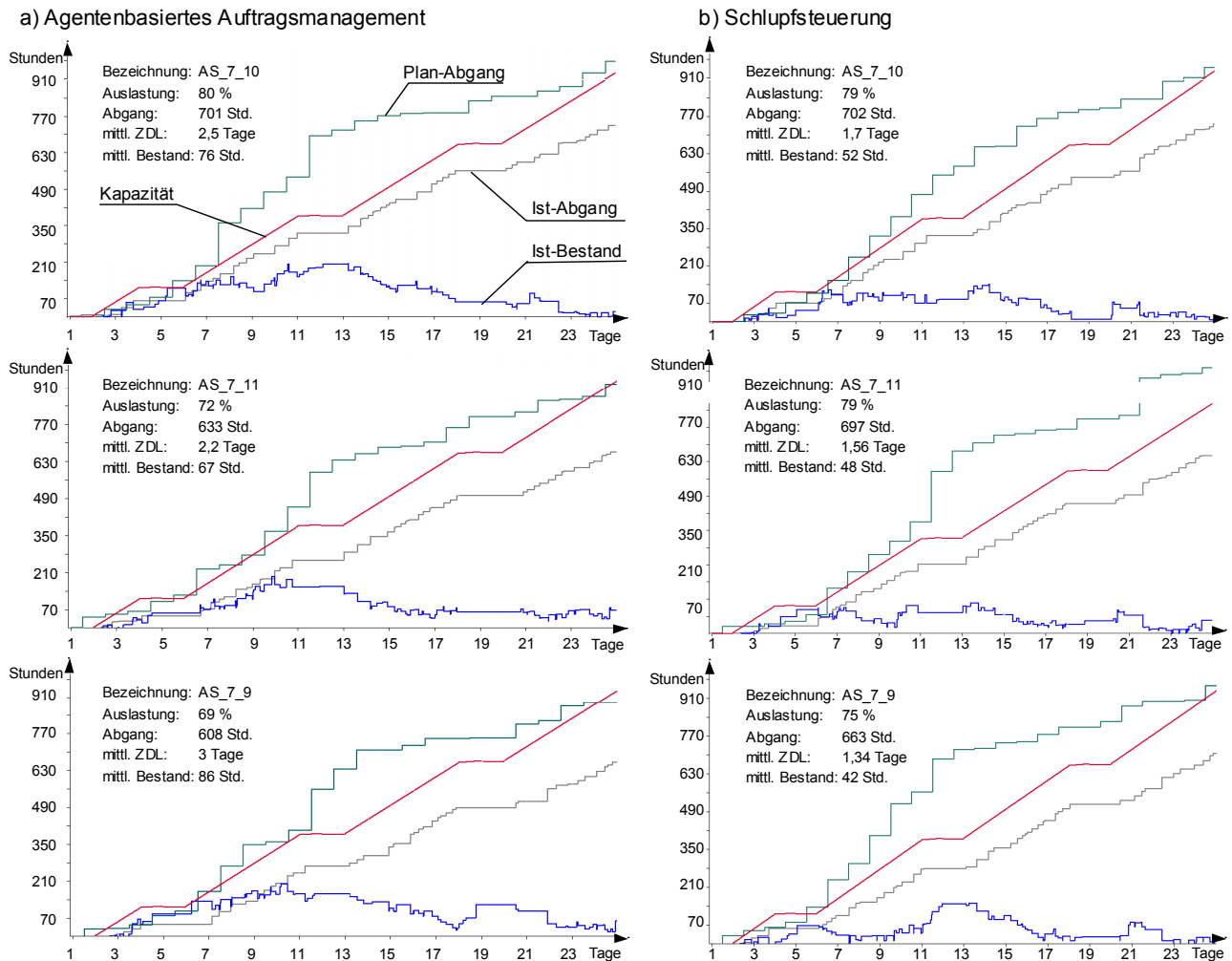


Bild 7.14 Durchlaufdiagramme der Montagestationen 7/9 bis 7/11 bei agentenbasiertem Auftragsmanagement und dem Steuerungsverfahren nach Evers

Im Zusammenhang mit der Auftragsendtermineinhaltung ist es wichtig, die „Treiber“ der relativen Terminabweichung auf Arbeitssystemebene zu kennen. Denn nur eine geringe und schwankungsarme relative Terminabweichung (vgl. **Gleichung 2.10** bis **2.12**) bzw. gleichbedeutend Durchlaufzeitabweichung erzeugt gleichmäßige und vorhersagbare Durchlaufzeiten. Die Hauptursachen für eine relative Terminabweichung auf Arbeitssystemebene sind falsch eingestellte Kapazitäten, zu große oder zu kleine Planübergangszeiten und Reihenfolgevertauschung. Im ersten Fall entstehen an den Arbeitssystemen bei Bestandsschwankungen Über- bzw. Unterlastzustände. Im zweiten Fall werden die Durchlaufzeiten selbst bei Annahme eines statischen Produktionszustandes zwangsläufig verkürzt oder verlängert. Allerdings ist im Rahmen des Vergleichs der beiden Steuerungs-

verfahren nur die Reihenfolgevertauschung relevant, da sowohl die Kapazitätseinstellungen als auch die Planübergangszeiten jeweils identisch waren. Da während der betrachteten Periode kein Arbeitssystem kontinuierlich an seiner Kapazitätsgrenze betrieben wurde und die Planübergangszeiten auf realen Werten basieren, lassen sich die Unterschiede in **Tabelle 7.3** weitgehend auf Reihenfolgevertauschungen zurückführen. Die Betrachtung von Mittelwert und Standardabweichung sowie Minimum und Maximum im Vergleich mit Auftragsdurchlaufzeiten von bis zu 17 Tagen zeigt, dass es unabhängig vom Steuerungsverfahren keine signifikanten „Treiber“ der relativen Terminabweichung gibt. Die Unterschiede zwischen den Verfahren fallen so geringfügig aus, dass beide bezüglich der relativen Terminabweichung nahezu gleichwertig zu beurteilen sind.

Tabelle 7.3 Kennwerte zur Durchlaufzeitabweichung unter Berücksichtigung aller Montagestationen

Kennwert: Durchlaufzeitabweichung	Agentenbasiertes Auftragsmanagement	Schlupfsteuerung nach Evers
Mittelwert	-0,4 Tage	-0,6 Tage
Standardabweichung	0,5 Tage	0,4 Tage
Minimum	-1,1 Tage	-1,4 Tage
Maximum	0,7 Tage	0,8 Tage

7.3.3 Simulationsergebnisse bei alternativer Angebotsbewertung und geänderter Konditionierung der Auftragsagenten

Die vorstehend beschriebenen Ergebnisse des agentenbasierten Auftragsmanagements sind auf Basis einer kombinierten termin-, budget- und materialflussorientierten Angebotsbewertung durch die Auftragsagenten entstanden. Eine sinnvolle Alternative dazu wäre, auf eine detaillierte Berücksichtigung des Budgets zu verzichten und alle gültigen Angebote als gleichwertig zu betrachten (siehe Kapitel 6.2.3). Dies erscheint besonders für einen innerbetrieblichen Markt sinnvoll, da hier in der Regel keine reale Entlohnung für bestimmte Leistungen erfolgt. Die erwarteten positiven Auswirkungen auf die Termineinhaltung konnten simulativ allerdings nicht nachgewiesen werden. Dies liegt zum einen daran, dass die verfügbaren Alternativen technisch sehr ähnlich ausgestattet sind, so dass aufgrund der gleichmäßigen Auslastung auch die jeweils geforderte Leistungsvergütung weitgehend identisch war. Zum anderen hatte die Priorisierung der Montagestationen einen starken Einfluss, weil es oft nur die Prioritätswerte 1 (optimal) und 4 (logistisch ungeeignet) gab. Dies hatte bei der vorliegenden Konditionierung der Auftragsagenten zur Folge, dass Montagestationen mit dem Prioritätswert 4 nur in wenigen Ausnahmefällen gültige Angebote unterbreiten konnten. In anderen Montagen kann diese alternative Angebotsbewertung aber durchaus signifikante Vorteile haben, z.B. wenn die alternativen Montagestationen logistisch gleichwertig sind, aber aufgrund ihrer technischen Ausstattung in derselben Situation unterschiedliche Leistungsvergütungen fordern.

Entgegen der alternativen Angebotsbewertung zeigt eine unterschiedliche Konditionierung der Auftragsagenten sehr wohl Auswirkungen auf die Flexibilitätsausnutzung (siehe **Tabelle 7.4**). Es

werden z.B. häufiger Montagestationen mit einem niedrigen Prioritätswert genutzt, wenn durch entsprechend parametrisierte Verhandlungsfunktionen ein stärkeres Gewicht auf die Termineinhaltung gelegt wird.

Eine vom aktuellen Produktionsspektrum abhängige Auswirkung stellt sich ein, wenn die Klassifizierung der Auftragsgruppen für die Zielverfolgung der Auftragsagenten nur von der Anzahl der Arbeitsvorgänge abhängig gemacht wird. Je nach mengenmäßiger Verteilung der Aufträge in den Auftragsgruppen wird sich die Einhaltung des optimalen Materialflusses erhöhen oder reduzieren. **Tabelle 7.4** zeigt in der letzten Zeile die Ergebnisse eines Simulationslaufes, bei dem allen Auftragsagenten von Aufträgen mit mehr als fünf Arbeitsvorgängen eine aggressive Terminverfolgung zugewiesen wurde. Die Agenten für Aufträge mit drei bis fünf Arbeitsvorgängen sollten ihre Terminziele intensiv verfolgen und alle übrigen Agenten wurden normal eingestuft. Die Verfolgungsintensität der Materialflussziele blieb unverändert.

Tabelle 7.4 Verteilung der Arbeitsvorgänge auf die Montagealternativen bei unterschiedlicher Konditionierung der Auftragsagenten

	Priorität 1		Priorität 2		Priorität 3		Priorität 4	
	Anzahl [-]	Anteil [%]	Anzahl [-]	Anteil [%]	Anzahl [-]	Anteil [%]	Anzahl [-]	Anteil [%]
Termin-, budget- und materialflussorientierte Angebotsbewertung	1881	85	133	6	22	1	177	8
Stärker terminorientierte Parametrisierung der Verhandlungsfunktionen	1782	81	156	7	28	1	247	11
Arbeitsvorgangsbezogenen Klassifizierung der Auftragsgruppen für Terminziele	1812	82	145	7	23	1	233	10

Interessanterweise konnte auch hier in keinem Fall eine verbesserte Endtermineinhaltung nachgewiesen werden. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass der stärkeren Ausnutzung der Montagealternativen ein höherer Logistikaufwand gegenübersteht, so dass sich die beiden Effekte gegenseitig aufheben. Diese Vermutung ist jedoch nur mit sehr großem Aufwand analytisch nachzuweisen, so dass an dieser Stelle darauf verzichtet wurde.

7.3.4 Fazit

Das agentenbasierte Auftragsmanagement kann sehr wohl mit den Ergebnissen, die Evers erreicht hat, konkurrieren. Auch wenn die erzielten Produktionsergebnisse für die betrachtete Montage erwartungsgemäß keine signifikanten Verbesserungen darstellen, bietet sich diese Methode aufgrund der strukturierten Vorgehensweise und der einfachen Übertragbarkeit auf andere Montage- oder Produktionsbereiche an. Die Vorteile einer verbesserten Endtermineinhaltung und einer geringeren Durchlaufzeitabweichung kommen besonders dann zum Tragen, wenn die Fertigungs- bzw. Montageaufträge einen direkten Kundenbezug haben und die Einhaltung der Auftragsziele die höchste Priorität genießt. Diese Vorteile beruhen im Wesentlichen auf der individuellen Vertretung der Auftrags- und Montagestationsinteressen durch die Produktionsagenten (siehe **Tabelle 7.5**). Weiter zeichnet sich das agentenbasierte Auftragsmanagement durch seine Anpassungsfähigkeit aus. Das gilt sowohl für die Anpassungsfähigkeit an neue Produktionsspektren, wie beispielsweise geänderte Mengenverhältnisse im Produktionsprogramm

oder gar neue Produkte, als auch für die Anpassungsfähigkeit bezüglich geänderter oder erweiterter Auftragsstrukturen, z.B. Netzstrukturen. Im Gegensatz zum Verfahren nach Evers, bei dem in beiden Fällen sämtliche Parametereinstellungen überprüft und ggf. mit Hilfe vieler Simulationsläufe angepasst werden müssten, ist hier nur eine erneute Gruppierung der Aufträge bzw. eine Erweiterung der Auftragsstypmerkmale notwendig. Analoges gilt auch für die Übertragbarkeit des jeweiligen Steuerungsverfahrens auf andere Montagen oder Produktionsbereiche. Allerdings muss dem system-immanenten Mangel eines erhöhten Kommunikations- und Koordinationsaufwands beim agentenbasierten Auftragsmanagement mit geeigneten Methoden begegnet werden. Dieser Aufwand ist also im Vergleich zu zentralen Steuerungsverfahren wie dem von Evers durchaus als Nachteil anzuführen.

Tabelle 7.5 Vergleich der Steuerungsverfahren

Steuerungsverfahren Bewertungskriterien	Agentenbasiertes Auftragsmanagement	Schlupfsteuerung nach Evers
Leistungsfähigkeit im Hinblick auf die Produktionsziele	+	+
Individuelle Zielverfolgung auf Auftrags- und Arbeitssystemebene	++	0
Anpassungsfähigkeit an neue Produktionsspektren	+	0
Anpassungsaufwand bei geänderter Auftragsstruktur	++	-
Übertragbarkeit auf andere Montagen	+	-
Kommunikations- und Koordinationsaufwand	-	+

++ sehr gut + gut 0 befriedigend - ausreichend - - mangelhaft

Die Möglichkeit, das Verhalten der Produktionsagenten mit Hilfe der Verhandlungsfunktionen maßgeblich beeinflussen zu können, zeigt aber auch, wie groß das Risiko ist, an dieser Stelle das Produktionsergebnis ursächlich negativ zu beeinflussen. Eine Variation der Verhandlungsfunktionen und die daraus resultierenden Auswirkungen sollten also immer sorgfältig überlegt werden, wie das folgende Beispiel erläutern soll:

Eine Montagestation, die bei statischer Betrachtung über den Simulationszeitraum keinen Engpass darstellt, kann im dynamischen Betrieb vorübergehend stark frequentiert sein. Während dieser Zeit würde die geforderte Leistungsvergütung aufgrund der längeren Warteschlange an der Montagestation sehr hoch ausfallen. Falls den Auftragsagenten zu stark divergierende Verhandlungsfunktionen zugewiesen wurden, können nur Auftragsagenten, die ein aggressives Verhalten bezüglich der Termineinhaltung aufweisen, solchen Forderungen entsprechen. Andere Aufträge, die von Agenten mit weniger aggressivem Verhalten vertreten werden, bleiben liegen, obwohl sie aus terminlicher Sicht ggf. viel dringender sein können als Aufträge mit aggressiver Terminzielverfolgung.

Um solche Risiken rechtzeitig zu erkennen und zu vermeiden, bietet sich eine simulationsgestützte Testumgebung an, da hier verschiedene Szenarien problemlos und ohne negative Konsequenzen erprobt werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zentrale Termin- und Kapazitätsplanungen, insbesondere wenn sie ein komplexes System über einen längeren Zeitraum planen, entsprechen in vielerlei Hinsicht nicht den betrieblichen Anforderungen. Falls die Realisierung der Planung aufgrund von nicht planbaren Einflüssen wie Maschinenstörungen, Fehlteilen, Personalmangel etc. nicht durchführbar ist, ist eine vollständige Neuplanung notwendig. Eine gezielte Neuplanung nur des betroffenen Bereichs ist nicht möglich und stößt aufgrund von Interdependenzen zwischen den einzelnen Bereichen auch an theoretische Grenzen. Da ständige Neuplanungen häufig viel zu aufwendig sind, wird in der Praxis oft mit veralteten und/oder nicht realisierbaren Plänen gearbeitet.

Durch ein agentenbasiertes Auftragsmanagement wird die Gesamtkomplexität eines Unternehmens nicht reduziert (siehe Kapitel 3.3.3), sondern der Lösungsraum wird mit Hilfe der Produktionsagenten, die auf einfachen Regeln beruhen, im Entscheidungsfall wesentlich kleiner sowohl bezüglich der möglichen Alternativen als auch der zu beachtenden Restriktionen. Allerdings werden die Anforderungen an die Koordination durch den Einsatz der Agententechnologie enorm erhöht, worauf jedoch durch die Verwendung aktueller Hard- und Software adäquat reagiert werden kann. Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass ein solches Auftragsmanagement aufgrund des strukturierten und methodisch unterstützten Vorgehens sehr gut geeignet ist, die Vorteile des sehr flexiblen, aber eher intuitiven Vorgehens der Praxis und der zentralen regelbasierten Verfahren in sich zu vereinen.

Die Verteilung des Planungsrisikos „auf viele Schultern“ macht das agentenbasierte Auftragsmanagement zu einem robusten und flexiblen Verfahren, das die Individualität der einzelnen Akteure in der Produktion besser als andere Verfahren berücksichtigt. Die hier vorgestellten Simulationsergebnisse wurden alle auf Basis der in Kapitel 5.4 und 5.5 beschriebenen Standardverhandlungsfunktionen erreicht. In Zukunft ist noch die Frage zu klären, ob sich weitere Potenziale aus einer Optimierung dieser Funktionen ergeben bzw. ob für bestimmte Merkmalsausprägungen der verschiedenen Montagebereiche unterschiedliche Verhandlungsfunktionen sinnvoll sind.

Eine weitere Fragestellung für die Zukunft beruht auf der Ergebnisinterpretation und zielt in Richtung lernfähige Agenten. Wenn es gelingt, aus unbefriedigenden Ergebnissen wie z.B. schlechter Termintreue geeignete Maßnahmen abzuleiten, könnten diese im Verhalten der Agenten hinterlegt werden. Dann könnte ein Auftragsagent, dem beispielsweise ein aggressives Terminverhalten zugewiesen wurde und der bei seiner Fertigstellung merkt, dass er seinen Sollendtermin nicht einhalten konnte, diese Information den übrigen identisch konditionierten Agenten mitteilen. Die übrigen Agenten könnten dann ihr eigenes Verhandlungsverhalten entsprechend anpassen.

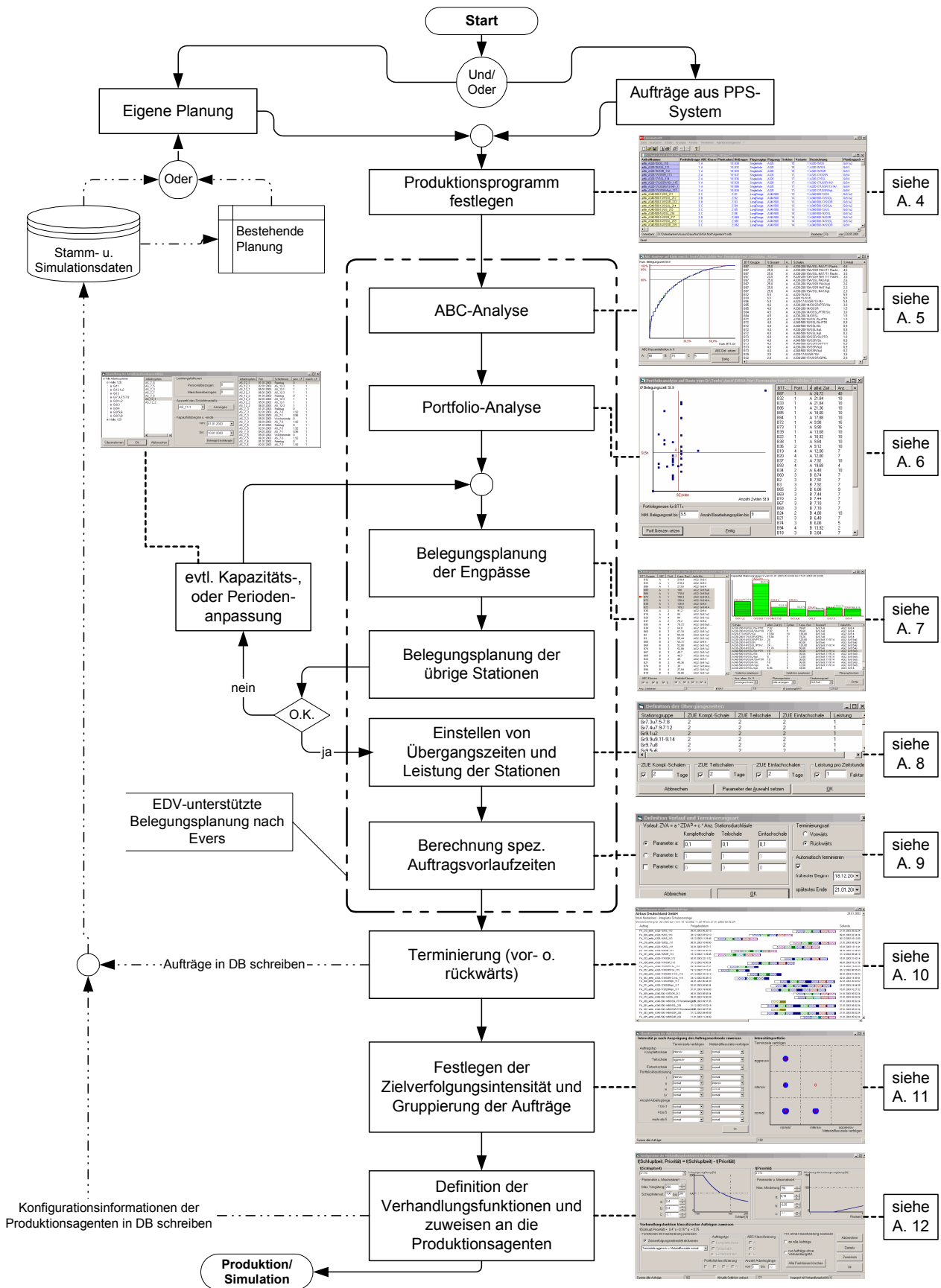
Der letzte weiterführende Punkt soll die Logistikkosten betreffen. In den meisten Unternehmen werden die Logistikkosten als Gemeinkosten erfasst. Durch den Einsatz von Produktionsagenten

könnten diese Kosten detailliert erfasst und zugeordnet werden. Wie die Montagestationen eine Leistungsvergütung für die Bearbeitung eines Arbeitsvorganges fordern, lassen sich auch alle anderen Vorgänge, die von Produktionsagenten veranlasst werden, bewerten, z.B. Transportieren, Einlagern etc.. Dadurch könnte nicht nur die Logistikleistung eines Unternehmens gemessen, sondern es könnten ihr auch die resultierenden Logistikkosten gegenübergestellt werden.

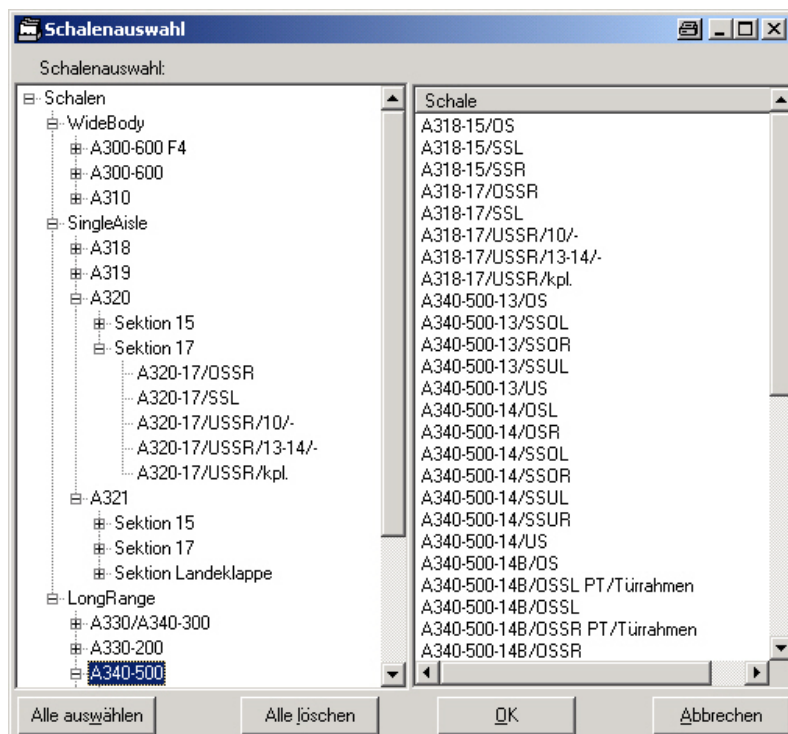
Im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Verfahren steht immer die Frage nach der praktischen Umsetzung und den bisher nicht realisierten Potenzialen. Ersteres ist insbesondere durch die Fortschritte in der Smart-Label- und Transpondertechnologie keine reine „Zukunftsmusik“ mehr [Ebeling, 2002; Frick, 2002]. An Flughäfen und bei Automobilisten werden Materialflüsse bereits individuell mit Hilfe von Smartlabels gesteuert. Deshalb bieten sich besonders hochpreisige, extrem komplex zu montierende und dokumentierungspflichtige Bauteile für den Einsatz von Transpondern an, da sie im Gegensatz zu Barcode-Systemen standardmäßig lese- und schreibfähig gestaltet sind, so dass beispielsweise die Dokumentation auf ihnen hinterlegt werden kann. Alle produktionstechnisch benötigten Daten, z.B. Arbeitspläne, können ebenfalls auf ihnen gespeichert werden. Weiter sind einige Transponder heute in der Lage, auch Regeln z.B. zur Qualitätssicherung in Form von Programmen, die abgearbeitet werden können, zu speichern. Diese Fähigkeit macht den Transponder zu einem aktiven Objekt und man könnte ihn durchaus als Agenten interpretieren bzw. auslegen. Vor diesem Hintergrund bietet es sich geradezu an, das Auftragsmanagement mit Hilfe von Transpondern zu realisieren und dadurch eine absolut dezentrale agentenbasierte Auftragsabwicklung zu erreichen. Allerdings müssen in diesem Zusammenhang noch viele Probleme wie Echtzeitfähigkeit, asynchrone Nachrichtenverarbeitung etc. gelöst werden.

Anhang

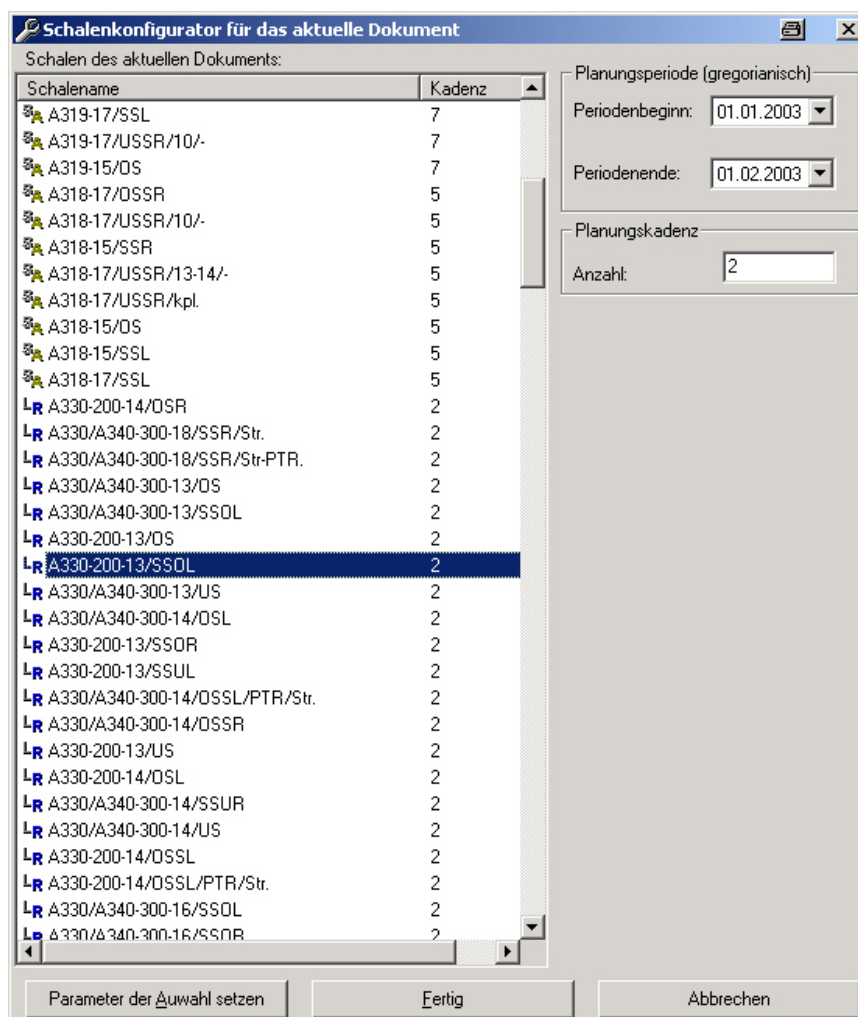
A.1 Ablaufschema der Software „Agent-AIM“ zur Unterstützung der Planungsebene (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6)



A.2 Bildschirmmaske zur freien Selektion der Produkte des Produktionsspektrums



A.3 Bildschirmmaske zur Festlegung des Planungshorizonts und der Produktionsmengen



A.4 Übersichtsgrafik des aktuellen Produktionsprogramms

IPH Agent AIM - [C:\Dokumente und Einstellungen\Fp\Eigene Dateien\Texte\Ascii\DASA-Nor\TerminatorTest\Belegungsplanungen\Diss\Testpro]

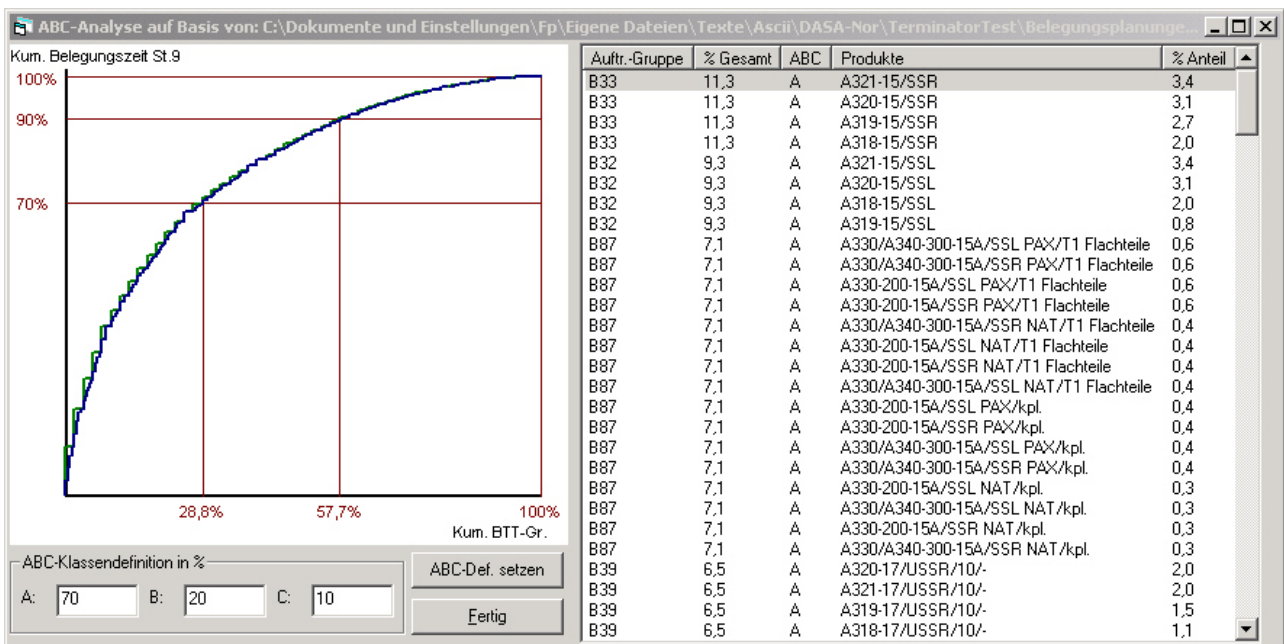
Datei Bearbeiten Schalen Anzeigen Fenster Terminieren Agentenmanagement ?

Artikelnummer	PortfolioGruppe	ABC-Klasse	Plankadenz	BttGruppe	Flugzeugtyp	Flugzeug	Sektion	Variante	Bezeichnung
artNr_A330-200-18/SSR/Str-PTR_		2 A		2 B73	LongRange	A330-200	18	1	A330-200-18/SSR/Si
artNr_A330/A340-300-15A/SSL NA		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A300-600 F4-18/SSL/kpl_3l		2 A		1 B72	WideBody	A300-600 F4	18	1	A300-600 F4-18/SSL
artNr_A321-17/SSL_122		2 A		8 B36	SingleAisle	A321	17	1	A321-17/SSL
artNr_A321-17/0SSR_121		2 A		8 B37	SingleAisle	A321	17	1	A321-17/0SSR
artNr_A321-17/USSR/10/-_123		2 A		8 B39	SingleAisle	A321	17	1	A321-17/USSR/10/-
artNr_A330/A340-300-15A/SSR PAX		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A330-200-18/SSL/kpl_205		2 A		2 B72	LongRange	A330-200	18	1	A330-200-18/SSL/kp
artNr_A330-200-15A/SSR NAT/kp		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSR N
artNr_A330-200-18/SSL/Str-PTR_		2 A		2 B72	LongRange	A330-200	18	1	A330-200-18/SSL/Str
artNr_A300-600 F4-18/SSL/kpl_3		2 A		1 B73	WideBody	A300-600 F4	18	1	A300-600 F4-18/SSR
artNr_A330/A340-300-15A/SSR NA		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A330/A340-300-15A/SSL NA		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A330-200-15A/SSR PAX/T1		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSR F
artNr_A330/A340-300-15A/SSL PAX		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A330/A340-300-15A/SSL PAX		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A330-200-15A/SSL PAX/T1		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSR F
artNr_A330-200-15A/SSR PAX/kpl		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSR F
artNr_A340-600-18/SSR/Str-PTR_		2 A		1 B73	LongRange	A340-600	18	1	A340-600-18/SSR/Si
artNr_A330/A340-300-15A/SSR PAX		2 A		1 B87	LongRange	A330/A340-300	15A	1	A330/A340-300-15A/
artNr_A330-200-15A/SSR NAT/T1		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSR N
artNr_A318-17/USSR/10/-_99		2 A		5 B39	SingleAisle	A318	17	1	A318-17/USSR/10/-
artNr_A318-15/SSL_95		2 A		5 B32	SingleAisle	A318	15	1	A318-15/SSL
artNr_A330-200-15A/SSL NAT/T1		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSL N
artNr_A330-200-15A/SSL NAT/kpl		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSL N
artNr_A300-600 F4-18/SSL/Str_		2 A		1 B72	WideBody	A300-600 F4	18	1	A300-600 F4-18/SSL
artNr_A330-200-15A/SSL PAX/kpl		2 A		1 B87	LongRange	A330-200	15A	1	A330-200-15A/SSL F
artNr_A330/A340-300-18/SSR/Str		2 A		2 B73	LongRange	A330/A340-300	18	1	A330/A340-300-18/S
artNr_A321-15/0S_118		2 A		8 B38	SingleAisle	A321	15	1	A321-15/0S
artNr_A318-17/USSR/13-14/-_100		2 A		5 B81	SingleAisle	A318	17	1	A318-17/USSR/13-1
artNr_A318-15/SSR_96		2 A		5 B33	SingleAisle	A318	15	1	A318-15/SSR
artNr_A330/A340-300-18/SSL/kpl		2 A		2 B72	LongRange	A330/A340-300	18	1	A330/A340-300-18/S

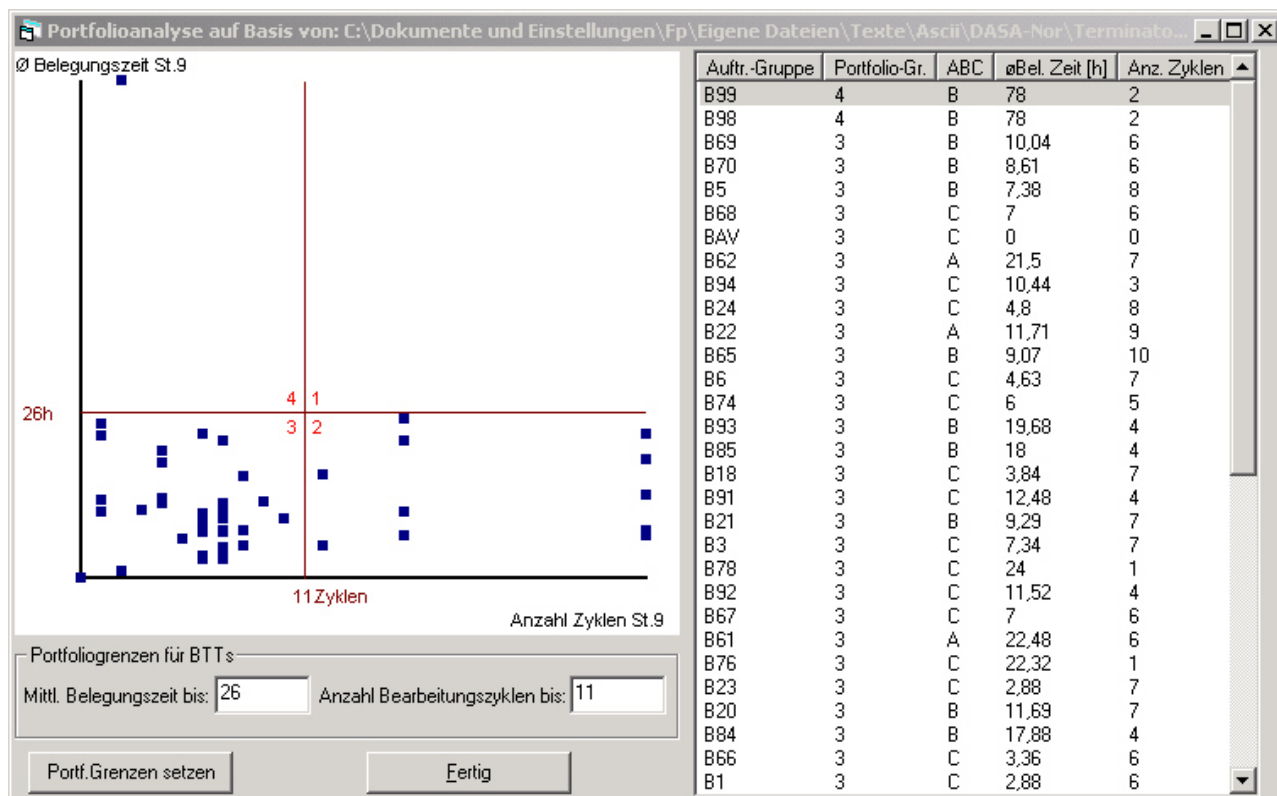
Datenbank: C:\Dokumente und Einstellungen\Fp\Eigene Dateien\Datenbanken\Access\DasaNor\DasaNor\AgentenV2.mdb Bearbeiter: Fp vom: 02.05.2001

Bereit

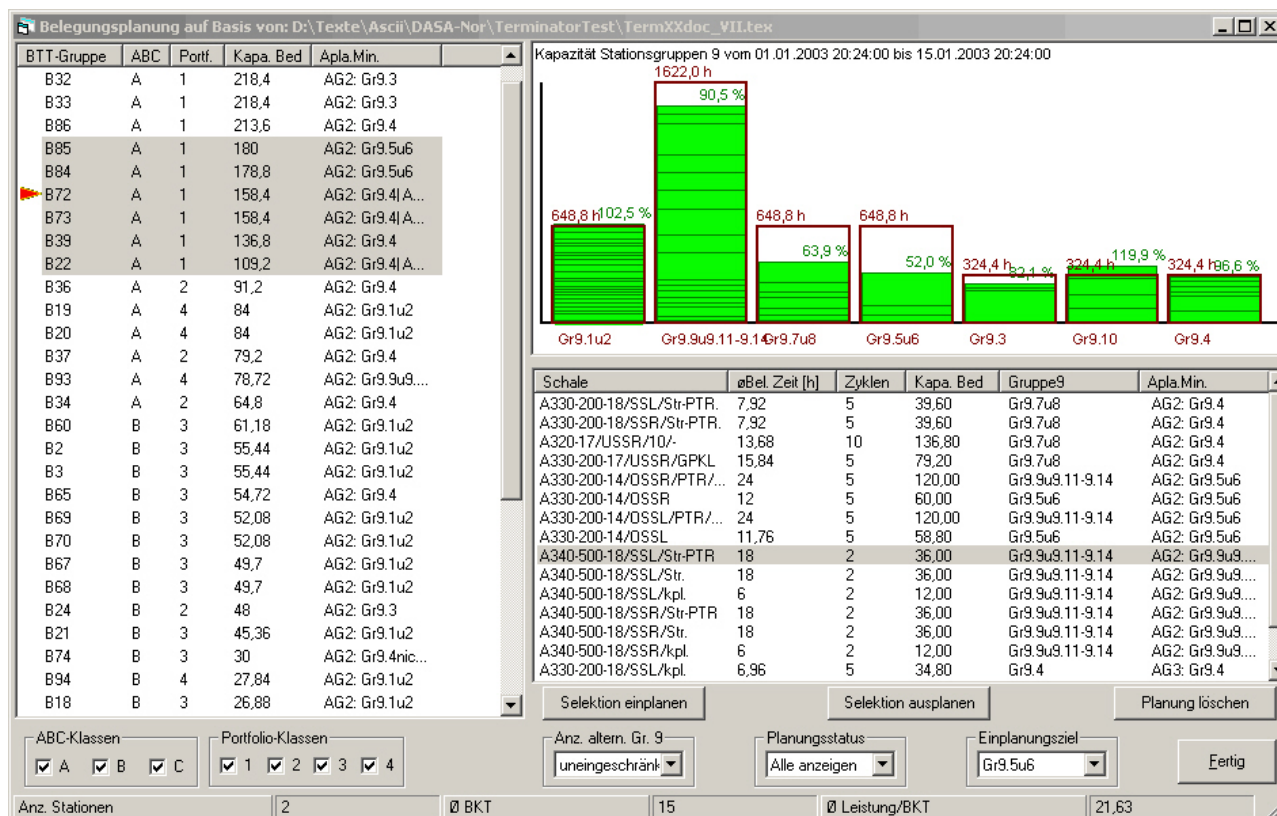
A.5 ABC-Analyse des aktuellen Produktionsprogramms



A.6 Portfolio-Analyse des aktuellen Produktionsprogramms



A.7 Belegungsplanung auf Basis von Montagestationsgruppen



A.8 Bildschirmmaske zur Festlegung der Montagestationskapazität und der jeweiligen Planübergangszeiten

Definition der Übergangszeiten

Stationsgruppe	ZUE Kompl.-Schale	ZUE Teilschale	ZUE Einfachscha	Leistung
Gr7.3u7.5-7.8	2	2	2	1
Gr7.4u7.9-7.12	2	2	2	1
Gr9.1u2	2	2	2	1
Gr9.9u9.11-9.14	2	2	2	1
Gr9.7u8	2	2	2	1
Gr9.5u6	2	2	2	1

ZUE Kompl.-Schalen: 2 Tage

ZUE Teilschalen: 2 Tage

ZUE Einfachscha: 2 Tage

Leistung pro Zeitstunde: 1 Faktor

Abbrechen Parameter der Auswahl setzen OK

A.9 Definition spezifischer Auftragsvorlaufzeiten (Nur bei Schlupfsteuerung nach Evers notwendig) und bestimmen der Terminierungsvariante

Definition Vorlauf und Terminierungsart

Vorlauf: $ZVA = a * ZDA^b + c * \text{Anz. Stationsdurchläufe}$

	Komplettschale	Teilschale	Einfachscha
<input checked="" type="radio"/> Parameter a:	0,1	0,1	0,1
<input type="radio"/> Parameter b:	1	1	1
<input type="checkbox"/> Parameter c:	0	0	0

Terminierungsart:

Vorwärts

Rückwärts

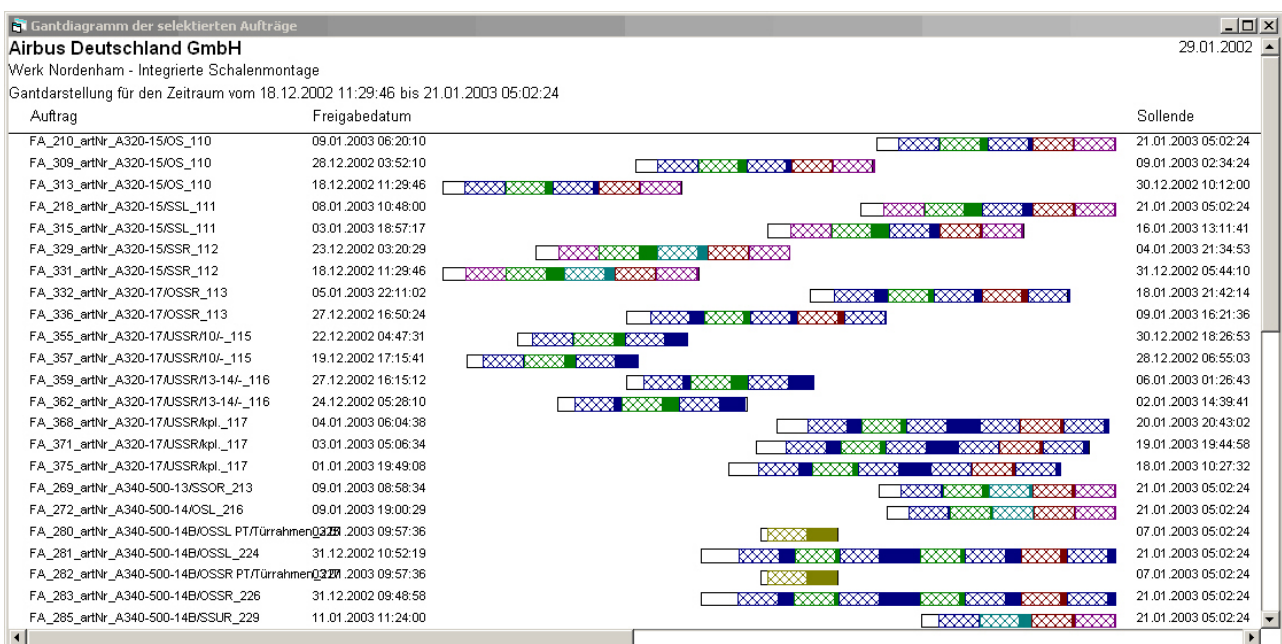
Automatisch terminieren:

frühester Beginn: 18.12.2001

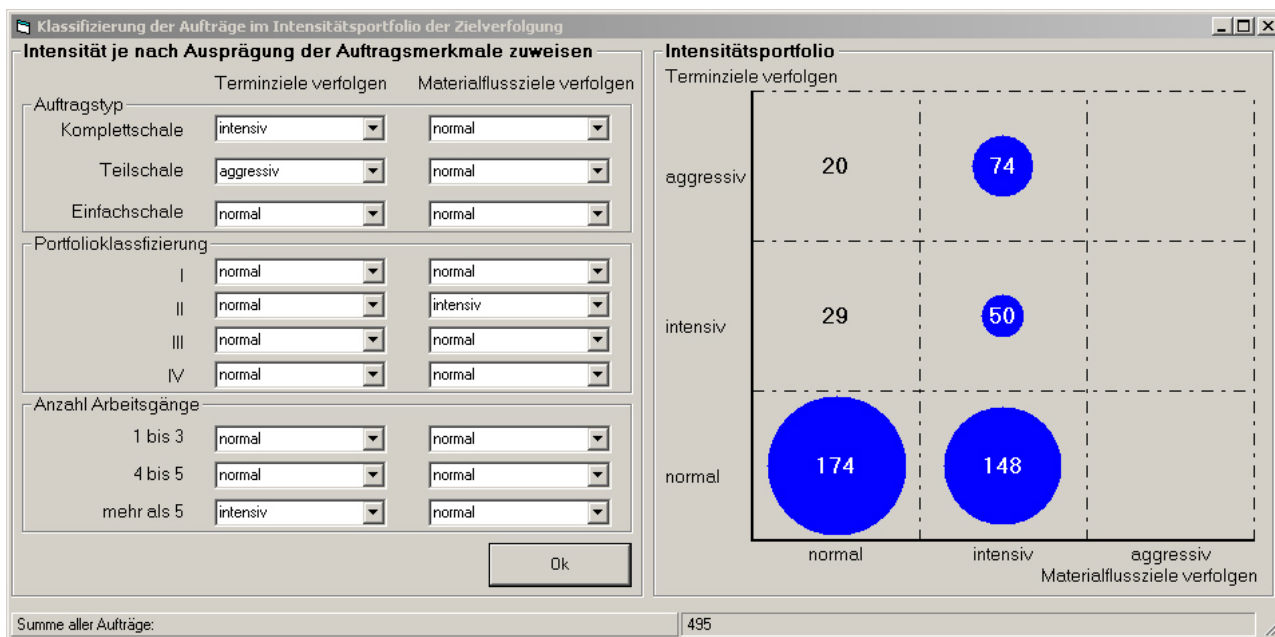
spätestes Ende: 21.01.2001

Abbrechen OK

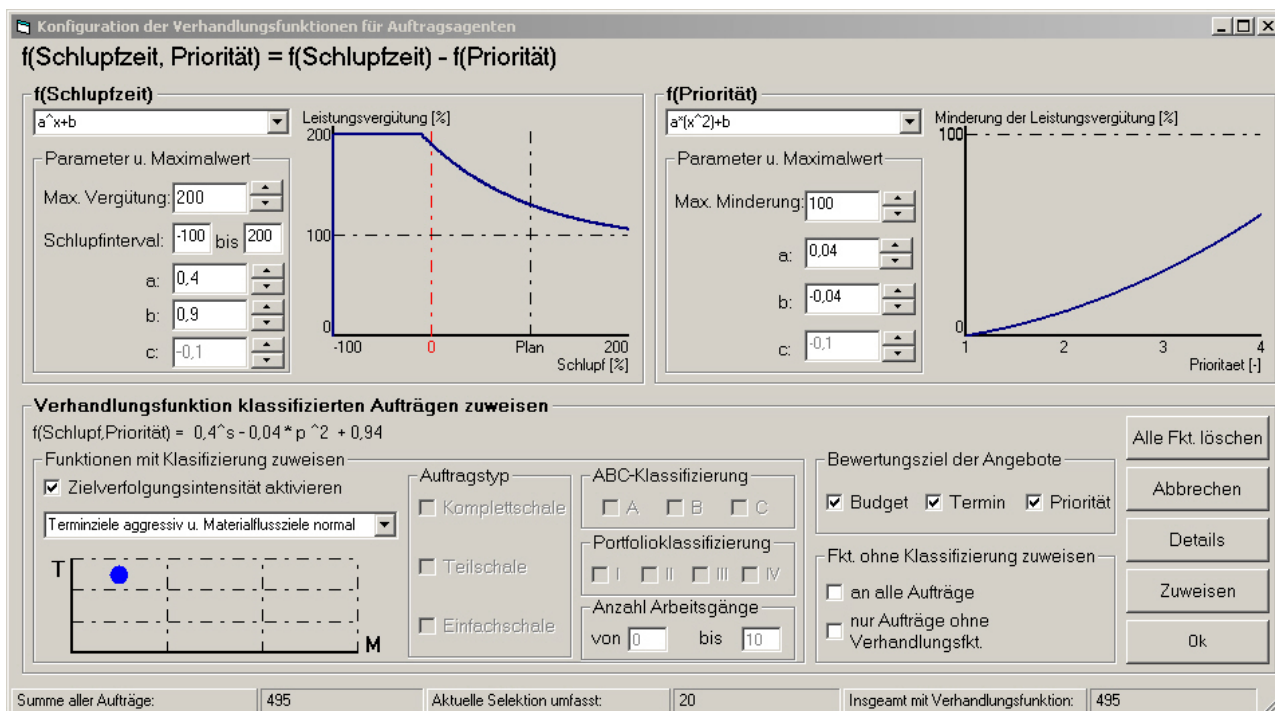
A.10 Ergebnisdarstellung der Auftragsterminierung auf Basis eines Gant-Diagramms



A.11 Bildschirmmaske zur Festlegung der Zielverfolgungsintensität und Gruppierung der Aufträge (Nur bei Anwendung des agentenbasierten Auftragsmanagements)



A.12 Bildschirmmaske zur Definition der Verhandlungsfunktionen und Zuweisung an die Auftragsagenten



A.13 Bildschirmmaske zur Definition der Verhandlungsfunktionen und Zuweisung an die Montagestationsagenten

Konfiguration der Verhandlungsfunktionen für Ressourcenagenten

f(Warteschlange)

$a \cdot x + b$

Leistungsvergütung [%]

Parameter u. Maximalwert

Max. Vergütung: 200

Interval: 0 bis 5

a: 0,4

b: 0,4

c: -0,1

Anz. Aufträge in Warteschlange [-]

Verhandlungsfunktion selektierten Arbeitssystemen zuweisen

$f(\text{Warteschlange}) = 0,4 \cdot w + 0,4$

Arbeitssystem	Verhandlungsfkt.
Gr12.1u2	$0,5 \cdot w + 0,5$
Gr7.3u7.5-7.8	$0,5 \cdot w + 0,5$

Funktion ohne Klassifizierung zuweisen

an alle Stationen nur an Stationen ohne Verhandlungsfkt.

Alle Fkt. löschen Abbrechen Zuweisen Ok

Alle Stationsgruppen: 20 davon mit Verhandlungsfunktion: 20

A.14 Bildschirmmaske zur tagesgenauen Zuweisung bestimmter Schichtmodelle an die einzelnen Montagestationen

Einstellung der Arbeitssystemkapazitäten

Arbeitssystem	Von	Schichtmod...	pers. LF	masch. LF
AS_12_1	01.01.2003	Feiertag	0	1
AS_12_1	02.01.2003	AS_12-3	1	1
AS_12_1	05.01.2003	AS_12-1	1	1
AS_12_1	06.01.2003	AS_12-3	1	1
AS_12_2	01.01.2003	Feiertag	0	1
AS_12_2	02.01.2003	AS_12-3	1	1
AS_12_2	05.01.2003	AS_12-1	1	1
AS_12_2	06.01.2003	AS_12-3	1	1
AS_7_3	01.01.2003	Feiertag	0	1
AS_7_3	02.01.2003	AS_7-3	1,92	1
AS_7_3	04.01.2003	AS_7-1	0,96	1
AS_7_3	05.01.2003	Wochenende	0	1
AS_7_3	06.01.2003	AS_7-3	1,92	1
AS_7_5	01.01.2003	Feiertag	0	1
AS_7_5	02.01.2003	AS_7-3	1,92	1
AS_7_5	04.01.2003	AS_7-1	0,96	1
AS_7_5	05.01.2003	Wochenende	0	1
AS_7_5	06.01.2003	AS_7-3	1,92	1
AS_7_6	01.01.2003	Feiertag	0	1
AS_7_6	02.01.2003	AS_7-3	1,92	1

Leistungsfaktoren

Personalbezogen: 0

Maschinenbezogen: 0

Auswahl des Schichtmodells

AS_11-1 Anzeigen

Kapazitätsbeginn u. -ende

von: 01.01.2003

bis: 10.01.2003

Bisherige Einstellungen

Übernehmen Ok Abbrechen

A.15 Informationsfenster über die notwendigen Arbeitsgänge und die technologisch geeigneten Montagestationen für bestimmte Produkte

Alle Arbeitsgänge für die selektierten Schalen

Schalename

- VA A300-600 F4-13/SSOR
- VA A300-600 F4-13/SSUL
- VA A300-600 F4-13/Tor
- VA A300-600 F4-13/US/kpl.
- VA A300-600 F4-13/US/Str./-
- VA A300-600 F4-14/DSL

Arbeitsplannummer	Arbeitsgänge	AG Folge-Nr.
aPINr_Halle128_213	1	1
aPINr_Halle128_215	1	1
aPINr_Halle128_223	2	2
aPINr_Halle128_224	2	2
aPINr_Halle128_225	2	2
aPINr_Halle128_227	2	2
aPINr_Halle128_229	2	2
aPINr_Halle128_234	2	2
aPINr_Halle128_236	2	2
aPINr_Halle128_237	3	3
aPINr_Halle128_238	3	3
aPINr_Halle128_239	3	3
aPINr_Halle128_249	4	4
aPINr_Halle128_251	4	4
aPINr_Halle128_252	5	5

Techn. mögl. Maschinengruppe
Gr9.5u6

Planstückzeit [in h] für diesen AG
3,84

Bezeichnung des AGs
Flächennietung

Bemerkungen zu einzelnen AGs
A300-600 F4-14/DSL

Fertig

A.16 Informationsfenster für Zusatzinformationen einzelner Produkte

Artikelinformationen

Schalename

- VA A300-600 F4-13/SSUL
- VA A300-600 F4-13/Tor
- VA A300-600 F4-13/US/kpl.
- VA A300-600 F4-13/US/Str./-
- VA A300-600 F4-14/DSL
- VA A300-600 F4-14/DSR
- VA A300-600 F4-14/SSOL
- VA A300-600 F4-14/SSOR
- VA A300-600 F4-14/SSUL/Str./-
- VA A300-600 F4-14/SSUL

Informationsbezeichnung

- Ablaufkonzept
- AnzahlHautfelder
- ClipsAufFlexiblerStat5Ziel
- MaterialanlieferungVon
- PlankadenzOP99_2001
- PlankadenzOP99_2003
- PlankadenzSP99_2001
- PlankadenzSP99_2001_24er
- PlankadenzSP99_2003
- PlankadenzSP99_2003_24er
- PlankadenzSP99_2003_24er_gerechnet
- StripperGeklebt

Bemerkungen zu einzelnen Infos
3 - 5.5 - 7 - 9 - 7 - 12 - 13 - 14 - 15

Fertig

A.17 Bildschirmmaske zum gezielten Editieren einzelner Montageaufträge

Auftrag	Artikelnummer	Freigabedatum	Sollende	Vorlauf	Verhandlungsfkt
FA_1137_artNr_...	artNr_A300-600 F4-13/SSUL_4	19.01.2003 11:45:36	28.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1138_artNr_...	artNr_A300-600 F4-13/Tor_5	20.01.2003 12:14:24	28.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1139_artNr_...	artNr_A300-600 F4-13/US/kpl_6	11.01.2003 10:33:36	20.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1140_artNr_...	artNr_A300-600 F4-13/US/Str./_7	08.01.2003 13:46:58	13.01.200...	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1141_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/DSL_8	15.01.2003 22:19:12	24.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1142_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/DSR_9	15.01.2003 06:43:12	24.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1143_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/SSOL_10	17.01.2003 17:16:48	27.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1144_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/SSOR_11	12.01.2003 13:12:00	22.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1145_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/SSUL/Str./_13	06.01.2003 05:45:36	11.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1146_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/SSUL_12	19.01.2003 10:19:12	29.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1147_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/SSUR/Str./_15	06.01.2003 04:48:00	11.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1148_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/SSUR_14	18.01.2003 09:50:24	28.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1149_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/US/kpl_16	11.01.2003 17:45:36	22.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1150_artNr_...	artNr_A300-600 F4-14/US/Str./_17	08.01.2003 00:20:34	13.01.200...	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1151_artNr_...	artNr_A300-600 F4-16/DS_18	14.01.2003 03:50:24	22.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
FA_1152_artNr_...	artNr_A300-600 F4-16/SSOL_19	15.01.2003 10:48:00	24.01.2003	0	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$

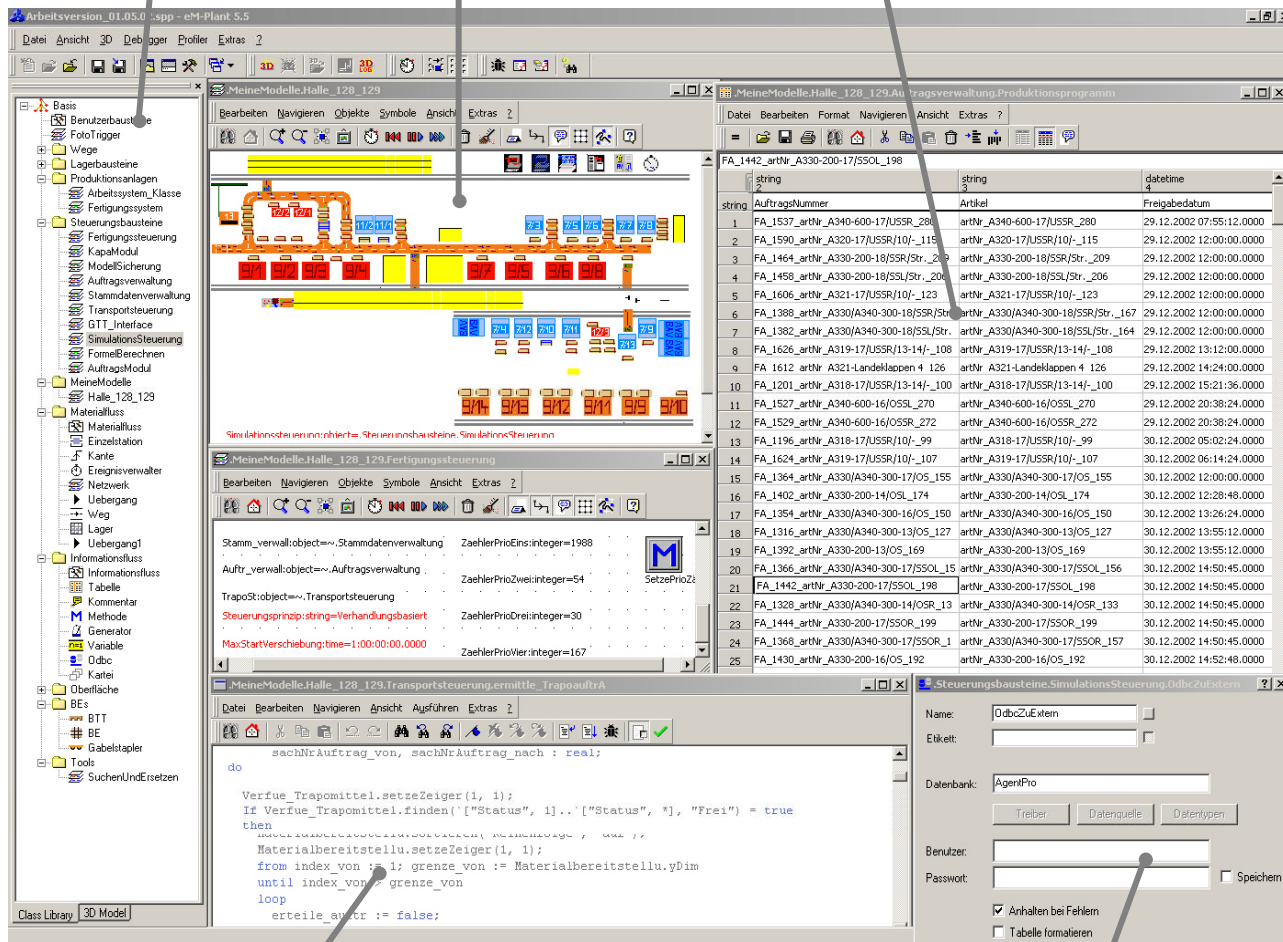
Sollendetermin	Individuelle Vorlaufzeit	Auftragsbezeichnung	Verhandlungsfunktion
<input checked="" type="checkbox"/> 28.01.2003	<input checked="" type="checkbox"/> 0	FA_1148_artNr_A300-600 F4-14/SSUR_14	$0,4^s - 0,03 * p^2 + 0,65$
Setzen	Schließen	Löschen	OK

A.18 Benutzeroberfläche der Simulationssoftware

Bausteinbibliothek

Animationsansicht des Modells

Tabellarische Darstellung der Simulationsdaten



Editor für individuelle Programmierung

Konfigurationsfenster für externen Datenzugriff

Literatur

- Abts, D.; Mülder, W. (1998) Grundkurs Wirtschaftsinformatik – Eine kompakte und praxisorientierte Einführung. Vieweg Verlag, Braunschweig u. Wiesbaden, 1998.
- Ahrens, V. (1998) Dezentrale Produktionsplanung und –steuerung: Systemtheoretische Grundlagen und Anwendungspotentiale. Dissertation U Hannover, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 427, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- Albayrak, S. (1992) Kooperative Lösung der Aufgabe Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch ein Mehr-Agentensystem auf Basis des Blackboard-Modells. Dissertation TU Berlin, Berlin, 1992.
- Albayrak, S.; Bussmann, S. (1993) Kommunikation und Verhandlungen in Mehragentensystemen. In: Müller, J. (Hrsg.), Verteilte Künstliche Intelligenz: Methoden und Anwendungen, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim u.a., 1993.
- Alt, R.; Cathomen, I.; Klein, S. (1995) CIL – Computerintegrierte Logistik. Bericht Nr. IM2000/CCEM/21 des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Hochschule St. Gallen, St. Gallen, 1995.
- Arlt, J.; Miese, M. (1971) Analyse des Produktionsbereichs Montage. Voraussetzungen und Möglichkeiten. Industrie-Anzeiger Bd. 93 (1971) Nr. 67, S. 1703-1709.
- Ashby, W. R. (1956) An Introduction to Cybernetics. London, 1956.
- Barker, R. (1992) Case method: Entity-Relationship-Modellierung. Bonn u.a., Addison-Wesley, 1992.
- Baumann, M. (1996) Optimierter Ressourceneinsatz in der flexiblen Fertigung. Ein Ansatz zur operativen Planung und Steuerung. Dissertation U Karlsruhe, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 229, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- Bechte, W. (1984) Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation U Hannover 1980, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 70, VDI-Verlag, 1984, Düsseldorf.
- Bechtolsheim, M. v. (1993) Agentensysteme: verteiltes Problemlösen mit Expertensystemen. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1993.
- Beckendorff, U. (1991) Reaktive Belegungsplanung für die Werkstattfertigung. Dissertation U Hannover, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2 Nr. 232, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.

- Booch, G. (1994) Objektorientierte Analyse und Design. Addison-Wesley, 1994.
- Bond, A.H.; Gasser, L. (1988) Readings in Distributed Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann, Los Angeles, CA, 1988.
- Brams, S.J. (1990) Negotiation games: Applying game theory to bargaining and arbitration. New York, 1990.
- Brankamp, K. (1975) Handbuch der modernen Fertigung und Montage. Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 1975.
- Büdenbender, W. (1991) Ganzheitliche Produktionsplanung und -steuerung - Konzepte für Produktionsunternehmen mit kombinierter kundenanonymer und kundenbezogener Auftragsabwicklung. Dissertation TH Aachen, FIR + IAW Forschung für die Praxis Bd. 33, Hachstein, R. (Hrsg.), Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1991.
- Burmeister, M. (1997) Auslegung der Verbrauchssteuerung bei vernetzter Produktion. Dissertation U Hannover, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 658, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Dettmer, W.H. (1995) Goldratt's Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement. Los Angeles, 1995.
- Carley, K.M.; Newell, A. (1994) The Nature of the Social Agent. Journal of mathematical Sociology, 19 (4), S. 221-262, 1994.
- Castelfranchi, C. Conte, R. (1996) Distributed artificial intelligence and social science: Critical issues. In: O'Hare, G.M.P. and Jennings, N.R. (Hrsg.), Foundations of Distributed Artificial Intelligence, S. 527-542, John Wiley and Sons, 1996.
- Chen, P. (1976) The Entity Relationship Model – Toward a Unified View of Data. ACM Transactions on Database Systems, 1976.
- Coase, R.H. (1937) The Nature of the Firm. In: Economica 4, S. 368-405, 1937.
- Collinot, A. (1991) Intelligence Artificielle Distribuee. In: Bulletin de l'AFIA, No. 6, 1991.
- Corsten, H.; Gössinger, R. (1997) Entwurf eines konzeptionellen Rahmens für ein Multiagentensystem zur integrativen Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung. Nr.13 der Schriften zum Produktionsmanagement, hrsg. v. H. Corsten, Kaiserslautern, 1997.
- Davis, R.; Smith, R. (1983) Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. In: Artificial Intelligence 20 (1983) 1, S. 63-109.

- Dieckhoff, C. (1995) Darstellung und Bewertung alternativer Automobil-Montagestrukturen mit einem parallelrechnerunterstützten Simulationssystem. Dissertation TU Braunschweig, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 162, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995.
- Dilger, W.; Kassel, S. (1993) Sich selbst organisierende Produktionsprozesse als Möglichkeit zur flexiblen Fertigungssteuerung. In: Müller, L. (Hrsg.): Verteilte Künstliche Intelligenz: Methoden und Anwendungen, Mannheim, S. 347-356, 1993.
- DIN 69901 (1987) DIN 69901 (Hrsg.), Projektwirtschaft: Projektmanagement - Begriffe. Berlin: Beuth, 1987.
- Dochnal, H.-G. (1990) Darstellung und Analyse von OPT (Optimized Production Technology) als Produktionsplanungs- und -steuerungskonzept. Universität zu Köln, Seminar für allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Arbeitsbericht Nr. 31, Köln, 1990.
- Dorninger, C. (1990) PPS: Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte, Methoden und Kritik. Wien, Ueberreuter Wirtschaftsverlag, 1990.
- Duden, Fremdwörterbuch (1997) herausgegeben und bearbeitet vom Wissenschaftlichen Rat der Dudenredaktion. 6. Aufl., Mannheim u.a., 1997, (Der Duden Band 5).
- Durfee, E.H.; Lesser, V.R.; Corkill, D.D. (1987) Coherent cooperation among communicating problem solvers. Zeitschriftenaufsatz: IEEE Transactions on Computers, Band 36, Heft 11, S. 1275-1291, U. Massachusetts, Amherst, 1987.
- Durfee, E.H.; Lesser, V.R.; Corkill, D.D. (1987) Cooperation through Communication in a Distributed Problem Solving Network. In: Huhns, M.N (Hrsg.): Distributed Artificial Intelligence. London, S. 29-58, 1987.
- Durfee, E.H. (1988) Coordination of Distributed Problem Solvers. Boston, 1988.
- Ebeling, A. (2002) Etikettierungen-Vom Barcode zum Smart-Label. c't Heft 9, Heise-Verlag, Hannover, 2002, S. 86-89.
- Engelbrecht-Wiggans, R. (1993) Optimal Auctions Revisited. In: Games and Economic Behavior 5, 1993.
- Esser, H. (1996) Integration von Produktionslogistik und Montageplanung und -steuerung. Berichte aus der Produktionstechnik, Band 96, 27, Aachen, Verlag Shaker, 1996.

- Evers, K.; Frackenpohl, D.; Wiendahl, H.-P.; Wolf, M. (2001) Simulationsgestützte Fabrikentwicklung – Konzept zur variantenflexiblen Herstellung von Flugzeuggroßbauteilen. wt Werkstattstechnik online, www.technikwissen.de/wt/2001/04/09.htm, 2001.
- Evers, K. (2002) Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multi-Ressourcen–Montage. Dissertation TU Hannover, 2002.
- Eversheim, W. (1989) Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 4. Fertigung und Montage. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1989.
- Eversheim, W. (1992) Rechnerunterstützte Simulation im Rahmen der Montageplanung und -steuerung. Abschlussbericht, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, TH Aachen, 1992.
- Eversheim, W. (1999) Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management 4 - Betrieb von Produktionssystemen. Springer Verlag, Berlin u.a., 1999.
- Fandel, G.; Francois, P.; Gubitz, K.-M. (1994) PPS-Systeme: Grundlagen, Methoden, Software, Marktanalyse. Springer-Verlag, Berlin u.a., 1994.
- Ferber, J. (2001) Multiagentensysteme: Eine Einführung in die künstliche Intelligenz. Addison-Wesley Verlag, München u.a., 2001.
- Findler, N.V.; Sengupta, U. (1991) An Overview of some recent and current research in the AI Lab at Arizona State University. AI Magazin, Fall, 1991.
- fir (1996a) Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen (Hrsg.): Aachener PPS-Modell: Das Aufgabenmodell. Sonderdruck 6/94, 4. Auflage, Aachen, 1996.
- fir (1996b) Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen (Hrsg.): Aachener PPS-Modell: Das Prozessmodell. Sonderdruck 10/95, 2. Auflage, Aachen, 1996.
- fir (1997) Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen (Hrsg.): Aachener PPS-Modell: Das morphologische Merkmalsschema. Sonderdruck 4/90, 6. Auflage, Aachen, 1997.
- Fleischmann, B. (1988) Operations-Research-Modelle und -Verfahren in der Produktionsplanung. ZfB 58, 1988, 3, S. 347-372.
- Forrester, J.W. (1969) Urban Dynamics. Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1969.

- Fox, B.R. (1987) The Implementation of Opportunistic Scheduling. In: Hertzberger, L.O.; Groen, F.C.A. (Hrsg.): Intelligent Autonomous Systems, An International Conference, Amsterdam u.a., 1987.
- Fox, B.R.; Kempf, K.G. (1985) Complexity, Uncertainty and Opportunistic Scheduling. In: Weisbin, v.C.R. (Hrsg.): Proceedings of the Second Conference on Artificial Intelligence Applications, The Engineering of Knowledge-Based-Systems, Fontainebleau, Washington, 1985.
- Fricker, A.; Luczak, H. (1997) Komplexität - ein Mittel der strategischen Unternehmensgestaltung. In: Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), Komplexität und Agilität, Berlin 1997, S. 309-327.
- Frick, F. (2002) Clevere Kleber. Bild der Wissenschaft, Heft 2, 2002, S. 86-89.
- Garlichs, R. (1996) Entscheidungsorientierte Belegungsplanung von verketteten Montageanlagen. Dissertation U Hannover, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 402, VDI-Verlag, 1996, Düsseldorf.
- Gell-Mann, M. (1994) Das Quark und der Jaguar - Vom einfachen zum Komplexen - Die Suche nach einer neuen Erklärung der Welt. Piper Verlag, München, 1994.
- Glaser, H. (1991) Verfahren zur Fertigungssteuerung in alternativen PPS-Systemen - Eine kritische Analsys. In: Fertigungssteuerung: Expertenwissen für die Praxis. Scheer, A.-W. (Hrsg.), München u.a., Oldenbourg, 1991, S. 21.
- Glaser, H.; Geiger, W.; Rohde, V. (1992) PPS - Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Konzepte, Anwendungen. Wiesbaden, 2. Aufl., Gabler, 1992.
- Gläßner, J. (1995) Modellgestütztes Controlling der beschaffungslogistischen Prozesskette. Dissertation Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 337, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995.
- Goldratt, E.M. (1988) Computerized Shop Floor Scheduling. In: International Journal of Production Research 26, 1988, S. 443-455.
- Goldratt, E.M. (1990) What is this Thing Called Theory of Constraints?. Croton-on-Hudson, 1990.
- Goldratt, E.M.; Cox, J. (1992) The Goal. Great Barrington, 1992.
- Groß, M. (1990) Planung der Auftragsabwicklung komplexer, variantenreicher Produkte. Konzeption eines EDV-

- gestützten Hilfsmittels zur integrierten Auftrags- und Produktionsprogrammplanung in der Kleinserienproduktion. Dissertation TH Aachen, 1990.
- Gutenberg, E. (1983) Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Bd. 1: Die Produktion, 24. Aufl., Berlin, 1983.
- Güth, W. (1982) Auktionen, Ausschreibungen und Erbschaftsprobleme als ordnungspolitischen Gestaltungsaufgaben. Diskussionspapier, Staatswissenschaftliches Seminar, Universität Köln, Köln, 1982.
- Güth, W. (1995) Preisregeln für Auktionen und Ausschreibungen. In: Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften 115, 1995.
- Hackstein, R. (1989) Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Ein Handbuch für die betriebliche Praxis. 2. Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- Hars, A.; Scheer, A.-W. (1991) Entwicklungstendenzen von Leitständen. In: Fertigungssteuerung: Expertenwissen für die Praxis. Scheer, A.-W. (Hrsg.), München u.a., Oldenbourg, 1991, S. 65-86.
- Henseler, H. (1998) Aktive Ablaufplanung mit Multi-Agenten. Dissertation zur künstlichen Intelligenz, Bd. 180, Infix, St. Augustin, 1998
- Herrmann, F. (1996) Modifizierte Verzweige- und Begrenze-Verfahren zur Belegungsplanung in der Produktion. Dissertation U Dortmund, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Anlagensteuerungstechnik der U Dortmund Bd. 96, 4, Aachen Shaker Verlag, 1996.
- Hoitsch, H.-J. (1993) Produktionswirtschaft. 2. Auflage. München: Vahlen Verlag 1993.
- Hughes, J. G. (1992) Objektorientierte Datenbanken. Carl Hanser Verlag, München Wien, Prentice Hall London, 1992.
- Jost, H. (1996) Kosten- und Leistungsrechnung – praxisorientierte Darstellung. 7. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1996.
- Kalde, M. (1987) Methodik zur Festlegung der Flexibilität in der Montage. Dissertation TH Aachen, 1987.
- Kassel, S. (1996) Multiagentensysteme als Ansatz zur Produktionsplanung und -steuerung. In: Information Management 1, S. 46-50, 1996.
- Kassel, S. (1998) Implementierung und Design von Multiagentensystemen. Dissertation TU Chemnitz, 1998.

- Kernler, H. (1995) PPS der 3. Generation: Grundlagen, Methoden, Anregungen. Heidelberg, Hüthig, 1995.
- Kettner, H. (1997) Einflussgrößen der Fertigungsdurchlaufzeit, ihre Ermittlung und Quantifizierung mit statistischen Methoden. Hannover, 1977.
- Khoshafian, S.; Copeland, G. (1986) Object Identity. SIGPLAN Notices, Vol. 21, 1986.
- Klügl, F. (2001) Multiagentensimulation – Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen. Addison-Wesley Verlag, München u.a., 2001.
- Kofler, M. (1998) Visual Basic 6 – Programmier Techniken, Datenbanken, Internet. Addison-Wesley-Longman, Bonn, 1998.
- Konz, H.-J. (1989) Steuerung der Standplatzmontage komplexer Produkte. Entwickeln einer Methode zur EDV-gestützten Steuerung von Standplatzmontagen in der auftragsgebundenen Kleinserien- und Serienproduktion. Dissertation TH Aachen, Hochschulschrift, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, 1989.
- Kotschenreuther, W. (1991) Unterstützung der Störungsbewältigung in der Produktion durch Verteilte Wissensbasierte Systeme. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1991.
- Kraemer, W.; Wiechmann, D. (1991) Die Betriebsdatenerfassung als integraler Bestandteil der Fertigungssteuerung und Kostenrechnung. In: Fertigungssteuerung: Expertenwissen für die Praxis. Scheer, A.-W. (Hrsg.), München u.a., Oldenbourg, 1991, S. 311.
- Kräkel, M. (1992) Auktionstheorie und interne Organisation, Wiesbaden, 1992.
- Krieger, D.J. (1996) Einführung in die allgemeine Systemtheorie. München, Fink Verlag, 1996.
- Kuhn, H. (1990) Einlastungsplanung von flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation TH Darmstadt, Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft Bd. 31, Heidelberg: Physica-Verlag 1990.
- Kühnel, R. (2001) Agentenbasierte Softwareentwicklung: Methoden und Anwendung. Addison-Wesley Verlag, München u.a., 2001.
- Lehmann, F. (1992) Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage. Ein Beitrag zur EDV-gestützten Montagesteuerung. Dissertation TH Aachen, Berichte aus

- dem Werkzeugmaschinenlabor Bd. 1, Aachen: Verlag Shaker, 1992.
- Lödding, H. (2001) Dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung. Dissertation Universität Hannover, 2001.
- Lücke, O. (1998) Methodische Nutzung der betrieblichen Lernfähigkeit: Ein Beitrag zur Verbesserung der Lernfähigkeit in der Kleinserienfertigung komplexer Produkte. Vulkan-Verlag, Essen, 1998.
- Luczak, H.; Eversheim, W.; Schotten, M. (1998) Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer, 1998.
- Luhmann, N. (1980) Komplexität. In: Grochla, H. (Hrsg.), Handwörterbuch der Organisation, Poeschel Verlag, S. 1064-1070, 1980.
- Malone, T.W. (1987) Modelling Coordination in Organizations and Markets. In: Management Science, 33 (1987) 10, S. 1317-1332.
- Mannmeusel, T. (1997) Dezentrale Produktionslenkung unter Nutzung verhandlungsbasierter Koordinationsformen. Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl., 1997.
- Martial, F. von (1992) Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz. In: Künstliche Intelligenz, 6. Jahrgang, Heft 1, S. 6-11, 1992.
- McAfee, R.P.; McMillan, J. (1987) Auctions and Bidding. In Journal of Economic Literature 25, Nr. 3, 1987.
- Melzer-Ridinger, R. (1994) PPS - Systemgestützte Produktionsplanung. München, 1994.
- Mendoza, E. (1993) Client-Server-Architektur. Hansen, W.-R. (Hrsg.), Bonn u.a., Addison-Wesley, 1993.
- Mertens, P.; Schultz, J.; Weigelt, M. (1995) Verfahren für die rechnergestützte Produktionsfeinplanung. Ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 594-608.
- Meyers großes Taschenlexikon (1995) Band 1, 5. Auflage, Mannheim u.a., 1995.
- Miese, M. (1972) Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Einzel- und Kleinserienproduktion. Dissertation TH Aachen, 1972.
- Minsky, M. (1986) The Society of Mind. Simon and Schuster, New York, 1986.
- Mosim (1999) Handlungsanleitung zum erfolgreichen Einsatz der Simulation in Produktion und Logistik. Verbundprojekt: Modellversuch Simulation MOSIM, BMBF, Produktion 2000, 1999.

- Much, D.; Nicolai, H. (1995) PPS-Lexikon, Berlin: Cornelsen, 1995.
- Müller, J. (1993) Verteilte Künstliche Intelligenz: Methoden und Anwendungen. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim u.a., 1993.
- Müller-Mehrbach, H. (1992) Operations-Research: Methoden und Modelle der Optimalplanung. 3. Auflage, München, Vahlen Verlag, 1992.
- Newell, A. (1962) Some problems in basic organizations in problem-solving problems. In: Yovits, M.C.; Jacobi, G.T.; Goldstein, G.D. (Hrsg.), Conference on Self-Organizing Systems, Washington D.C., S. 393-423, Spartan Books, 1962.
- Nyhuis, P. ; Wiendahl, H.-P. (1999) Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Springer-Verlag, 1999.
- Oestereich, B. (1998) Objektorientierte Softwareentwicklung: Analyse und Design mit der Unified Modeling Language. München, Wien, Oldenbourg, 1998.
- Oracle (1998) SQL*Plus – Sprachbeschreibung. Oracle Deutschland GmbH, Hamburg, 1988.
- Ott, A.E. (1968) Grundzüge der Preistheorie. Göttingen, 1968.
- Parunak, H.V.D. (1987) Manufacturing Experience with the Contract Net. In: Huhns, M.N (Hrsg.), Distributed Artificial Intelligence, London, S. 285-310, 1987.
- Parunak, H. V. D. (1994) Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry. Technical Report ITI TR 93-03.1, Industrial Technology Institute, Ann Arbor, 1994.
- Pritsker, A.A.B. (1986) Introduction to Simulation and SLAM II. West Lafayette, 1986.
- Rao, A.S.; Georgeff, M.P. (1992) An abstract architecture for rational agents. In: Proc. Of 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'92), S. 439-449, Morgan Kaufmann, 1992.
- Ruffing, T. (1991) Integrierte Auftragsabwicklung bei Fertigungsinseln. In: Fertigungssteuerung: Expertenwissen für die Praxis. Scheer, A.-W. (Hrsg.), München u.a., Oldenbourg, 1991, S. 65-86.
- Rumbaugh, J.; Blaha, M.; Premerlani, W.; Eddy F.; Lorensen, W.; (1991) Object Oriented Modelling and Design. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1991.

- Sachs, L. (1984) Angewandte Statistik. 6. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 1984.
- Scheer, A.-W. (1996) Wirtschaftsinformatik, Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. 6. Aufl., Springer, Berlin u.a., 1998.
- Schimke, E.-F. (1991) Montageplanung: Methoden, Fallbeispiele, Praxiserfahrung. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1991.
- Schmidt, M. (1992) Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Dissertation TU München, IWB Forschungsberichte Bd. 41, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1992.
- Scholz-Reiter, B. und Nathansen, K. (1998) Modellierung und Steuerung von Materialflüssen in Produktionssystemen. In: PPS Management 3/1998, GITO-Verlag, S.14.
- Schomburg, E. (1980) Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssysteme im Maschinenbau. Dissertation TH Aachen, 1980.
- Seicht, G. (1997) Moderne Kosten- und Leistungsrechnung – Grundlagen und praktische Gestaltung. 9. Auflage, Linde verlag, Wien, 1997.
- Spur, G. (1986) (Hrsg.): Fügen, Handhaben und Montieren. Handbuch der Fertigungstechnik. Bd. 5, München: Carl Hanser Verlag, 1986.
- Stecke, K.E.; Raman, N. (1995) FMS Planning Decisions – Operating Flexibilities and System Performance. IEEE Transactions on Engineering Management 42 (1995) 1, S. 82-89, 1995.
- Sundermeyer, K. (1993) Modellierung von Agentensystemen. In: Müller, L. (Hrsg.), Verteilte Künstliche Intelligenz: Methoden und Anwendungen, Mannheim, S. 22-44, 1993.
- Trost, R.; Bamberg, G. (1995) Muß bilaterales Aushandeln subventioniert werden? In: Homo Oeconomicus, Bd. 12 (1/2), 2. Teil, München, 1995.
- Ulrich, H.; Probst, G.J.B. (1995) Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte. Haupt, 4. Auflage, Bern u.a., 1995.
- VDI (1983) Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 3. Auflage, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983.

- VDI (1993) Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1, 1993.
- VDI (1995) Auftragsabwicklung: Methodische Abwicklung von Aufträgen im Investitionsgütergeschäft. VDI (Hrsg.), VDI-Richtlinie 4505, Berlin: Beuth, Entwurf 1995.
- Vester, F. (1991) Neuland des Denkens – Vom technokratischen zum kybernetischen Zeitalter. DTV-Verlag, München, 1991.
- Vollmer, L. (2000) Agentenbasiertes Auftragsmanagement mit Hilfe von Preis-Liefertermin-Relationen. Dissertation U Hannover, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 119, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- Weigelt, M. (1994) Dezentrale Produktionssteuerung mit Agenten.-Systemen: Entwicklung neuer Verfahren und Vergleich mit zentraler Lenkung. Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl., 1994.
- Weingarten, U. (1995) Ressourceneinsatzplanung bei Werkstattproduktion. Dissertation TU Braunschweig, Produktion und Logistik, Heidelberg: Physica-Verlag, 1995.
- Weinhardt, C.; Gomber, P. (1996) Domänenunabhängige Koordinationsmechanismen für die dezentrale betriebliche Planung. In: Information Management 1, S. 6-16, 1996.
- Weiss, G. (2000) Multiagent Systems - A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, MIT Press, 2000.
- Westkämper, E. (1997) Produktion in Netzwerken. In: Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), Komplexität und Agilität, Berlin, S. 275-291, 1997.
- Westkämper, E.; Balve, P.; Wiendahl, H.-H. (1998) Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen - Anforderungen und Ansätze. In: PPS Management 1/1998, GITO-Verlag, S. 22.
- Westkämper, E. (1999) Kooperative Planung und Steuerung in dynamischen Prozessketten. In: Sonderforschungsbereich 467 - Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion, Endbericht 1997-1999, S. 323-384.
- Westkämper, E. (2002) Fabrikbetriebslehre I, Vorlesung 8, Folie 4.
http://afs.iff.uni-stuttgart.de/links_download/dl_de/stoffeinschraenkungen/fabrikbetriebslehre/Pruefungsvorbespr_FBL1.pdf,
Universität Stuttgart, Internetrecherche vom 17.02.02.

- Wiendahl, H.-P. (1996) Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte - Taschenbuch für Betriebsingenieure. 7. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 1996.
- Wiendahl, H.-P. (1997) Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Hanser Verlag, München u. Wien, 1997.
- Wiendahl, H.-P. (1997a) Betriebsorganisation für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1997.
- Wiendahl, H.-P. (1999) Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management 4 - Betrieb von Produktionssystemen. Springer Verlag, Berlin u.a., 1999.
- Wilksch, S. (1994) Wissensbasierte Spezifikation von Systemen zum fertigungsnahen Auftragsmanagement. Dissertation TU Berlin, München, Hanser, 1994.
- Wilke, H. (1991) Systemtheorie – eine Einführung in die Grundprobleme der Theorie sozialer Systeme. 3. Auflage, Stuttgart, New York, Fischer Verlag, 1991.
- Wooldridge, M.J.; Jennings, N.R. (1995) Intelligent Agents. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 890. Springer Verlag, Berlin 1995.
- Wooldridge, M. J. (2000) Reasoning about rational agents. Cambridge, Mass. u.a., MIT Press, 2000.
- Zäpfel, G. (1989) Strategisches Produktionsmanagement. Berlin, New York, de Gruyter Verlag, 1989.
- Zäpfel, G. (1994) Entwicklungsstand und -tendenzen von PPS-Systemen. In: Corsten, H. (Hrsg.), Handbuch Produktionswirtschaft, Wiesbaden, S.719-745, 1994.
- Zäpfel, G. (1998) Grundlagen und Möglichkeiten der Gestaltung dezentraler PPS-Systeme. In: Corsten, H.; Gössinger, R. (Hrsg.), Dezentrale Produktionsplanung und –steuerung: eine Einführung in zehn Lektionen. Stuttgart u.a., Kohlhammer, 1998.
- Zelewski, S. (1988) Competitive Bidding aus der Sicht des Ausschreibers - Ein spieltheoretischer Ansatz. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung 40 (1988) 5, S. 407-421.
- Zelewski, S. (1993) Multi-Agenten-Systeme für die Prozesskoordinierung in komplexen Produktionssystemen – Ein Verteiltes Problemlösungskonzept auf Basis von Kontraktnetzen. Arbeitsbericht Nr. 46 des Seminars für allgemeine

-
- Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft der Universität zu Köln, Köln, 1993.
- Zelewski, S. (1998) Flexibilitätsorientierte Produktionsplanung und – Steuerung. In: Corsten, H.; Gössinger, R. (Hrsg.), Dezentrale Produktionsplanung und –steuerung: eine Einführung in zehn Lektionen. Stuttgart u.a., Kohlhammer, 1998.
- Zell, M. (1992) Simulationsgestützte Fertigungssteuerung. Oldenbourg Verlag, München Wien, 1992.
- Zimmermann, H.-J. (1986) Operations Research. München, Oldenbourg Verlag, 1986.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Detlef Frackenpohl
geboren am: 21.09.1968
Familienstand: verheiratet mit Anja Frackenpohl, geb. Zander
Kinder: Tom, geboren am 03.02.1994 und Luke, geboren am 20.10.1995
Eltern: Reiner und Waltraud Frackenpohl, geb. Kehrer

Schulbildung:

07.1975 - 07.1979	Grundschule Hannover und Burgdorf
08.1979 - 06.1981	Orientierungsstufe Burgdorf
07.1981 - 05.1988	Gymnasium Burgdorf; Abschluss: allgemeine Hochschulreife

Berufsausbildung: 08.1988 - 06.1991 Ausbildung zum Industriemechaniker der Fachrichtung Produktionstechnik bei der Volkswagen AG Hannover

Zivildienst: 10.1992 - 12.1993 Zivildienstleistender in der Werkstatt für Behinderte Burgdorf

Studium:

10.1991 - 09.1992	Maschinenbau an der Universität Hannover
10.1993 - 03.1998	Vertiefungsrichtung: Produktionstechnik

Berufstätigkeit:

06.1991 - 09.1991	Arbeiter in der Rohmontage bei der Volkswagen AG Hannover
04.1998 - 05.2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Integrierte Produktion Hannover