

Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage

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

von

Dipl.-Ing. Karsten Evers

geboren am 7. April 1967 in Hildesheim

2002

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-P. Wiendahl
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff
Tag der Promotion: 18. März 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stellenwert der Montage und Entwicklungen in ihrer Planung und Steuerung	1
1.3	Logistische Positionierung und Grad der Zielerreichung.....	4
1.4	Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit.....	7
2	Charakterisierung der Planungsaufgabe und Methoden ihrer Durchführung	10
2.1	Belegungsplanung und Multiressourcen-Montage	10
2.1.1	Belegungsplanung als Funktion der Produktionsplanung und -steuerung	10
2.1.1.1	Produktionsplanung	10
2.1.1.2	Produktionssteuerung.....	12
2.1.1.3	Belegungsplanung	13
2.1.2	Einordnung des betrachteten Montageprinzips.....	15
2.1.2.1	Montage.....	15
2.1.2.2	Ressource	16
2.1.2.3	Auftragsabwicklung.....	18
2.1.2.4	Flexibilität.....	23
2.2	Verfahren für die Belegungsplanung.....	25
2.2.1	Optimierende Planungsverfahren	26
2.2.2	Konventionelle Planungsverfahren	28
2.2.2.1	Prioritätsregeln.....	28
2.2.2.2	Konventionelle Heuristiken	30
2.2.3	Simulation als unterstützendes Verfahren	33
2.2.4	Planungsverfahren der künstlichen Intelligenz.....	34
2.2.5	Diskussion der Anwendbarkeit der Verfahren	37
2.3	Einsatz von CA-Technologien.....	43
2.3.1	Digitale Produktentwicklung.....	43
2.3.2	Digitale Fabrikplanung	45
2.3.3	Hilfsmittel für die Belegungsplanung.....	48
2.4	Anforderung an ein System zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage	52
3	Modellierung einer Multiressourcen-Montage	55
3.1	Bestimmung der Zielgrößen.....	56
3.1.1	Montageauftrag.....	56
3.1.2	Montagestation	58

3.2	Darstellung der Zielgrößen	59
3.2.1	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm	59
3.2.2	Produktionskennlinie	65
3.2.3	Materialflussbeziehungen	71
3.2.4	Kennzahlen	72
3.3	Erstellung eines Simulationsmodells und einer zentralen Datenbank	73
3.3.1	Bildung eines Simulationsmodells	73
3.3.2	Aufbau einer zentralen Datenbank	78
4	Entwicklung eines Verfahrens zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage	81
4.1	Bildung und Bewertung von logistischen Klassifizierungskriterien	81
4.1.1	Montageaufträge	81
4.1.2	Montagestationen	84
4.2	Bestimmung der Stationsbelegungen	86
4.2.1	Auftrags- und Stationsgruppierung	86
4.2.2	Priorisierung der Belegungsalternativen	91
4.3	Bestimmung der Montagesteuerung	97
4.3.1	Auftragsfreigabe	97
4.3.2	Auftragsdurchlauf	101
4.4	Integration der Simulation	103
4.4.1	Bildung eines Regelkreises	103
4.4.2	Planungsablauf	105
5	Prototypische Realisierung eines Systems zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage	106
5.1	Definition der spezifischen Randbedingungen	106
5.1.1	Montagestruktur	106
5.1.2	Problemstellung und Zielsetzung der Belegung	108
5.2	System zur Belegungsplanung	109
5.2.1	Systemaufbau und Datenverwaltung	110
5.2.2	Module zur Klassifizierung der Arbeitsvorgänge	111
5.2.3	Modul zur Bestimmung der Stationsbelegung	113
5.2.4	Modul zur Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung	116
5.2.5	Module zur Simulation und Analyse des Montagesystems	117
5.3	Simulationsergebnisse des Systemeinsatzes	120
6	Schlussbetrachtung	125
6.1	Zusammenfassung	125
6.2	Ausblick	126
7	Literatur	128

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

allgemeine Merkmale

(Index oder nachführende Bezeichnung)

i, j, k, l, p	allgemeine Laufvariablen
m	Mittelwert
max	maximal
mg	mittlerer gewichteter Wert
min	minimal
rel	relativ
s	Standardabweichung
v	Variation

Dimensionsangaben

%	Prozent
BKT	Betriebskalendertag
Std	Stunde

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
BEL	Std/BKT	Belastung
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
m	-	Anzahl Stationen
n	-	Anzahl auszuwertender Ereignisse
P	BKT	Bezugszeitraum (Periode)
R	BKT	Reichweite
t	BKT	Zeit
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
TBA	BKT	Bearbeitungsanfang
TBE	BKT	Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges
TBEV	BKT	Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges
TF	BKT	Fertigstellungstermin eines Auftrages
TRA	BKT	Rüstanfang
TTA	BKT	Transportanfang
TTE	BKT	Transportende
z	-	Anzahl der Montagesystemdurchläufe
ZAU	Std	Auftragszeit (Vorgabezeit)
ZBA	Std	Bearbeitungszeit
ZBD	BKT	Bearbeitungszeitdauer
ZDA	BKT	Durchlaufzeit eines Auftrages
ZDF	BKT	Durchführungszeit eines Arbeitsvorganges
ZDL	BKT	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
ZLN	BKT	Nachliegezeit
ZLV	BKT	Vorliegezeit
ZR	Std	Rüstzeit
ZRD	BKT	Rüstdauer
ZTR	BKT	Transportzeit
ZUE	BKT	Übergangszeit eines Arbeitsvorganges
ZVA	BKT	Vorlaufzeit eines Auftrages

Abkürzungen

altern.	alternativ
Anz.	Anzahl
Apla.	Arbeitsplangruppe
AR	Augmented Reality
artNr	Artikelnummer
Bd.	Band
BDE	Betriebsdatenerfassung
Bed.	Bedarf
Bel.	Belegung
BOA	belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BTT	Bauteilträger
CA	Computer Aided (rechnerunterstützt)
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design (rechnerunterstützte Entwicklung und Konstruktion)
CAM	Computer Aided Manufacturing (rechnerunterstützte Steuerung und Überwachung)
CAP	Computer Aided Planning (rechnerunterstützte Arbeitsplanung)
CAQ	Computer Aided Quality Assurance (rechnerunterstützte Qualitätssicherung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DV	Datenverarbeitung
e	Regeldifferenz
EDM	Engineering Data Management
EDV	elektronische Datenverarbeitung
etc.	und so weiter

FA	Fertigungsauftrag
FCFS	first come first serve
FIFO	first in first out
FIR	Forschungsinstitut für Rationalisierung
FLT	frühester Liefertermin
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FTS	fahrerloses Transportsystem
ggf.	gegebenenfalls
GH	Gesamthochschule
Gr.	Gruppe
GRB	größte restliche Bearbeitungszeit
HR	Hochregal
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
in Anl.	in Anlehnung an
Kapa.	Kapazität
KI	künstliche Intelligenz
kompl.	komplett
KOZ	kürzeste Operationszeit
KRB	kürzeste Restbearbeitungszeit
LOZ	längste Operationszeit
MAA	meiste noch auszuführende Arbeitsgänge
min.	mindestens
Nr.	Nummer
PDM	Product Definition Management
Portf.	Portfolio

PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QFD	Quality function deployment
r	Rückführgröße
S.	Seite
SZ	Schlupfzeit
techn.	technologisch
TH	Technische Hochschule
TU	Technische Universität
U	Universität
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
VPS	vorausschauend planende Simulation
VR	Virtual Reality
w	Führungsgröße
x	Regelgröße
y	Stellgröße
y_R	Reglerausgangsgröße
z	Störgröße
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Abstract

Die notwendige Anpassung an die wachsenden Kosten- und Leistungsanforderungen des internationalen Absatzmarktes erfordert von den Unternehmen eine hohe Auslastung ihrer kapitalintensiven Ressourcen bei Sicherstellung eines hohen Flexibilitätsgrades. Dieses ist gerade in Montagebereichen mit vielen verfügbaren Ressourcen nur durch eine realistische Planung und genaue Steuerung der Belegung zu erreichen.

Im Rahmen der Belegungsplanung wird die Simulationstechnik als unterstützendes Planungsverfahren der Forderung nach einer hinreichend genauen Abbildbarkeit aller möglichen Entscheidungsalternativen und der Berücksichtigung aller wesentlichen Randbedingungen gerecht. Der Aufwand zur Erstellung und Auswertung von Simulationsmodellen steht mit Voranschreiten der Rechnertechnologie zunehmend in einem günstigen Verhältnis zur erzielbaren Planungssicherheit.

Vor diesem Hintergrund wird ein Verfahren zur Belegungsplanung für Montagesysteme mit vielen alternativ einsetzbaren Ressourcen entwickelt. Auf Basis der Simulation der Montageabläufe werden geeignete Werte für verschiedene Planungsparameter bestimmt und der Zielerreichungsgrad des Planungsergebnisses ermittelt. Die Bildung eines Regelkreises ermöglicht die Optimierung der Ressourcenbelegung in der Planungsphase und das Monitoring der logistischen Zielgrößen des realen Montageablaufs.

Grundlegende Neuerungen der simulationsgestützten Belegungsplanung gegenüber bisher vorgestellten Planungsverfahren stellen die Priorisierung aller technologisch möglichen Zuordnungen von Arbeitsvorgängen zu Montagestationen entsprechend gebildeter logistischer Klassifizierungskriterien sowie die Einführung einer auftragspezifischen Vorlaufzeit zur Bestimmung des optimalen Freigabezeitpunktes dar. Ergänzend zum Simulationseinsatz werden Ansätze der künstlichen Intelligenz innerhalb des Planungsverfahrens verwendet.

Die simulationsgestützte Belegungsplanung ist in mehreren Programmmodulen realisiert und wurde erfolgreich in der Vormontage eines Herstellers von Verkehrsflugzeugen getestet. Die Verknüpfbarkeit zu bestehenden DV-Systemen wurde bei der Programmentwicklung gewährleistet.

Schlagwörter: Belegungsplanung, Simulation, Montageplanung/-steuerung

Abstract

The necessary adaptation to the growing requirements of costs and performance of the international market forces enterprises to highly utilize their capital-intensive manufacturing resources in line with assuring a high level of flexibility. Especially in assembly systems with many available resources, this can only be achieved by a realistic planning and a precise control of the load.

As a supporting planning procedure the simulation fulfils the demand for an adequate reproduction of all possible decision alternatives and the consideration of all essential constraints within the loading planning. With ongoing computerization, the effort of creating and analysing simulation models is increasingly justified by the resulting planning assurance.

Taking this into account, a loading planning procedure for assembly systems with many alternative usable manufacturing resources is developed. Based on the simulation of assembly processes suitable values for different planning parameters are determined and the degree of achievement of the planning result is identified. Forming a control loop enables to optimise the resource allocation in the planning phase and to monitor the logistics targets of the real assembly process.

The prioritisation of all technologically possible allocations of operations to assembly stations according to defined logistics classification criteria and the introduction of an order-specific preparation time for determining the optimal release point are fundamental innovations of the simulation-based loading planning procedure. In addition to the use of the simulation technique, approaches of artificial intelligence are applied within the planning procedure.

The simulation-based loading planning procedure is realized in several program modules and was successfully tested in the pre-assembly of a commercial aircraft manufacturer. The possibility of a link to existing IT-systems was ensured through program developing.

Key words: loading planning, simulation, assembly planning/control

1 Einführung

1.1 Motivation

Die tatsächlich vorhandenen Produktionskapazitäten werden von den heute im Einsatz befindlichen PPS-Systemen nicht oder erst nach Aufstellung des Belegungsplans berücksichtigt. Die Übereinstimmung zwischen Planung und verfügbaren Ressourcen stellt sich dadurch im betrieblichen Ablauf höchstens zufällig ein. Besonders große Planabweichungen ergeben sich in der Multiressourcen-Montage, da in ihr neben der in der Montage ohnehin verbreiteten Flexibilität eine Vielzahl von Ressourcen alternativ eingesetzt werden können. Die schlechte Planungsqualität führt dort zu einer erheblichen Verschwendung von Produktionspotentialen, da die vorhandenen Ressourcen nicht optimal genutzt werden. Darüber hinaus ergibt sich eine schlechte Termintreue der Montageaufträge.

Alternative Planungsverfahren scheitern bis heute an den komplexen Verknüpfungen in realen Produktionssystemen. Nur die sich schnell entwickelnde Simulationstechnik kann dynamische Abhängigkeiten hinreichend genau abbilden. Ihr Einsatz als entscheidungsunterstützendes Verfahren ist deshalb vielversprechend.

Der Logistik als die marktgerechte Gestaltung, Planung, Steuerung und Abwicklung aller Material-, Waren- und Informationsflüsse zur Erfüllung der Kundenaufträge kommt die Aufgabe zu, auch für die Multiressourcen-Montage eine effiziente und zielerreichende Belegungsplanung zu ermöglichen. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Zur Einführung in die Thematik erfolgt nach der Schilderung des Stellenwerts der Montage im Produktionsablauf sowie aktueller Entwicklungen in der Montageplanung und -steuerung die Herleitung logistischer Zielgrößen aus den Unternehmenszielen und eine Aussage zu ihrem derzeitigen Grad der Zielerreichung. Anschließend werden Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit näher erläutert.

1.2 Stellenwert der Montage und Entwicklungen in ihrer Planung und Steuerung

Die Wettbewerbsfähigkeit eines Produktionsunternehmens wird zum einen durch die Fähigkeit bestimmt, sein Produkt- und Leistungsangebot auf die wechselnden Bedürfnisse des Marktes einzustellen, und zum anderen dadurch, in welchem Maße es gelingt, die Unternehmenspotentiale in den Bereichen Forschung und Entwicklung sowie Beschaffung, Produktion und Vertrieb auszuschöpfen.

Innerhalb der Produktion hat die Montage eine große Bedeutung für das verarbeitende Gewerbe in Europa [DEL92]. Je nach Branche (Bild 1.1) und Produkt werden bis zu 70% der Herstellungszeit von ihr beansprucht [KÖH00, VDI92a]. Darüber hinaus ist die

Montage der personalintensivste Bereich der gesamten Produktion [vgl. HAR93, vgl. LEH92, LOT92]. Bei Betrachtung der gesamten Herstellungskosten entfallen am Standort Deutschland auf sie durchschnittlich 25% [AWK96, LIN93, LOT93].

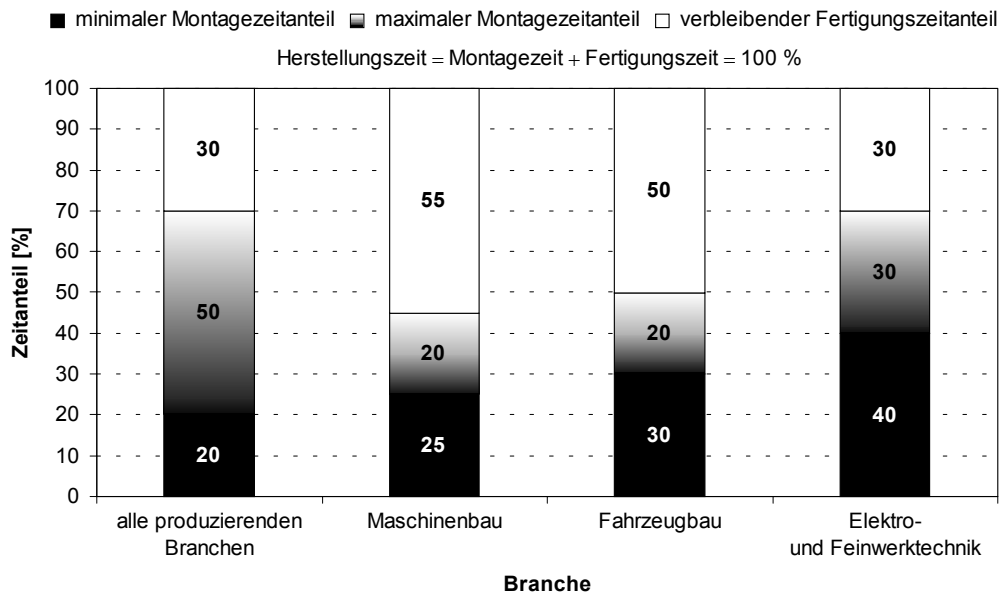


Bild 1.1 Anteile der Montagezeit an der gesamten Herstellungszeit (Köhrmann)

Als Folge konzentrieren sich im besonderen Maße deutsche Unternehmen aufgrund des hohen Lohnniveaus, der kurzen Soll-Arbeitszeiten sowie der hohen Unternehmensbesteuerung [MIL94] auf eine kontinuierliche Steigerung ihrer Produktivität [VDI92a]. So nahm die Arbeitsproduktivität im montageintensiven Fahrzeugbau innerhalb von drei Jahren um knapp 20% und in der Elektro- und Feinwerktechnik um knapp 30% zu (Bild 1.2). Die Steigerung der Arbeitsproduktivität im Fahrzeugbau ist vor allem auf den hohen Automatisierungsgrad in der Baugruppen- und Aggregatmontage zurückzuführen. Die geringe Komplexität und die großen Produktionsstückzahlen sind dagegen die Basis für einen hohen Automatisierungsgrad in der Komponentenmontage im Bereich der Elektro- und Feinwerktechnik.

Ein hoher Automatisierungsgrad allein reicht aber nicht aus, um dem hohen Kostendruck entgegen zu wirken. Zum Erzielen einer wettbewerbsfähigen und effizienten Auftragsabwicklung in der Montage sind Strukturanpassungen und zusätzliche Hilfsmittel unerlässlich [REI96a]. Aus diesem Grund werden seit einigen Jahren neue Ansätze zur Umstrukturierung und Reorganisation diskutiert [CHA94, HAM97]. Ein wesentlicher Ansatz ist dabei die Umstrukturierung der Montage in sich selbst steuernde, kleinere und dadurch flexiblerer Einheiten. Derzeit im Gebrauch befindliche Schlagworte sind hier „Segmentierung“ sowie „Fraktale Fabrik“ und „Produktionsnetzwerke“ [WAR99, WIE96, WIL98].

Die mit der Umstrukturierung zusammenhängenden Entwicklungen haben auch wesentlichen Einfluss auf die Montageplanung und -steuerung [LEH92]. Zwar bietet eine zentrale Planung prinzipiell die größten Potentiale zur Optimierung der Abläufe, die zentral entwickelten Pläne haben aufgrund der dynamischen Vorgänge und Störeinflüsse jedoch nur eine begrenzte Lebensdauer, die häufig kürzer als der verwendete Planungshorizont ist [GAR96]. Als Konsequenz ist ein Trend zu einfachen, überschaubaren und modular aufgebauten Systemen zu erkennen [LUC93].

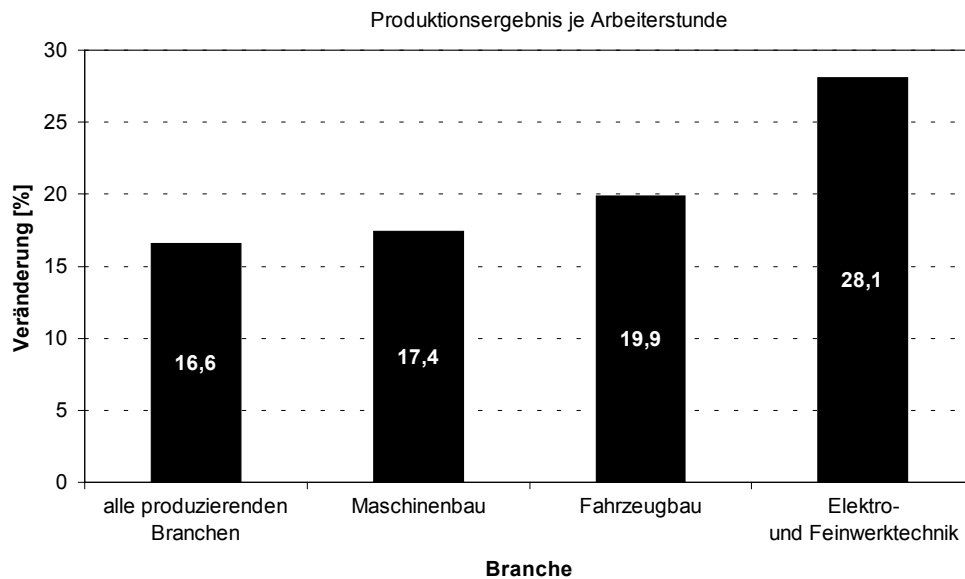


Bild 1.2 Veränderung der Arbeitsproduktivität von 1995 bis 1998 in Deutschland (Statistisches Bundesamt)

Als Hilfsmittel zur Optimierung der Abläufe in der Montageplanung und -steuerung sowie zur Reduzierung des mit ihr verbundenen Arbeitsaufwandes ist eine immer umfassendere Rechnerunterstützung zu beobachten [BUL89a, EVE88, FEL92, MIL88]. Diese erfordert wiederum rechnerinterne Modelle [SCU92, WEI85]. Dabei ist entscheidend, dass die unterschiedlichen Rechnerwerkzeuge mit den selben Modellen arbeiten. Andernfalls ergeben sich aus redundanter Datenhaltung eine Reihe von Fehlerquellen, die zu Dateninkonsistenzen führen können [FEL97]. Ebenso verursachen eine Vielzahl von Rechnerwerkzeugen in der Montageplanung und -steuerung einen hohen Datenaufwand durch wiederholte Datenumwandlung beim Übergang von einem System zum anderen. Dagegen können in einem durchgängigen Ansatz in der Planung erzeugte Daten, wie z.B. zur Steuerung der Montageprozesse, direkt für die Betriebsphase weiterverwendet werden. Durch kontinuierlich anwendbare Analysen und Simulationen im Planungsablauf sind so im Laufe der Montageplanung immer detailliertere Analysen hinsichtlich der zu erwartenden Kosten, Ressourcenleistungen und auftretenden Durchlaufzeiten möglich [CUI96, CUI97, FEL97].

Als eine der jüngsten Entwicklungen im Rahmen der Montageplanung und -steuerung ist die Simulation von Montagesystemen mit Hilfe von virtuellen Produkt-Prototypen zu nennen. Mit einer durchgängigen digitalen Beschreibung soll der gesamte Montageablauf im Rechner abgebildet werden, um so unterschiedliche Planungs- und Steuerungsvarianten zu generieren und auf ihre Leistungsfähigkeit hin zu untersuchen. Dazu werden Simulationstechniken in der virtuellen Montage integriert [REI99].

1.3 Logistische Positionierung und Grad der Zielerreichung

Entscheidend für den langfristigen Wettbewerbserfolg produzierender Unternehmen ist die Umsetzung der globalen Ziele Eigenkapitalrendite, Produktivitätszuwachs, Umsatzwachstum und relative Wettbewerbsstellung in die Produktionsziele Logistikleistung, Kosten, Qualität und Produktfunktionalität (Bild 1.3).

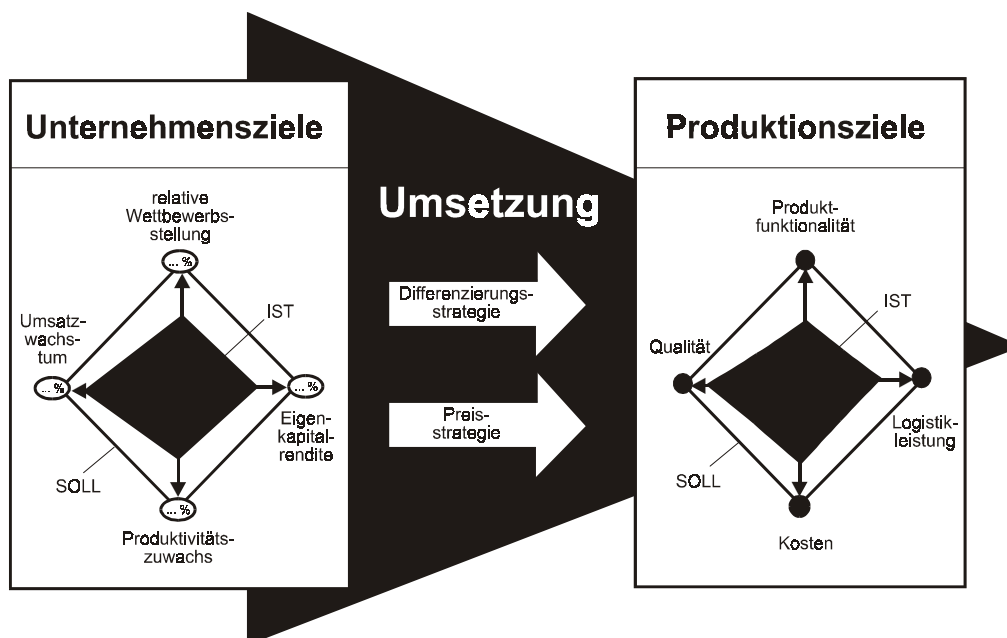


Bild 1.3 Umsetzung der Unternehmensziele in Produktionsziele (Eidenmüller)

Eine Geschäftspolitik ist i.d.R. nur dann erfolgreich, wenn sie konsequent auf einen grundlegenden Wettbewerbsvorteil abzielt. Ein solcher Vorteil kann eine Preisdominanz durch niedrige Kosten oder eine Differenzierung durch eine bessere Leistung aus Kundensicht sein [EID91]. Veränderte Anforderungen der Abnehmer führen zunehmend dazu, dass Wettbewerbsvorteile nur durch eine Kombination von Kosten- und Leistungsüberlegenheit zu erzielen sind [ZEN00]. Während insbesondere asiatische Unternehmen zunächst eine Kostenführerschaft anstreben, herrscht in Deutschland die umgekehrte Strategie der Leistungsdifferenzierung mit anschließenden Anstrengungen zur Kostensenkung vor [HÜN94]. Werden aus diesen Umsetzungsstrategien logistische

Zielsetzungen abgeleitet, können ihre gegenseitigen Abhängigkeiten als Zielsystem der Produktionslogistik dargestellt werden (Bild 1.4).

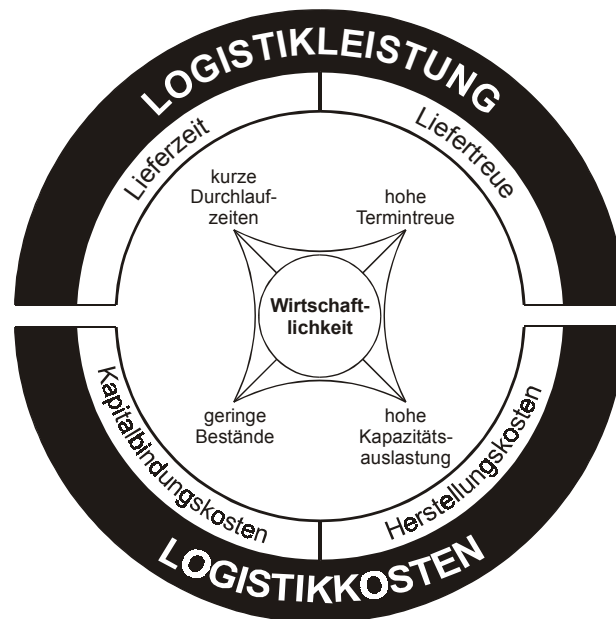


Bild 1.4 Zielsystem der Produktionslogistik (nach Wiendahl)

Die Logistikleistung wird über die erreichte Liefertreue und die Lieferzeit bzw. die Lieferfähigkeit bewertet. Eine hohe Lieferfähigkeit bzw. kurze Lieferzeiten erfordern kurze Durchlaufzeiten in allen Produktionsbereichen. Eine hohe Liefertreue erfordert eine gute Termineinhaltung bei der Auftragsabwicklung.

Der Logistikleistung stehen Logistikkosten gegenüber, die sich aus Kapitalbindungskosten und Herstellungskosten zusammensetzen. Die Kapitalbindungskosten werden durch Bestandsänderungen beeinflusst, während die Herstellungskosten u.a. von der Auslastung der eingesetzten Produktionseinrichtungen abhängig sind [WIE97a].

Da ein Unternehmen nur begrenzte Ressourcen besitzt, besteht eine ständige Konkurrenz der Aufträge um die Ressourcen. Daraus resultiert ein Zielkonflikt [WIE87], der aus dem Widerspruch kurzer Durchlaufzeiten und hoher Termintreue einerseits sowie hoher Auslastung und geringer Bestände andererseits besteht. Die Sicherung einer hohen Auslastung erfordert nämlich hohe Bestände, die ihrerseits jedoch lange Durchlaufzeiten hervorrufen. Lange und damit i.d.R. stark schwankende Durchlaufzeiten stehen jedoch dem Ziel einer hohen Terminalsicherheit entgegen [NYH99].

Anhand von Unternehmensbefragungen wird dieses Dilemma deutlich (Bild 1.5). So werden z.T. widersprüchliche Ziele genannt [BÜD91]. Es existiert demnach prinzipiell nicht nur ein Ziel, dessen Wert es zu maximieren oder zu minimieren gilt, sondern es müssen die Abhängigkeiten aller angestrebten Ziele gleichzeitig berücksichtigt werden.

Als Folge können die angestrebten Ziele in der Praxis nicht alle in befriedigendem Maße erfüllt werden [AWK99]. Die erreichten Durchlaufzeiten liegen i.d.R. weit über den vorgegebenen Zeiten und zahlreiche Erhebungen weisen nach, dass 20% bis 60% aller Aufträge mit Terminverzug abgeschlossen werden [ESS96, EVE92a, EVE96]. Dabei beläuft sich das in der Montage gebundene Umlaufkapital auf 30% bis 50% des gesamten Bestandswertes [LEH92]. Weiter zeigen zahlreiche auf nationaler und internationaler Ebene durchgeführte Untersuchungen, dass die tatsächliche Auslastung an verschiedenen Montagesystemen (Bild 1.6) deutlich unter der theoretisch möglichen Auslastung liegt [KÖH00, WIE97b, WIE98a] und dass es bei vielen Maschinenherstellern in Deutschland bereits bei einem Auslastungsdurchschnitt von knapp 90% zu erheblichen Produktionsengpässen kommt [VDM00a].

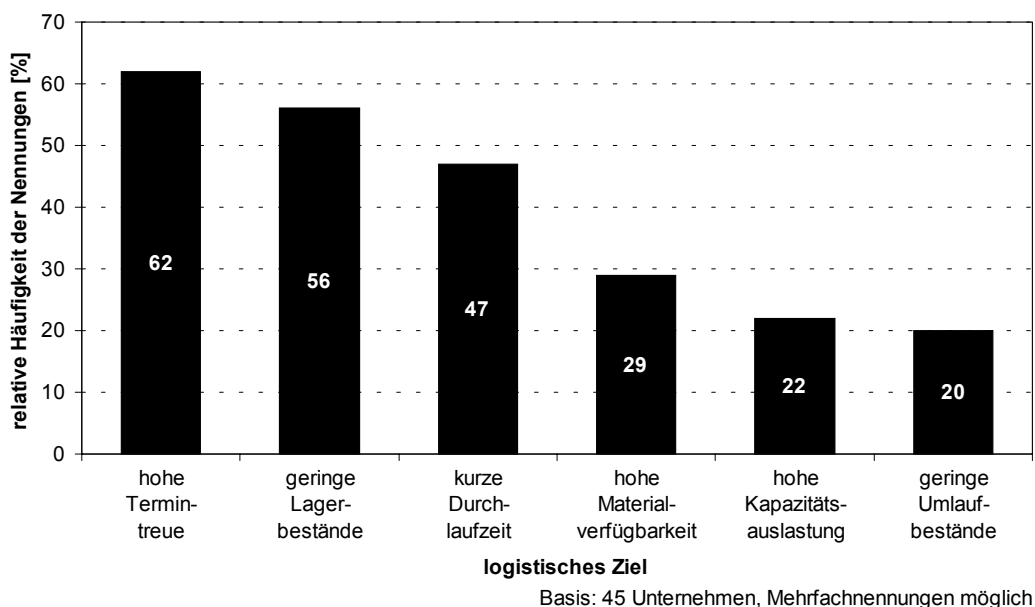


Bild 1.5 Gewichtung der logistischen Ziele (nach *Büdenbender*)

Der interne Zielkonflikt wird durch externe Einflüsse zusätzlich verschärft. Zwar führt die zunehmende Globalisierung zu einem um ein Vielfaches größeren Beschaffungs- und Absatzmarkt, jedoch werden die Unternehmen auch mit einer zunehmenden Anzahl von Konkurrenten konfrontiert. So war innerhalb der neunziger Jahre eine Zunahme um mehr als 50% bei der Anzahl der Wettbewerber zu verzeichnen. Diese verstärkte Konkurrenzsituation führte durch den Marktdruck zu einer Verkürzung der Lieferzeiten um bis zu 60%. Gleichzeitig fielen die Marktpreise um bis zu 50% [AWK96, REI96a, WID94]. Die stark gewachsenen Kundenansprüche und der große Kostendruck werden heute als zentrale Anforderungen an die Logistik bezeichnet [BAU99, WEI99, ZEN00]. Dieses wirkt sich im besonderen Maße auf die Montage als letztes Glied der Wertschöpfungskette eines produzierenden Unternehmens aus, da hier die Liefertreue entscheidend beeinflusst wird [WAL91] und alle Störungen in der Auftragsabwicklung aus

vorgelagerten Unternehmensbereichen kompensiert werden müssen [DIE95]. So fordern zum einen nicht zutreffende Kapazitätsplanungen oder verspätete Termine vorgelagerter Stellen im Rahmen der Auftragsabwicklung von der Montage ein erhebliches Maß an Flexibilität [SCI91] und zum anderen muss sie zusätzlich auf Veränderungen des Absatzes bedarfsorientiert reagieren können, welches die Kapazitätsplanung dort erheblich erschwert [KRÜ99a].

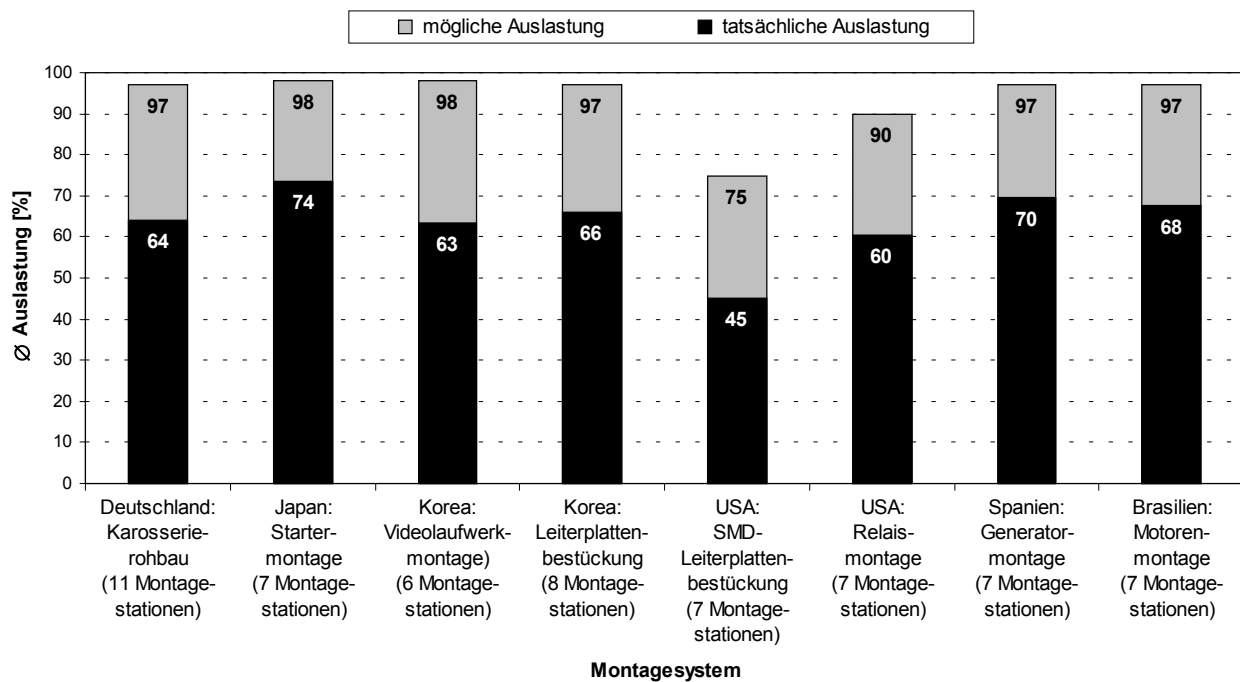


Bild 1.6 Auslastungsverluste verschiedener Montagesysteme (nach Köhrmann)

1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage entwickelt, deren Grad der Zielerreichung in einer dynamischen Testumgebung mit Hilfe der Simulationstechnik bestimmt wird. Die zum Montageprozess erforderlichen Ressourcen sollen so zugeordnet werden, dass im betrachteten System ein bestmöglicher Kompromiss zwischen Logistikleistung und Logistikkosten entsprechend der spezifischen Zielsetzung erreicht wird. Es wird ein Gesamtsystem vorgestellt, das ausgehend von Arbeitsplandaten, Stücklisten sowie Liefermengen und -terminen den Planungsprozess methodisch und visuell unterstützt sowie die Zielerreichung durch Bildung eines logistischen Regelkreises interaktiv ermöglicht.

Bei der Systembildung werden bereits bestehende Planungstechniken kombiniert und angepasst. Der Einsatz von CA-Technologien soll die Einbindung des Systems in aktuelle EDV-Umgebungen ermöglichen und die notwendigen Datenverarbeitungen weitestgehend automatisieren. In der Praxis verbreitete und bewährte Logistikmodelle bil-

den die Basis der Systemmodellierung. Bei der Verfahrensentwicklung wird ein möglichst allgemeiner Ansatz gewählt, um eine große Übertragbarkeit zu gewährleisten. Eine beispielhafte Anwendung in der Vormontage eines Flugzeugherstellers soll zeigen, wie mit dem entwickelten Verfahren unter Nutzung der Simulationstechnik eine hohe Auslastung bei guter Termintreue und maximaler Flexibilität in der betrieblichen Praxis erreicht werden kann.

Kapitel 1: Einführung <ul style="list-style-type: none"> • Montageplanung und -steuerung • Logistisches Zielsystem 	Stand – Konzept – Umsetzung – Anwendung
Kapitel 2: Charakterisierung der Planungsaufgabe und Methoden ihrer Durchführung <ul style="list-style-type: none"> • Belegungsplanung • Multiressourcen-Montage • Simulation 	
Kapitel 3: Modellierung einer Multiressourcen-Montage <ul style="list-style-type: none"> • Zielgrößen • Simulationsmodell 	
Kapitel 4: Entwicklung eines Verfahrens zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage <ul style="list-style-type: none"> • Prioritätsbildung • Steuerung • Regelkreis 	
Kapitel 5: Prototypische Realisierung eines Systems zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage <ul style="list-style-type: none"> • Randbedingungen • Module • Ergebnisse 	
Kapitel 6: Schlussbetrachtung <ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung • Ausblick 	

Bild 1.7 Inhaltliche Gliederung der Arbeit

Bild 1.7 zeigt zur Übersicht die Gliederung der Arbeit. In *Kapitel 1* wurde einleitend ausgeführt, dass eine mangelnde Berücksichtigung der kapitalintensiven Ressourcen bei der Produktionsplanung zu einem schlechten Grad der logistischen Zielerreichung in der Montage führt. Anschließend wird in *Kapitel 2* die Planungsaufgabe formuliert und ein Überblick über vorhandene Lösungsmethoden gegeben. Der Zweck ist, die Rolle der Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage im produktionslogistischen Sinne herauszuarbeiten und darzustellen, welche Verfahren und Hilfsmittel für ihre Durchführung zur Verfügung stehen. In *Kapitel 3* erfolgt eine Modellbildung mit der Zieldefinition und Ermittlung des Datenbedarfes. Für eine effiziente Rechnerunterstützung des Verfahrens soll somit ein geeignetes Planungsmodell entwickelt werden. Die Verfahrensentwicklung und -durchführung wird in *Kapitel 4* erläutert. So soll durch

planerische und steuernde Maßnahmen ein optimales Verhältnis von Leistung und Ressourceneinsatz erreicht werden. Daran schließt sich in *Kapitel 5* eine prototypische Realisierung mit einer beispielhaften Darstellung und Analyse der Ergebnisse an. Abschließend wird in *Kapitel 6* die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gewährt.

2 Charakterisierung der Planungsaufgabe und Methoden ihrer Durchführung

Für die Entwicklung eines Verfahrens zur Belegungsplanung ist es zunächst sinnvoll, die Planungsaufgabe zu charakterisieren und eine Bewertung bereits vorhandener Verfahren und Hilfsmittel für ihre Durchführung vorzunehmen.

2.1 Belegungsplanung und Multiressourcen-Montage

Zunächst wird das Planungsumfeld der Belegungsplanung skizziert und dann die spezifische Charakteristik der Multiressourcen-Montage beschrieben.

2.1.1 Belegungsplanung als Funktion der Produktionsplanung und -steuerung

2.1.1.1 Produktionsplanung

Der Begriff *Planung* wird in vielen gesellschaftlichen Bereichen mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Allgemein formuliert ist Planung das gedankliche Durchdringen eines zukünftigen Geschehens und beinhaltet die Ideenfindung, Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und Ergebnisdokumentation auf Basis von Zielen, Vorgaben sowie Prognosen [DEU89, nach WIE97a]. Eine allgemeingültige Definition des Begriffs *Produktionsplanung* beinhaltet darüber hinaus das Entwickeln einer gedanklichen Ordnung für das effiziente Zusammenwirken von Produktionsfaktoren zur Hervorbringung von Produkten unter Berücksichtigung arbeitswissenschaftlicher und technologischer Erkenntnisse sowie wirtschaftlicher Ziele [nach LAS75].

Die Produktionsplanung lässt sich in die strategische, taktische und operative Produktionsplanung unterteilen [ANT65, HAX84]. Die *strategische Produktionsplanung* arbeitet mit einem Planungshorizont von mehreren Jahren und verfolgt das Ziel der Sicherung der Unternehmensexistenz durch Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit [ZÄP89a]. Als Ergebnis wird zum einen das langfristige Produktionsprogramm durch Produkt-Markt-Entscheidungen festgelegt und zum anderen die zur Leistungserbringung notwendigen Ressourcen bestimmt, indem die Produktionsstandorte sowie die Ausgestaltung der Produktionssysteme ausgewählt werden. Die *taktische Produktionsplanung* ist der strategischen Produktionsplanung untergeordnet, ihr Planungshorizont greift kürzer und sie verfolgt die inhaltliche Konkretisierung der konzeptionellen Ergebnisse der übergeordneten Planungsebene [GÜN95, ZÄP89b] in Form der Kapazitäts-, Investitions- und Personalplanung. Festgelegt werden die Organisationsform der Produktion, das Produktionslayout, die Ausstattung mit technischen Anlagen sowie das benötigte Personal. Auf der Ebene der *operativen Produktionsplanung*, deren Zeithorizont am kürzesten gefasst ist und die der taktischen Produktionsplanung untergeordnet ist, wird das kurzfristige Produktionsprogramm festgelegt und die Mengenplanung sowie die Termin- und

Kapazitätsplanung durchgeführt. Die operative Planungsebene ist die letzte Ebene der Produktionsplanung. Die Ergebnisse der operativen Produktionsplanung werden als Eingangsdaten an die Produktionssteuerung zur Realisierung der Produktionsprozesse weitergegeben [WEI95].

Die Bezeichnungen der Kernaufgaben der operativen Produktionsplanung und -steuerung (PPS) folgen in der Literatur weitgehend der in Bild 2.1 dargestellten Struktur [vgl. BÜD91, nach FIR96a, vgl. GLA92, nach HAC89, vgl. SCE90a, vgl. WEI95, vgl. WIE97c, vgl. ZÄP82, vgl. ZÄP89a]. Die Erläuterung der PPS-Aufgaben erfolgt angelehnt an das „Aachener PPS-Modell“. Auf der Steuerungsebene werden allerdings nur die für die Belegungsplanung relevanten Eigenfertigungsaufträge betrachtet, während die Fremdbezugssteuerung nicht weiter erörtert wird. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die hierarchisch angeordneten Stufen der Programmplanung, Mengenplanung, Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Auftragsveranlassung und Auftrags- und Ressourcenüberwachung sukzessiv durchlaufen werden.

Durch die *Produktionsprogrammplanung* werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der strategischen und taktischen Planung die in den einzelnen Perioden des Planungszeitraums herzustellenden Erzeugnisse nach Art, Menge und Termin festgelegt [ADA90, BÜD91, GÜN95]. Ergebnis ist der hinsichtlich seiner Absetzbarkeit und Realisierbarkeit abgestimmte Produktionsplan, der verbindlich festlegt, welche Leistungen in welchen Stückzahlen zu welchen Zeitpunkten produziert werden sollen. Die Produktionsprogrammplanung ist eine rollierende Planung, die periodisch, z.B. monatlich durchgeführt wird. Die Planung des Produktionsprogramms ist eng mit der Absatzplanung verbunden, da sich die geplanten Absatzzahlen nur dann realisieren lassen, wenn die Erzeugnisse auch in den jeweils erforderlichen Mengen produziert werden können. Voraussetzung für eine differenzierte und möglichst präzise Ermittlung des Primärbedarfs ist das Vorliegen anforderungsgerechter Dispositionsstrategien, wie z.B. die Festlegung von Sicherheitsbeständen oder die Reichweite von Lagerbeständen. Um zu überprüfen, ob das Produktionsprogramm zu einer ausgeglichenen Belastung der Kapazitäten führt und ob der zu erwartende Materialbedarf gedeckt ist, wird eine grobe Ressourcenplanung durchgeführt. Dazu ist der Primärbedarf in Form einer Deckungsrechnung mit den in der Produktion zur Verfügung stehenden Ressourcen grob abzustimmen [nach FIR96a].

Die *Mengenplanung* umfasst die Planungsteilschritte Materialbedarfsermittlung und Losgrößenplanung [WEI95]. Zunächst wird ohne Einbeziehung der Lagerbestände der Bruttosekundärbedarf ermittelt. Dann erfolgt unter Berücksichtigung von Lagerbeständen, Reservierungen, Umlauf-, Sicherheits-, Meldebeständen sowie Bestellungen die Reduzierung auf den Nettobedarf. Der Nettosekundärbedarf ist somit der einer bestimmten Periode zugeordnete Bedarf, der bisher weder lagerbestandsmäßig verfügbar, noch in einem bereits geplanten bzw. veranlassenen Auftrag zur Bedarfsdeckung

enthalten ist [FIR96a]. Der Tertiärbedarf umfasst ergänzend den entsprechenden Bedarf an Betriebs- und Hilfsstoffen je Erzeugnis. Dies können z.B. Schmierstoffe oder Kühlmittel sein. Durch die Beschaffungsartzuordnung wird anschließend die Entscheidung getroffen, ob ein Bedarf im eigenen Unternehmen befriedigt oder fremdbezogen wird. Zuletzt erfolgt die Bestimmung der Losgrößen. Planungsgegenstand ist hier die Entscheidung über die Bestimmung von Produktionsauftragsgrößen und die Festlegung von Produktionseckterminen, die in dem Spektrum zwischen einsatzsynchroner Materialbereitstellung und dem Materialbereitstellungsprinzip der Vorratshaltung unter Berücksichtigung von Kosten-, Kapazitäts- und Serviceaspekten zu treffen ist [TEM92a].

Innerhalb der *Termin-* und *Kapazitätsplanung* stellt die Durchlaufterminierung zeitliche Zusammenhänge zwischen den Fertigungsaufträgen her. Durch eine Aneinanderreihung von Fertigungsaufträgen, die aufgrund der Erzeugnisstrukturen miteinander in Beziehung stehen, wird ein Netzplan erstellt, der die gegenseitigen Abhängigkeiten aufzeigt [GÜN92]. Die zeitliche Strukturierung des Fertigungsprozesses, die auch in Form einer Vorlaufverschiebung bei der Sekundärbedarfsermittlung erfolgt, wird hier mit einem höheren Genauigkeitsgrad durchgeführt. Es werden periodenbezogen neben den Eigenfertigungsaufträgen auch die Beschaffungsaufträge geplant. Die Planungsgrundlage für diese Aufgabe sind die entsprechenden Arbeitspläne und Übergangszeitmatrizen bzw. Wiederbeschaffungszeittabellen. Das Ergebnis der Durchlaufterminierung sind im Falle der Fertigungsaufträge Ecktermine, wie z.B. die frühest möglichen und spätest zulässigen Start- und Endtermine, bezogen auf Einzelkapazitäten bzw. Kapazitätsgruppen. Dabei wird von unbegrenzten Kapazitäten ausgegangen. Die spätere Belastungssituation wird hier nicht berücksichtigt [nach FIR96a]. Auf Basis der Ecktermine und Arbeitsinhalte wird durch die Kapazitätsbedarfsermittlung der Ressourcenbedarf für die Planungsperioden ermittelt. Durch die Gegenüberstellung von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot wird in der Kapazitätsabstimmung die zukünftige Belastung der Kapazitäten berücksichtigt. Der Ausgleich erfolgt durch eine Kapazitäts- oder Belastungsanpassung.

2.1.1.2 Produktionssteuerung

Die innerhalb der Produktionsplanung gebildeten Fertigungsaufträge werden so eingeplant, dass dem Planungsergebnis zufolge die Ressourcenverfügbarkeit gesichert ist. Je nach Fertigungsstruktur können die eingeplanten Fertigungsaufträge die komplette Fertigung eines Enderzeugnisses, einer Baugruppe oder einzelner Arbeitsvorgangfolgen, wie z.B. Montagearbeiten, enthalten. Die zugehörigen Arbeitsvorgänge sind in einem oder mehreren Fertigungsbereichen abzarbeiten. Die entsprechenden Arbeitsinhalte sind mit Mengen und Terminen vorgegeben. Die Aufgabe der *Produktionssteuerung* ist nun die Realisierung der Planvorgaben. Die zentralen Verfahrensschritte sind hier die Auftragsveranlassung sowie die Auftrags- und Ressourcenüberwachung [nach

ZÄP89a]. Der innerhalb der Produktionssteuerung vorhandene Dispositionsspielraum ergibt sich aus der Differenz der frühest möglichen und spätest zulässigen Start- und Endterminen sowie der Verteilung der zu fertigenden Mengen.

Im Rahmen der *Auftragsveranlassung* ermittelt die Feinterminierung zunächst für die gebildeten Fertigungslose die Start- und Endtermine auf Arbeitsvorgangsbasis in jedem Fertigungsbereich unter Berücksichtigung der Ecktermine. Durch die Ressourcenfeinplanung soll dann die Verfügbarkeit der erforderlichen Kapazitäten gesichert werden, da zum Zeitpunkt der Termin- und Kapazitätsplanung das Kapazitätsangebot zu den in der Zukunft liegenden Fertigungsterminen nur ungefähr bekannt war. Maschinenstörungen, Personal- und Werkzeugausfälle können nämlich im voraus nur auf der Basis von Erfahrungswerten berücksichtigt werden. Nach Einplanung und vor der Freigabe eines Fertigungsauftrags wird anschließend die Verfügbarkeit aller Ressourcen, insbesondere des Materials und der Kapazitäten überprüft. Fehlende Verfügbarkeiten können Änderungen der Planungsergebnisse erfordern. Unter Beachtung der Ergebnisse der Feinterminierung und der Ressourcenfeinplanung erfolgt danach die Auftragsfreigabe, die auch die Bereitstellung der Ressourcen veranlasst. Zuletzt werden die Arbeitsvorgänge auf die Kapazitäten verteilt [nach FIR96a].

Die *Auftrags-* und *Ressourcenüberwachung* schließt eine Reihenfolgesteuerung ein, da die für eine Planungszeiteinheit an einer Einzelkapazität oder einer Kapazitätsgruppe vorgesehenen Arbeitsvorgänge eine Warteschlange bilden können und die Reihenfolge der Abarbeitung i.d.R. nicht festgelegt ist. Die Reihenfolgesteuerung versucht in diesem Fall nach ausgewählten Kriterien, eine optimale Abarbeitungsreihenfolge zu bilden, ohne die Endtermine zu gefährden. Die Auftragsfortschrittserfassung basiert dann auf Soll-/Ist-Vergleichen von Terminen und Mengen, kann aber auch die Überwachung auftragsbezogener Kennzahlen beinhalten. Bei erheblichen Soll-/Ist-Abweichungen wird durch eine veränderte Kapazitätsbelegung oder eine erneute Feinterminierung die Einhaltung des Eigenfertigprogramms 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 [FIR96a].

2.1.1.3 Belegungsplanung

Unter *Belegungsplanung* wird in dieser Arbeit eine Querschnittsfunktion der Produktionsplanung und -steuerung verstanden (Bild 2.1), die Aufgaben aus der

Termin- und Kapazitätsplanung sowie aus der Auftragsveranlassung und Auftrags- und Ressourcenüberwachung umfasst [vgl. FLE88, nach GAR96, vgl. KUH90, vgl. VDI83, vgl. ZÄP89a]. 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 [DOR90, GLA92, HAC89]. Die *Belegungszeit* bezeichnet hierbei die Zeit, während der ein Betriebsmittel durch einen Auftrag- bzw. Arbeitsvorgang belegt ist [MEI95]. Sie setzt sich aus der Rüst- und Bearbeitungszeit zusammen und ist als Vorgabezeit im Arbeitsplan enthalten. Die Belegungszeit entspricht somit dem Kapazitätsbedarf für ein Betriebsmittel zur Durchführung eines Auftrags bzw. Arbeitsvorgangs [RKW87, SON91].

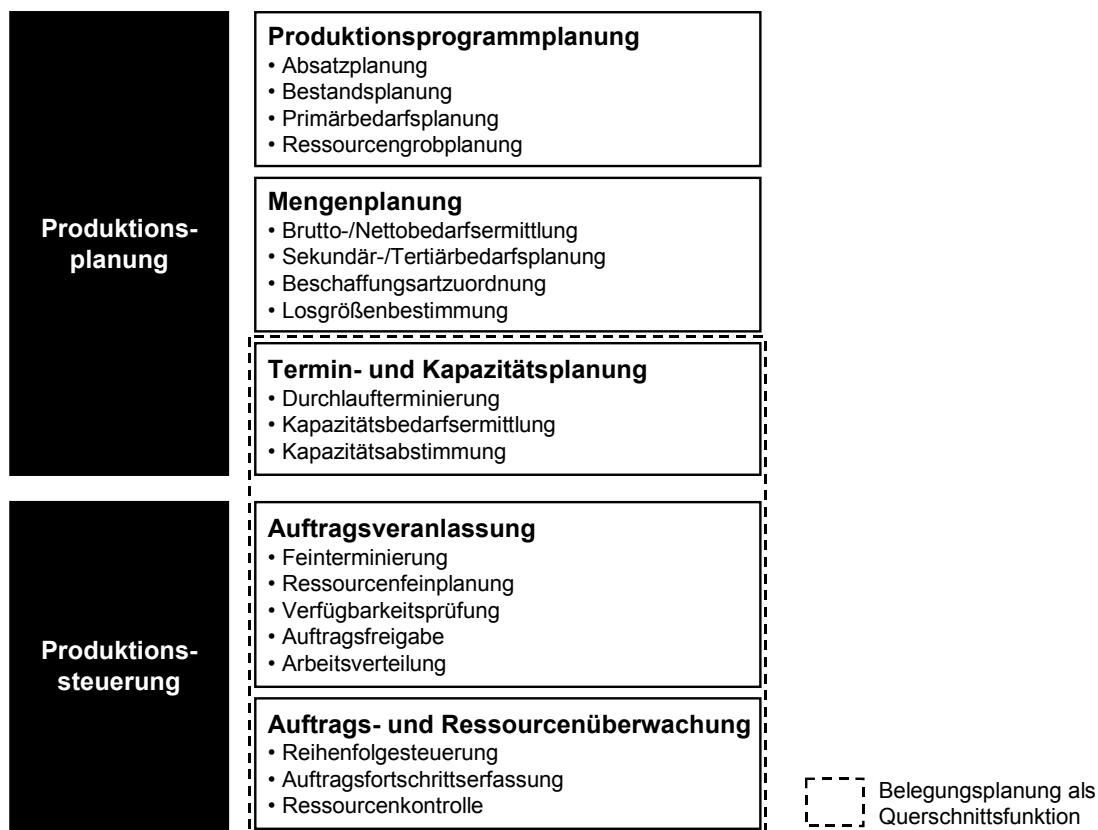


Bild 2.1 Kernaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung mit der Belegungsplanung als Querschnittsfunktion (in Anl. *FIR*)

Die Belegungsplanung übernimmt die in der Mengenplanung ermittelten Fertigungsaufträge und bestimmt dann die Reihenfolge, in der die um eine Ressource konkurrierenden Lose bzw. Aufträge eingelastet werden, sowie die Festlegung des Startzeitpunktes jeder einzelnen Bearbeitung eines Auftrages an den Ressourcen [nach DOM93, nach KIS93]. 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 [BEC91, nach HOI93, nach LEH92, nach ZÄP82]. Jeder Arbeitsvorgang benötigt hierbei eine bestimmte Menge von Ressourcen, die aus dem Arbeitsplan bekannt ist [BAU96].

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 anderen Problemen werden die Aufträge erst nach und nach bekannt gegeben. In diesem Fall werden die Aufträge ab dem Freigabezeitpunkt für die Belegung der Ressourcen berücksichtigt, wodurch die Belegungsplanung ein kontinuierlicher Prozess ist. Solche Systeme, bei denen die Ankunftscharakteristik der Aufträge durch zufällige Ereignisse bestimmt ist und die Bearbeitungscharakteristiken fest sind, werden als semideterministische Systeme bezeichnet. Bei stochastischen Systemen sind auch die Bearbeitungscharakteristiken der Aufträge zufällig bestimmt. Zusätzlich wird zwischen deterministischer und zufälliger Ankunftscharakteristik unterschieden [nach HER96].

2.1.2 Einordnung des betrachteten Montageprinzips

2.1.2.1 Montage

Der Begriff *Montage* wird sowohl im Sprachgebrauch der Praxis als auch in Normen und Richtlinien uneinheitlich verwendet [SCÄ92, SPU86]. Eine begriffliche Festlegung findet sich erstmals bei *Richter*, *Schilling* und *Weise*, die Montieren als Gesamtheit aller Tätigkeiten beschreiben, um aus Bauelementen ein zusammengesetztes technisches Gebilde zu schaffen [RIC74]. In diesem Sinne wird die Montage als das Aufbauen von Systemen höhere Komplexität aus Systemen niederer Komplexität verstanden (Bild 2.2), bei der man ggf. in mehreren Stufen, beginnend mit Einzelteilen über Systeme wachsender Komplexität, zum Endprodukt gelangt [ARL71, BRA75].

Die funktionale Beschreibung der Montage spezifiziert dagegen, durch welche Operationen man von einem Ausgangszustand zu einem Folgezustand gelangt. Die dabei durchzuführenden Tätigkeiten umfassen nach *Richter et. al.* die Operationskomplexe *Fügen*, *Handhaben*, *Kontrollieren* und *Justieren* sowie in Ergänzung von *Warnecke*, *Löhr* und *Kiener* eventuell notwendige *Sonderoperationen*, wie Reinigen, Markieren, etc. [WAR75]. Das Fügen besteht wiederum nach DIN 8593 [DIN85] aus *Füllen*, *An-/Einpressen*, *Umformen*, *Schweißen* und *Kleben*.

Industriell hergestellte Produkte bestehen i.d.R. aus einer Vielzahl von Einzelteilen, die zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlichen Verfahren produziert werden [LOT92]. Die Montage hat dabei die Aufgabe, diese Einzelteile in einer bestimmten Reihenfolge

und Zeit zu einem Produkt höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen irreversibel miteinander zu verknüpfen [LOT92, SCM92, WAR75]. Dabei sind viele Wechselwirkungen zu berücksichtigen, denn der Zusammenbau von mechanischen, elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Komponenten in der Montage führt zu einer starken Vernetzung der einzelnen Arbeitsvorgänge.

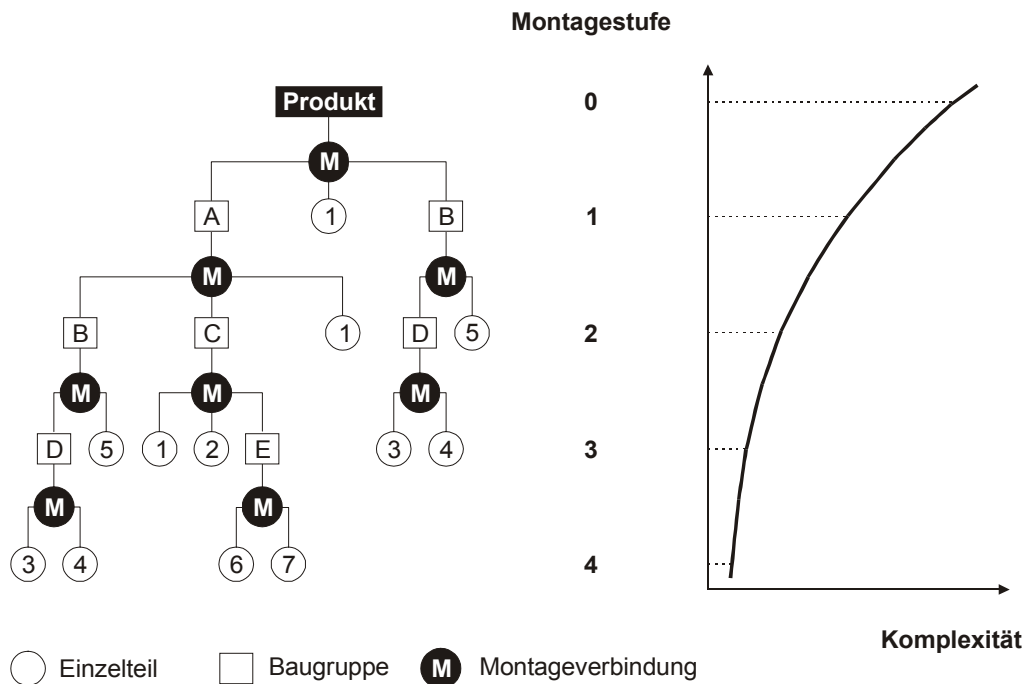


Bild 2.2 Prinzip der Montage

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 [KAL87].

2.1.2.2 Ressource

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 [FIR96a, MCH95]. Unter *Betriebsmittel* werden alle Anlagen, Geräte und Einrichtungen verstanden, die der betrieblichen Leistungserstellung dienen bzw. zur Durchführung der Montageprozesse erforderlich sind. Zu den Betriebsmitteln gehören Organisationsmittel (z.B. DV-Anlage, Kartei, Kopiergerät), Innenausstattungen (z.B. allgemeine Möbel, Leuchten), Ver- und Entsorgungsanlagen (z.B. Stromverteilungsanlage; Filteranlage), Fertigungsmittel (Maschinen, Werkzeuge, Zeichnungen), Mess- und Prüfmittel (z.B. Maßstab, Fühlerlehre), Fördermittel (z.B. Gabelstapler, Elektrohängebahn) sowie Lagermittel (Regal, Lager-

kasten) [VDI78]. Im engeren Sinne bezieht sich Material auf das Teil bzw. Werkstück. [MAI92, MEI95].

Im Rahmen der Belegungsplanung ist „Ressource“ eine allgemeingültige Bezeichnung für alle Arten von Gütern, die Engpässe werden können. Es muss zwischen konsumierbaren und nicht konsumierbaren Ressourcen unterschieden werden. Konsumierbare Ressourcen werden unwiederbringlich verbraucht, wie z.B. jede Art von Material. Nicht-konsumierbare Ressourcen werden nur verübergehend in Anspruch genommen. So bearbeiten z.B. Maschinen nacheinander Arbeitsvorgänge unterschiedlicher Aufträge [GUT83].

Sind bei der Durchlaufterminierung nicht nur die eingeschränkt verfügbaren Maschinen, auf denen die einzelnen Aufgaben der Aufträge abzuarbeiten sind, zu berücksichtigen, sondern auch Abhängigkeiten von weiteren Ressourcen, liegt ein *Multiresourcen-Problem* vor. Derartige eingeschränkt verfügbare und nicht konsumierbare Ressourcen können Werkzeuge, Fördermittel, Personal und ähnliches sein. Es kann sich aber auch um konsumierbare Ressourcen handeln, deren Verbrauch eingeschränkt werden soll [GES98]. Zur Ausführung eines Arbeitsvorgangs ist somit also die gleichzeitige Verfügbarkeit mehrerer Ressourcen sicherzustellen [ESS96, LEH92].

Als *Multiresourcen-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 Montagstation, die zu einer Gruppe technologisch ähnlicher Stationen gehört, mit unterschiedlichen Vorrichtungen bearbeitet werden. Die Optimierung des Ressourceneinsatzes bewirkt dabei, dass die Durchführung der Arbeitsvorgänge unter rationellen und zeitnahen Aspekten erfolgt [SCI91].

Im Gegensatz zur Fertigung, wo meist eine feste Beziehung zwischen Maschinen, Fläche sowie Bedienern besteht, werden die Zuordnungen in der Montage je nach Bedarf hergestellt [KON89]. Ebenso können Material und Informationen in der Fertigung leichter als Einheit aufgefasst werden, da der Arbeitsplan und die Zeichnung das Werkstück i.d.R. durch die Werkstatt begleiten [EVE89], während in der Montage verschiedene Materialien zu unterschiedlichen Prozessschritten benötigt werden. 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 [LEH92]. So liegen aufgrund der wechselnden Situationen in der Montage ständig sich verändernde, d.h. dynamische Randbedingungen vor. Dieses wird dadurch verstärkt, dass die Kom-

bination der Ressourcen in der Montage im Gegensatz zur Fertigung auftragsunabhängig vorgenommen wird [LEH92].

Sind die zu montierenden Produkte mehrstufig, ergeben sich verzweigte Ablaufstrukturen. Viele Teile und Baugruppen können zeitlich parallel zusammengefügt werden [GRO90]. Im Gegensatz dazu findet man bei der mechanischen Bearbeitung eines Produktes sowohl in der Werkstattfertigung als auch im flexiblen Fertigungssystem technologisch bedingt lineare Vorgangsfolgen vor [EVE89]. So wird z.B. eine Welle zuerst gesägt, dann gedreht, gehärtet und geschliffen. Die Parallelität der Arbeitsvorgänge in der Montage führt zu vernetzten Strukturen [LEH92], welche die Belegungsplanung der notwendigen Ressourcen zusätzlich erschwert.

2.1.2.3 Auftragsabwicklung

Zur Abgrenzung des Einsatzbereiches des zu entwickelnden Planungsverfahrens ist es unumgänglich, das betrachtete Montageprinzip hinsichtlich seiner Merkmale und Eigenschaften differenziert zu betrachten. Hierzu wird die Merkmalausprägung der Auftragsabwicklung anhand einer Typologiematrix (Tabelle 2.1) verdeutlicht [in Anl. BÜD91, in Anl. FIR96b, in Anl. FIR97, in Anl. HAC89, in Anl. HIR90]. Die gekennzeichneten Merkmalausprägungen charakterisieren die Struktur der Auftragsabwicklung, für die das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Belegungsplanung geeignet ist.

Eine Montage mit Multiressourcen ist i.d.R. sehr kapitalintensiv. Entsprechende Investitionen werden immer dann getätigt, wenn größere Stückzahlen mit hoher Sicherheit von einem oder mehreren Kunden abgenommen werden. Die zugehörige Bindung der Produktion an den Absatzmarkt wird durch die Art der *Auftragsauslösung* gekennzeichnet. Maßgebendes Kriterium zur Differenzierung der Merkmalausprägungen ist die Art der Primärbedarfsauslösung. Die Initiierung der Auftragsabwicklungsaktivitäten wird in der Multiressourcen-Montage am ehesten durch die Produktion auf Bestellung innerhalb von Rahmenverträgen erfolgen.

Die technische Auftragsabwicklung wird in hohem Maße geprägt durch den organisatorischen Aufwand für die Erfüllung des Kundenauftrages. Dieser ist um so größer, je geringer der Standardisierungsgrad der Erzeugniskonstruktion und je größer der Kundeneinfluss auf die Gestaltung des Erzeugnisses ist. Einzelaufträge weisen häufig einen hohen Anteil 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 wird üblicherweise nach erstmaliger Vereinbarung eines Entwicklungsauftrages einmalig ein konstruktiver Aufwand entstehen, der bei den anschließenden Rahmenaufträgen und Abrufen vernachlässigt werden kann. So kann nach der Konstruktion des kundenspezifischen Produktes dies als Standardprodukt

aufgefasst werden. Dementsprechend umfasst das *Erzeugnisspektrum* sowohl typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten als auch Standarderzeugnisse mit und ohne Varianten. Hierbei sind die Montagevarianten dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit der Kundenaufträge unterschiedliche Montagearbeiten ausgeführt werden müssen und somit ein unterschiedlicher Ressourcenbedarf entsteht.

Der konstruktionsbedingte Aufbau der Erzeugnisse wird durch die *Erzeugnisstruktur* gekennzeichnet [SCO80]. Die Entscheidungssituation in der Montagesteuerung ist stark durch dieses Merkmal geprägt. Maßgebende Kriterien zur Differenzierung sind zum einen die Strukturtiefe und zum anderen die Strukturbreite. Im betrachteten Fall handelt es sich um mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur oder um geringteilige Erzeugnisse. Zu bemerken ist, dass die Montage mehrteiliger Produkte vernetzte Ablaufstrukturen [GRO90] und eine Vielzahl unterschiedlicher zu koordinierender Ressourcen aufweist [LEH92].

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, da die Rahmenverträge eine ausreichende Planungsgenauigkeit gewährleisten. Entstehen die Erzeugnisse durch Kombination von Komponenten nach dem Baukastenprinzip, kann der *Komponentenbedarf* heuristisch auf Basis von Absatzprognosen oder deterministisch anhand der eingehenden Kundenaufträge ermittelt werden. In diesem Fall ist der Auftragsdurchlauf häufig in Vor- und Endmontage geteilt.

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. Der Fremdbezug dieser Baugruppen kann abhängig vom Produkt sowohl unbedeutend sein als auch in größerem Umfang vorgenommen werden [FIR96b], welches die *Beschaffungsart* charakterisiert.

Die *Bevorratung* wird entweder direkt auf Erzeugnisebene oder auf unteren Strukturebenen des Erzeugnisses vorgenommen. Die Bevorratung von Erzeugnissen kommt durch die wirtschaftliche Losgröße zustande, die oft höher festgelegt ist, als die vom Auftraggeber mittels Abrufen spezifizierte Menge, so dass die verbleibende Restmenge eingelagert wird [FIR96b].

Tabelle 2.1 Merkmalausprägung des betrachteten Montageprinzips (in Anl. FIR)

Merkmale der Auftragsabwicklung		Merkmalausprägung 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	mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	mehrteilige 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						
5	Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert	teilweise auftragsorientiert / teilweise periodenorientiert	teilweise auftragsorientiert / teilweise periodenorientiert	periodenorientiert						
6	Beschaffungsart	weitestgehender Fremdbezug	Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug in größerem Umfang	weitestgehend interne Beschaffung						
7	Bevorratung	kaum Bevorratung von Bedarfpositionen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfpositionen 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	mittlerer Strukturierungsgrad	geringer Strukturierungsgrad						
11	Kundenänderungseinflüsse während der Produktion	viele Änderungseinflüsse	gelegentliche Änderungseinflüsse	gelegentliche Änderungseinflüsse	wenige Änderungseinflüsse						

Merkmalecharakteristik des betrachteten Montageprinzips

Zur Kennzeichnung der Auftragsabwicklung in der Multiressourcen-Montage ist es ebenfalls zweckmäßig, die *Montageart* durch eine Differenzierung anhand der Produktionsstückzahlen zu charakterisieren. Für den untersuchten Planungsbereich sind einerseits die Einzel- und Kleinserienmontage und andererseits die Serienmontage relevant. Im Falle der Einmalmontage eines komplexen Produktes ist aus Gründen des Aufwandes zur Datenbereitstellung der Einsatz der Belegungssystematik nicht vorgesehen. Vielmehr hat sie ihren Schwerpunkt bei einer ausreichenden Wiederholhäufigkeit der Erzeugnisse.

Die Form der räumlichen Zusammenfassung von Arbeitskräften und Betriebsmitteln zu montagetechnischen Einheiten wird als *Organisationsform* der Montage bezeichnet. Die Organisationsformen können nach dem Bewegungszustand der Montageobjekte in die beiden Ablaufkategorien *Verrichtungsprinzip* mit einer stationären Anordnung der Montageobjekte an örtlich konzentrierten Stationen und *Fließprinzip* mit während des Arbeitsprozesses durch mehrere auseinanderliegende Stationen bewegten Montageobjekte unterteilt werden. Eine weitere Unterteilung dieser Organisationsformen ist durch die Betrachtung der Arbeitsplätze, die ebenfalls entweder bewegt werden oder stationär bleiben, möglich (Bild 2.3). Somit ergeben sich die Grundformen Baustellen-, Gruppen-, Reihen- und Fließmontage [in Anl. EVE89, in Anl. HAC89, MIE72, in Anl. SPU86].

Bei einem ortsfesten Montageobjekt und einem stationären Arbeitsplatz spricht man von einer *Baustellenmontage*. Ist der Arbeitsplatz bewegt und das Montageobjekt stationär handelt es sich um eine *Gruppenmontage*. Zur Entkopplung vom Takt des Produktionsflusses wird in der *Reihenmontage* mit Varianten das *Nebenflussprinzip* eingesetzt, da durch die Ausschleusung aus dem Hauptmaterialfluss große Taktzeitunterschiede beherrscht werden können. In dieser Organisationsform wird die Montage arbeitsteilig an mehreren Stationen ausgeführt und das Montageobjekt muss zwischen diesen transportiert werden. Auch wenn die Stationen in der Reihenfolge des Montagefortschritts angeordnet sind, wird bei der Reihenmontage bei grob differenzierter Arbeitsteilung weder eine Taktzeit vorgeben noch der Materialfluss zeitlich festgelegt. Ebenso können während des Montagedurchlaufs bei Varianten einzelne Stationen übersprungen oder auch im Sinne einer Rückführung mehrfach angesteuert werden. Als *Fließmontage* wird dagegen bezeichnet, wenn das Montageobjekt während des Montagevorganges in starren Schritten oder kontinuierlich bewegt wird. Hier wird das *Hauptflussprinzip* durch das klassische Fließband mit starrer Verknüpfung und hohen Stückzahlen repräsentiert.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Belegungsplanung in einem Montageprinzip, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die Montageprodukte eine generelle Arbeitsplanstruktur aufweisen, die Aufträge die Montagestationen in unterschiedlicher Arbeitsvorgangsfolge durchlaufen und für die Durchführung der Arbeitsvorgänge eines

Auftrags mehrere Ressourcen alternativ geeignet sein können. Dieses Montageprinzip bedingt i.d.R. die Organisationsform der Reihenmontage. Ein weiteres Merkmal dieses Montageprinzips ist häufig der parallele Einsatz mehrerer Arbeitskräfte an den Stationen, um bei ausreichender Stückzahl das Prinzip der Fließmontage zu realisieren. Die Zykluszeiten solcher Reihenmontagen liegen oftmals im Bereich von mehreren Stunden bzw. Tagen [EVE92b].

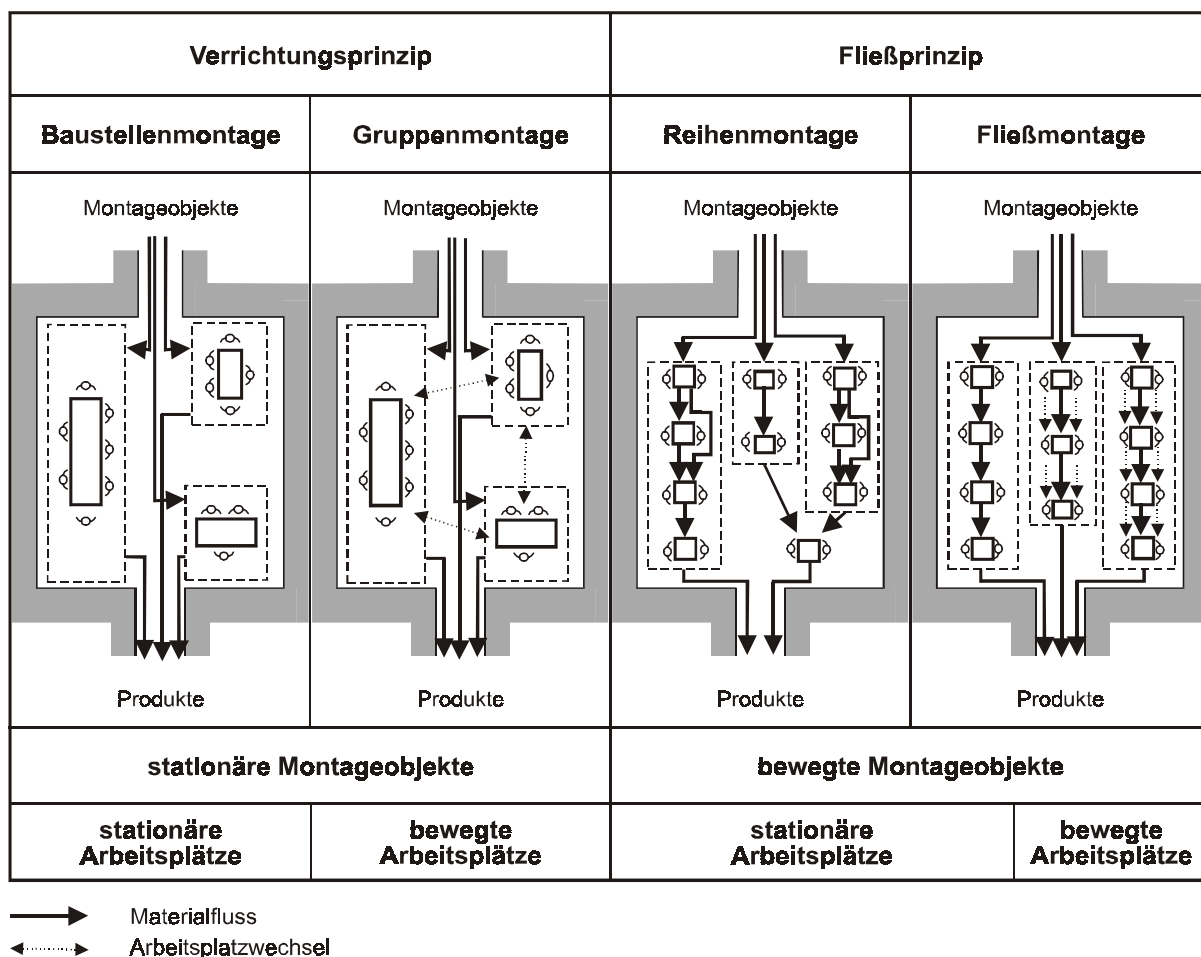


Bild 2.3 Organisationsformen in der Montage (in Anl. *Hackstein*, in Anl. *Eversheim*)

Die Abläufe in der Montage stellen sich als Netzstrukturen dar. D.h. es gibt sowohl Aktivitäten, die gleichzeitig bearbeitet werden können, als auch solche, die aus technologischen Gründen sequentiell abgewickelt werden müssen. Da die Aufträge häufig auf die gleichen Ressourcen zugreifen, sind die Netzstrukturen über diese Kapazitäten untereinander gekoppelt. Die Konsequenz ist, dass jede Veränderung eine Vielzahl von Folgeeffekten nach sich zieht [LEH92]. Die *Montagestruktur* hat dabei eine große Auswirkung auf die Arbeitsteilung bzw. die Kapazitätsplanung im System. So bedingt ein hoher Automatisierungsgrad die Montageartteilung mit einer sequentiellen Durchführung

unterschiedlicher Montageverrichtungen. Dagegen ist die Flexibilität bei der Mengenteilung mit einer parallelen Durchführung gleicher Montageverrichtungen größer [nach HEC95, VDI92a]. Das hier betrachtete Montageprinzip ist dadurch gekennzeichnet, dass es einen geringen bis mittleren Strukturierungsgrad besitzt, der i.d.R. 20 aufeinanderfolgende Arbeitsvorgänge im Montageprozess nicht überschreitet [vgl. SCO80]. Die durchschnittliche Anzahl aufeinanderfolgender Montageabschnitte sowie ihre Parallelität sind somit begrenzt.

Die Konstruktion und die Arbeitsplanung werden vorwiegend in der Vorbereitungsphase zu einem Rahmenauftrag tätig. Aufgrund des vorliegenden Seriencharakters werden dort in entscheidendem Maße die Herstellungskosten des Erzeugnisses festgelegt. Die *Änderungseinflüsse* des Kunden sind bis zu diesem Zeitpunkt vorhanden, nehmen aber nach dem Vertragsabschluss ab und sind während der Montage unbedeutend [nach FIR96b].

Geeignete Auftragsfamilien für das in dieser Arbeit behandelte Belegungsproblem sind entsprechend der beschriebenen Merkmalcharakteristik typisch für die Montage von Produktionsunternehmen, bei denen die Auslösung des Primärbedarfs aufgrund längerfristigen Vereinbarungen für eine größere Zahl von Lieferungen erfolgt. Dieses Montageprinzip ist repräsentativ für viele Automobilzulieferer und Systemlieferanten. 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.

2.1.2.4 Flexibilität

Eine weitere wichtige Spezifikation besteht in der Flexibilität, die im wesentlichen die Planungskomplexität des betrachteten Montageprinzips bestimmt.

Flexibilität bezeichnet die Fähigkeit von Menschen oder Systemen, sich im Verhalten und Erleben wechselnden Situationen rasch anzupassen [DUD00]. In der Montage bzw. in Montagesystemen kann die Flexibilität als die Anpassfähigkeit des Systems an die Änderungen bei den zu produzierenden Produkten, den Produktionsanforderungen sowie den Produktionsbedingungen definiert werden [SCM92]. Bei interner Flexibilität bzw. Einsatzflexibilität lässt sich ein Montagesystem durch einfaches Umprogrammieren der bereits auf die Produktionsänderung vorbereiteten Anlagen anpassen. Externe Flexibilität bzw. Anpassflexibilität bedeutet, dass die Anpassung durch einen Eingriff über die Systemgrenzen hinweg erfolgt, also z.B. durch den Austausch eines Montagewerkzeuges [BUL86, FIC96, SCM92].

In der Multiressourcen-Montage stellt die Flexibilität der Ressourcen und Abläufe hohe Ansprüche an die Planung und Steuerung, da die Anzahl der Zuordnungs- und Reihenfolgemöglichkeiten erheblich ist. Grundsätzlich können bei diesem

Montageprinzip quantitative, qualitative und zeitliche Flexibilitätsarten unterschieden werden [in Anl. BAU96, in Anl. DIE95, REF90, in Anl. STE95, in Anl. WIL98].

Die quantitative Flexibilität bezieht sich auf veränderte Produktionsmengen und beinhaltet folgende Betrachtungsgegenstände:

- Die *Produktmixflexibilität* beschreibt die Möglichkeit, einzelne Produkte individuell nach Bedarf herzustellen. Sie ist um so größer, je mehr unterschiedliche Produkttypen ohne Umrüsten gleichzeitig hergestellt werden können.
- Die *Produktionsmengenflexibilität* beschreibt die Fähigkeit, ein Montagesystem auch bei Schwankungen der Produktionsmengen wirtschaftlich zu betreiben. Diese Flexibilitätsart befähigt zur Reaktion auf Veränderungen der Marktanforderungen.

Eine qualitative Flexibilität wird durch Produktumstellungen, neue Werkstoffe oder neue Anlagen erforderlich. Betrachtungsgegenstände sind dabei:

- Die *Stationsflexibilität* beschreibt die Möglichkeit, wechselnde Montageaufgaben durchzuführen. Sie ist um so größer, je kleiner der Aufwand ist, der entsteht, wenn von einem Montagespektrum auf ein anderes umgestellt wird. Im wesentlichen bestimmen die Zeiten für Werkzeugwechsel, Wechsel der Spannvorrichtung und bei automatisierten Systemen das Laden der NC-Programme die Stationsflexibilität. Die Produktmixflexibilität wächst mit der Stationsflexibilität.
- Die *Produktflexibilität* bezieht sich auf die Möglichkeit, neue Produkttypen zu montieren, um auf veränderte Marktforderungen schnell und wirtschaftlich reagieren zu können.
- Die *Durchlaufflexibilität* bezieht sich auf die Reaktionsfähigkeit bei Ressourcenausfällen, d.h. auf die Geschwindigkeit mit der die Montage des aktuellen Montagespektrums fortgesetzt werden kann. Sie wird ermöglicht durch sich ersetzende Montageressourcen und vorhandene Alternativarbeitspläne, da ein Arbeitsvorgang so auf mehr als einer Station durchgeführt werden kann.

Unter zeitlicher Flexibilität ist die Unabhängigkeit von Tätigkeiten und Arbeitsvorgängen innerhalb eines Produktionssystems zu verstehen. Der zeitliche Aspekt ist dabei die Dauer, bis zu der nach einer Veränderung des Systems die volle Betriebsbereitschaft wieder hergestellt ist. Gegliedert sind die Betrachtungsgegenstände dabei wie folgt:

- Die *Erweiterungsflexibilität* beschreibt die Möglichkeit, ein bereits existierendes System einfach und modular zu erweitern. Z.B. kann ein erkannter Engpass durch die Erweiterung um entsprechende Stationen beseitigt werden.
- Die *Arbeitsplanflexibilität* bezieht sich auf die Möglichkeit, einen Auftrag nach mehreren technologischen Vorgangsfolgen zu fügen. Gibt es einen derartigen Frei-

heitsgrad, so kann im Systembetrieb abhängig vom aktuellen Systemzustand der nächste Arbeitsvorgang ausgewählt werden.

Die Produktmix-, Stations-, Durchlauf- und Arbeitsplanflexibilität haben unmittelbaren Einfluss auf die Belegungsplanung, da sie kurz- und mittelfristige Planungsaktivitäten sowie Steuerungsaktivitäten erfordern. Im Gegensatz dazu werden die Produktionsmengen-, Produkt- und Erweiterungsflexibilität eher in langfristigen Planungen berücksichtigt.

Es wird schnell ersichtlich, dass je höher die Produktmix-, Stations-, Durchlauf- und Arbeitsplanflexibilität ist, die Planungs- und Steuerungskomplexität stark zunimmt. Insbesondere die Stationsflexibilität erfordert in der Planungsphase die Berücksichtigung einer großen Anzahl von Planungsalternativen. Welcher Auftrag jedoch tatsächlich an welcher Station montiert wird, hängt von den zum spezifischen Zeitpunkt vorhandenen Ressourcen, wie freie Stationskapazitäten, verfügbaren Spannvorrichtungen und erstellten NC-Programmen, ab. Die im Rahmen der Produktmixflexibilität mögliche bedarfsorientierte Montage sehr kleiner Losgrößen verkomplizieren die Belegungsplanung zusätzlich. Die Durchlaufflexibilität hat zur Folge, dass jeder Auftrag das Montagesystem auf alternativen Routen durchlaufen kann. Somit besteht zwischen allen geeigneten Ressourcen Wahlfreiheit. Als Voraussetzung für die Stations-, Produktmix- und Durchlaufflexibilität vergrößert die Arbeitsplanflexibilität den Grad der Komplexität nur, wenn auf gleichen Ressourcen alternative Arbeitsvorgänge gewählt werden können.

Insgesamt existiert in der Multiressourcen-Montage ein großer Entscheidungsspielraum, der mit Hilfe herkömmlichen Planungsverfahren kaum zu bewältigen ist. Das Ergebnis der Belegungsplanung hat unmittelbaren Einfluss auf die Nutzung des vorhandenen Flexibilitätspotentials und somit auf den Grad der logistischen Zielerreichung.

2.2 Verfahren für die Belegungsplanung

Die Vielzahl der heute bekannten Verfahren für die Belegungsplanung lassen sich in optimierende Verfahren, konventionelle Verfahren und Planungsverfahren der künstlichen Intelligenz unterteilen (Bild 2.4). *Optimierende Verfahren* verwenden mathematische Ansätze, um Belegungspläne zu erstellen. Zu den *konventionellen Planungsverfahren* zählen die Prioritätsregeln und die konventionellen Heuristiken. Zusammen mit den optimierenden Planungsverfahren gehören diese Verfahren zu den Wissenschaften des *Operations Research* (Optimalplanung) [SCR92, ZIM86], die sich wiederum der *Simulation* als unterstützendes Verfahren bedienen. Neuere Ansätze basieren auf den *Verfahren der künstlichen Intelligenz*, mit deren Hilfe versucht wird, menschliches Entscheidungsverhalten zu simulieren. Diese Verfahren befinden sich überwiegend noch im Forschungsstadium [FIS99]. Eine konkrete Einteilung der Verfahren ist allerdings nicht immer unstrittig, da die Definition geeigneter Ordnungskriterien sehr schwierig ist

[MER95, SCU95]. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Planungsverfahren vorgestellt und ihr Einsatz im Rahmen der Belegungsplanung beschrieben.

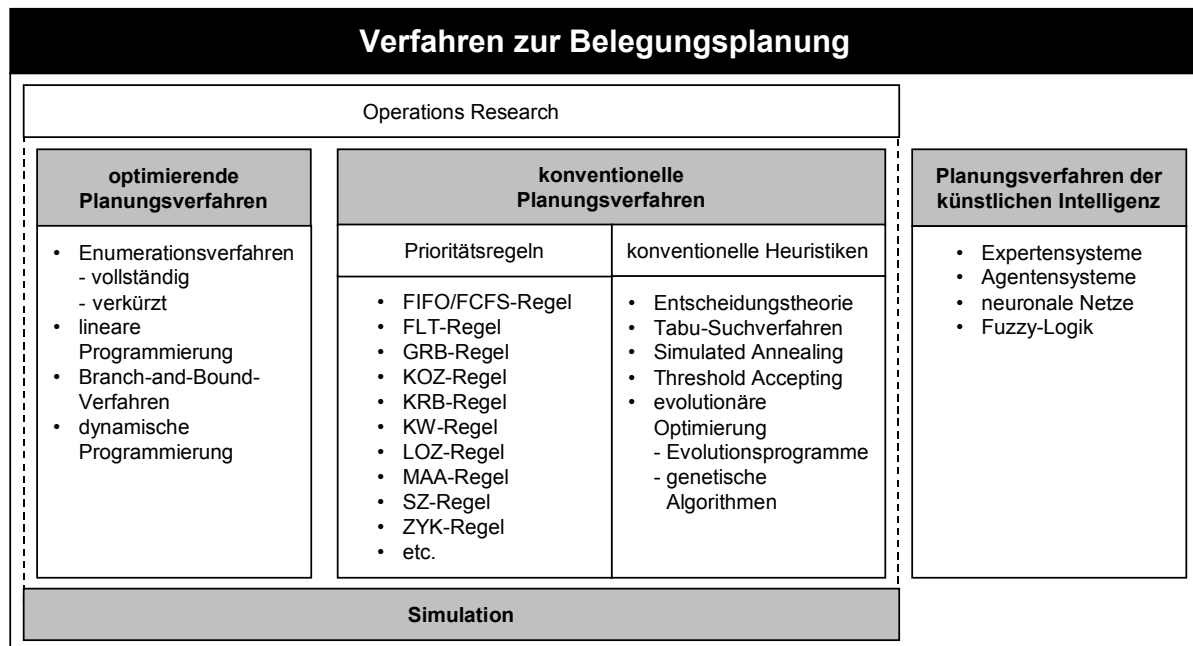


Bild 2.4 Elementare Planungsverfahren zur Belegungsplanung

2.2.1 Optimierende Planungsverfahren

Enumerationsverfahren

Alle optimierenden Planungsverfahren garantieren die optimale Lösung für genau ein gegebenes Ziel. Entsprechend erzeugen *Enumerative Methoden* alle möglichen Lösungen eines Ressourcenbelegungsproblems und eliminieren dabei diejenigen, die sich als nicht optimal erweisen [HER96].

Mit Hilfe der *vollständigen Enumeration* werden alle zulässigen Maschinenbelegungspläne ermittelt und dargestellt. Sie ist allerdings aufgrund ihrer langen Berechnungszeiten für die Belegungsplanung nur von theoretischem Interesse [SCU95], da z.B. bei einer Berechnung mit 100.000 Ablaufplänen pro Sekunde die Wartezeit auf die Lösung für ein zehn Aufträge und zehn Maschinen Problem $1,2 * 10^{53}$ Jahre betragen würde. Anwendbar ist die vollständige Enumeration nur in Spezialfällen von Flow-Shop-Problemen, so z.B. zur dezentralen Anlagenbelegungsplanung.

Zur Verringerung des Rechenaufwandes wurden die Verfahren der *verkürzten Enumeration* entwickelt. Durch sie wird die Menge der zulässigen Lösungen solange in Untermengen aufgeteilt, bis jede Menge nur noch eine Lösung enthält. Diese Aufteilung lässt sich durch einen Lösungsbaum repräsentieren, in dem jede Verzweigung jeweils eine

Menge von zulässigen Lösungen darstellt, wie z.B. Maschinenbelegungen oder Prozesse, und seine Kanten den Grenzwert der Zielfunktion repräsentieren. An jedem Knoten wird jeweils nur die Verzweigung ausgewählt, die einen optimalen Wert für die aktuelle Zielgröße zu ergeben verspricht. Durch das Hinzunehmen jeweils eines weiteren Lösungselementes wird der Lösungsaufbau so schrittweise generiert [STA93].

Lineare Programmierung

Die *lineare Programmierung* ist im Bereich der Produktionsplanung ein sehr verbreitetes Verfahren, in dem eine oder mehrere Zielfunktionen aufgestellt werden, die unter Berücksichtigung von Restriktionen (linearen Nebenbedingungen) entweder maximiert oder minimiert werden [HIL88]. Das klassische Anwendungsgebiet der linearen Programmierung ist die gleichzeitige Modellierung und Optimierung der hinsichtlich ihres Planungshorizontes und erforderlichen Detaillierungsgrades sehr unterschiedlichen Phasen der Programmplanung, der Losgrößenplanung und der Ablaufplanung. So werden z.B. mit Hilfe einer linearen Funktion und einer meist kostenorientierten Zielgröße die für einen betrachteten Planungshorizont herzustellenden Gesamtmengen aller Erzeugnisse bestimmt [MÜL92]. Darüber hinaus wird die lineare Programmierung nur für die Formulierung verschiedener, einfacher Belegungsprobleme angewendet [BEC91].

In der gleichzeitigen Optimierung ist auch der wesentliche Kritikpunkt an der linearen Programmierung begründet. Zwischen den heterogenen Teilproblemen existieren nämlich viele Interdependenzen, welche die ganzheitliche Betrachtung des Problems erschweren. Sie führen zudem zu einer Vielzahl von Nebenbedingungen und Entscheidungsvariablen, die eine exakte Lösung dieser Modelle nahezu unmöglich machen [KUR99].

Branch-and-Bound-Verfahren

Grundgedanke des *Branch-and-Bound-Verfahrens* ist es, eine Lösungsmenge aufzuspalten und daraus Teilmengen anhand von Grenzwerten, sogenannten „Bounds“, zu identifizieren, die keine optimale Lösung enthalten können. Im Laufe des Prozesses wird durch das „Branching“ nur noch in erfolgversprechende Teilmengen verzweigt. Aufgrund dieser Verzweigungstechnik wird das Branch-and-Bound-Verfahren zu den Entscheidungsbaumtechniken gezählt. Keines der Branch-and-Bound-Verfahren hat jedoch für die Belegungsplanung praktische Bedeutung erlangt [KIM93, SCU95, VAS93].

Dynamische Programmierung

Als weiteres, ebenfalls zu den Entscheidungsbaumtechniken zählendes Verfahren, lässt sich die *dynamische Programmierung* zum Lösen des Reihenfolgeproblems innerhalb der Belegungsplanung nutzen. Das Planungsproblem wird in Entscheidungsstufen zerlegt, wobei Einzelentscheidungen einer Stufe in Abhängigkeit von der vorher-

gehenden zu sehen sind, und die Entscheidung auf der betrachteten Stufe entsprechend eingeschränkt ist [LIT92]. Aufgrund des Rechenaufwandes können allerdings nur spezielle Reihenfolgeprobleme gelöst werden [SCU95].

2.2.2 Konventionelle Planungsverfahren

Im Rahmen der konventionellen Methoden werden einfachere Planungsverfahren verwendet, die bestimmte Vorgehensregeln definieren, welche hinsichtlich einer Zielfunktion als erfolgsversprechend erscheinen. Grundsätzlich kann in Prioritätsregeln und konventionelle Heuristiken unterschieden werden.

2.2.2.1 Prioritätsregeln

Prioritätsregelverfahren oder auch Reihenfolgeregeln sind i.d.R. leicht anwendbar, garantieren jedoch nicht die Erreichung eines Optimums. Es werden durch die Wahl von Prioritätsregeln Einschränkungen vorgenommen, die das zu betrachtende Problem reduzieren. Die Prioritätsregeln lassen sich in Abhängigkeit der in einen Prioritätswert einfließenden Informationen in lokale und globale sowie in statische und dynamische Prioritätsregeln unterscheiden. Dabei verarbeiten *lokale Prioritätsregeln* ausschließlich Informationen über die zu belegende Ressource, während *globale Prioritätsregeln* aus ressourcenübergreifenden Informationen generiert werden. *Statische Prioritätsregeln* sind im Gegensatz zu *dynamischen Prioritätsregeln* unabhängig vom momentanen Systemzustand.

Bei dem Einsatz von Prioritätsregelverfahren zur Planung des Durchflusses von Aufträgen durch ein Produktionssystem wird das betrachtete System als Warteschlangennetzwerk aufgefasst, welches durch mehrere einstufige Warteschlangensysteme gebildet wird. Ein Warteschlangensystem besteht aus einer Zugangsquelle, einem Warteraum und einem Bedienungssystem. In dem Warteraum werden die Werkstücke von dem Transportsystem nach dem Transport und vor der Bearbeitung abgelegt. Das Bedienungssystem besteht aus einem oder mehreren Bedienstationen und wird aus dem Warteraum mit Werkstücken versorgt [nach DOM90a, nach TEM92b]. Trifft ein Auftrag an der Bedienstation, an der es als nächstes bearbeitet werden soll, ein und warten bereits mehrere Aufträge auf die Bearbeitung an derselben Bedienstation, so wird der neu eintreffende Auftrag in dem der Bedienstation zugehörigen Warteraum in die bestehende Warteschlange eingereiht. Anhand einer Prioritätsregel wird für jeden wartenden Auftrag ein Rangwert ermittelt. Die Aufträge werden in Abhängigkeit von der gewählten Prioritätsregel in aufsteigender oder absteigender Reihenfolge der ihnen zugeordneten Rangwerte bearbeitet.

Einige in der betrieblichen Praxis verwendeten einfache lokale Prioritätsregeln sind [nach BER84, nach HAC89, nach HOI93]:

- **FIFO-Regel (first in – first out)/FCFS-Regel (first come – first serve):**
Die Aufträge werden in der Reihenfolge ihres Eintreffens an der Bedienstation bearbeitet.
- **FLT-Regel (frühester Liefertermin):**
Die Aufträge werden in der aufsteigenden Reihenfolge der ihnen zugeordneten Liefertermine bearbeitet.
- **GRB-Regel (größte Restbearbeitungszeit):**
Die Aufträge werden in der absteigenden Reihenfolge der kumulierten Bearbeitungszeiten, die bis zu ihrer Fertigstellung noch verbleiben, bearbeitet.
- **KOZ-Regel (kürzeste Operationszeit):**
Die Aufträge werden in der aufsteigenden Reihenfolge ihrer Bearbeitungszeiten an der betrachteten Bedienstation bearbeitet.
- **LOZ-Regel (längste Operationszeit):**
Die höchste Priorität erhält der Auftrag in der Warteposition, der die längste Bearbeitungszeit an dem betrachteten Arbeitsplatz erfordert.
- **MAA-Regel (meiste noch auszuführende Arbeitsgänge):**
Die Aufträge werden in der absteigenden Reihenfolge der Anzahl noch an ihnen durchzuführender Arbeitsgänge bearbeitet.
- **SZ-Regel (Schlupfzeit):**
Die Aufträge werden in der aufsteigenden Reihenfolge der Differenz zwischen der verbleibenden Zeit bis zum Fertigstellungstermin und der kumulierten Restbearbeitungszeit bearbeitet.

Die FIFO- bzw. FCFS-Regel ist eine statische Prioritätsregel, da der einmal zugewiesene Rangwert im Zeitablauf unverändert bleibt. Die anderen genannten Regeln sind dynamisch, da sich bei ihnen der Rangwert jeweils zum Zeitpunkt des Eintreffens eines neuen Auftrags ändern kann.

Besteht die Möglichkeit, einen Arbeitsvorgang in einem Warteschlangensystem an mehr als einer Bedienstation durchzuführen, erfolgt die Auswahl der Bedienstation bzw. die Auswahl der einer Bedienstation zugeordneten Warteschlange ebenfalls über Prioritätsregeln.

Einige in der betrieblichen Praxis verwendeten einfache globale Prioritätsregeln sind [nach TEM91]:

- **KRB-Regel (kürzeste Restbearbeitungszeit):**
Ein eintreffender Auftrag wird der Warteschlange zugeordnet, welche die kürzeste kumulierte Restbearbeitungszeit aller bereits wartenden Aufträge aufweist.

- **KW-Regel (kürzeste Warteschlange):**
Ein eintreffender Auftrag wird der Warteschlange zugeordnet, welche die kleinste Anzahl zu bearbeitender Aufträge enthält.
- **ZYK-Regel (zyklische Auswahl):**
Eintreffende Aufträge werden den Warteschlangen in einer fest vorgegebenen Reihenfolge zugeordnet.

Die Auswahl einer bestimmten Prioritätsregel oder die Kombination von verschiedenen Prioritätsregeln orientiert sich an den jeweiligen Zielen einer Produktionsplanung und -steuerung [KER95]. Prioritätsregeln werden überall dort eingesetzt, wo Aufträge zu einem Betrachtungszeitpunkt um dieselben Ressourcen konkurrieren. Prioritätsregeln werden sowohl in PPS-Systemen als auch in Fertigungsleitständen z.B. zur Bestimmung konkreter Auftragsreihenfolgen bei der Belegungsplanung eingesetzt. Bei der belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA), die in einigen PPS-Systemen verwendet wird, basiert der Prioritätswert z.B. auf den Anfangsterminen der Fertigungsreihenfolge. Die Aufträge werden nach diesen Terminen sortiert und so in eine Reihenfolge gebracht. Gemäß dieser Reihenfolge werden die Aufträge bei dem Freigabeverfahren berücksichtigt [WIE87, WIE98b].

2.2.2.2 Konventionelle Heuristiken

Das Problem der langen Rechenzeiten und des vergleichsweise hohen Speicherbedarfes beim Einsatz von optimierenden Methoden führte zu der Entwicklung von Heuristiken. *Heuristische Verfahren* sind Suchverfahren, die von empirisch-statistischen Beobachtungen Gebrauch machen, und enthalten bestimmte Vorgehensregeln zur Lösungsfindung, die hinsichtlich des angestrebten Zieles unter Berücksichtigung der Problemstruktur erfolgversprechend erscheinen. Mit heuristischen Verfahren lassen sich allerdings lediglich Näherungslösungen erreichen.

Entscheidungstheorie

In der *Entscheidungstheorie* wird bei der Auswahl geeigneter Auftrags-Ressourcen-Kombinationen ein dreistufiger Prozess durchlaufen. Zunächst werden die Entscheidungsalternativen bestimmt, daraufhin ihre Konsequenzen nach einem vorgegebenen Kriterium bewertet und abschließend die beste Alternative ausgewählt [vgl. KAN93]. Da aus kombinatorischen Gründen nicht alle möglichen Alternativen betrachtet werden können, beschränkt sich das Verfahren darauf, jeweils einen Auftrag unmittelbar einzuplanen und für alle übrigen, nicht unmittelbar eingeplanten Aufträge, den zu erwartenden Fertigstellungstermin zu schätzen.

Tabu-Suchverfahren

Das *Tabu-Suchverfahren* wählt aus allen in der Umgebung des aktuellen Belegungsplanes liegenden Lösungen den besten Nachbarn aus [nach GLO86]. Eine sogenannte Tabu-Liste vermerkt die letzten Nachbarschaftsschritte, um eine Rückkehr zu bereits bekannten Plänen zu verhindern. Ist die Tabu-Liste voll, so ersetzt das Verfahren das älteste durch das neueste Verbot [DEL93, GLO89a].

Simulated Annealing [KUR95], Threshold Accepting und auch genetische Algorithmen sind *lokale Suchverfahren* und versuchen wie das Tabu-Suchverfahren, ausgehend von einem oder mehreren bestehenden Belegungsplänen, einen besseren Belegungsplan zu finden [SCU95]. Die Verfahren brechen ab, sobald z.B. eine vorgegebene Zahl an Iterationsschritten erreicht wird.

Simulated Annealing

Beim *Simulated Annealing* handelt es sich um ein stochastisches, heuristisches Verbesserungsverfahren, welches es zulässt, vorübergehend auch schlechtere Lösungen zu erzeugen. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird aber um so geringer, je besser der aktuelle Lösungswert ist [AAR89, FAI98, LAA92, SIE94].

Threshold Accepting

Eine deterministische Variante des Simulated Annealing stellt das *Threshold Accepting* dar [DUR90]. Das Verfahren akzeptiert eine schlechtere Lösung, wenn die Gütedifferenz aus aktuellem und vorhergehendem Lösungswert unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwerts (Threshold) liegt. Der Schwellenwert sinkt im Laufe des Verfahrens bis auf Null, so dass schließlich nur noch eine Verbesserung die Suche vorantreibt [DUE90, DUE93].

Evolutionäre Optimierung

Evolutionsprogramme bilden Problemlösungsprozesse auf evolutionären Suchprozessen ab. In einem wiederholten Evaluations-/Selektions-/Rekombinations-Zyklus wird aus einer Menge (Population) potentieller Lösungskandidaten (Chromosomen) jeweils eine Folgepopulation abgeleitet. Zunächst werden dabei die Elemente einer Population evaluiert, dann wird auf Basis dieser Bewertung eine Teilmenge der Population (Mating Pool) selektiert, aus der die Folgepopulation generiert wird. Dabei werden durch Rekombinationen der ausgewählten Elemente so lange neue Lösungskandidaten erzeugt, bis die gewünschte Mächtigkeit der Folgepopulation erreicht ist [SIE94]. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Lösungskandidat in den Mating Pool übernommen wird, hängt von seiner Bewertung (Fitness) ab („Survival of the Fittest“). Durch die Rekombination wird ein Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Lösungskandidaten initiiert. Dabei können Lösungskandidaten sich „kreuzen“ (Cross-over), indem sie z.B. Teile ih-

rer Chromosomen austauschen. Diese Mutationsfunktion verändert z.B. die Reihenfolge der Arbeitsvorgänge vor jeder Ressource, so dass neue Belegungspläne entstehen. Der beste Belegungsplan wird schließlich durch den Lösungsprozess selektiert [nach KOP95, nach KUR95]. Während der Selektion und der Rekombination unterliegt der Lösungsprozess stochastischen Einflüssen [SIE94]. Der Abbruch des Prozesses erfolgt entweder durch Überschreiten eines gesetzten Zeitlimits oder bei Erreichen eines bestimmten Gütegrades der Lösung, da ein absolutes Optimum nicht erkannt wird [STA93].

In klassischen *genetischen Algorithmen* werden Lösungskandidaten in Folge binärer Werte (Bitstrings) kodiert und Problemlösungen unter Anwendung sogenannter Standard-Rekombinationsoperatoren abgeleitet [MIC92]. In neueren Ansätzen erfolgt eine Harmonisierung durch den Einsatz von zweiteiligen „Repair“-Algorithmen, um zum Zwecke der Bewertung unzulässige in zulässige Belegungspläne zu transformieren. Zuerst werden dazu in der lokalen Harmonisierung Inkonsistenzen auf Betriebsmittel-seite beseitigt. Danach wird in der globalen Harmonisierung ggf. die Konsistenz auf Ablaufplanebene hergestellt. Darüber hinaus wird durch das „Forcing“ ein unzulässiger Belegungsplan durch den während der Harmonisierung abgeleiteten zulässigen Plan ersetzt, falls er den Selektionsprozess „überlebt“ [NAK91].

Kritik an klassischen genetischen Algorithmen zur Belegungsplanung resultiert vorrangig aus der verwendeten binären Repräsentationsform, denn sie hat den Nachteil, dass der über die Repräsentation definierte Suchraum erheblich größer als der Raum zulässiger Lösungen ist [SIE94]. Nachteilig ist weiterhin, dass keine konstruktiven Methoden zur Verfügung stehen, um die Codierung, die Wahl der zu verwendenden Operatoren und die Festlegung der Anfangspopulation, die alle die erzielbare Ergebnisqualität wesentlich beeinflussen, geeignet zu unterstützen [WIL96]. Das Problem vieler genetischer Algorithmen, mögliche Lösungen zu unterdrücken, wird inzwischen durch neuere Ansätze vermieden. Der Vorteil der genetischen Algorithmen liegt vor allem in der hohen Konvergenzgeschwindigkeit bei gleichzeitig großen Lösungsräumen. Ferner verarbeiten sie direkt verfügbares Wissen, das nicht abgeleitet oder generiert werden muss. So haben sich genetische Algorithmen mittlerweile nicht nur in vielen Feldern des Operations Research etabliert, sondern es können auch Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung mit Hilfe von Evolutionsansätzen gelöst werden [BEC93, NIS94]. Anwendungsfelder sind hier die Bestimmung optimaler Bestellmengen und Losgrößen, die Reihenfolgesteuerung [SAN93], die Lagerplatzoptimierung sowie die Hochregalsteuerung [SCÖ94]. Genetische Algorithmen unterstützen darüber hinaus die Robotertechnik, Verkehrsleitsysteme und den Flugzeugbau [DAV91a, NIS97].

2.2.3 Simulation als unterstützendes Verfahren

Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem System mit Hilfe eines experimentierfähigen Modells, um Erkenntnisse zu erlangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [nach VDI92b]. Trotz anwendungsspezifisch unterschiedlicher Interpretationen lassen sich einige Eigenschaften der Simulation nennen, die allgemeingültigen Charakter haben. So ist eine Simulation die Darstellung eines realen, i.d.R. komplexen Systems in Form eines Modells. Sie erlaubt als experimentelle Methode, Rückschlüsse auf Struktur und Eigenschaften des realen Systems durch systematisches Verändern, Beobachten und Analysieren in statischer und dynamischer Hinsicht zu ziehen [nach SCW99].

Die Simulation wird als auswahlunterstützendes Verfahren bezeichnet [SCU95] und kann als Lösungshilfsmittel in solchen Bereichen eingesetzt werden, die sich, wie die Belegungsplanung [TEI98], als kombinatorisches Optimierungsproblem darstellen lassen. Dabei besteht der Kernpunkt eines kombinatorischen Optimierungsproblems in der Reduktion des Lösungsraumes, z.B. mit einem Anforderungskatalog, der realtypische Produktionsbedingungen beinhaltet. Die Simulation wird ständig im Sinne einer besseren Abbildung des Realprozesses weiterentwickelt. Im Laufe einer Simulation lassen sich sukzessive immer mehr Parameter, die den realen Prozess beeinflussen, in den Anforderungskatalog aufnehmen. Dieser schränkt den Lösungsraum dadurch weiter ein und nähert das Modell dem realen Produktionssystem immer besser an.

Nachteilig an der Simulation ist, dass die Datenerfassung schwierig und daher oft unvollständig ist, so dass das reale System nicht komplett abgebildet werden kann, und dass sich die Validierung schwierig gestaltet, da eine Berücksichtigung aller Einflussgrößen nicht möglich ist. Dies führt dazu, dass nur Näherungslösungen bestimmt werden können. Der im Vergleich zu anderen Planungsverfahren hohe Zeitaufwand für die Modellbildung konnte in neuester Zeit durch die objektorientierte Programmierung beträchtlich gesenkt werden. Somit ist heute eine hohe Anpassungsfähigkeit an reale Gegebenheiten möglich. Hierdurch lassen sich komplexe Zusammenhänge einfach darstellen und ermöglichen so die Gewinnung von Erkenntnissen über das dynamische Systemverhalten. Darüber hinaus lassen sich auch Schwachstellen im Informationsfluss des realen Systems aufdecken. Im ganzen ist die Simulation oft mit erheblich geringerem Zeitaufwand möglich als die Durchführung eines realen Experimentes. Aufgrund der durchführbaren objektiven Bewertung von Planungsalternativen schafft sie zudem eine höhere Planungssicherheit.

Eingesetzt wird die Simulation vornehmlich, wenn eine Neuplanung durchgeführt wird, die Grenzen analytischer Methoden erreicht sind, komplexe Wirkungszusammenhänge zu verdeutlichen sind, das zeitliche Ablaufverhalten untersucht werden soll oder ein Experiment am realen System aus Kosten-, Zeit- oder Platzgründen nicht sinnvoll ist [DIE95, KOX67]. Im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung eingesetzte

Simulationen zeichnen sich im allgemeinen durch eine hohe Komplexität aus [NCH91, ZEL92] und werden auf allen Planungsebenen angewandt [FEL00a, WEC91]. Ein Beispiel für den Einsatz in der Belegungsplanung ist das Verfahren der vorausschauend planenden Simulation (VPS), deren Grundkonzept die permanente progressive Neueinplanung des Auftragsbestandes unter Beachtung der jeweils aktuellen terminlich-kapazitiven Wechselwirkungen zwischen Arbeitsgängen und Arbeitsplätzen ist. Die Neueinplanung der Aufträge wird entweder durch ein Ereignis, das den aktuellen Zustand verändert, z.B. Rückmeldungen, oder über das Eintreten einer als unzulässig erkannten Planabweichung ausgelöst. Der Einsatz dieses auch als „Vorwärts-Simulation“ bezeichneten Verfahrens erfordert eine große Rechnerleistung sowie den Zugriff auf umfangreiche Datenbestände [BEI91].

2.2.4 Planungsverfahren der künstlichen Intelligenz

Die künstliche Intelligenz (KI) hat zum Ziel, Maschinen und Programme zu entwickeln, die menschliche Wahrnehmungs- und Verstehensregeln zeigen sollen, oder Leistungen dieser Art nachbilden oder ersetzen sollen [FIS99].

Expertensysteme

Expertensysteme sind wissensbasierte Systeme innerhalb der Produktionsplanung und Steuerung, die sich insbesondere die künstliche Intelligenz zunutze machen. Sie werden zur Entscheidungsunterstützung und Beratung von Endbenutzern, die keine Experten im betrachteten Problembereich sind, eingesetzt. Typisch für diese Systeme ist die Trennung von Wissen und Problemlösungstechniken. Die Wissensspeicherung erfolgt in einer Wissensbasis, der sogenannten Produktionsregel, die sich aus Fakten und Regeln (Wenn-Dann-Beziehungen) zusammensetzt. Die Bedingungen für die Eingangskonditionale im Wenn-Teil werden durch die Eingangsdaten bereitgestellt und über den Schlussfolgerungsmechanismus, mit dessen Hilfe die Inhalte der Wissensbasis analysiert werden, neu generiert [SCW99, MAR98].

Heute im Einsatz befindliche Expertensysteme bestehen neben der Wissensbasis aus einer Erklärungs-, Problemlösungs- und Wissensakquisitionskomponente sowie einem Dialogmanager. In Expertensystemen wird das deklarative Wissen, d.h. das Know-how über das „Was“, und das prozedurale Wissen, d.h. das Know-how über das „Wie“, unterschieden [BUL89b]. Eine andere Unterteilung sieht Fakten und Regeln vor. Der Vorteil der Trennung der jeweiligen Klassen ist die hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichen Problemstellungen [HAR89].

Expertensysteme wurden bisher angesichts ihrer noch beschränkten Möglichkeiten vor allem für eng abgegrenzte und exakt zu beschreibende Probleme mittlerer Komplexität benutzt. Da zur Lösung auf heuristisches, vages Wissen zurückgegriffen werden kann, sind Expertensysteme insbesondere dazu geeignet, das Erfahrungswissen des Pro-

duktionsplaners in den rechnergestützten Prozess der Störungsbehandlung zu integrieren. Allerdings sind selbst für Problemstellungen geringer Komplexität umfangreiche Wissensbasen erforderlich, so dass die Transparenz der Entscheidungsprozesse häufig aufgrund vielfach verknüpfter Regeln leidet. Darüber hinaus ist es schwierig, zeitdynamische Prozesse geeignet mit Expertensystemen darzustellen, da diese nicht adäquat abgebildet werden können [SCW99].

Für eine wissensbasierte Belegungsplanung sind eine Fülle von Systemen entwickelt worden, die nach ihren Einsatzgebieten in Werkstattfertigung, Flexible Fertigungssysteme und automatisierte Montage unterteilt werden können [LEH92]. Ein Expertensystem für die Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage wird in der Literatur allerdings bis heute nicht beschrieben.

Agentensysteme

Agentensysteme basieren auf dem Konzept des verteilten Problemlösens durch kooperatives oder konkurrierendes Zusammenwirken mehrerer Agenten, welche sich durch eine relativ einfache Funktionsweise und teilautonome Operationsweise auszeichnen [COR97]. Dabei wird die Erfüllung einer gemeinsamen Aufgabe entweder durch einen gegenseitigen Informationsaustausch zwischen den Agenten bewirkt, oder die einzelnen Agenten werden von einer übergeordneten Steuerung je nach Bedarf aktiviert oder deaktiviert. Die am besten erforschte Variante des verteilten Problemlösens stellen Expertensysteme mit der Blackboard-Architektur dar [HAU93]. Dabei ist das Blackboard eine dynamische Wissensbasis des aktuellen Produktionssystems, in deren Vordergrund die teilautonomen Submodule der Problemlösungskomponente stehen, die sogenannten Aktoren oder „Dämonen“. Sie operieren als Agenten und lassen sich einzelnen Fertigungsaufträgen, Maschinen oder Maschinengruppen zuordnen. Die fertigungsauftragsbezogenen Agenten verhalten sich tendenziell nicht-kooperativ, da jeder von ihnen versucht, die eigenen Aufträge möglichst schnell durch das Fertigungssystem zu bringen. Dagegen verhalten sich maschinenbezogene Agenten eher kooperativ, da sie durch die zentrale Steuerung einer Blackboard-Architektur dazu bewegt werden, zur Ausführung eines Auftrages in der produktionstechnisch erforderlichen Reihenfolge aktiv zu werden. Es existieren jedoch auch Agentensysteme, in denen die Agenten versuchen, einen Auftrag durch das Produktionssystem zu bringen und dabei entsprechende Nachfragen nach Bearbeitungsleistungen entfalten. Zwischen den bearbeitungsnachfragenden Auftragsagenten und bearbeitungs anbietenden Maschinenagenten werden entsprechende Kontrakte ausgehandelt, die zusammen mit Meldungen über erfolgreiche Kontrakterfüllungen durch Bearbeitungsprozesse als Nachrichten zwischen den Agenten ausgetauscht werden [ZEL90].

Als Vorteil ist die einfache Grundstruktur zu nennen, die jedoch nicht die betriebliche Praxis nachbildet. Nachteilig ist, dass das Blackboard als globale Datenstruktur eine

starke Parallelität der Agenten verhindert, da es sich als Engpass negativ auf die Leistung des ganzen Systems auswirkt [HEN97].

Neuronale Netze

Neuronale Netze sind Modelle informationsverarbeitender Systeme, die sich an der Struktur und Funktionsweise des Gehirns orientieren [HOP82, KÖH90]. Neuronale Netze transformieren zum einen Eingabemuster in Ausgabemuster und sind zum anderen in der Lage, die hierzu erforderlichen Transformationsmechanismen durch Selbstorganisation ihrer internen Funktionsweise aktiv zu erlernen. Grundbausteine dieser Netze sind einfach strukturierte Verarbeitungseinheiten, sogenannte „Neuronen“, die unabhängig voneinander, d.h. parallel, arbeiten. Zwischen ihnen bestehen Verbindungen, denen je nach Bedeutung eine unterschiedlich starke Gewichtung (Verbindungsgewicht) zugeordnet wird. Die Informationsverarbeitung in den Neuronen erfolgt über jeweils eine Eingangs-, Aktivierungs- und Ausgangsfunktion, die je nach Neuronenmodell unterschiedliche Ausprägungen haben.

Neuronale Netze werden vor allem in der Sprachverarbeitung, der Regelungstechnik und der Datenverarbeitung eingesetzt [RIG94]. Zunehmend werden neuronale Netze jedoch auch für betriebswirtschaftliche Problemstellungen im Rahmen der PPS verwendet [COR95, LOH94, SCN93, WAN95a]. So verarbeiten Expertensysteme auf der Grundlage neuronaler Netzwerke Informationen über Produktionsziele und -situationen als Eingabemuster. Als Ausgabemuster erzeugen sie Empfehlungen von Prioritätsregeln für die maschinenorientierte Terminplanung. Im Verlauf einer Trainingsphase wird deren Wirksamkeit in Produktionsmodellen simulativ ermittelt. Die resultierenden Regelwirksamkeiten dienen dann als Maßstab für den Erfolg der Verknüpfung von Ein- und Ausgabemustern durch die neuronalen Netzwerke. Im Verlauf ihrer Selbstorganisation erlernen die Netzwerke selbst, die ziel- und situationsspezifisch wirksamsten Prioritätsregelempfehlungen als Ausgabemuster zu erkennen. Dieses Assoziationswissen ist über die neuronalen Netzwerke räumlich verteilt und wird schließlich zu geeigneten Metaregeln für konventionelle Expertensysteme verdichtet. Die Metaregeln stellen dabei eine situationsspezifische Kombination herkömmlicher Prioritätsregeln dar [ZEL90].

Vorteile der neuronale Netze gegenüber anderen Verfahren liegen vor allem darin, dass sie sich durch die Lernfähigkeit an veränderte Umgebungsbedingungen anpassen können. Auch besitzen neuronale Netze durch die verteilte Speicherung des Wissens eine hohe Fehlertoleranz. Gleichzeitig ergeben sich aus der dezentralen Speicherung des Wissens aber auch gravierende Nachteile, da es nicht möglich ist, das Wissen aus dem Netz, z.B. zu Kontrollzwecken, zu extrahieren oder explizit einzuspeisen [WIL96]. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Trainingsaufwand, der für den Aufbau eines neuronalen Netzes notwendig ist, da für die optimale Einstellung und die Veränderungen des Netzes umfangreiches Spezialwissen erforderlich ist [HEN97]. Somit eignen sich neu-

ronale Netze vorrangig für Aufgaben mit begrenzter Merkmalanzahl und nur bedingt für die Lösung komplexer Planungs- oder Konfigurationsaufgaben [SCI98, KUR93].

Fuzzy-Logik

Eine weitere Form der künstlichen Intelligenz, die für die Lösung von Belegungsproblemen eingesetzt wird, ist die Fuzzy-Technologie. Mit Hilfe der *Fuzzy-Logik* ist es möglich, Systeme durch die Abbildung umgangssprachlich unscharfer Begriffe durch mathematische Formalismen zu beschreiben. Anstelle der in der booleschen Logik verwendeten Wahrheitswerte „wahr“ und „falsch“ arbeitet die Fuzzy-Logik in einem Bereich zwischen diesen beiden Begriffen, der durch das Intervall $[0,1]$ dargestellt wird. Die bekannten logischen Operatoren Konjunktion, Disjunktion und Negation werden in der Art modifiziert, dass ihre Ergebnisse wieder unscharfe Größen ergeben. Hierdurch können Probleme und Sachverhalte, über die nur unpräzise, verbal formulierte Informationen vorliegen, einer deterministischen Bearbeitung zugänglich gemacht werden.

Mögliche Ansatzpunkte für eine Einbindung der Fuzzy-Logik in herkömmliche PPS-Systeme bestehen in der Entscheidungsunterstützung durch Quantifizierung von Sicherheiten oder Risiken, in der Entscheidungsunterstützung bei einmalig oder selten vorkommenden Ereignissen sowie in der Bewertung natürlichsprachlicher Informationen. Derzeitige Anwendungen sind die Optimierung der Material- und Zeitwirtschaft und die Verbesserung der belastungsorientierten Auftragsfreigabe [NIE94]. Im Bereich der Belegungsplanung existieren Ansätze zur Messung des logistischen Grades der Zielerreichung [GLA93, LEH87], für Entscheidungen im Rahmen der Produktionsregelung [FIS99, SCI93, WEI93] und zur Termin- und Ablaufsteuerung [HIN87]. Keiner der hier aufgeführten Ansätze kann allerdings auf die Multiressourcen-Montage übertragen werden, da aufgrund der Entscheidungsvielfalt auch die Ablaufstrukturen mit ihrer Flexibilität im Modell abgebildet sein müssen [vgl. HAC97].

2.2.5 Diskussion der Anwendbarkeit der Verfahren

Bereits in den fünfziger Jahren wurde versucht, Belegungsplanungsprobleme mit Hilfe des Operations Research zu lösen [JOH54]. Zunächst wurde die optimale Belegungsplanung von Spezial- und Sonderfällen behandelt. Später wurden verschiedene umfassende Rechenmodelle entwickelt, die den Anspruch hatten, ein Optimum für den gesamten Komplex der Produktionsplanung und -steuerung zu finden. Ihr praktischer Einsatz scheiterte jedoch an der Komplexität und an dem großen Informationsbedarf [SWI89]. Obwohl nach wie vor ein Schwerpunkt der Forschung in der Entwicklung exakter Lösungsverfahren für einfach strukturierte Formalprobleme besteht [HER96], wird die Anwendbarkeit von Belegungsalgorithmen in der industriellen Praxis zunehmend bei deren Entwicklung mitberücksichtigt. Allerdings konnte seit Anfang der Belegungsplanung kein Verfahren entwickelt werden, das dem Anspruch in der Praxis in

hohem Maße genügen würde [TEI98], da Problemstellungen in praxisrelevanten Größenordnungen weiterhin nicht mit den bis heute entwickelten Methoden in zumutbarer Zeit gelöst werden können [LIT92, SCU95, TEI98].

Im Gegensatz zu den optimierenden Planungsverfahren verzichtet man beim Einsatz konventioneller Planungsverfahren bewusst auf die Optimalität eines Belegungsplans. Somit ist die resultierende Problemlösung also nicht unbedingt ideal im Sinne des zugrundegelegten Zielsystems. Konventionelle Verfahren sind vielmehr darauf ausgerichtet, einen aus praktischer Sicht zufriedenstellenden Belegungsplan zu erhalten, der mit vertretbarem Aufwand ermittelt und realisiert werden kann [MEI95, TUF88].

Obwohl es bei n Aufträgen in den Warteschlangen von m Maschinen $(n!)^m$ mögliche Reihenfolgen gibt, besteht der Vorteil von Prioritätsregeln in der kurzen Rechenzeit, die zur Bestimmung des Prioritätswertes notwendig ist und ablaufbegleitend erfolgen kann. Auf diese Weise können auch kurzfristige Einflüsse, wie Störungen, in die Belegungsplanung einbezogen werden. Ein grundsätzlicher Schwachpunkt des Einsatzes lokaler Prioritätsregeln ist, dass die tatsächliche Einplanung eines Arbeitsvorgangs auf eine Station nur auf Daten der Arbeitsvorgänge in der betrachteten Warteschlange zu dieser Station basieren. Informationen über die Zustände anderer Warteschlangen, speziell der weitere Durchlauf von Aufträgen durch das System und somit die Folgewarteschlangen, bleiben dagegen unberücksichtigt. Darüber hinaus hat sich in umfangreichen Untersuchungen über die zielspezifische Eignung von Prioritätsregeln herausgestellt, dass keine Prioritätsregel alle anderen dominiert oder auch nur auf einzelne Zielfunktionen bezogen, signifikant bessere Zielerfüllungen gegenüber anderen Prioritätsregeln herbeiführt [BER70, BER76, BLA82]. Dies liegt daran, dass die Eingangsdaten der Experimente, mit denen die Regeln überprüft wurden, nicht vergleichbar sind. Auftragszusammensetzung, Maschinenumgebung und Zieldefinition waren nämlich bei den einzelnen Untersuchungen sehr verschieden. Hinsichtlich der Güte der Planungsvorschläge in Bezug auf die Erreichung eines oder mehrerer Ziele liegen Prioritätsregeln deshalb i.d.R. hinter leistungsfähigen Suchverfahren [TEI98].

Ursprünglich wurden genetische Algorithmen nur zur Lösung direkter Optimierungsprobleme herangezogen. Inzwischen werden sie jedoch auch für die Lösungsfindung bei kontinuierlichen Parameteroptimierungen benutzt. Genetische Algorithmen können nämlich nur Probleme lösen, für die eine Bewertungsfunktion definiert werden kann. Da es sich um ein Suchverfahren handelt, kann der Prozess unter Umständen sehr viel Rechenzeit beanspruchen. In der Praxis werden genetische Algorithmen selten in ihrer ursprünglichen Form eingesetzt. Die Kombination aus genetischen Algorithmen, traditionelle Optimierungsverfahren oder Heuristiken und problemspezifischen Ansätzen werden als hybride Methoden bezeichnet [DAV91b]. Diese Verfahren versuchen zunächst mit Vorwissen gute Lösungen zu erhalten. Ein frühes Anwendungsgebiet der genetischen Algorithmen ist z.B. das Problem des Handelsreisenden [CLA96].

Genetische Algorithmen erfordern eine sehr aufwendige Modellierung von Problemen, deren Datenbasis im Vorfeld genau bestimmt sein muss. Der Umstand, dass bisher nur vereinzelt genetische Algorithmen zur Problemlösungsfindung in der betrieblichen Produktionsplanung und -steuerung eingesetzt werden, liegt darüber hinaus in der relativ langen Laufzeit entsprechender Programme begründet. Gegenüber den künstlichen neuronalen Netzen haben genetische Algorithmen allerdings den Vorteil, dass die Anzahl der zu wählenden Parameter relativ klein und unabhängig von der Problemgröße ist [TEI98].

Seit mit Beginn der achtziger Jahre geeignete Methoden und Werkzeuge für eine weitergehende Modellierung verfügbar sind, werden heuristische Methoden mit Methoden der Wissensrepräsentation der künstlichen Intelligenz kombiniert [BEC91]. Im Vergleich zu den Algorithmen (allgemeine Verfahrensregeln) konventioneller Programme eignen sich Expertensysteme zur Lösung von Problemstellungen insbesondere dort, wo die Beschreibungen der Umwelt und die möglichen Abläufe häufig vage, unsicher und unvollständig sind [BER89]. Bei der Verbindung von Expertensystemen mit konventionellen Methodenbankelementen findet man im Bereich der Belegungsplanung oft eine Kombination aus Expertensystem und Simulation bzw. Warteschlangentheorie vor. Dabei ermöglicht das Expertensystem z.B. den Zugang zu komplizierten Simulationsmethoden und übernimmt die Interpretation der simulierten Daten [BIE89, PLU90]. Jedoch ist bisher nur die Berücksichtigung lokaler Prioritätsregeln möglich, während globale Zielgrößen, wie z.B. eine minimale Durchlaufzeit, unberücksichtigt bleiben.

Expertensysteme können grundsätzlich zwar Entscheidungen im Rahmen der Belegungsplanung unterstützen, ihrer Fähigkeit, Zusammenhänge transparent zu machen, stehen aber einige gravierende Nachteile gegenüber, welche die Einsetzbarkeit auf der operativen Unternehmensebene erheblich erschwert [BUR92]. So sind Expertensysteme langsam, welches der Forderung nach kurzen Antwortzeiten widerspricht. Darüber hinaus muss die Wissensbasis ständig gewartet werden, was bei den sich häufig ändernden Randbedingungen in der Montage zu Anpassungen in großem Umfang führt. Daraus erwächst die Forderung, diejenigen Teile der Wissensbasis dynamisch zu gestalten, welche die augenblicklichen Zusammenhänge in der Montage beschreiben [LEH92].

Anwendungen neuronaler Netze in der Produktionsplanung und -steuerung sind bisher selten [COR95], da ihre Wirkungsweise für den Anwender nicht transparent ist. Aufgrund der großen Kontenzahlen und der komplexen Rechenzeiten können nur kleine Probleme gelöst werden. Aus diesem Grund sind neuronale Netze für die Belegungsplanung eher nicht geeignet [GLO89b, SCU95].

Die Theorie von Agenten als Teilbereich der künstlichen Intelligenz ist als Lösungsansatz dagegen für das Problem der Montagesteuerung als sehr interessant zu bewerten,

weil dezentrale Bereiche gebildet werden, die Aufgaben autonom lösen können. Somit wird die in vielen Produktionsbereichen vorangetriebene Dezentralisierung unterstützt. Der großen Flexibilität solcher Systeme steht aber die Gefahr gegenüber, dass das logistische Gesamtoptimum der Produktion nicht erreicht wird. Auch ist der Aufwand, der mit zunehmender Dezentralisierung stark zunimmt, immens.

Der Einsatz der Fuzzy-Logik ist insbesondere bei den Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung sinnvoll, bei denen exakte Daten aufgrund von Unsicherheiten nicht oder nur schwer ermittelt werden können oder bei denen Heuristiken beziehungsweise Entscheidungen mit Hilfe von Erfahrungswissen formuliert werden. Die Verknüpfung verschiedener Ressourcen, wie Maschinen, Vorrichtungen und Werkzeuge, wird z.B. bei der Steuerung flexibler Fertigungssysteme mit Hilfe von Petri-Netzen abgebildet [HOR89, TÖN86]. Sinnvoll ist hier eine Ergänzung durch die Fuzzy-Logik, da unterschiedliche Systemzustände in einem Netz abgebildet werden, während bei der Verwendung scharfer Petri-Netze jede Situation individuell beschrieben werden muss. Darüber hinaus können durch die Anwendung der Fuzzy-Logik auch unvollständige Informationen berücksichtigt werden.

Als Nachteil bleibt festzuhalten, dass Fuzzy-Systeme selbst keine gezielte Suche nach guten Lösungen durchführen. Das Planungsergebnis hängt damit noch immer in hohem Maße von der Erfahrung des Fertigungssteuerers ab [TEI98].

Die deterministisch heuristischen Verfahren sind zwar wenig zuverlässig, kommen jedoch mit relativ einfachen Zielfunktionen und dadurch vergleichsweise schnell zu Ergebnissen. Um die Wahrscheinlichkeit, mit der die gefundene Lösung einem globalen Optimum entspricht, zu erhöhen, können deterministisch heuristische Suchverfahren von mehreren, im Lösungsraum verteilten Startwerten ablaufen. So finden Heuristiken derzeit häufig bei der Reihenfolgeplanung in Fertigungsleitständen Anwendung, um einen aus Fertigungssicht möglichst optimalen Belegungsplan zu erhalten. Die in diesem Aufgabenbereich eingesetzten Heuristiken stützen sich oft auf Prioritätsregeln [DUD93]. Allerdings haben die hier eingesetzten konventionellen Planungsverfahren den Nachteil, dass sie bei heterogenen Auftragspektren keine gleichbleibende Güte der Ergebnisse gewährleisten [SCÖ93], denn die Erreichbarkeit der erwarteten Zielgrößen hängt sehr stark von der aktuellen Belastungssituation im betrachteten Fertigungssystem ab [SCU95]. Deshalb werden die konventionellen Planungsverfahren oft durch die Simulation ergänzt [GÜN93], mit der sich die Auswirkungen mehrerer Belegungspläne jeweils gemessen an einem Zielsystem vergleichen lassen.

Die Simulation als heuristisches Verfahren hat sich zur Untersuchung des Zeitverhaltens verschiedenster Systeme durchgesetzt. Mit Voranschreiten der Rechnertechnologie rückt die, im Gegensatz zu den auf der Wartschlangentheorie basierenden analytischen Ansätzen, flexiblere *Simulationstechnik* immer mehr in den Vordergrund. So wird

in Abhängigkeit der Planungsaufgabe auf der Anlagenebene die Ablaufsimulation, auf der Zellenebene die Ablauf- und Bewegungssimulation, auf der Maschinenebene die Bewegungs- und NC-Simulation sowie auf der Komponentenebene die FEM-Simulation eingesetzt [HAR91, HEC95, SCM92]. Die fallspezifische Modellierung und Simulation der jeweiligen konkreten Ressourcenstruktur eines Produktionssystems kann so Informationen über das zu erwartende Betriebsverhalten geben.

Ein großer Vorteil der Simulation ist die intuitive Erlernbarkeit, da neben der Beherrschung des Simulators keine systemtheoretischen oder mathematischen Kenntnisse notwendig sind. Weiterhin lassen sich durch eine entsprechend detaillierte Nachbildung des Originals fast beliebig komplexe Systeme abbilden. Der Komplexitätsgrad bei der Abbildung von Systemen bei Simulationsmodellen ist i.d.R. höher als bei mathematisch-analytischen Methoden der Unternehmensforschung. Darüber hinaus sind Simulationsmodelle anschaulich, da sie das Systemverhalten im Zeitablauf abbilden können. Außerdem entsteht im allgemeinen kein großer mathematischer Aufwand, da sich das Verhalten der einzelnen Komponenten und ihre Abhängigkeiten untereinander aus dem Systemaufbau ergeben [DIE95, NIE72].

Nachteil der Simulation ist der hohe zeitliche Aufwand für die Modellierung, Datenerhebung, Versuchsdurchführung und Auswertung [ASI95]. Zudem ist die Optimierung des Planungsproblems meist schwierig und zeitaufwendig, da es keine eindeutige mathematische Zielfunktion gibt [SFB00]. Die bislang einzige „Steuergröße“ in herkömmlichen Simulationsprogrammen stellen Prioritätsregeln dar. Es gibt keine spezifischen Lösungsalgorithmen. Es sind insbesondere solche Algorithmen nicht vorhanden, die zwangsläufig zu einer optimalen Systemkonfiguration oder zu einem optimalen Ablauf führen. Deshalb wird die Simulation von vielen Autoren zu den nicht-optimierenden Verfahren gezählt [SCW99]. Auch sind nach einem hohen Programmieraufwand viele Rechendurchgänge für statistisch gesicherte Aussagen erforderlich. Darüber hinaus lässt die Interpretation der Ergebnisse unterschiedliche Schlüsse und Auslegungen über das Verhalten des Realsystems zu [DIE95, NIE72].

In den letzten Jahren wurden jedoch neuere Ansätze vorgestellt, welche den Nachteil der nicht ausreichenden Steuerungsgrößen durch den simultanen Einsatz von Expertensystemen auszugleichen versuchen. Solche Modelle werden unter dem Oberbegriff Produktionsregelung behandelt und sind erst durch den Einsatz leistungsstarker Rechnersysteme möglich geworden [MIL91]. Für die Untersuchung eines mit Hilfe der Simulationstechnik abgebildeten Produktionssystems, in dem diskrete, stochastische Einflüsse überwiegen, existiert allerdings auch heute kein geeignetes Optimierungsverfahren. Es hat sich jedoch gezeigt, dass deterministisch heuristische Strategien und Zufallsalgorithmen mit Modellen, wie z.B. den Evolutionsstrategien, vielversprechend sind. Allerdings spielt der Zufall bei den Evolutionstechniken eine zu große Rolle [CLA96].

Um die Simulation als Diagnosewerkzeug im Rahmen der Produktionssteuerung einsetzen zu können, ist es erforderlich, die Ausführungszeit von Simulationsläufen wesentlich zu reduzieren, da eine Verbesserung der Planung lediglich durch die Analyse vieler Parametervariationen erreicht werden kann. Darüber hinaus muss zur Erzielung aussagekräftiger, statistisch abgesicherter Ergebnisse i.d.R. eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt werden. Der im Bereich der Multiressourcen-Montage für das Auffinden geeigneter Maßnahmen zur Verfügung stehende Zeitrahmen bewegt sich jedoch im Bereich weniger Minuten, so dass für den Einsatz der Simulation passende Mechanismen zur Beschleunigung der Untersuchungen erforderlich werden. Möglichkeit hierzu besteht z.B. im Einsatz entsprechender Suchstrategien oder in der Ausnutzung vorhandener Parallelrechnerkapazitäten [MAR98]. Auch ermöglicht der Einsatz einer Empfindlichkeitsanalyse, die auf ereignisdiskrete Systeme angewandt werden kann, anhand eines einzigen Simulationslaufes, die Empfindlichkeit des Systems für Optimierungsparameter zu bestimmen, um diese im Anschluss gewichten zu können. Es wird eine Tabelle ausgegeben, welche die lokale Empfindlichkeit um einen gegebenen Parametersatz angibt [NOC90].

Eine weitere wichtige Voraussetzung für den effektiven Einsatz der Simulation ist die Exaktheit und die Aktualität der zugrundeliegenden Modelle, welches eine aufwändige Pflege dieser Modelle erforderlich macht. Dabei scheiden alle Ansätze aus, die einen Simulationsexperten erfordern, der die angesprochene Pflege übernimmt. Vielmehr muss angestrebt werden, z.B. durch den Einsatz grafischer Systeme zur Modellierung, Wartung und Pflege der Simulationsmodelle wesentlich zu vereinfachen [MAR98].

Die Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage erfordert ein Verfahren, das möglichst alle Belegungsvarianten abbilden kann und jeweils eine geeignete Belegungskombination in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebssituation unter Berücksichtigung der logistischen Zielsetzung auswählt. Dabei hat die zur Auswahl benötigte Zeitspanne eine besondere Bedeutung. Werden z.B. 10 Belegungsvarianten aus 200 Varianten zufällig herausgegriffen, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass unter diesen 10 sich wenigstens eine geeignete Variante befindet, d.h. eine solche, die zu den insgesamt 10 geeigneten von den 200 vorgegebenen Varianten gehört, 0,53 [nach HOY94]. Um eine Wahrscheinlichkeit von 0,99, eine geeignete Variante zu finden, zu erreichen, muss die Anzahl der ausgewählten Varianten bereits auf 35 erhöht werden.

Da die Ermittlung einer geeigneten Belegungskombination in für den betrieblichen Gebrauch akzeptabler Zeit durch keines der bis heute entwickelten Verfahren garantiert werden kann, bietet sich die Kombination des Einsatzes der Simulation bei der Planung mit der Anwendung ausgewählter Prioritätsregeln bei der Steuerung zur Problemlösung an. Ergänzt wird diese Verfahrenskombination innerhalb der vorliegenden Arbeit um Ansätze der künstlichen Intelligenz, wie Experten- und Agentensysteme, soweit es

sinnvoll erscheint. Um den Aufwand für die Datenerhebung und die Modellerstellung zu limitieren wird eine enge Verknüpfung zu CA-Technologien angestrebt.

2.3 Einsatz von CA-Technologien

Rechnerunterstützte Techniken und dort eingesetzte DV-Systeme werden im Rahmen dieser Arbeit als *CA-Technologien* bezeichnet.

2.3.1 Digitale Produktentwicklung

Ein hohes Potential zur Leistungssteigerung und damit zur Kostensenkung wird durch den Einsatz rechnerunterstützter Systeme in der Entwicklung und Konstruktion erschlossen [SPU94].

CAD-Systeme sind in den meisten Unternehmen als Stand der Technik anzusehen [WIE97a] und haben einen hohen Entwicklungsstand erreicht [VDI92a]. Über die rechnerunterstützte Konstruktion hinaus werden heute CA-Technologien im Rahmen der *digitalen Produktentwicklung* auch für andere technische Aufgaben, wie für die Lösung komplexer Berechnungs-, Optimierungs- und Simulationsaufgaben im Bereich der Neukonstruktion sowie der auftragsbezogenen Projektierung, eingesetzt [PAH93, ZIL95]. Weitere verbreitete CA-Technologien sind CAM-, CAP- und CAQ-Systeme.

CAM-Systeme unterstützen die technische Steuerung und Überwachung von Betriebsmitteln in der Produktion. Dies betrifft die Funktionen Fertigen, Montieren, Handhaben, Transportieren und Lagern. Durch die Rechnerunterstützung werden Kostensenkungen vor allem durch Automatisierung und Flexibilisierung erreicht [DOR90, KIE94, KUR99, SCE90b].

Innerhalb der Arbeitsplanung werden häufig *CAP-Systemen* eingesetzt, die vorwiegend den Arbeitsplanerstellungsprozess unterstützen. Aufbauend auf konventionell oder mit CAD-Systemen erstellten Arbeitsergebnissen der Konstruktion werden Daten für Teilefertigungs- und Montageanweisungen erzeugt. Ergebnis ist die Festlegung von Arbeitsgängen und Arbeitsgangfolgen, die Auswahl von Verfahren und Betriebsmitteln, die Vorgabezeitermittlung (Bearbeitungs-, Rüst- und Übergangszeit) sowie die Zuordnung von Hilfsmitteln, wie Werkzeuge, Vorrichtungen und Messmitteln. Darüber hinaus werden Daten für die Steuerung der Betriebsmittel, wie z.B. NC-Programmen, erstellt, die an ein CAM-System übergeben werden können.

Zu den Bausteinen eines CAP-Systems gehören eine Stammdatenverwaltung (Arbeitsgänge, Arbeitspläne), eine Simulationskomponente für die Kontrolle und Verbesserung manuell angelegter Arbeitsgänge, ein NC-Programmgenerator und eine NC-Programmverwaltung. Zur Ermittlung der Vorgabezeiten werden Nomogramme, die mehrere voneinander abhängige Zielgrößen graphisch darstellen, Zeitrichtwerttabellen

sowie Diagramme eingesetzt. Heutige CAP-Systeme bieten dem Anwender darüber hinaus die Möglichkeit, unternehmensspezifisches Planungs-Know-how abzulegen, da z.B. die Arbeitsgangfolgeermittlung wesentlich durch die Erfahrung des Planers bestimmt wird. Dazu wird häufig die Entscheidungstabellentechnik verwendet, bei der einzelne Planungsvorgänge in Form von „Wenn-dann-Regeln“ abgebildet werden [KUR99, MCH95].

CAQ-Systeme werden einerseits zur Erstellung von Prüfplänen, Prüfprogrammen und Kontrollwerten eingesetzt und andererseits führen sie rechnerunterstützte Mess- und Prüfverfahren durch. Innerhalb der Produktentwicklung unterstützen CAQ-Systeme heute alle Phasen der Produktentstehung, von der Produktidee bis hin zum praktischen Einsatz, und dient damit der EDV-Unterstützung des gesamten Qualitätsmanagements. Die Rechnerunterstützung erfolgt vorrangig in der Durchführung der Prüfungen sowie bei der Planung der Prüfvorgänge [DOR90, KUR99].

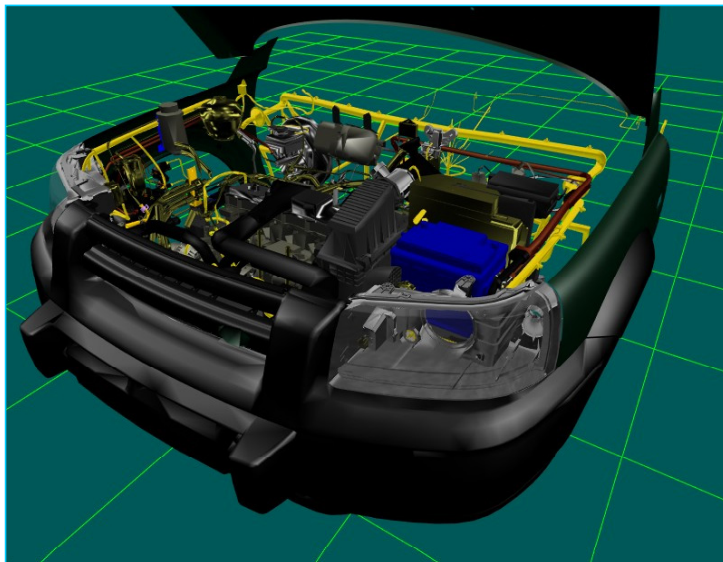


Bild 2.5 Digitales Produkt eines Kfz-Motorbereiches (Siemens AG)

Sei einigen Jahren findet mehr und mehr der Begriff „digitales Produkt“ Anwendung. Als *digitales Produkt* wird eine realistische Rechnersimulation eines Produktes vom vollständigen Zusammenbau bis hin zu allen Einzelteilen bezeichnet (Bild 2.5). Ein digitales Produkt enthält alle erforderlichen Funktionalitäten zur Unterstützung von Konstruktion, Planung, Fertigung sowie Wartbarkeit (Serviceability). Mit der digitalen Produktentwicklung in direktem Zusammenhang steht das *Digital Mockup*, welches zur simultanen Produkt- und Prozessentwicklung, Kommunikation, Entscheidungsfindung sowie Dokumentation dient. Der Digital Mockup unterstützt den gesamten Lebenszyklus vom ersten Konzept bis zum Recycling des Produkts [EDA00a].

In Bild 2.6 ist der Digital Mockup als Projektierungs-, Planungs-, und Auslegungsverfahren dargestellt. CAD-Daten von unterschiedlichen Quellen und Systemen können zu einem digitalen Prototypen kombiniert werden, der mit einem EDM- bzw. PDM-System (Engineering Data Management- bzw. Product Definition Management-System) verbunden ist. Im weiteren Forschungsmittelpunkt stehen derzeit Aktivitäten zur Einbindung von Informationen, Daten und Wissen aller Betriebsbereiche und Lebenszyklusphasen in Produktdatenmodelle [VAJ99].

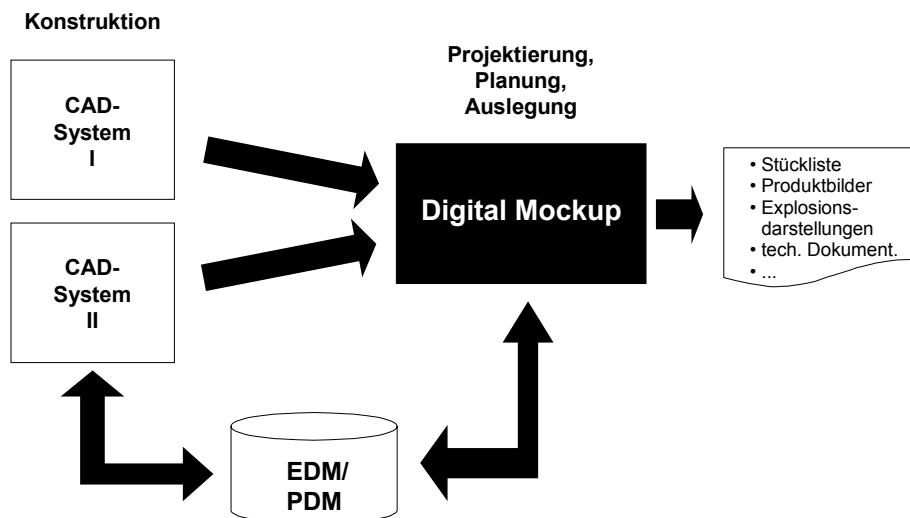


Bild 2.6 Digital Mockup als Projektierungs-, Planungs-, und Auslegungsverfahren

2.3.2 Digitale Fabrikplanung

Ein effizientes Engineering Data Management gilt als Schlüssel zur *digitalen Fabrik*, welche die Abbildung einer Produktionsanlage in der digitalen Welt ist. Die digitale Fabrik erfasst dabei alle Informationen, die erforderlich sind, um eine gesamte Fabrik oder einzelne Arbeitsschritte zu planen, zu simulieren und zu optimieren [WOL98]. Die digitale Fabrik dient der simultanen Prozess- und Produktentwicklung, Kommunikation, Entscheidungsfindung sowie Dokumentation. Sie unterstützt den gesamten Produktionslebenszyklus vom ersten Konzept bis zu Demontage und Recycling der Produktionsanlagen [EDA00b].

Die Architektur eines im wesentlichen auf ISO 10303 (STEP) basierendes EDM-Systems beschreiben *Benn, Dürr, Dube, Löbig* und *Kunzmann* sowie *Ting* und *Trappey* [BEN98, TIN98]. STEP eignet sich für Zwecke der Geometriebeschreibung und des Geometriedatenaustausches zwischen CAD-Konstruktionssystemen [MUS00]. Die Stärken liegen in geometrieorientierten Anwendungsfällen wie Design Review [ANF98, EBB99], Fabrik- und Layoutplanung [HEN99, MEZ98], Montageprozessplanung [MÜL98] und kinematischen Simulationen. *Grabowski* erarbeitete auf Basis von STEP

ein Produkt- und Produktionsmodell [GRA96]. Die Norm STEP und die von ihr abgeleiteten Werkzeuge stellen dabei den korrekten Datenfluss im Engineeringprozess sicher [RÖH98].

Im Rahmen der digitalen Fabrikplanung werden bisher verschiedene Simulationswerkzeuge eingesetzt. Grundsätzlich können zwei Hauptrichtungen unterschieden werden. Zum einen werden mit Hilfe von Simulatoren materialverarbeitende und transportierende Prozesse abgebildet [DRE97]. So entwickelte *Feldmann* eine Simulationsumgebung für die Elektronikproduktion, die aufgrund eines modularen Konzeptes eine wirtschaftliche Erstellung von Simulationsumgebungen ermöglicht [FEL00b]. *Griffel* und *Hoffmann* stellen ein Simulationsprojekt für den Rohbau eines Automobilherstellers vor, bei dem das Simulationsmodell kontinuierlich von den ersten Planungen bis zur Online-Simulation in der Betriebsphase an die einzelnen Planungsschritte angepasst wurde. Aufgrund des durchgängigen Einsatzes der Simulation konnte der Aufwand verringert und der Nutzen gesteigert werden [GRI98]. Weiter erstellt *Krüger* ein Gesamtkonzept zur Optimierung komplexer Montageanlagen, in das die Simulation als wesentlicher Bestandteil zur Ermittlung strategischer Potentiale hinsichtlich der eingesetzten Technik und Personalressourcen eingebunden ist [KRÜ99b]. Über ein integriertes Datenmanagement werden der Simulation die aktuellen Betriebsdaten als Eingangsgrößen zur Verfügung gestellt. Versuchsplanung und Durchführung der Simulationsläufe erfolgen teilweise automatisch. Die Ergebnisse werden zu Kennlinien verdichtet, an denen die Potentiale der Einflussgrößen, wie Stationsverfügbarkeiten oder Personalqualifikationen, direkt abgelesen werden können. Zum anderen werden zur Planung und Gestaltung von informations- und kommunikationsbezogenen Vorgängen Geschäftsprozessmodellierer eingesetzt. Deren deterministische Prozessmodelle sind allerdings für die situativen Prozesse in der Montage vielfach ungeeignet. Zudem lässt sich bei dieser Vorgehensweise eine methodische Trennung der Material- und der zugehörigen Informationsflüsse nicht vermeiden [SCO96].

Trotz des unbestrittenen Nutzens der Simulation von materialverarbeitenden und transportierenden Prozessen hat die direkte Anwendung in den Planungsabteilungen der Unternehmen noch keinen breiten Einzug gehalten [GRO97, REI97]. Vielmehr haben sich, als Ursache der zunehmenden Komplexität der Simulatoren, Simulationsexperten herausgebildet, die entweder als interne Dienstleister in Großunternehmen oder als externe Dienstleister bei kleinen und mittelständischen Unternehmen Simulationsdienstleistungen anbieten. Durch diese Entwicklung wird die für die digitale Fabrikplanung erforderliche enge Kopplung von kreativer Planung durch den Konstrukteur und der Bewertung des Planungsstandes durch die Simulation unterbrochen [ABE93]. Der Planer plant losgelöst eine Anlage nach seinen Vorstellungen aus, die dann vom Simulationsexperten ohne Kenntnis der Zusammenhänge und Freiheitsgrade simuliert wird. Die Entstehung einer Produktionsanlage als Ergebnis einer ganzheitlichen Be-

trachtung [REI98] im Sinne eines Simultaneous Engineering wird dadurch nicht unterstützt.

Viele aktuelle Forschungsansätze zielen auf eine weitestgehende Optimierung und Vereinfachung der Versuchsdurchführung ab [HIR97]. Durch eine Automatisierung der Modellierung, Versuchsdurchführung und Datenverwaltung sollen Arbeitserleichterungen geschaffen werden. Obwohl die Automatisierung der Modellerstellung [FEL94] bereits eine wesentliche Erleichterung bedeutet, bleibt die Problematik der Versuchsdurchführung bestehen. Verschiedene Methoden zur automatisierten Versuchsdurchführung zielen vor allem auf eine Integration der notwendigen Eingangsdaten z.B. aus CAD-Systemen ab [LEH97]. Weiter werden verschiedene Ansätze zur automatisierten Problemoptimierung z.B. mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen und Fuzzy-Logik verfolgt, um den Aufwand bei der simulationsunterstützten Untersuchung komplexer Systeme zu verringern und ein zielgerichtetes Vorgehen zu ermöglichen. *Wang* beschreibt eine Methode zur effektiven Vorgehensweise bei der Optimierung von Montageanlagen mit Hilfe der Simulation [WAN95b]. Durch die Strukturierung der Vorgehensweise bei der Durchführung von Simulationen soll auch einem Nichtexperten die Optimierung von komplexen Systemen mit Hilfe der Simulation ermöglicht werden. So baut das vorgestellte Verfahren auf dem Erfahrungswissen von Planungs- und Simulationsexperten auf und integriert die Methoden der Statistik und des Operations Research. Doch die grundsätzliche Problematik eines erheblichen individuellen Durchführungsaufwandes für Simulationsstudien bleibt dabei erhalten. Auch die Reduktion des Versuchsaufwandes durch Methoden der statistischen Versuchsplanung (z.B. nach Taguchi) führt hier zu keinem allgemeingültigen Lösungsansatz. Zwar kann die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe verringert werden, doch die dafür notwendigen Voruntersuchungen sind ebenfalls sehr aufwendig und bedürfen zusätzlich einiger Erfahrung [WAN95b].

Westkämper et al. [WES97] schlägt die simulationsunterstützte Modellierung von Produktionssystemen durch neuronale Netzwerke vor. Neu ist hier, dass die aufwendigen Simulationsversuche nur zur Analyse des generellen Systemverhaltens benutzt werden. Anschließend erfolgt eine Modellierung dieses Verhaltens mit leichter handhabbaren Methoden. *Griffel* formuliert einen regelkreisbasierten Ansatz für eine Prozesskettensimulation [GRI99]. Innerhalb der einzelnen Planungsphasen wird das jeweiligen Optimum durch Simulationsstudien ermittelt und an die nächste Planungsphase übergeben. Problematisch sind die vorgenommenen Entkopplungen einzelner Fertigungsbereiche, welche die dynamischen Auswirkungen innerhalb des Gesamtsystems nur unzureichend unterstützen. Außerdem ist ein hoher Aufwand zur Erstellung der Prozesskette erforderlich. [SFB00].



Bild 2.7 Simulationsmodell einer Karosseriemontage (*Siemens AG*)

Als weitere Entwicklung im Rahmen der digitalen Produktentwicklung und Fabrikplanung ist der Einsatz von Virtual Reality (VR) bei der Konstruktion, Produktentwicklung und Anlagenplanung zu nennen. Hier erfolgt die Mensch-Maschine-Kommunikation mit Hilfe von Eingabemedien, die den menschlichen Sinnen angepasst sind [SFB00]. VR-basierte Simulationen können dabei z.B. für einen menschen- und ablaufgerechte Fabrikplanung sorgen und so optimierte Montageanlagen ermöglichen [WEI97]. Mit Hilfe der dreidimensionalen Animation von Bildfolgen zur Darstellung von Bewegungseffekten, Abläufen und Vorgängen innerhalb einer Simulation kann der Realablauf in einem bestimmten Produktionsbereich dargestellt werden (Bild 2.7).

2.3.3 Hilfsmittel für die Belegungsplanung

Bis vor einigen Jahren existierte in der Montage überwiegend eine traditionelle Meistersteuerung, welche sich i.d.R. auf einfache, listenbasierte Planungshilfsmittel stützte [EVE91, KON89, KOR90]. EDV-Systeme wurden meist nur auf der strategischen Ebene eingesetzt [LEH92]. Die erhebliche Komplexität des Belegungsplanungsproblems wurde daher kaum beherrscht [nach ESS96]. Der Rechnereinsatz innerhalb der letzten Jahre war dann weitgehend durch Insellösungen gekennzeichnet. Den häufigsten Grad der Anwendung fanden PPS-, CAD- und CAQ-Systeme. Eine rechnergestützte Montageplanung und -steuerung konnte in der industriellen Praxis jedoch keine Breitenanwendung finden [VDI92a].

Heute werden vielfach zentrale PPS-Systeme auf Großrechnern eingesetzt [TEI98]. Die Planung durch diese Systeme erfolgt allerdings häufig in so großen Abständen, dass sie schnell überholt ist. Auch ist die Produktionsprogrammplanung eigentlich einer

Kundenauftragsverwaltung gleichzusetzen, die allenfalls durch einfache Prognoseinstrumente unterstützt wird [ADA88a, DRE94, SCE83]. Eine Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen findet weder innerhalb der Produktionsprogrammplanung noch innerhalb der Mengenplanung statt [ADA88a, DRE94, FLE98, WAR86]. Darüber hinaus werden bei der Durchlaufterminierung feste Plandurchlaufzeiten bestehend aus Übergangs- und Durchführungszeit entsprechend der Erzeugnis- oder Arbeitsplanstammdaten herangezogen [DRE94, KER95, SCE97]. Die ablaufbedingte Liegezeit als Bestandteil der Übergangszeit mit wesentlichem Anteil an der Durchlaufzeit steht aber, im Gegensatz zu den relativ genau abschätzbaren Durchführungs- und Transportzeiten, ausschließlich erst nach Erstellung des Belegungsplans fest [ADA77, DRE94, TEM95, ZÄP82]. Die Rückmeldungen über den tatsächlichen Produktionsfortschritt erfolgen nämlich mit großer Verzögerung. Die verwendeten Plandurchlaufzeiten eignen sich somit nicht für die Abbildung des realen Produktionsablaufs. Auch impliziert die bei der Durchlaufterminierung unterlassene Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen die Erwartung der Verfügbarkeit aller Ressourcen zu dem geplanten Termin. Die Überprüfung der Pläne auf Zulässigkeit hinsichtlich der Kapazitätsbeanspruchung erfolgt durch den Vergleich der Soll- und Ist-Belastungen. Innerhalb der Kapazitätsabstimmung, die als automatisch durchgeführter Planungsabschnitt überhaupt in einer nur sehr geringen Anzahl von zentralen PPS-Systemen existiert [KUR99], sollen dann Arbeitsvorgänge zeitlich so verlagert werden, dass sie aus Perioden mit Überschreitung des Kapazitätsangebotes in Perioden mit Unterauslastung verschoben werden. Da die im Rahmen der Durchlaufterminierung herangezogenen Plandurchlaufzeiten den realen Produktionsablauf aber nur unzureichend erfassen, wird für die Kapazitätsabstimmung von der falschen Annahme ausgegangen, dass die geplanten Termine und die sich tatsächlich ergebenden Zeitpunkte der Produktionsdurchführung übereinstimmen [ADA88b]. Aus diesem Grund können auf Basis der Planwerte durchgeführte Kapazitätsausgleichsmaßnahmen unter Umständen überhaupt keine Effekte auf die reale Belastungssituation haben [WEI95]. Als Folge endet der Einflussbereich zentraler PPS-Systeme meist nach der Auftragsfreigabe [HAC97, SCE94].

Auch die in den letzten Jahren entwickelten dezentralen PPS-Systeme genügen nicht den Anforderungen einer schnellen und flexible Produktion [BLE94, GRO92a, GRO93] und erfüllen in der Termin- und Kapazitätsplanung in vielen Fällen immer noch nicht die Erwartungen der Anwender [SIM92, VDM00b]. Die Zielerreichung (Bild 2.8) bei der Belegungsplanung wird nur unzureichend unterstützt [AWK99, DOM90b, HIR91, vgl. SCE99] und so werden bis heute in der kurzfristigen Montagesteuerung mit hohem Zeitaufwand diverse Unterlagen manuell erstellt. Diese Übersichten sind allerdings immer nur bis zum nächsten Eilauftrag oder bis zur nächsten Störung aktuell [HAC97]. Zwar können einige Störungen durch die in der Montage vorhandene Flexibilität ausgeglichen werden, jedoch ist der Mensch bei dieser Aufgabe mit seinem Auffassungsvermögen aufgrund der Komplexität, der Dynamik und der Intransparenz überfordert [ZÜH94].

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der intuitiven Entscheidungsfindung Rückkopplungen und Zeitverzögerungen sowie Strukturwissen nur mangelhaft berücksichtigt werden. Letztendlich ist die genutzte Flexibilität geringer als die vorhandene und damit kostenwirksame Flexibilität [BUL92]. Darüber hinaus werden häufig kurzfristige Änderungen, wie Reihenfolgevertauschungen und Losteilungen, angestoßen, ohne dabei die Konsequenzen für andere Aufträge absehen zu können [EVE94]. Die Folgen dieser unzureichenden Auftragsabwicklung schlagen sich in hohen Umlaufbeständen, unzureichender Termintreue und langen Liegezeiten zwischen den Bearbeitungsschritten nieder [LEH92].

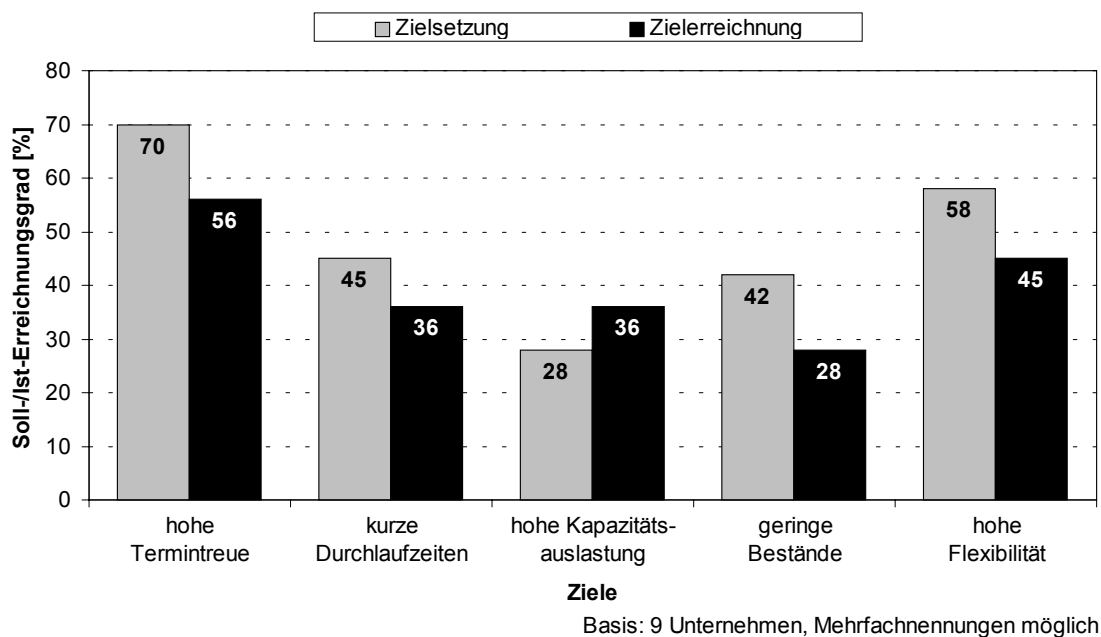


Bild 2.8 Zielsetzung vor und Zielerreichung nach Einführung eines PPS-Systems (nach Scheid, nach Nothnagel)

Zur Unterstützung von PPS-Systemen, welche die Feinsteuerung nur unzureichend durchführen können, werden Leitsysteme angeboten [BEI91, GRO94, KER95]. Grundsätzlich kann zwischen „klassischen“ und „elektronischen“ Leitständen unterschieden werden.

Klassische Leitstandssysteme stellen eine zentrale Organisation der Arbeitsverteilung dar. Die kurzfristige Produktionssteuerung wird mit auftragsbezogenen Arbeitsbelegen zentral durchgeführt. Die Arbeitsbelege werden über ein Organisationsmittel wie z.B. eine Plantafel organisiert und anhand erfolgter Rückmeldungen aktualisiert [KAN87]. Mit Hilfe der Plantafel lässt sich für jeden Arbeitsplatz die Reihenfolge der Aufträge, die Verfügbarkeit und das Belastungsprofil sowie der Auftragsfortschritt in Diagrammform darstellen. So wird neben der Termin- und Kapazitätsplanung auch die Auftragsveranlassung und -überwachung unterstützt [HAC89, SCW92].

Elektronische Leitstände ersetzen die konventionellen Plantafeln durch EDV-Geräte. Sie ermöglichen die Abbildung der Kapazitätsbelegung in Form von auftrags- oder kapazitätsorientierten Balkendiagrammen (Gantt-Charts), bei denen auf der horizontalen Achse die Zeit und auf der vertikalen Achse die betrachteten Aufträge bzw. Kapazitätseinheiten dargestellt werden. Somit können die Arbeitsvorgänge als Balken, deren Länge der Arbeitsvorgangsdauer entspricht, für die jeweilige Kapazitätseinheit über die Zeit auftragen werden [DOR90]. Darüber hinaus ermöglichen elektronische Leitstände die weitgehende Automatisierung der Arbeitsplanauflösung verbunden mit einem graphischen Kapazitätsausgleich. Sie bieten dem Disponenten die Möglichkeit, eine Zulässigkeitsprüfung seiner geplanten Maßnahmen durchzuführen und durch die jederzeitige Aktualität der Plandaten schnell auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren [HAC89, PLI90]. Kommerziell verfügbare Systeme verwenden entweder einfache Prioritätsregeln für eine automatische Reihenfolgeplanung oder unterstützen den Disponenten oder Meister vor Ort, der die Feinplanung durch steuernde Eingaben an einem graphischen Leitstand vornehmen kann. Forschungsarbeiten der letzten Jahre beschäftigen sich darüber hinaus mit dem Einsatz wissensbasierter Komponenten in Leitständen [FIS99, HOF91, PLI90], diese sind jedoch bisher über die Abbildung einfacher Zuteilungsregeln nicht hinaus gekommen [HER96].

Leitstände haben sich als Hilfsmittel zur operativen Durchsetzung des Produktionsprogramms bei einfachen Fertigungsstrukturen bewährt [HAC97, SCE94, STA99]. Ein Belegungsplan, der die zeitliche Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu den Produktionsressourcen wiedergibt, kann damit entweder interaktiv oder EDV-gestützt durch konventionelle Planungsverfahren, wie Heuristiken oder Prioritätsregeln, erzeugt werden. Allerdings wird bei Abweichungen vom geplanten Montageablauf eine Maßnahmenfindung nicht unterstützt. Ebenso ist eine Bewertung des Umplanungsergebnisses nicht durchführbar [BRI94]. Eine störungsbedingte Umplanung unter Nutzung aller vorhandenen Ressourcen ist so nicht möglich [LEH92]. Darüber hinaus stellen elektronische Leitstände i.d.R. Individualsoftware in dem Sinne dar, dass sie an die existierenden EDV-Umgebungen des jeweiligen Anwenders angepasst werden müssen. Der Anpassungsaufwand ist dabei meist beträchtlich [KUR99]. Als Fazit bleibt zu bemerken, dass Leitstände bisher nicht in der Lage sind, die Funktionalitätslücke zwischen Organisation und Technik zu schließen [TEI98].

Über die genannten Defizite hinaus ist der Einsatz von PPS-Systemen mit oder ohne Leitstandsystem zur Planung und Steuerung der Montage zudem umstritten. Der Grund hierfür ist die auf der Produktsstruktur basierende Abbildung des Produktionsablaufs. In der auf Stücklisten basierenden Struktur wird die Fertigung von Einzelteilen oft minutengenau abgebildet. Dagegen können die oft sehr viel länger dauernden Abläufe in der Montage nur noch als sequentielle Arbeitsgänge eines Arbeitsplans abgebildet werden. Dieser Arbeitsplan erlaubt nicht die Darstellung der für die Montage typischen, komple-

xen Ablaufbeziehungen. Zudem ermöglichen herkömmliche PPS-Systeme nur die Abbildung einer Leitressource, z.B. einer Maschinengruppe [GRO92b, HAC89]. Die für eine realistische Montageplanung erforderliche Berücksichtigung mehrerer Engpassressourcen, wie z.B. Personal, Betriebsmittel, Pufferfläche, ist daher nicht möglich. Aus diesen Gründen wird die prinzipielle Eignung von PPS-Systemen für die Montageplanung und -steuerung von zahlreichen Autoren in Frage gestellt [EVE87, GRO90, HAC89, KON89]. Auch die PPS-Systeme, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, bieten hier keine Verbesserung [ESS96].

Andere eingesetzte Hilfsmittel für die Belegungsplanung in der Montage sind ebenfalls sehr stark an der funktionalen Betrachtung von Einzelarbeitsgängen orientiert [BAU95, LOT92, SPU86]. Dies ist vor allem im traditionellen betrieblichen Ablauf des Planungsvorganges begründet, der nur den Durchlauf durch die jeweils betrachtete Ressource bewertet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die geplante Montageleistung insgesamt erreicht wird. Untersuchungen des Betriebsverhaltens komplexer Montagesysteme haben jedoch gezeigt, dass aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Ressourcen Auslastungsverluste von 20% bis 30% entstehen [REI96b].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass trotz einiger vorhandener Hilfsmittel, die für die Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage einsetzbar sind, immer noch erhebliche Defizite sowohl im Planungsaufwand als auch in der Planungsqualität bestehen.

2.4 Anforderung an ein System zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die Charakterisierung der Planungsaufgabe erfolgte sowie Verfahren und Hilfsmittel für die Belegungsplanung erläutert wurden, sind nun die Anforderung an ein System zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage zu definieren.

Eine Verbesserung der Qualität und Realisierungsmöglichkeiten von mittels PPS-Systemen erzeugten Planungsergebnissen soll in dieser Arbeit für die Multiressourcen-Montage durch die Entwicklung einer geeigneten Belegungssystematik erzielt werden. Besondere Bedeutung kommt dabei der Berücksichtigung vergleichbarer Ressourcen und umfangreicher Restriktionen zu. Die Akzeptanz einer Belegungsplanung steigt nämlich in dem Maße, in dem sich die Anforderungen hinsichtlich des Wissenstands über Liefertermine, Kapazitäten und ihrer gegenseitigen Ersetzbarkeit sowie alternativer Montageverfahren, Auftrags- und Ressourceneigenschaften einschließlich ihrer Verfügbarkeiten in der Belegung widerspiegeln. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist die zu bewältigende Planungs- und Steuerungskomplexität erheblich. Herkömmliche Systeme bieten in diesem Bereich keine ausreichenden Lösungen an. Die

vielfach in der Theorie entwickelten Lösungsansätze gehen von idealisierten Annahmen aus, die in der Realität nicht anzutreffen sind, da sie z.B. entscheidungsrelevante Ressourcen oder Restriktionen vernachlässigen. Auch reichen die derzeit zur Verfügung stehenden Planungs- und Steuerungsverfahren nicht aus, um das in der Multiressourcen-Montage existierende Flexibilitätspotential zweckmäßig zu handhaben und gleichzeitig einen hohen Nutzungsgrad sicherzustellen. Gerade aber die Ausnutzung der Flexibilität trägt dort maßgeblich zur Rentabilität und Wirtschaftlichkeit der kapitalintensiven Ressourcen bei.

Ein System zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage sollte in Übereinstimmung mit dem Aufbau heute eingesetzter PPS-Systeme in ein Ebenenmodell gegliedert sein, das nach funktionalen Gesichtspunkten eingeteilt ist. Auf der administrativen Ebene kann so die Datenverwaltung, auf der dispositiven Ebene die Termin- und Kapazitätsplanung und auf der operativen Ebene die Auftragssteuerung erfolgen. Dazu muss ein strukturiertes Planungsinstrumentarium entwickelt werden, das möglichst den Planungsaufwand reduziert und gleichzeitig die Planungsqualität erhöht.

Betrachtungsschwerpunkte der *administrativen Ebene* sind dann die Montage- und Auftragsstruktur. Eine Erhöhung der Planungseffizienz und -sicherheit kann hier durch ein durchgängiges Datenmodell unterstützt werden. Ziel muss es sein, Daten nur einmal zu erzeugen und überall dort so aufbereitet zur Verfügung zu stellen, wie sie jeweils gebraucht werden. Dies kann durch eine Verknüpfung mit bestehenden Komponenten zur rechnerunterstützten Konstruktion und Produktion realisiert werden. So stehen im Montagevorfeld CAD- und CAP-Systeme zur Erzeugung und Verarbeitung von Technologiedaten sowie PPS-Module zur Erfassung und Verarbeitung von Auftrags- und Betriebsdaten bereit. Eine Anbindung an den Digital Mockup ermöglicht ein einheitliches, durchgängiges Datenmodell vom Produktmodell über das Ablaufmodell bis zu den logistischen Zielmodellen.

Durch die *dispositive Ebene* muss folglich sichergestellt werden, dass das Potential in der Multiressourcen-Montage weitestgehend ausgeschöpft werden kann. Reduziert man nämlich bereits in dieser Planungsphase die Anzahl der möglichen Belegungsalternativen, bleiben in der Praxis viele Ressourcenpotentiale ungenutzt. Die Möglichkeit der Optimierung des Ressourceneinsatzes stellt dagegen sicher, dass die Abwicklung der Montageaufgabe unter rationellen und zeitnahen Aspekten erfolgen kann. Grundlage einer realistischen Montageplanung ist hier die Berücksichtigung aller geltenden Restriktionen. Dazu gehören neben technologischen Abhängigkeiten gleichermaßen die Berücksichtigung des im Planungszeitraum zur Verfügung stehenden Kapazitätsangebots sowie eine Terminierung mit wirklichkeitsnahen Übergangszeiten, die auch ablaufbedingte Liegezeiten einschließen. Durch eine realistische Terminierung ist zu vermeiden, dass auf der operativen Ebene unabhängig von der terminverzögernden Ursache das Auftreten von Terminüberschreitungen zu einer tendenziell verfrühten

Auftragseinlastung in der Zukunft führt. Die damit verbundene Bestandserhöhung zieht sonst gleichzeitig längere und stärker streuende Durchlaufzeiten nach sich, die wiederum zu einer schlechten Termintreue führen womit ein sich selbstverstärkender Fehlerkreis geschlossen wird. Die Folge des Planungsergebnisses der dispositiven Ebene soll vielmehr eine Kombination von Leistungssteigerung und rationellem Einsatz der Ressourcen sowie eine hohe Termintreue im Auftragsablauf sein.

Auf der *operativen Ebene* muss sich das Auftragsfreigabeverfahren an der zentralen Rolle des Auftragsbestandes von Engpasskapazitäten orientieren, da sie den Durchsatz eines Montagesystems wesentlich beeinflussen und daher entsprechend ihrer Kapazität optimal ausgelastet sein sollten. Ebenso müssen nach Eintritt von Störungen unter Ausnutzung der vorhandenen Flexibilität umgehend Reaktionsmechanismen angestoßen werden können, welche die Auswirkungen der Störungen begrenzen. Hierdurch kann die Anzahl verspäteter Aufträge minimiert und die Durchlaufzeit der Aufträge kurz gehalten werden. Es ist durch die Montagesteuerung exakt das Bestandsniveau einzustellen, dass eine ausreichende Versorgung der Engpasskapazitäten auch bei Eintritt von Störungen gewährleistet, ohne die Warteschlangen vor den Montagestationen unnötig lang werden zu lassen.

3 Modellierung einer Multiressourcen-Montage

Die vielfältigen Wechselwirkungen der Komponenten des Systems Montage und das Berücksichtigen unterschiedlicher Zielgrößen (vgl. Kapitel 1.3) erschweren die Entscheidungsfindung bei der Belegungsplanung. Aus diesem Grund müssen zunächst alle durch die Belegungsplanung beeinflussbaren logistischen Zielgrößen definiert und ihre Abhängigkeiten beschreiben werden, um das Planungsproblem bestmöglich lösen zu können. Bis jetzt fehlt jedoch in der Multiressourcen-Montage eine allgemeingültige Methodik, mit der die quantitative Abstimmung zwischen den gegenläufigen Zielgrößen vorgenommen werden kann. Zur Bewältigung der Planungsaufgabe soll deshalb aufbauend auf bereits bestehende Ansätze ein Modell einer Multiressourcen-Montage erstellt werden, um durch eine idealisierte und vereinfachte Beschreibung der Realität Informationen über logistische Sachverhalte zu gewinnen und zu überprüfen. Das hierzu notwendige Modellieren beinhaltet das Erkennen und Beschreiben der problemrelevanten Aspekte. Die Analyse des Modells schafft dann die Voraussetzung zur Entwicklung eines Lösungsverfahrens, welches auf das reale Problem übertragen werden kann. In Bezug auf die Belegungsplanung des betrachteten Montageprinzips heißt Modellieren, die innerhalb der Systemgrenzen zu berücksichtigen Vorgänge, Ressourcen, technologischen und organisatorischen Restriktionen auszuwählen, abzubilden und das Planungsziel festzulegen. Da die Übertragung eines Lösungsverfahrens auf das reale Problem nur dann möglich ist, wenn im Modell alle wesentlichen Zusammenhänge eine Berücksichtigung finden, werden überwiegend sehr detaillierte Modelle zur Lösungsfindung herangezogen.

Grundsätzlich werden hierzu drei Modellarten unterschieden [nach HAH86]:

- *Beschreibungsmodelle* dienen der zielorientierten Wiedergabe und der systematisierenden Aufbereitung von Tatbeständen der Realität. Sie enthalten jedoch keine Aussage über Ursache-Wirkungszusammenhänge und erlauben auch keine Prognosen über das Verhalten des Realsystems bei Änderungen.
- *Erklärungsmodelle* integrieren die Ursache-Wirkungsbeziehung einzelner Modellgrößen, die auf Vermutungen beruhen oder auch empirisch abgesichert sind. Die Beziehungszusammenhänge können dabei sowohl deterministischer als auch stochastischer Natur sein und die Modellformulierung kann statische wie dynamische Aspekte berücksichtigen.
- *Entscheidungsmodelle* verknüpfen Erklärungsmodelle mit Zielsystemen bzw. Zielfunktionen.

3.1 Bestimmung der Zielgrößen

Entscheidend für den messbaren Erfolg der Durchführung einer planerischen Aufgabe ist neben dem methodischen Vorgehen die Festlegung der Planungsziele. Bedingungen für eine Zielkonkretisierung sind, dass nachzuvollziehende Planungsmaßnahmen zur Zielerreichung vorhanden sind, die Erreichbarkeit des Zielwertes festzustellen ist, der Erreichungszeitraum festliegt und für Zielmehrheiten eine Prioritätsordnung existiert [BER73].

3.1.1 Montageauftrag

Im allgemeinen ist ein Auftrag die Aufforderung an eine organisatorische Einheit, eine bestimmte Aufgabe zu bearbeiten. Durch ihn wird festgelegt, welche Leistung zu welchem Termin zu erbringen ist [nach MEI95]. Ein Auftrag besteht aus mehreren Arbeitsvorgängen, die wiederum aus mehreren Arbeitsgängen bestehen können. Die Auftragsdaten umfassen alle zur Durchführung eines Auftrags erforderlichen Daten, wie Auftragsnummer, benötigtes Material, Stations- bzw. Stationsgruppennummer, Arbeitsvorgangbezeichnung und Belegungszeiten.

Die Grundlage der Definition der Auftragszielgrößen bildet das *Durchlaufelement* (Bild 3.1). Es beschreibt die *Durchlaufzeitanteile* eines Arbeitsvorganges [WIE84]. Die Zeitspanne zwischen der Freigabe des ersten Arbeitsvorganges (TAB) und dem Abschluss des letzten Arbeitsvorganges (TAE) eines Montageauftrages ergibt die *Auftragsdurchlaufzeit* (ZDA). Die Auftragsdurchlaufzeit ergibt sich somit aus der Summe der Durchlaufzeiten der einzelnen, dem Auftrag zugehörigen Arbeitsvorgänge (Bild 3.1a).

Die *Durchlaufzeit* für einen Arbeitsvorgang ist wiederum als Zeitspanne festgelegt, die ein Auftrag von der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Arbeitsvorganges selbst benötigt:

$$ZDL = TBE - TBEV$$

Gl. 3.1

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

Im Bildteil b ist ein Durchlaufelement dargestellt, das zunächst nur eine Dimension – die Zeitdauer – hat und daher als „eindimensionales“ Durchlaufelement bezeichnet wird [LOW85]. In seiner allgemeingültigen Form wird das eindimensionale Durchlaufelement in die Bestandteile *Liegen nach Bearbeitung*, *Transport*, *Liegen vor Bearbeitung*, *Rüsten* und *Bearbeiten* aufgeteilt.

In der vereinfachten Form des eindimensionalen Durchlaufelements werden nur noch die Teile *Übergangszeit* (ZUE) und *Durchführungszeit* (ZDF) dargestellt (Bild 3.1c).

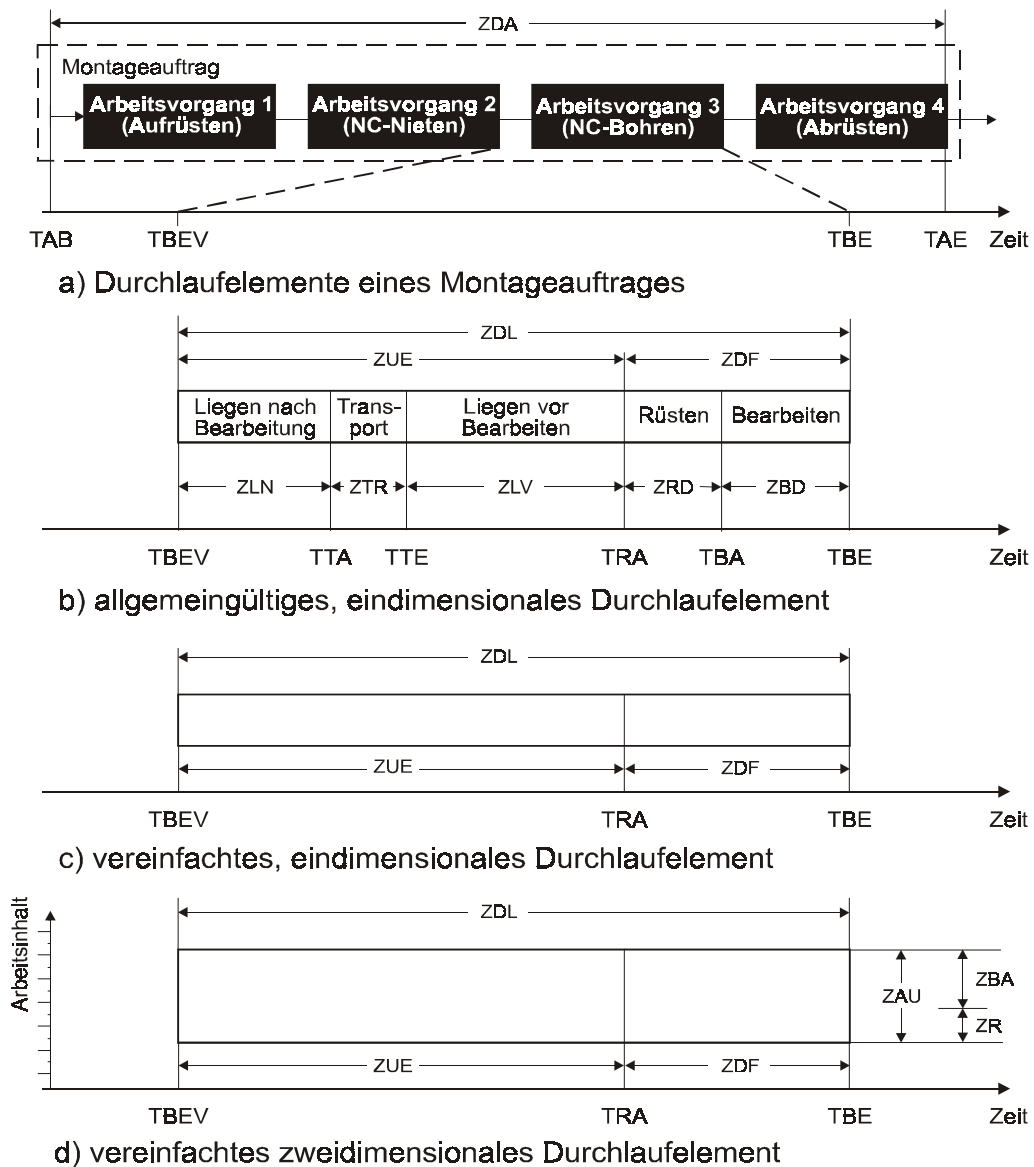


Bild 3.1 Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente (nach *Bechte*, nach *Heinemeyer*, nach *Erdlenbruch*)

Eine große Bedeutung bei der Bestimmung der Zielgrößen besitzt das zweidimensionale Durchlaufelement (Bild 3.1d). Es entsteht, wenn das eindimensionale Durchlaufelement um eine zweite Dimension, den *Arbeitsinhalt* des Auftrags, die *Auftragszeit* (ZAU) erweitert wird. Die Auftragszeit errechnet sich aus der Summe der Vorgabezeiten für den entsprechenden Auftrag an der Ressource, die durchlaufen wird, wie Arbeitsplatz, Station oder gesamtes Montagesystem. Die Auftragzeit wird dem Arbeitsplan entnommen und dient zur Gewichtung der zeitlichen Größen eines Montageauftrages.

Aus den logistischen Zielsetzung (Bild 1.4) können aus Auftragsicht folgende Zielgrößen abgeleitet werden:

- Die Leistungserbringung pro Zeiteinheit wird durch eine verringerte *Durchlaufzeit* verbessert.
- Ein hohe *Terminreue* garantiert im Rahmen des logistischen Effizienzdenkens ein gutes Verhältnis von Systemleistung und Kundenservice.

3.1.2 Montagestation

Ein Montagesystem kann in mehrere Teilsysteme gegliedert werden (Bild 3.2), die zeitlich parallel zueinander ablaufen und terminlich miteinander verknüpft werden können. Ein Beispiel für eine derartige Struktur ist die Gliederung eines Montagesystems in die Teilsysteme Vormontage und Endmontage. Jedes Teilsystem besteht wiederum aus Montageabschnitten, die durch den Montageablauf miteinander verknüpft sind. Ein Montageabschnitt eines Montagesystems ist die Montagestation, welcher aus der Montageablaufstruktur abgeleitete Tätigkeiten zugeordnet sind [SAU87]. Der räumliche Bereich in einer Montagestation, in dem die Arbeitsaufgabe verrichtet wird, ist ein Arbeitsplatz.

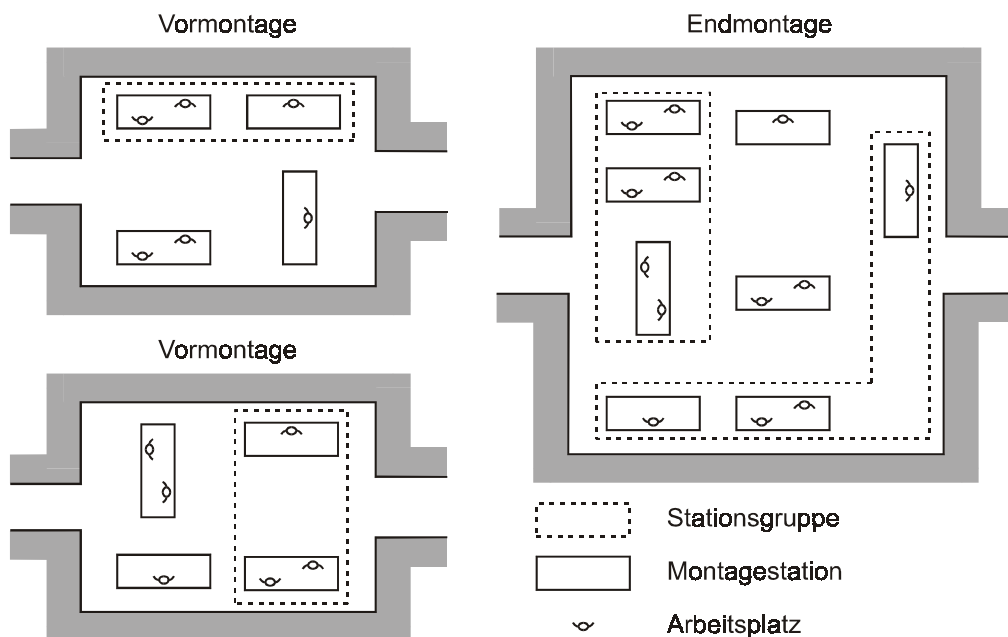


Bild 3.2 Teilsysteme eines Montagesystems

Montagestationen, an denen im Sinne der Auftragsabarbeitung gleiche Funktionen durchzuführen sind, werden zu Stationsgruppen zusammengefasst. Stationen einer Stationsgruppe müssen nicht räumlich zusammenliegen. Innerhalb einer Stations-

gruppe besteht grundsätzlich die Möglichkeit, einen Arbeitsvorgang an jeder Station einer Gruppe durchzuführen.

Aus der logistischen Zielsetzung (Bild 1.4) können aus Ressourcensicht folgende Zielgrößen abgeleitet werden:

- Ein hoher *Durchsatz* einer Montagestruktur kennzeichnet deren Effizienz.
- Eine hohe *Kapazitätsauslastung* kennzeichnet das gute Verhältnis zwischen vorhandenem und genutztem Potential an Ressourcen.
- Kleinstmögliche *Bestände* verringern den Faktor Material und verbessern das Verhältnis zwischen eingesetztem und genutztem Faktorpotential.

Allgemein beschreibt der Durchsatz die Anzahl der pro Zeiteinheit im betrachteten System vollständig bearbeiteten Teile. Unter Bestand wird die mengen- oder wertbezogene Substanz eines Bereiches zu einem bestimmten Termin verstanden [DOR90]. Innerhalb dieser Arbeit bezeichnet der Bestand grundsätzlich den Arbeitsinhalt in Stunden. Ferner wird der Durchsatz als *Leistung* bezeichnet und gibt die Größe des in einer Zeiteinheit abgearbeiteten Arbeitsinhaltes an.

3.2 Darstellung der Zielgrößen

Die Darstellung der Zielgrößen soll anhand in der Praxis verbreiteter und bewährter logistischer Modelle vorgenommen werden.

3.2.1 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Logistische Modelle haben die Aufgabe, die dynamischen Zusammenhänge zwischen den logistischen Qualitätsmerkmalen zu beschreiben. Weiterhin sollen sie den tatsächlichen und den geplanten Durchlauf von Aufträgen durch die Produktion realitätsnah beschreiben sowie Aussagen über Idealzustände und über praktische Näherungen zulassen [WIE97a].

Ein solches Beschreibungsmodell stellt das Trichtermodell und das daraus abgeleitete Durchlaufdiagramm dar (Bild 3.3). Die Grundidee des *Trichtermodells* besteht darin, dass jede beliebige Kapazitätseinheit eines Produktionssystems durch die Größen *Zugang*, *Bestand* und *Abgang* in ihrem Durchlaufverhalten vollständig beschrieben und als Trichter dargestellt werden kann [nach BEC84]. Die an einer Montagestation zugehenden Arbeitsvorgänge der Aufträge werden als Kugeln abgebildet, deren Volumen dem Arbeitsinhalt an dieser Station entspricht (Bild 3.3a). Sie bilden mit den bereits dort wartenden Arbeitsvorgängen einen Bestand an wartenden Arbeitsvorgängen. Diese fließen nach Bearbeitung aus dem Trichter ab. Die Trichteröffnung symbolisiert dabei die Leistung, die innerhalb der Kapazitätsgrenzen variieren kann.

Das Verhältnis der Trichterfüllung oder auch der *Bestandsfläche* (vgl. Bild 3.4c) zum Abgang bzw. des mittleren Bestandes zur mittleren Leistung entspricht der mittleren *Reichweite*. Diese Beziehung wird als *Trichterformel* bezeichnet [NYH99].

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

Gl. 3.2

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

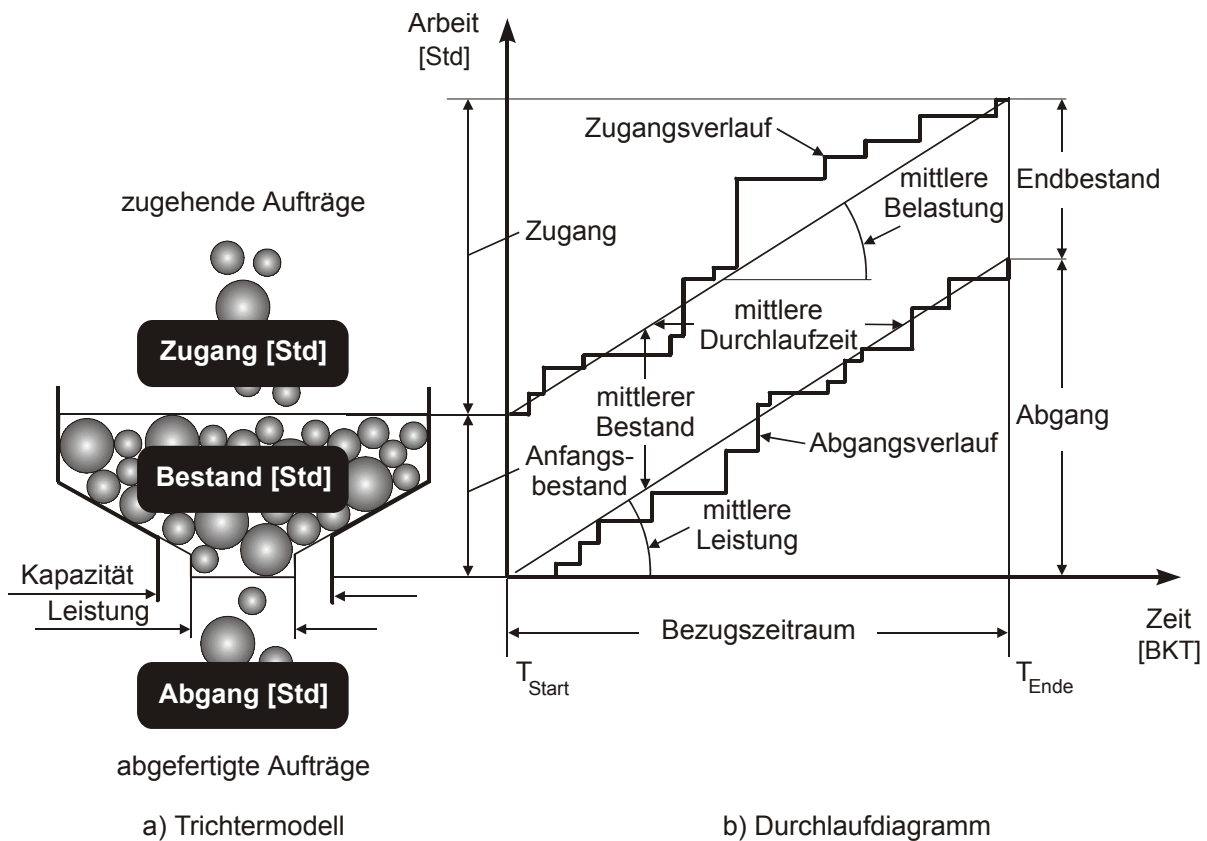


Bild 3.3 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm einer Arbeitsstation (nach *Bechte*)

Das Trichtermodell einer Montagestation ermöglicht eine einfache und anschauliche Steuerung und Regelung des Auftragsdurchlaufs in der Montage. Anhand der Trichterfüllung kann die Reichweite des Bestandes an der Station abgelesen werden und es wird erkenntlich, welche Stationen als Engpässe den Auftragsfluss behindern.

Die Ereignisse an einem Trichter lassen sich in ein *Durchlaufdiagramm* übertragen (Bild 3.3b). Der *Abgangsverlauf* entsteht, indem die Arbeitsinhalte der fertiggestellten

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 Beginn der Zugangskurve 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 Abgangskurve ist der Bestand und der horizontale Abstand entspricht der Durchlaufzeit.

Während das Trichtermodell den Prozesszustand nur für einen definierten Zeitpunkt oder Zeitraum anzeigt, ist das Durchlaufdiagramm ein ideales Modell, das dynamische Verhalten einer Montagestation qualitativ und zeitpunktgenau mit den üblichen Betriebsdaten in grafischer Form darzustellen. Durchlaufdiagramme können sowohl für Vergangenheits- als auch für Zukunftsbetrachtungen verwendet werden. In ihren unterschiedlichen Anwendungsformen zeigen sie Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen auf (Bild 3.4) und machen sie einer mathematischen Beschreibung zugänglich.

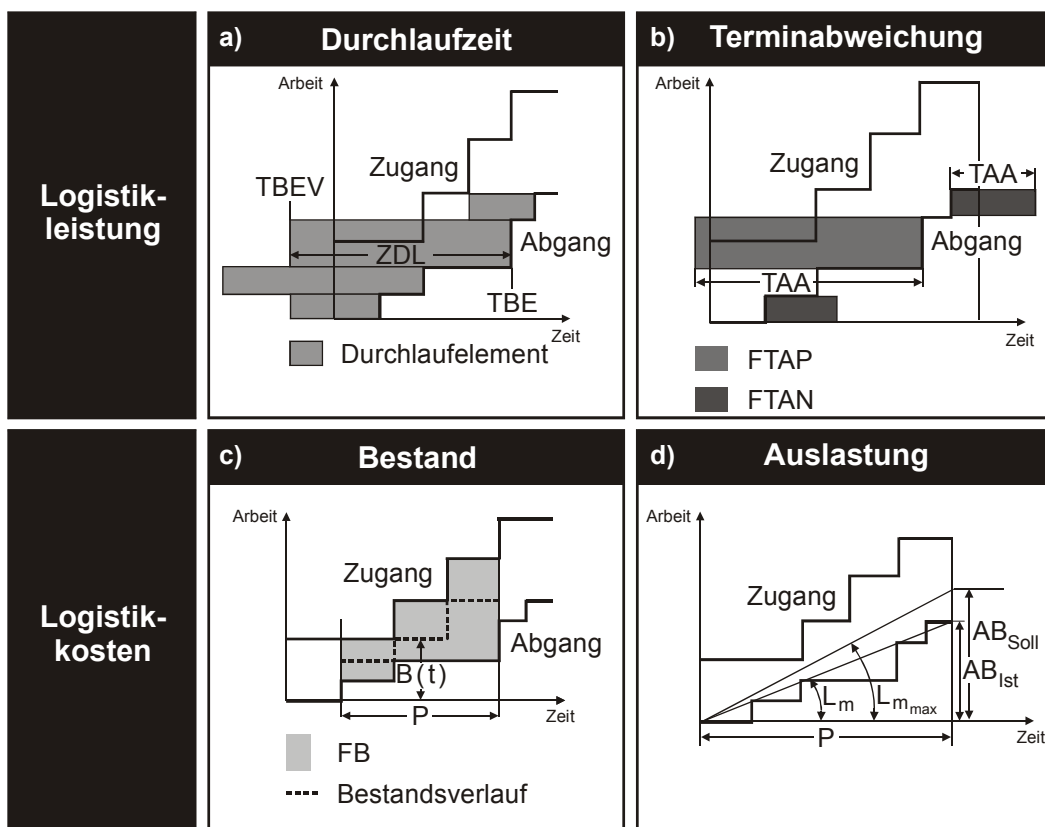


Bild 3.4 Die logistischen Zielgrößen im Durchlaufdiagramm (nach *Wiendahl*)

Durchlaufzeit

Die Berechnung der mittleren Durchlaufzeiten an einer Montagestation lässt sich auf zwei verschiedene Arten durchführen. Es wird zwischen der mittleren einfachen Durchlaufzeit und der mittleren gewichteten Durchlaufzeit unterschieden [WIE97c].

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

$$ZDL_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZDL_i}{n} \quad \text{Gl. 3.3}$$

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 (Bild 3.1d). Der Berechnung liegt nicht die Anzahl, sondern der Arbeitsinhalt der abgegangenen Aufträge zugrunde. Es wird daher jede einzelne Durchlaufzeit mit dem Arbeitsinhalt multipliziert (gewichtet), so dass eine Fläche entsteht (Bild 3.4a), die man als gewichtete Durchlaufzeit dieses Arbeitsvorgangs deuten kann. Der Mittelwert ergibt sich, indem die Summe aller abgegangenen gewichteten Durchlaufzeiten durch die Summe aller Auftragszeiten dividiert wird:

$$ZDL_{mg} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZDL_i * ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad \text{Gl. 3.4}$$

mit	ZDL_{mg}	mittlere gewichtete Durchlaufzeit von Arbeitsvorgängen
	ZDL_i	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
	ZAU_i	Auftragszeit eines Arbeitsvorganges
	i	Arbeitsvorgangindex
	n	Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge

Während die mittlere einfache Durchlaufzeit eine Aussage darüber zulässt, wie lange ein Auftrag im Mittel an einer Montagestation verweilt, können mit der mittleren gewichteten Durchlaufzeit aufgrund der Berücksichtigung der Arbeitsinhalte weitergehende Erkenntnisse gewonnen werden. So gibt der Mittelwert der gewichteten Durchlaufzeiten an, wie lange es im Mittel dauert, bis eine Arbeitseinheit, z.B. eine Stunde, durch die betrachtete Montagestation gelaufen ist. Grundsätzlich kann die mittlere gewichtete Durchlaufzeit kleiner, gleich oder größer als die mittlere einfache Durchlaufzeit

sein. Ist die mittlere gewichtete Durchlaufzeit kleiner als die mittlere einfache Durchlaufzeit, werden die Aufträge mit großem Arbeitsinhalt im Mittel schneller abgefertigt als die Aufträge mit kleinem Arbeitsinhalt. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn mit Hilfe der LOZ-Regel (längste Operationszeit) die Reihenfolge an der Montagestation gebildet wird. Bei Anwendung der KOZ-Regel (kürzeste Operationszeit) ist die mittlere gewichtete Durchlaufzeit dagegen größer als die mittlere einfache Durchlaufzeit, da Aufträge mit geringem Arbeitsinhalt bevorzugt werden.

Terminabweichung

Die Differenz aus Ist- und Soll-Abgangstermin eines Auftrags ergibt die *Abgangsterminabweichung*. Verfrüht fertiggestellte 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 (Bild 3.4b). Die *mittlere gewichtete Terminabweichung* der Abgänge ergibt sich aus der Differenz der positiven und negativen Terminabweichungsflächen, dividiert durch die Summe der Abgänge im Bezugszeitraum:

$$TAA_{mg} = \frac{FTAP - FTAN}{AB} \quad \text{Gl. 3.5}$$

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:

$$TAZ_{mg} = \frac{FTZP - FTZN}{AB} \quad \text{Gl. 3.6}$$

mit	TAZ_{mg}	mittlere gewichtete Zugangsterminabweichung
	$FTZP$	positive Zugangsterminabweichungsfläche
	$FTZN$	negative Zugangsterminabweichungsfläche
	AB	Abgang im Bezugszeitraum

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

$$TAR_{mg} = TAA_{mg} - TAZ_{mg} \quad \text{Gl. 3.7}$$

mit	TAR_{mg}	relative mittlere gewichtete Terminabweichung
	TAA_{mg}	mittlere gewichtete Abgangsterminabweichung
	TAZ_{mg}	mittlere gewichtete Zugangsterminabweichung

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.

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:

$$B_m = \frac{FB}{P} \quad \text{Gl. 3.8}$$

mit	B_m	mittlerer Bestand
	FB	Bestandsfläche
	P	Bezugszeitraum

Neben der Bestandsfläche ist im Durchlaufdiagramm auch der Bestandsverlauf über der Zeitachse abgebildet (Bild 3.4c). Werden anstelle der Ist-Zugangskurve und Ist-Abgangskurve die entsprechenden Plan-Kurven dargestellt, wird der Plan-Bestand aus der vertikale Differenz der Plan-Zugangskurve und Plan-Abgangskurve ersichtlich.

Auslastung

Die Leistung kann aus dem Abgangsverlauf des Durchlaufdiagramms bestimmt werden (Bild 3.4d). 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:

$$L_m = \frac{AB}{P} \quad \text{Gl. 3.9}$$

mit L_m mittlere Leistung
 AB Abgang im Bezugszeitraum
 P Bezugszeitraum

Die *Auslastung* einer Montagestation wird definiert als das Verhältnis der mittleren Leistung zu der *maximal möglichen mittleren Leistung* (Bild 3.6):

$$A_m = \frac{L_m}{L_{m_{max}}} \quad \text{Gl. 3.10}$$

mit A_m mittlere Auslastung
 L_m mittlere Leistung
 $L_{m_{max}}$ maximal mögliche mittlere Leistung

Mit Hilfe der Durchlaufdiagramme ist es möglich, grundlegende Informationen über die Montageabläufe zu gewinnen und hinsichtlich verschiedener Fragestellungen zu analysieren. So wird das Auffinden von Ursachen für Abweichungen von den Planvorgaben und das Ableiten geeigneter Steuerungsmaßnahmen weitgehend unterstützt. Durchlaufdiagramme werden im Rahmen des entwickelten Verfahrens zur Belegungsplanung dazu genutzt,

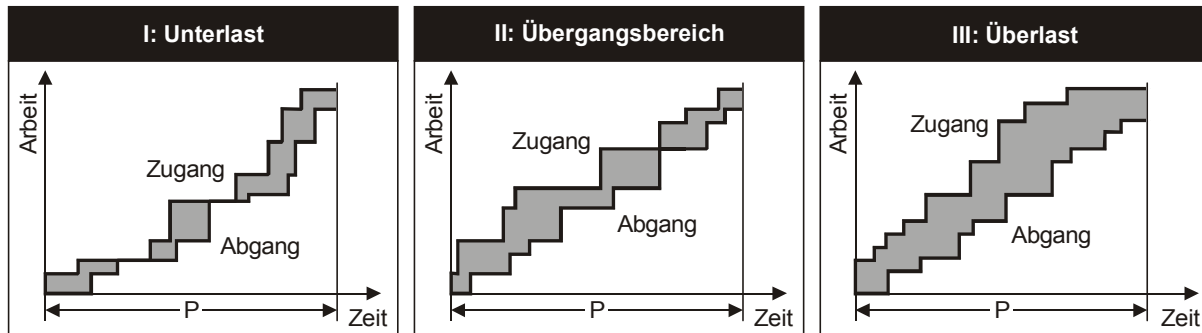
- Belastungssituationen,
- Durchlaufzeitverhalten,
- Termineinhaltungen und Reihenfolgevertauschungen,
- Bestands- und Rückstandssituationen sowie
- Engpassbetrachtungen

an den Montagestationen zu untersuchen.

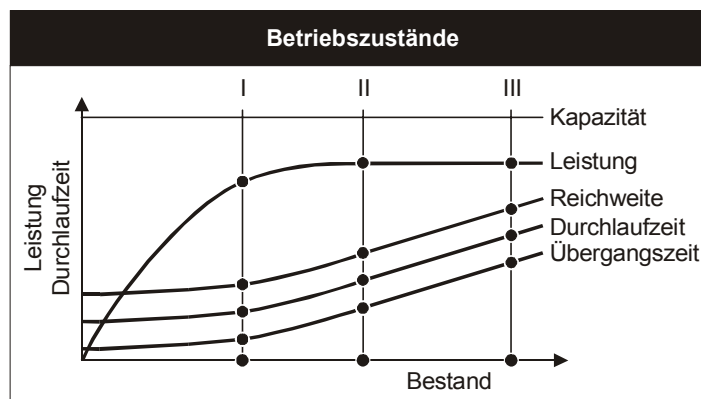
3.2.2 Produktionskennlinie

Das Messen und Darstellen der logistischen Zielgrößen allein reicht nicht aus, um eine Bewertung der logistischen Leistungsfähigkeit eines Montagesystems vornehmen zu können. Es ist ebenso wichtig, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen sinnvoll erreichbaren Leistungs-, Durchlauf- und Bestandswerte zu bestimmen, um daraus realistische Zielvorgaben abzuleiten. So kann mit Hilfe des Durchlaufdiagramms der *Betriebszustand* einer Montagestation für eine Periode ermittelt werden. Mögliche Be-

triebszustände sind Unter- und Überlast oder ein dazwischen liegender Zustand (Bild 3.5a). Diese unterschiedlichen Betriebszustände lassen sich in Form von *Produktionskennlinien* [NYH99] verdichtet darstellen. Dazu werden die jeweiligen Periodenwerte für die Leistung, Übergangszeit, Durchlaufzeit und Reichweite in Abhängigkeit vom zugehörigen Bestand aufgetragen (Bild 3.5b).



a) typische Betriebszustände an einem Arbeitssystem innerhalb einer Periode



b) Darstellung der Betriebszustände in Produktionskennlinien für eine Periode

Bild 3.5 Darstellung unterschiedlicher Betriebszustände in Produktionskennlinien (nach Nyhuis)

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. Sie kann jedoch ein Minimum, welches sich aus der mittleren Durchführungszeit der Aufträge und ggf. der Transportzeit ergibt, nicht unterschreiten. In diesem Betriebszustand trifft jeder zugehende Auftrag auf freie Kapazität und wird sofort bearbeitet. Ein prinzipiell ähnliches Verhalten wie die *Durchlaufzeitkennlinie* weist die

Übergangskennlinie auf, die sich bei geringen Beständen der Transportzeit immer weiter annähert. Die *Reichweitenkennlinie* ergibt sich gemäß der Trichterformel (Gl. 3.2) unmittelbar aus dem Verhältnis von Bestand und Leistung [NYH99].

Zur Unterscheidung von Kapazität und maximal möglicher Leistung sind verschiedene Größen zu berücksichtigen (Bild 3.6). So ergibt sich die Kapazität einer Montagestation aus der Summe der maximal durchführbaren Rüst- und Bearbeitungszeiten je Periode. Diese nur theoretisch nutzbare Kapazität reduziert sich um Ausfallszeiten infolge von Störungen, Wartungen, etc. zu einer verfügbaren Stationskapazität. Zusätzlich muss die Personalkapazität berücksichtigt werden, da eine Montagestation grundsätzlich nur dann genutzt werden kann, wenn entsprechendes Personal zur Durchführung der Arbeitsinhalte, wie z.B. Fügen, Kontrollieren, Justieren (vgl. Kapitel 2.1.2.1), vorhanden ist. Die Personalkapazität ergibt sich aus den Arbeitszeiten bzw. dem Schichtmodell und ist an Montagestationen mit Einzelarbeitsplätzen i.d.R. aufgrund von Wochenenden, Feiertagen, etc. kleiner als die Stationskapazität. Aufgrund von Urlaub, Krankheit und weiteren Abwesenheitszeiten reduziert sich die Personalkapazität auf die verfügbare Personalkapazität. Durch die Einbeziehung des Leistungsgrads kann die nutzbare Personalkapazität ermittelt werden. Der Leistungsgrad berücksichtigt z.B., dass eine Mehrstationenbedienbarkeit vorliegt oder ein Mehrfacharbeitsplatz an einer Montagestation vorhanden ist. Er entspricht dem Verhältnis von Vorgabe- zu Belegungszeit und kann größer, gleich oder kleiner eins sein. Die maximal mögliche Leistung ist gleich dem Minimum aus verfügbarer Stations- und nutzbarer Personalkapazität, also gleich der beschränkenden Kapazität.

Im rechten Teil von Bild 3.6 ist der prinzipielle Verlauf einer Leistungskennlinie abgebildet. Anhand der Graphik wird deutlich, dass mit den Leistungskennlinien nur bestandsabhängige Auslastungsverluste dargestellt werden. Alle weiteren Größen, welche die Leistung bzw. Auslastung einer Montagestation beeinflussen, gehen bereits in die Ermittlung der bestandsunabhängigen maximal möglichen Leistung ein [nach NYH99].

Zusätzlich ist zwischen den realen und idealen Verläufen der Kennlinien zu unterscheiden (Bild 3.7). 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 einerseits die beschriebenen Einwirkungen auf die maximal mögliche Leistung und andererseits die aufgrund verschiedener Losgrößen sowie unterschiedlicher Rüst- und Bearbeitungszeiten schwankenden Arbeitsinhalte. Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen den idealen und realen Kennlinienverläufe ist, dass der Zugang an den einzelnen Montagestationen i.d.R. durch den Abgang mehrerer Vorgängerstationen bestimmt wird und sich so eine Streuung im Zugangsverlauf ergibt. Darüber hinaus sind die Übergangszeiten einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt und weisen somit ebenfalls eine entsprechende Streuung auf.

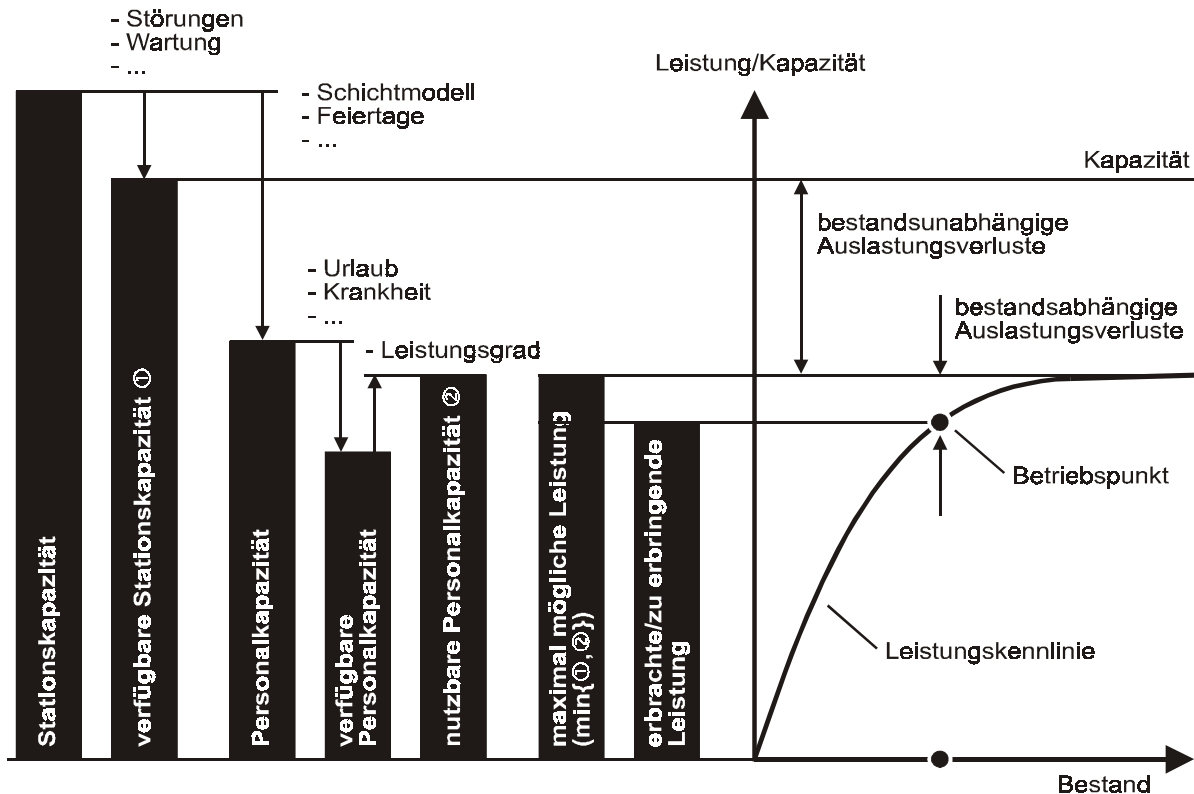


Bild 3.6 Kapazität und maximal mögliche Leistung einer Montagestation
(in Anl. Nyhuis)

Der *ideale Mindestbestand* ergibt sich aus der Summe der mittleren gewichteten Auftragszeit und der mittleren gewichteten Transportzeit [NYH99]:

$$BI_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i * ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (ZTR_i * ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad \text{Gl. 3.11}$$

mit

- BI_{min} idealer Mindestbestand
- ZAU_i Auftragszeit eines Arbeitsvorganges
- ZTR_i Transportzeit eines Arbeitsvorganges
- i Arbeitsvorgangindex
- n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge

Unter Verwendung der Gleichungen für den Mittelwert und die Standardabweichung [SAC84] lässt sich die Gl. 3.11 umformen zu:

$$BI_{min} = ZAU_m + \frac{ZAU_s^2}{ZAU_m} + \frac{\sum_{i=1}^n (ZTR_i * ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \tag{Gl. 3.12}$$

- mit
- BI_{min} idealer Mindestbestand
 - ZAU_m Mittelwert der Auftragszeit
 - ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit
 - ZTR_i Transportzeit eines Arbeitsvorganges
 - ZAU_i Auftragszeit eines Arbeitsvorganges
 - i Arbeitsvorgangindex
 - n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge

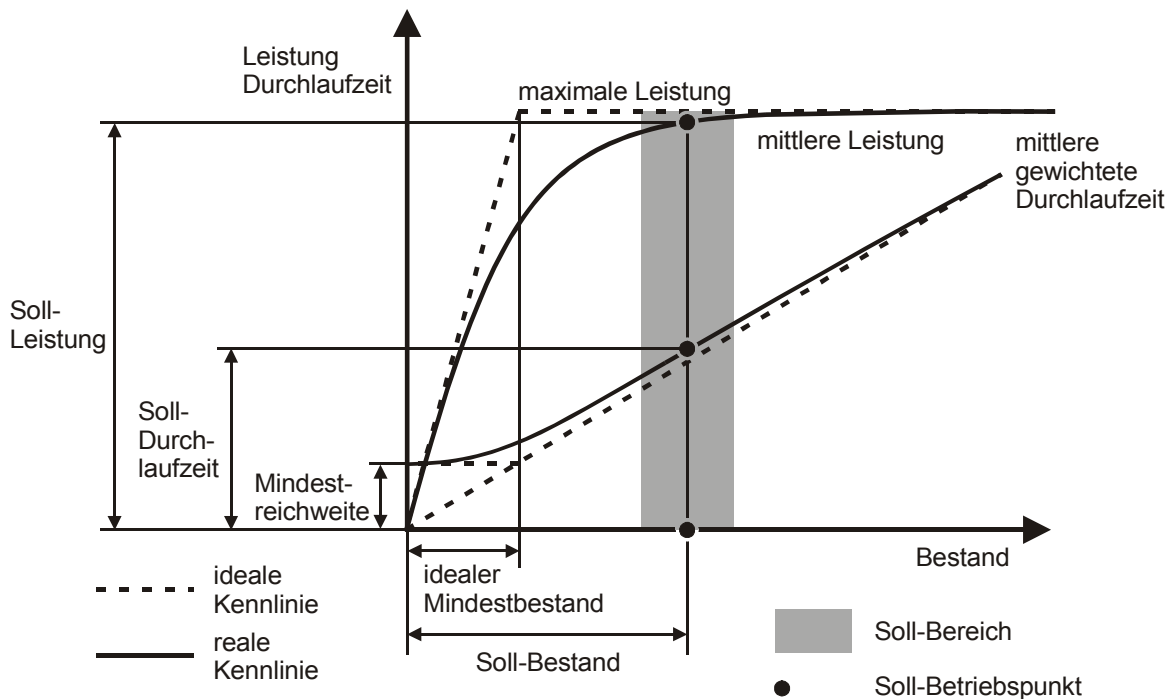


Bild 3.7 Vergleich von idealer und realer Betriebskennlinie (in Anl. Nyhuis)

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:

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \tag{Gl. 3.13}$$

- mit
- ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit
 - ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit
 - ZAU_m Mittelwert der Auftragszeit

Bei konstanter bzw. arbeitsvorgangsunabhängiger Transportzeit vereinfacht sich die Gl. 3.12 unter der Verwendung der Gl. 3.13 zu:

$$BI_{min} = ZAU_m * (1 + ZAU_v^2) + ZTR_m \quad \text{Gl. 3.14}$$

mit BI_{min} idealer Mindestbestand
 ZAU_m Mittelwert der Auftragszeit
 ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit
 ZTR_m Mittelwert der Transportzeit

Die *Mindestreichweite* ergibt sich gemäß der Trichterformel (Gl. 3.2) aus dem Verhältnis von idealem Mindestbestand und maximal möglicher Leistung [NYH99]:

$$R_{min} = \frac{BI_{min}}{L_{max}} \quad \text{Gl. 3.15}$$

mit R_{min} Mindestreichweite
 BI_{min} idealer Mindestbestand
 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, um einen guten Kompromiss aus hoher Auslastung einerseits und kurzen Durchlaufzeiten andererseits bei einem geringen Bestandsniveau zu erzielen:

$$B_{rel} = \frac{B_m}{BI_{min}} \quad \text{Gl. 3.16}$$

mit B_{rel} mittlerer relativer Bestand
 B_m mittlerer Bestand
 BI_{min} idealer Mindestbestand

Produktionskennlinien sind Erklärungsmodelle, da sie die Beziehungszusammenhänge zwischen den Leistungs- und Durchlaufzeitgrößen als Funktion des Bestandes aufzeigen. Sie werden innerhalb des entwickelten Belegungsplanungsverfahrens mit Hilfe der Simulation berechnet und dazu genutzt, die logistischen Charakteristika der Montagestationen zu analysieren. Unter ihrer Anwendung wird jeweils ein Bereich definiert, in dem der Betriebspunkt der betreffenden Station liegen soll. Dieser Bereich ist i.d.R. durch eine hohe Auslastung bei kurzen Durchlaufzeiten und niedrigen Beständen gekennzeichnet. Die Montagesteuerung hat dann die Aufgabe, den Betriebspunkt der jeweiligen Station in diesen Bereich zu bringen und dort zu halten.

3.2.3 Materialflussbeziehungen

Das Trichtermodell sowie die Produktionskennlinien sind grundsätzlich ressourcenorientiert. Das Durchlaufdiagramm ist dagegen auch als *Auftragsdurchlaufdiagramm* darstellbar, indem alle zweidimensionalen Durchlaufelemente eines Auftrages kumuliert über der Zeit aufgetragen werden. Um jedoch alle Auftragsdurchläufe durch das gesamte Montagesystem bewerten zu können, bedarf es zusätzlich einer Beschreibung der Einbindung der einzelnen Montagestationen in den Montageablauf. Die Verbindung der einzelnen Stationen untereinander lässt sich durch die Analyse der Materialflussbeziehungen bestimmen, die sich aus den unterschiedlichen Arbeitsvorgangsfolgen der einzelnen Aufträge im Montagesystem ergeben. Durch eine Kombination dieser Analyse mit den vorgestellten Modellen kann dann eine Gesamtanalyse des Montagesystems durchgeführt werden (Bild 3.8).

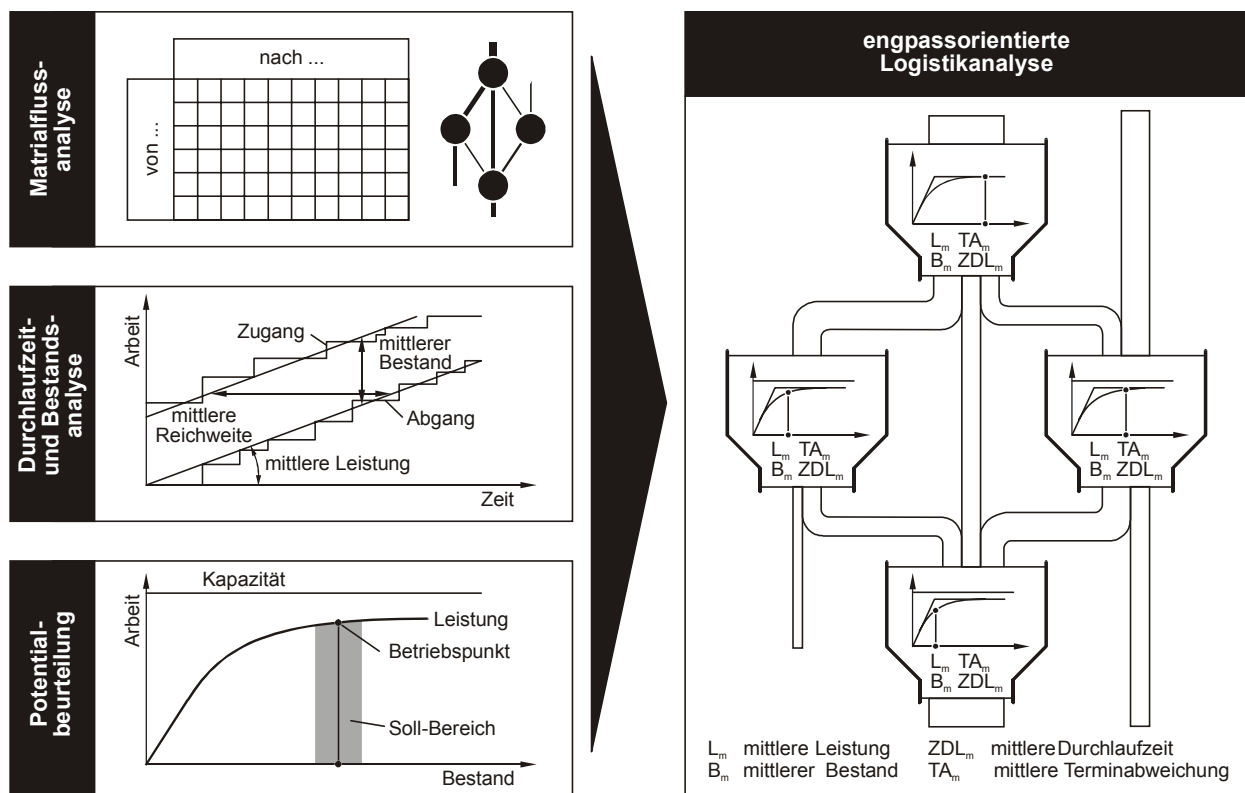


Bild 3.8 Das Prinzip einer engpassorientierte Logistikanalyse (nach *Wiendahl*)

Durch Transportmatrizen oder Sankey-Diagramme können die Materialflüsse erfasst und deren Intensität bewertet werden. Aus logistischer Sicht aussagekräftige Größen sind der Arbeitsinhalt, die Anzahl der Arbeitsvorgänge oder die Stückzahl. Mit Hilfe der Durchlaufdiagramme erfolgt eine Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse. Wichtige Mittelwerte der Leistung, der Durchlaufzeit, des Bestandes sowie der Terminabweichung werden für die jeweilige Periode berechnet. Mit den Produktionskennlinien kann darüber

hinaus aufgezeigt werden, an welchen Montagestationen ein mögliches Potential zur Durchlaufzeit- und Bestandsreduzierung vorhanden ist.

Die Gesamtanalyse des Montagesystems sollte aufgrund der vorhandenen Komplexität auf die logistischen Engpässe konzentriert werden [in Anl. WIE98c]. Wesentlich sind hierbei durchsatzbegrenzende sowie durchlaufzeit- und lieferzeitbestimmende Montagestationen. Durch die Analyse des Gesamtsystems kann so die Bedeutung der Montagstationen für den gesamten Auftragsdurchlauf bestimmt werden.

3.2.4 Kennzahlen

Kennzahlen sind Analysehilfsmittel und eignen sich besonders zur Quantifizierung von Zielanforderungen und deren Erfüllung. Sie können je nach Art der verwendeten Verhältniszahlen oder absoluten Zahlen sowie Dimensionen sowohl technische, organisatorische als auch betriebswirtschaftliche Aussagen liefern [in Anl. REI00, in Anl. SYS90]. In einem Kennzahlensystem werden Kennzahlen logisch miteinander verknüpft, um kausale Zusammenhänge von Abhängigkeiten zu ergründen. Es findet so eine Verdichtung von aussagekräftigen Informationen statt.

Im entwickelten Verfahren zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage werden drei Kennzahlgruppen unterschieden:

- *Stichtagskennzahlen* beschreiben die Situation der Auftragsabwicklung zu einem bestimmten Zeitpunkt wie Wochen-, Monats-, Quartals- oder Jahresstichtage. Bei den Stichtagskennzahlen handelt es sich insbesondere um die Kenngrößen Bestand, Rückstand und Vorlauf. Diese unterliegen i.d.R. großen dynamischen Schwankungen und haben als absolute Werte keine große Aussagekraft. Aus diesem Grund werden sie immer in Verbindung mit Zeitraum- oder Periodenkennzahlen betrachtet.
- *Periodenkennzahlen* zeigen die dynamische Entwicklung von Kennzahlen entsprechend Zeitrasterungen wie Tag, Woche, Monat, Quartal und Jahr. Sie bieten die Möglichkeit, Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern und Einflussgrößen der Auftragsabwicklung zu erkennen und zu quantifizieren. Periodenkennzahlen werden sowohl für Durchlauf- als auch für Strukturkenngößen, wie z.B. Auftragszeiten, ermittelt.
- *Zeitraumkennzahlen* stellen eine Sonderform der Periodenkennzahlen dar. Sie beziehen sich auf eine feste Zeitspanne, die nicht an ein bestimmtes Zeitraster gebunden ist. Die Zeitraumkennzahlen bilden die Basis für Montagestationslisten, nach denen eine differenziertere Betrachtung vorgenommen werden kann. Die Zeitraumkennzahlen werden außerdem für die Berechnung der Produktionskennlinien verwendet.

Tabelle 3.1 zeigt die wichtigsten im Rahmen des Verfahrens zur Belegungsplanung eingesetzten Kennzahlen. Unterschieden werden die Sichtweise und das betrachtete Objekt.

Tabelle 3.1 Sichtweisen und Objekte logistischer Kennzahlen

Sichtweise	auftragsorientiert		ressourcenorientiert
Objekt	Auftrag	Arbeitsvorgang	Montagestation
Kennzahl	<ul style="list-style-type: none"> • Starttermin-einhaltung • Endtermin-einhaltung • Vorlaufzeit • Durchlaufzeit • Durchlaufzeit-abweichung • Durchlaufzeit-verteilung • Arbeitsinhalts-verteilung • Anzahl Stations-durchläufe 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangstermin-abweichung • Abgangstermin-abweichung • Durchlaufzeit • Durchlaufzeit-abweichung • Durchlaufzeit-verteilung • Übergangszeit • Durchführungszeit • Auftragszeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückstand • Vorlauf • Durchlaufzeit • Übergangszeit • Durchführungszeit • Bestand • Leistung • maximale Leistung • Auslastung • Auftragszeit • Reichweite

Die Auftrags- und Arbeitsvorgangskennzahlen werden neben einigen Stationskennzahlen insbesondere zur Ermittlung von Plan-Werten und deren Abgleich mit den sich ergebenden Ist-Werten verwendet. Die Ressourcenkennzahlen machen darüber hinaus deutlich, welche Montagestationen Engpässe darstellen und welche verfügbaren Kapazitäten durch vorgelagerte Engpässe nicht richtig genutzt werden. Weiter ist ersichtlich, an welcher Station bei gegebener maximaler Leistung Bestände reduziert werden können, ohne die Auslastung nennenswert zu verschlechtern. Darüber hinaus können Montagestationen, bei denen ein Kapazitätsabgleich mit anderen überlasteten Stationen möglich ist, erkannt werden.

3.3 Erstellung eines Simulationsmodells und einer zentralen Datenbank

3.3.1 Bildung eines Simulationsmodells

Zur Entscheidungsfindung innerhalb der Belegungsplanung ist neben der Anwendung von Beschreibungs- und Erklärungsmodellen auch die Berücksichtigung der Dynamik einer Multiressourcen-Montage erforderlich. Unter *Dynamik* versteht die Systemtheorie das „Verhalten“ eines Systems. Damit sind die Veränderungen von Input und Output je Zeiteinheit gemeint, die in der Produktion den Logistikprozessen entsprechen. Es wird zwischen äußerer Dynamik, dem Verhalten der Umwelt, und innerer Dynamik, dem Verhalten der Elemente und Subsysteme zueinander, unterschieden [FLE72].

Die Dynamik einer ausgewählten Multiressourcen-Montage, welche aus einem Bearbeitungssystem, z.B. Montagestationen, und einem Materialflusssystem, z.B. Transport- und Handhabungssysteme, besteht, wurde durch ein digitales Simulationsmodell nachgebildet. Bei dem realen System handelt es sich um die Vormontage eines Flugzeugherstellers, in der Rumpfteile montiert werden und mehrere Montagestationen sowie Vorrichtungen alternativ eingesetzt werden können. Dieses System wird dazu als eine Menge von Elementen, wie z.B. Aufträge und Ressourcen, verstanden, die untereinander in Beziehung stehen und sich gegenseitig beeinflussen. Die Elemente lassen sich durch Merkmale beschreiben, welche zu einem gegebenen Zeitpunkt bestimmte Ausprägungen haben. Beziehungen zwischen den Elementen kommen dadurch zum Ausdruck, dass ihre Merkmalausprägungen nicht in jeder theoretisch möglichen Kombination auftreten können. Die Gesamtheit der Merkmalausprägungen, welche die Elemente der Multiressourcen-Montage zu einem bestimmten Zeitpunkt haben, ist der Systemzustand. Das Systemverhalten kommt durch Zustandsänderungen zum Ausdruck. Die Merkmale können sich im Zeitablauf ständig, z.B. Transportprozess, oder nur zu bestimmten Zeitpunkten, z.B. Störungseintritt, verändern. Folglich müssen kontinuierliche und diskrete Zustandsänderungen unterschieden werden. Diskrete Zustandsänderungen werden auch als „Ereignisse“ bezeichnet. Eine Beschreibung der zeitliche Abfolge von sich ändernden Zuständen heißt „Zustandsgeschichte“ [WIT94]. Die Zustandsgeschichte des Systems erfasst die gemeinsame Entwicklung der Merkmale der Systemelemente. Der Übergang von einem Systemzustand zu einem anderen erfolgt nach Regeln. Dabei können die Systemzustände zufallsabhängig sein, z.B. Störungen. Da durch die Belegungsplanung die Abläufe in der betrachteten Multiressourcen-Montage zielorientiert beeinflusst und somit bevorzugte Systemzustände herbeigeführt werden sollen, müssen die direkt beeinflussbaren Elemente identifiziert werden. Ihre Merkmalausprägungen sind dann so festzulegen, dass sich aufgrund der Transformationsregeln bevorzugte Systemzustände einstellen.

Im Rahmen der Modellbildung wurden die Merkmale der abzubildenden Multiressourcen-Montage durch Variablen nachgebildet, die durch mathematische und logische Beziehungen verknüpft sind. Die Variablenwerte bilden die Merkmalausprägungen ab. Den Zustandsgeschichten des Realsystems entsprechen Zeitreihen, welche die Veränderung der Variablen bzw. die Dynamik im Modell beschreiben. Bei zufallsabhängigen Merkmalen sind die entsprechenden Variablen Zufallsgrößen und die zugehörigen Zustandsgeschichten wurden durch stochastische Prozesse umgesetzt. Die Transformationsregeln des Montagesystems mussten durch Regeln zur Fortschreibung der Variablenwerte im Zeitablauf erfasst werden. Der Unterschied zu den analytischen Modellen (Kapitel 2.2.1) besteht hier in der Art und Weise, wie diese Regeln zur Festlegung der Beziehungen zwischen den Variablen formuliert wurden. Bei analytischen Modellen werden die Regeln im wesentlichen im Rahmen einer einzigen mathematischen Teildisziplin wie der linearen Algebra oder der Funktionalanalysis formuliert.

Die Teildisziplin liefert dann auch das formale Instrumentarium für Optimierungsformulierungen. Die Beziehungen müssen dafür in den Strukturen der Teildisziplin abzubilden sein. Das ist bei dem erstellten Modell nicht der Fall, da eine Vielzahl von Algorithmen auch alternativ angewendet werden, um eine realitätsgerechte Fortschreibung der Variablen zu gewährleisten. Dazu reicht bereits die Kenntnis darüber aus, welcher Zustand sich im Realsystem ausgehend von einer bestimmten Situation, z.B. der Begegnung zweier fahrerloser Transportsysteme (FTS) auf derselben Spur, als nächstes einstellt und wie sich die relevanten Größen kurzfristig ändern. Die synchronisierte Fortschreibung der Variablenwerte ermöglicht die Darstellung des Gesamtverhaltens des Montagesystems. Dabei erfolgt die Berechnung der Werte beim Eintreten eines neuen Ereignisses, also zu diskreten Zeitpunkten. Die Länge der fortzuschreibenden Zeitdauer ist eine unabhängige Systemvariable, wobei zwischen tatsächlicher Zeit und Simulationszeit unterschieden wird. Die Streckung oder Stauchung der Simulationszeit gegenüber der Realzeit wird über einen Faktor geregelt, der somit den Zeitmaßstab vorgibt.

Die Modellierung der Multiressourcen-Montage erfolgte objektorientiert. Jedes Objekt hat eine eigene Identität und stellt eine Kombination von Eigenschaften und Verhalten dar. Das Verhalten eines Objektes wird in Form von Anweisungen, Funktionen bzw. Methoden beschrieben, die auf Basis der Eigenschaften, Attribute bzw. Daten durchgeführt werden. Objekte mit identischen Datenstrukturen und Funktionen wurden in Klassen gruppiert, die jeweils aus einem Klassennamen und den zugehörigen Attributen bestehen. Generalisierungen beschreiben Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Klassen. Die Implementierung von Generalisierungen erfolgte mit Vererbungsmechanismen. Hierzu wurden die Klassen in eine Hierarchie, d.h. in eine Über-/Unterordnungsbeziehung, eingeordnet. Jede neu erzeugte Klasse besitzt eine oder mehrere Oberklassen, von denen Attribute und Methoden übernommen wurden. Grundsätzlich können nur die Strukturen der Klassen, nicht aber die Attributwerte einzelner Objekte vererbt werden.

Das Simulationsmodell wurde mit dem Programm eM-Plant der Firma Tecnomatix erstellt. Dieses Simulationswerkzeug bietet im wesentlichen den Vorteil einer erweiterbaren und flexiblen Struktur. Der objektorientierte Ansatz wird durch den Aufbau einer Klassenbibliothek unterstützt (Bild 3.9, oben links). Für die Modellierung der Multiressourcen-Montage diente die vorhandene Bausteinbibliothek (Bild 3.9, mittig) als Grundlage, die entsprechend erweitert wurde. So erfolgte eine Anpassung der vorgegebenen Standardelemente durch Methoden (Bild 3.9, mittig rechts), die frei programmierbar sind (Bild 3.9, unten rechts).

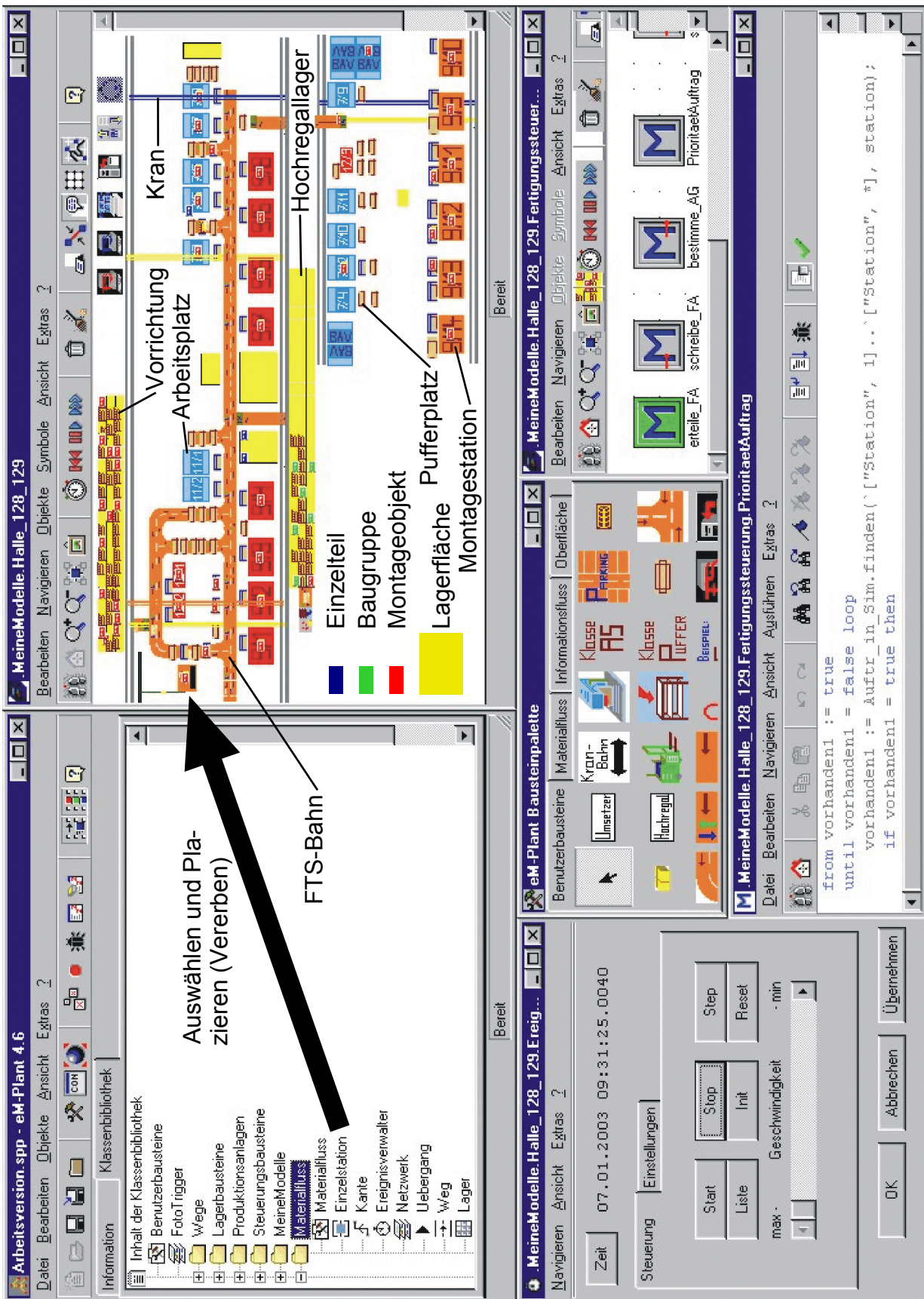


Bild 3.9 Programmierungs- und Animationssicht des Simulationsmodells

Der Vorteil der objektorientierten Darstellung der Abläufe ist, dass die in der Realität vorhandenen Objekte, wie z.B. Montagestationen und -aufträge, auch im Simulationsmodell als Objekte, d.h. als zusammenhängende logische Einheit mit allen ihren relevanten Eigenschaften nachgebildet sind. Somit konnten die Eigenschaften und Ausprägungen der einzelnen Objekte während der Modellerstellung beschrieben werden, ohne dass andere Modellteile davon betroffen wurden.

Nach Festlegung der Systemgrenzen erfolgte zunächst die Abbildung der Montagestationen. Hierzu wurde ein geeignetes Element der Klassenbibliothek ausgewählt, im Modell platziert (Bild 3.9, oben rechts), menügesteuert durch Attribute beschrieben und mit einer graphischen Darstellung versehen. Danach schloss sich schrittweise die Nachbildung anderer Objekte des realen Systems an. Hierbei erfolgte ein ständiger Vergleich der Simulationsergebnisse des in der Komplexität zunehmenden Modells mit der Auswertung einer durchgeführten Ist-Analyse der existierenden Multiressourcen-Montage. Durch dieses Vorgehen konnte der notwendige Detaillierungsgrad der abzubildenden Elemente genau bestimmt werden. So wurden alle wesentlichen Ressourcen wie Montagestationen und Vorrichtungen in ihrem Verhalten detailliert modelliert, um deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem analysieren zu können. Für den Arbeitsablauf weniger wichtige Bereiche, wie z.B. die Lagermittel, sind zwar mit einbezogen, ihr Abstraktionsgrad liegt jedoch wesentlich höher. Dadurch ließ sich der Modellierungsaufwand deutlich einschränken ohne relevanten Informationsgehalt zu verlieren. Der modulare Aufbau des Modells schließt somit die Abbildung der Verkettung aller wesentlichen Vorgänge beim Montieren sowie Lagern und Transportieren ein. Hinsichtlich der Zeitgrößen Durchlaufzeit und Terminabweichung liegen die Abweichungen zwischen Modell und Realsystem im einstelligen Prozentbereich, welches durch den Vergleich realer und simulierter Bewegungsdaten nachgewiesen wurde.

Bei der Modellierung wurden passive und aktive Objekte unterschieden. Passive Objekte stellen Informationen oder physische Dinge dar. In der Montage bestehen Informationen z.B. aus Arbeitsplänen und Stücklisten. Physische Objekte sind z.B. das Material und die Betriebsmittel. Passive Objekte sind reine Datenspeicher. Sie besitzen Attribute und Methoden zur Abfrage und Änderung ihrer Attributwerte. Eine Änderung erfolgt immer durch aktive Objekte, die das Verhalten des realen Systems in Form der Methoden beschreiben. Ein aktives Objekt ist z.B. die Montagesteuerung, die eine Station anweist, einen bestimmten Auftrag zu bearbeiten. Eine der Methoden entspricht einem Ereignisverwalter. Der Ereignisverwalter hat die Aufgabe, die Simulation anzustoßen und zu steuern (Bild 3.9, unten rechts). Zu Beginn der Simulation wird der Ereignisverwalter aktiviert, der dann die einzelnen Abläufe innerhalb des Simulationsmodells über die Simulationszeit synchronisiert. Alle Simulationsvorgänge werden so entsprechend ihrer zeitlichen Reihenfolge abgearbeitet.

Falls die Aktivitäten eines Objektes parametrisierbar sind, wurden die entsprechenden Daten als Attribut beim Objekt gespeichert. Somit sind einige aktive Objekte ebenfalls mit Attributen ausgestattet. Die Reihenfolgebildung der Montagesteuerung hängt z.B. von den verwendeten Prioritätsregeln ab. Diese Größe stellt dann ein Parameter des Simulationsobjektes Montagesteuerung dar.

3.3.2 Aufbau einer zentralen Datenbank

Die passiven Objekte der Simulation sind nicht modellspezifisch. Ihre Informationen wurden externen Datenbanken entnommen. PPS-Systeme stellen z.B. alle notwendigen Informationen für den Auftragsdurchlauf in einem Simulationsmodell bereit. Technische Restriktionen, Stücklisten und sogar Objektbilder der Ressourcen und Produkte können dagegen von einem EDM- bzw. PDM-System (Kapitel 2.3.1) abgefragt werden. Alle für die Simulation notwendigen Daten werden in einer zentralen relationalen Datenbank hinterlegt, die über Schnittstellen mit dem Modell verbunden ist. Durch die extern gepflegten Daten können so ohne Expertenwissen alle relevanten Informationen für die Durchführung von Simulationsläufen berücksichtigt werden.

Neben den Eingabegrößen enthalten die passiven Objekte auch Ausgabegrößen. Durch den Aufbau der Datenbank, die zwischen dem Simulationssystem und den betrieblichen Datenbanken wie PPS- und EDM- bzw. PDM-System angeordnet ist, arbeitet das Simulationssystem nur auf Basis dieser Datenbank. Die Daten können somit ohne Folgen für den laufenden Betrieb geändert werden und der Aufbau der betrieblichen Systeme bleibt von der Simulation unberührt.

Eine zentrale Datenbank gewährleistet über die Verknüpfung zum Simulationsmodell hinaus eine strukturierte, redundanzfreie Datenablage und regelt die Zugriffsrechte einzelner Benutzer auf die Datenbasis. Die implementierten Such- und Ordnungsalgorithmen erleichtern den Überblick selbst über große Datenbestände. Außerdem können die Daten innerhalb der Datenbank über unterschiedliche Programmmodule weiterverarbeitet und verknüpft sowie in übersichtlichen Masken angezeigt werden.

Erstellt wurde eine solche Datenbank mit dem Programm Access der Firma Microsoft (Bild 3.10). Die zur Erstellung des Simulationsmodells notwendigen Daten werden nach Datenbezug und Datenbedarf unterschieden. Einerseits werden gemäß ihres Bezugs Auftrags- und Ressourcendaten, andererseits entsprechen ihrer Art Grunddaten und Bewegungsdaten verarbeitet.

Die Grunddaten haben eine mittel- bis langfristige Gültigkeit und lassen sich in Stamm- 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.

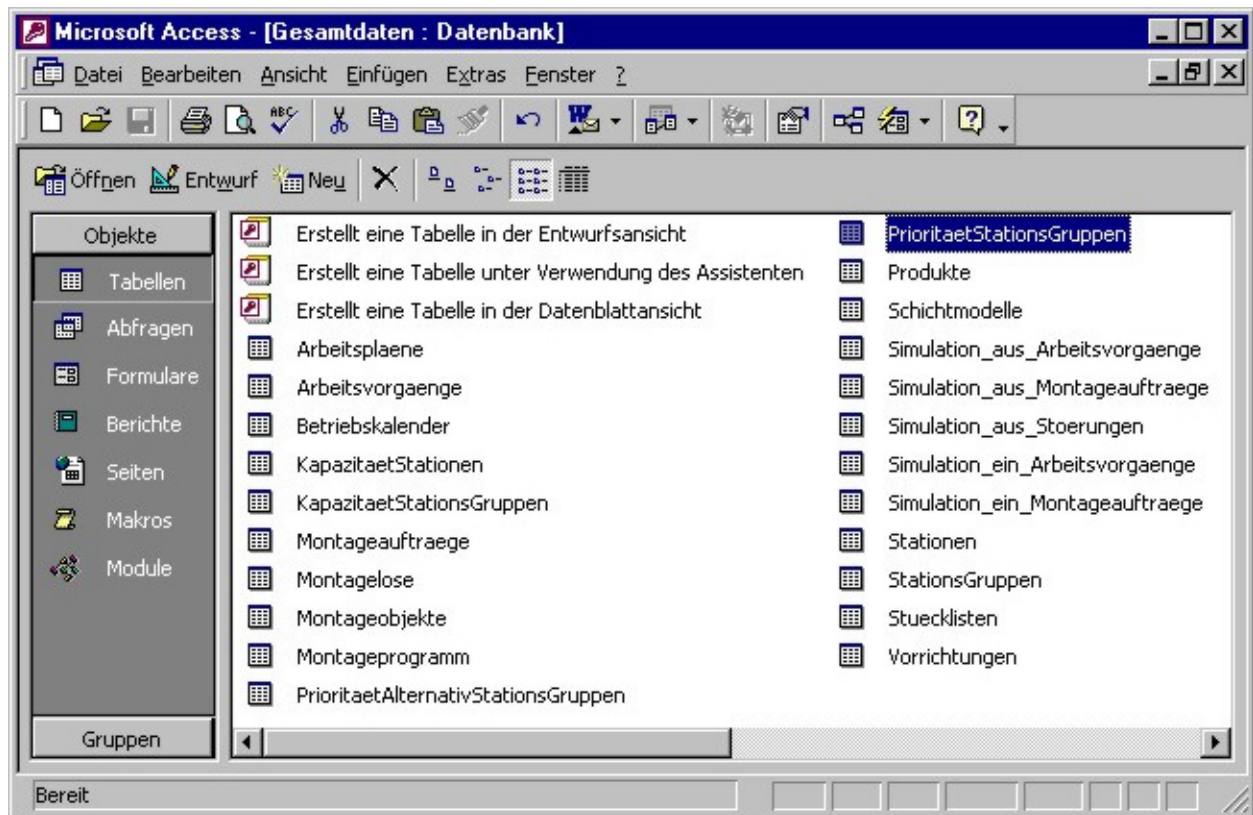


Bild 3.10 Struktur einer zentralen Datenbank

Die für das Simulationsmodell notwendigen Stammdaten sind:

- Betriebsmittel (Montagestationen, Vorrichtungen, Lager-/Fördermittel, NC-Programme, etc.)
- Stations-/Personalkapazitäten (Schichtpläne)
- Montageaufträge
- Arbeitsvorgänge
- Material

Als Strukturdaten werden verwendet:

- Stücklisten
- Arbeitspläne
- Mehrstationenbedienungslisten

Das Ergebnis eines Simulationslaufes sind die Bewegungsdaten:

- Arbeitsvorgangsmeldungen
- Störungs- und Unterbrechungsmeldungen

Die Arbeitspläne enthalten alle notwendigen Arbeitsvorgänge mitsamt der erforderlichen Abarbeitungsreihenfolge, das zu verwendende Material, für jeden Arbeitsvorgang die Montage- und alle Alternativmontagestationen sowie die Vorgabezeiten. In einem Betriebskalender werden für den Untersuchungszeitraum die Arbeitstage mit der verfügbaren Kapazität für jede Station festgelegt. Rechenoperationen, die tages- oder schichtbezogen erfolgen, werden durch die Nummerierung der Arbeitstage vereinfacht. Die verfügbare Tageskapazität jeder Ressource wird entsprechend den Schichtplänen errechnet. Urlaubs- und Krankheitstage werden aus Vergangenheitsdaten für die Zukunft hochgerechnet. Darüber hinaus werden Plan- und Ist-Daten verarbeitet. Plan-Daten sind das Ergebnis konkreter Planung und sind im Falle einer Vorgabe Soll-Daten. Ist-Daten sind reale oder hier, simulierte Daten. Der Datenaustausch zwischen dem Simulationsmodell und der Datenbank entspricht so einer Betriebsdatenerfassung in der Realität.

Die als Eingangsgröße für die Modellbildung dienende und anschließend in den Versuchsläufen benutzte Datenbasis wurde sehr genau überprüft und aufbereitet, da Simulationsergebnisse wertlos oder irreführend sind, wenn die Datenbasis fehlerhaft ist. Deshalb wurde diese einer Plausibilitätskontrolle hinsichtlich der Beschreibung der Systemlast, Systemstruktur und funktionellen Abläufen über der Zeit unterzogen.

4 Entwicklung eines Verfahrens zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage

Die in Kapitel 3 beschriebene Modellierung der Multiressourcen-Montage bildet die Grundlage zur Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Belegungsplanung. Die vorgestellten Modelle ermöglichen einerseits die Abbildung des logistischen Systemverhaltens und andererseits die logistische Zielbestimmung sowie die Darstellung des Zielerreichungsgrades. Dies ist sowohl für das Gesamtsystem Multiressourcen-Montage als auch für seine Subsysteme möglich.

Die Erläuterung des Verfahrens wird in nachstehender Reihenfolge vorgenommen:

1. Bildung und Bewertung von logistischen Klassifizierungskriterien für die Montageaufträge und -stationen
2. Gruppierung der Montageaufträge und -stationen gemäß ausgewählter Kriterien
3. logistische Klassifizierung der Arbeitsvorgänge
4. Vergabe von Prioritätswerten für alle technologisch möglichen Belegungskombinationen gemäß einer Kriterienrangfolge
5. Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung
6. Bestimmung der Ablaufsteuerung
7. Bildung eines Regelkreises

4.1 Bildung und Bewertung von logistischen Klassifizierungskriterien

Die Klassifizierung und Bewertung eines Systems oder Teilsystems mit dem Ziel der Gewinnung eines Gesamtbildes wird als Diagnose bezeichnet [nach RED97]. Da eine Multiressourcen-Montage aus einer Vielzahl von Teilsystemen besteht, die in komplexer Weise zusammenwirken, ist es schwierig, die Einflussgrößen auf die sich einstellende Belegung der Ressourcen und damit auf die logistischen Zielgrößen eindeutig zu identifizieren. Aus diesem Grund wird zur Strukturierung des Planungsproblems eine logistische Klassifizierung vorgenommen. Um einen durchgängigen Konzeptaufbau zu erhalten, werden hierzu entsprechend der Modellierung (Kapitel 3) Kriterien für die Montageaufträge sowie die Montagestationen gebildet.

4.1.1 Montageaufträge

Zur Charakterisierung der Montageaufträge wird nach Produktmerkmalen sowie dispositiven Faktoren unterschieden:

- Produktmerkmale
 - Komplexität/Dimensionen
 - Struktur
 - Arbeitsinhalt
 - Anzahl Arbeitsvorgänge
- dispositive Faktoren
 - Wiederholhäufigkeit
 - Losgröße

Die wesentlichen logistischen Kriterien der Montageaufträge leiten sich direkt aus dem Produkt ab. Unter *Komplexität* wird insbesondere der Schwierigkeitsgrad der Bearbeitung verstanden. Dieser hängt maßgeblich von der Anzahl und den Parametern der Fügverbindungen ab. Innerhalb des zu entwickelten Verfahrens wird die Komplexität in Verbindung mit den *Dimensionen* der Montageobjekte wie Größe, Gewicht und geometrische Gestalt gesehen, da beide Kriterien gemeinsam die Produktmix-, Stations-, Durchlauf- und Arbeitsplanflexibilität (Kapitel 2.1.2.4) sowie Vorrichtungsflexibilität im Montagesystem bestimmen. Eine Standardisierung von Komplexität und Dimensionen durch eine Montagefamilienbildung innerhalb der Konstruktion ermöglicht die Variantenbildung erst zum Ende des Montagedurchlaufs und trägt somit maßgeblich zu einer Flexibilitätserhöhung bei. Die *Struktur* kennzeichnet den konstruktionsbedingten Aufbau eines Produktes. Sie ist Ausgangspunkt für die Festlegung des Durchlaufs der Teilaufträge durch die Montage, da sie die zugehörigen Einzelteile und Baugruppen mit den zugehörigen Aufbaustufen enthält, auf deren Basis das Auftragsnetz (Bild 4.3) gebildet wird. Der *Arbeitsinhalt* ist das direkte Maß für den Kapazitätsbedarf eines Auftrags. Entsprechend der vorliegenden Mengen- oder Arteilung des Montagesystems bestimmt die *Anzahl der Arbeitsvorgänge* die Anzahl der zu durchlaufenden Montagestationen.

Unter dispositiven Kriterien werde planerische Größen verstanden, welche die Montageaufträge betreffen und die i.d.R. im Rahmen der Mengenplanung (Kapitel 2.1.1.1) festgelegt werden. Die *Wiederholhäufigkeit* eines Montageauftrages legt unter Berücksichtigung des Zeitraums den Auftragszyklus fest. Dieser kann regelmäßig oder unregelmäßig sein. Die Planungssicherheit steigt mit zunehmender Regelmäßigkeit, da die Wahrscheinlichkeit von Planungsabweichungen sinkt. So ist z.B. bei einer täglichen Wiederholung einer Auftragsvariante die rechtzeitige Bereitstellung der notwendigen Betriebsmittel eher gewährleistet, als bei einer zufälligen Auftragswiederkehr. Die *Losgröße* wirkt sich insbesondere auf Kapazitätsbetrachtungen aus, da die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit im selben Maß steigt, wie die notwendige Rüstzeit sinkt.

Die Bestimmung der gemäß den logistischen Zielgrößen bedeutenden Auftragskriterien wird durch eine Kriterien-Wirkungsmatrix unterstützt (Tabelle 4.1). Da das Planungsproblem systemspezifisch variiert und die Gewichtung der Zielgrößen stark unternehmens- oder situationsbedingt ist, kann allerdings keine allgemeingültige Aussage erfolgen.

Tabelle 4.1 Auswirkungen der Auftragskriterien auf die Zielgrößen

Auswirkung von \ auf	Durchlaufzeit	Termin- abweichung	Bestand	Leistung
Komplexität/Dimensionen	○	○	○	◐
Struktur	●	●	◑	○
Arbeitsinhalt	◑	◑	●	◐
Anzahl Arbeitsvorgänge	●	●	○	○
Wiederholhäufigkeit	◑	◑	○	◐
Losgröße	◑	◑	●	◐

● = sehr starke, ● = starke, ◐ = mittlere, ◑ = geringe, ○ = keine (Auswirkung)

Durch das Kriterium „Komplexität/Dimensionen“ ist festgelegt, welche Stationen den jeweiligen Auftrag mit welchen Vorrichtungen bearbeiten können. Es wirkt sich somit auf die Zielgröße Leistung aus. Die Struktur bestimmt das Auftragsnetz und beeinflusst somit die Durchlaufzeit und die Terminabweichung. Der Einfluss auf die Durchlaufzeit ergibt sich aus dem Grad, in dem die Teilaufträge seriell oder parallel durch das Montagesystem laufen. Die Abhängigkeit der Terminabweichung ist durch die Anzahl der zu koordinierenden Teilaufträge mit der entsprechenden Wahrscheinlichkeit einer Verfrühung oder Verspätung begründet. Eine mehrteilige Auftragsstruktur erhöht ebenso die Wahrscheinlichkeit, dass ein vorhandener Bestand nicht abgearbeitet werden kann, da z.B. einer von zwei Teilaufträgen, die gefügt werden sollen, noch nicht zugegangen ist. Der Arbeitsinhalt wirkt sich unmittelbar auf den Bestand und somit entsprechend der Trichterformel (Gl. 3.2) auch auf die Zielgrößen Durchlaufzeit und Leistung aus. Da große Arbeitsinhalte die Beschleunigung von Arbeitsvorgängen erschweren, haben sie auch einen Effekt auf die Terminabweichung. Die Anzahl der Arbeitsvorgänge steht aufgrund der ablaufbedingten Übergangszeiten in einer direkten Beziehung zur Durchlaufzeit und beeinflusst über die Reihe der zu durchlaufenden Wartschlangen ebenfalls die Terminabweichung. Die Wiederholhäufigkeit eines Auftrages steht in einer Bezie-

hung zur Planungssicherheit und wirkt sich damit auf die Terminabweichung aus. Aufgrund des Ausmaßes eines sich einstellenden Lerneffektes ergeben sich ebenso Einflüsse auf die Durchlaufzeit und Leistung. Die Losgröße hat eine ähnliche Auswirkung auf die Zielgrößen wie die Auftragszeit. Allerdings beeinflusst sie durch den über die Losbildung variierbaren Rüstzeitanteil die Durchlaufzeit stärker. Innerhalb des entwickelten Verfahrens wird das Kriterium „Losgröße“ über das Kriterium „Arbeitsinhalt“ berücksichtigt und wird bei der Planungsdurchführung nicht weiter einbezogen. Der Grund hierfür ist zum einen der in der Multiressourcen-Montage i.d.R. verhältnismäßig kleine Rüstzeitanteil. Zum anderen würde die Planungsaufgabe deutlich erschwert, wenn man die Kriterien „Arbeitsinhalt“ und „Losgröße“ getrennt voneinander betrachten würde. Darüber hinaus wird die Losgröße meist sowieso durch die Mengenplanung vorgegeben und kann somit durch die Belegungsplanung kaum beeinflusst werden.

4.1.2 Montagestationen

Im Rahmen der Kriterienbildung für die Montagestationen werden folgende Ressourcenmerkmale betrachtet:

- Bearbeitungsflexibilität
- Automatisierungsgrad
- Störungsrate
- Kapitalintensivität
- Gruppenzugehörigkeit
- Vorrichtungsanzahl
- Anordnung
- Personalflexibilität

Die *Bearbeitungsflexibilität* ist ein Maß für die Einsatzmöglichkeiten einer Montagestation. Eine Station kann einerseits starr und andererseits umbau-, umstell-, umrüst-, umsteuer- oder programmflexibel sein. Der *Automatisierungsgrad* wird aus logistischer Sicht nur in Bezug auf die Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassung betrachtet. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad sinkt i.d.R. die Kapazitätsanpassungsfähigkeit. Die *Störungsrate* ist ein Maß für die Zuverlässigkeit einer Montagestation und wirkt sich somit auf die Planungssicherheit aus. Die *Kapitalintensivität* ergibt sich aus den Anschaffungskosten. Es wird bei der Charakterisierung anhand der *Gruppenzugehörigkeit* unterschieden, ob es sich bei einer Montagestation um eine Einzel- oder Gruppenkapazität handelt. Mehrere gleichartige parallele Stationen haben aufgrund der somit vorhandenen Alternativ- und Ausweicharbeitsplätze eine höhere Produktionsmengen-

und Durchlaufflexibilität (Kapitel 2.1.2.4) als eine Einzelstation. Die *Vorrichtungszahl* gibt den Umfang der vorhandenen alternativen Fertigungsmittel zur Positionierung der Montageobjekte an. Der Grad der Materialflussanbindung wird durch die *Anordnung* der Montagestation bestimmt. Aus der Anordnungsstruktur, wie z.B. Zelle, Linie oder Karree, ergeben sich die Verknüpfungen zu anderen Stationen sowie zu Lagern bzw. Puffern. Die qualitative *Personalflexibilität* ergibt sich aus der möglichen Anzahl unterschiedlicher Bearbeitungsaufgaben, die ein Werker durchführen kann, während die zeitliche Personalflexibilität ein Maß für die Variierbarkeit der Anwesenheitszeiten ist.

Die Darstellung des Kriterieneinflusses auf die logistischen Zielgrößen wird wiederum durch eine Kriterien-Wirkungsmatrix vorgenommen (Tabelle 4.2). Auch für die Merkmale der Montagestationen kann an dieser Stelle keine allgemeingültige Aussage getroffen werden.

Tabelle 4.2 Auswirkungen der Stationskriterien auf die Zielgrößen

Auswirkung von \ auf	Durchlaufzeit	Termin- abweichung	Bestand	Leistung
Bearbeitungsflexibilität	○	○	○	●
Automatisierungsgrad	●	●	●	●
Störungsrate	●	●	●	●
Kapitalintensivität	○	○	○	●
Gruppenzugehörigkeit	◐	●	◑	◐
Vorrichtungszahl	◑	◐	◑	◑
Anordnung	◐	◐	○	○
Personalflexibilität	●	●	●	●

● = sehr starke, ◐ = starke, ◑ = mittlere, ◒ = geringe, ○ = keine (Auswirkung)

Die Bearbeitungsflexibilität wirkt sich direkt auf die Leistung aus, da sie das durchführbare Montagespektrum festlegt. Durch den Automatisierungsgrad wird die Anpassungsfähigkeit einer Montagestation hinsichtlich des Kapazitätsangebotes bestimmt. Eine Variation des Kapazitätswertes hat einen Einfluss auf alle Zielgrößen. Die Störungsrate schränkt das Kapazitätsangebot ein und beeinflusst somit ebenfalls alle Zielgrößen. Eine große Kapitalintensivität einer Montagestation bedingt die Forderung nach

einer hohen Auslastung und wirkt so auf die Leistung ein. Innerhalb einer Stationsgruppe können sich die zugehörigen Montagestationen grundsätzlich in ihrer Montageaufgabe ersetzen. Hierdurch können sowohl Durchlaufverzögerungen als auch Belastungsspitzen ausgeglichen werden, wodurch einerseits die Terminabweichung und andererseits die Größen Durchlaufzeit, Bestand und Leistung beeinflusst werden. Die Anzahl der verfügbaren Vorrichtungen fällt bei der Durchlaufzeit, dem Bestand, der Leistung und insbesondere bei der Terminabweichung ins Gewicht, da mit steigender Anzahl die Gefahr einer nicht durchführbaren Montageaufgabe aufgrund fehlender Vorrichtungen sinkt. Die Anordnung einer Montagestation bestimmt große Teile ihrer Übergangszeiten, da zum einen die Transportzeiten direkt vom Standort abhängen. Zum anderen erfordert eine weniger gute Anbindung an den Materialfluss zusätzliche Koordinationsvorgänge, deren Dauer und Qualität die ablaufbedingten Liegezeiten mitbestimmen. Folglich ergibt sich ein Einfluss auf die Durchlaufzeit und Terminabweichung. Die Personalflexibilität wirkt sich auf die Zielgrößen genauso aus, wie der Automatisierungsgrad. Die Ursache hierfür ist, dass bei entsprechendem Automatisierungsgrad eine Anpassung des Kapazitätsbedarfes i.d.R. nur durch eine Variation des Personals, welches das Montageobjekt bearbeitet, erfolgen kann. Aus diesem Grund werden beide Kriterien in der weiteren Ausführung nur gemeinsam betrachtet.

4.2 Bestimmung der Stationsbelegungen

4.2.1 Auftrags- und Stationsgruppierung

Eine isolierte Betrachtung einzelner Klassifizierungsmerkmale ist nicht ausreichend. Wichtig ist vielmehr die Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten und wie diese sich auf die Zielgrößen auswirken. Da aufgrund der hohen Komplexität des Planungsproblems nicht alle zielbeeinflussenden Abhängigkeiten gleichermaßen berücksichtigt werden können, ist zunächst eine Beschränkung auf einige bedeutende Kriterien und ihre Kombinationen zielführend. Innerhalb des Verfahrens wird die in Bild 4.1 dargestellte Vorgehensweise angewendet.

Zunächst erfolgt eine Clusterung der Aufträge (Bild 4.1a). Hierzu werden alle Montageaufträge gemäß des Kriteriums „Komplexität/Dimension“ gruppiert. Aus technologischer Sicht ähnliche Aufträge werden somit zu Auftragsteilgruppen zusammengefasst. Als Folge ändert sich der Wert des Merkmals „Wiederholhäufigkeit“ und es wird fortan als *Wiederholhäufigkeit* gekennzeichnet. Der Vorteil dieser Zusammenfassung ist, dass der Wert dieses Merkmals in Summe über alle Montageaufträge erhöht wird.

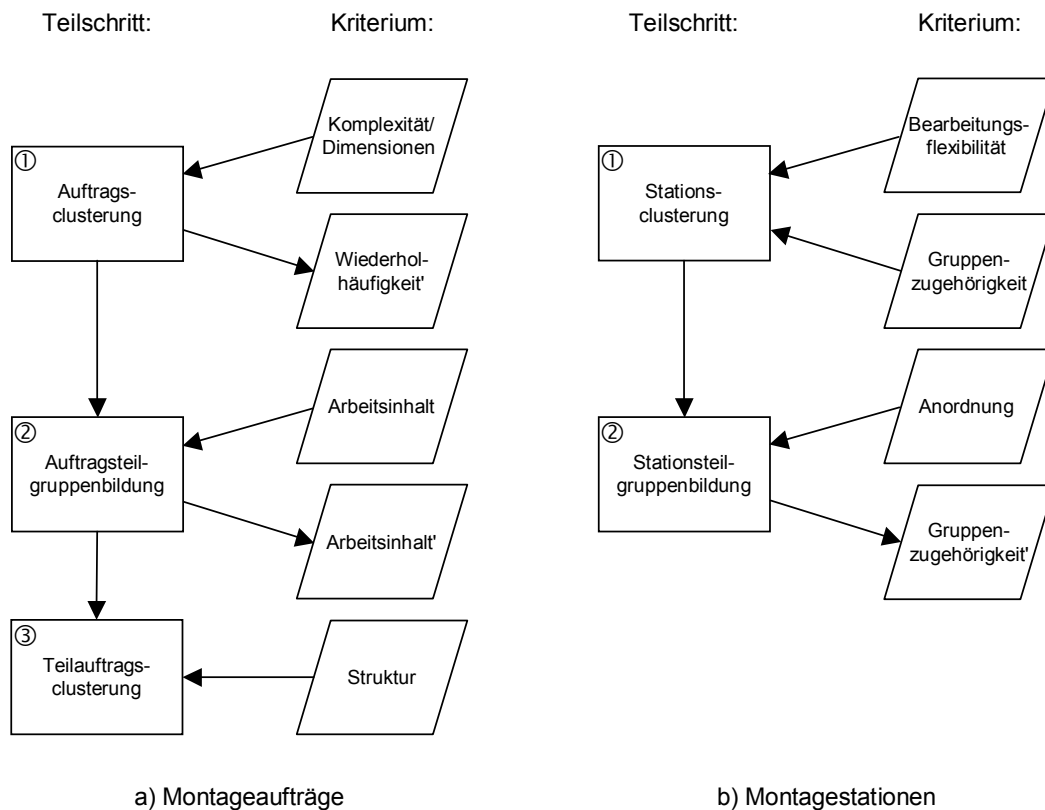


Bild 4.1 Vorgehensweise zur Auftrags- und Stationsgruppierung auf Basis der Klassifizierungskriterien

Der nächste Schritt besteht in der Unterteilung der gebildeten Auftragsgruppen entsprechend des Kriteriums „Arbeitsinhalt“. Das Ziel ist, eine Harmonisierung der Auftragszeiten zu erreichen (Bild 4.2).

Je größer die Streuung der Auftragszeiten ist, desto flacher verläuft die Leistungskennlinie (3.2.2). Die Ursache hierfür liegt darin, dass aufgrund der stärker variierenden Arbeitsinhalte im Durchschnitt ein höheres Bestands- und somit auch Durchlaufzeitniveau notwendig ist, um einen Abriss des Materialflusses zu vermeiden. Die Größe dieses zur Vermeidung von Leistungseinbußen an einer Montagestation notwendigen Arbeitsvorrates wird vorrangig durch den idealen Mindestbestand beeinflusst [nach NYH99]. Er bestimmt nämlich bei gegebener maximaler Leistung sowohl die Steigung der Leistungskennlinie als auch den erforderlichen Bestandspuffer. Anhand Gl. 3.13 und Gl. 3.14 ist ersichtlich, dass die Streuung der Arbeitsinhalte quadratisch in den Wert des idealen Mindestbestandes einfließt. Somit sollten sie durch eine entsprechende Auftrags-/Ressourcenzuordnung auf einem möglichst geringen Niveau einander angeglichen werden. Dieser Zusammenhang unterstützt auch die gewählte Berücksichtigung des Kriteriums „Losgröße“ über das Klassifizierungsmerkmal „Arbeitsinhalt“, da eine Auftragszeitharmonisierung durch eine gezielte Losteilung von Montageaufträgen mit großem Arbeitsinhalt oft wirksamer ist, als eine über alle Aufträge gleich-

mäßig verteilte Losgrößenreduzierung. Durch die Auftragseteilgruppenbildung ändert sich der Wert des Merkmals „Arbeitsinhalt“ und es erfolgt eine Kennzeichnung als *Arbeitsinhalt*.

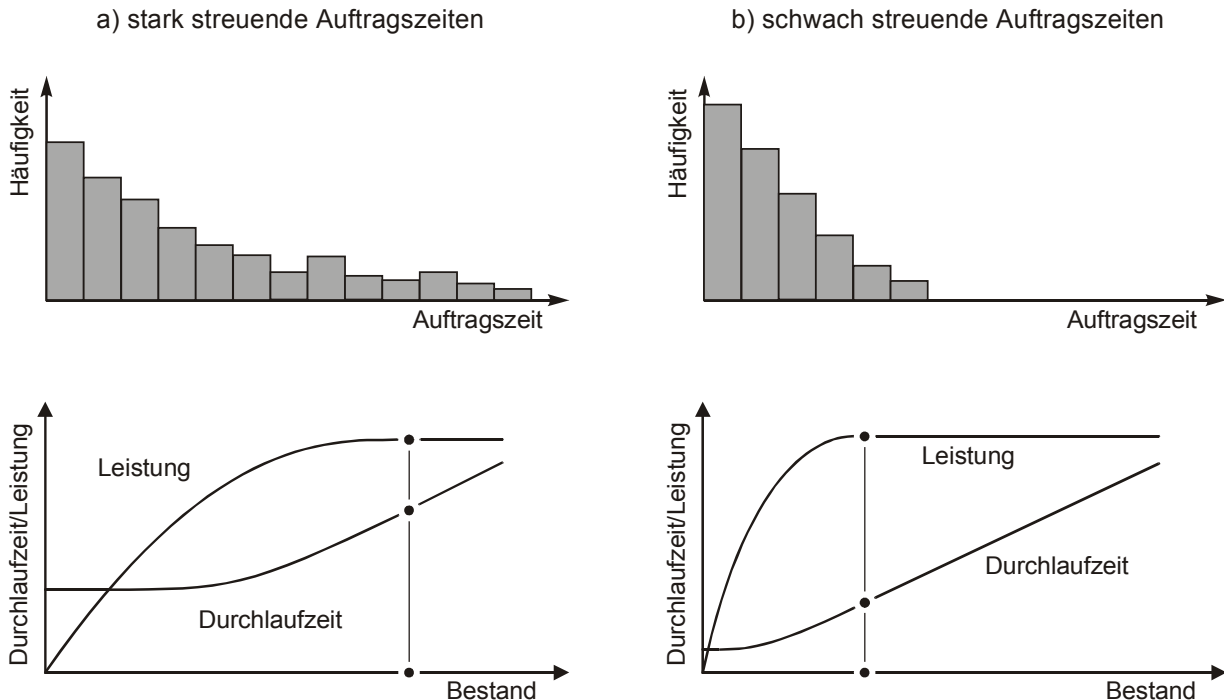


Bild 4.2 Bestandsenkung und Durchlaufzeitreduzierung durch eine Harmonisierung der Auftragszeiten (nach Nyhuis)

Das Kriterium „Struktur“ wird im folgenden Teilschritt berücksichtigt. Hierzu werden aus den gebildeten Teilgruppen Aufträge gemäß ihrer Zusammengehörigkeit geclustert. Keine Auswirkung hat das für *Einfachaufträge* entsprechend dem Auftragsnetz der linearen Montage (Bild 4.3a). Entspricht eine Struktur dagegen einem Auftragsnetz der vernetzten Montage (Bild 4.3b), werden alle zu diesem Auftragsnetz gehörenden *Teilaufträge* und *Komplettaufträge* zusammengefasst. Das Ziel der Berücksichtigung aller Teile eines Auftrages als eine Gruppe ist eine einfachere Koordinierbarkeit ihres Durchlaufs.

Auch die Montagestationen werden geclustert (Bild 4.1b). Entsprechend ihrer vorhandenen Bearbeitungsflexibilität und der bisherigen Gruppenzugehörigkeit werden Stationsgruppen gebildet. Sich ersetzende Montagestationen, d.h. Stationen, die ähnliche Einsatzmöglichkeiten im Montageprozess haben, werden somit zu Gruppen zusammengefasst und der Wert des Kriteriums „Gruppenzugehörigkeit“ in Summe erhöht.

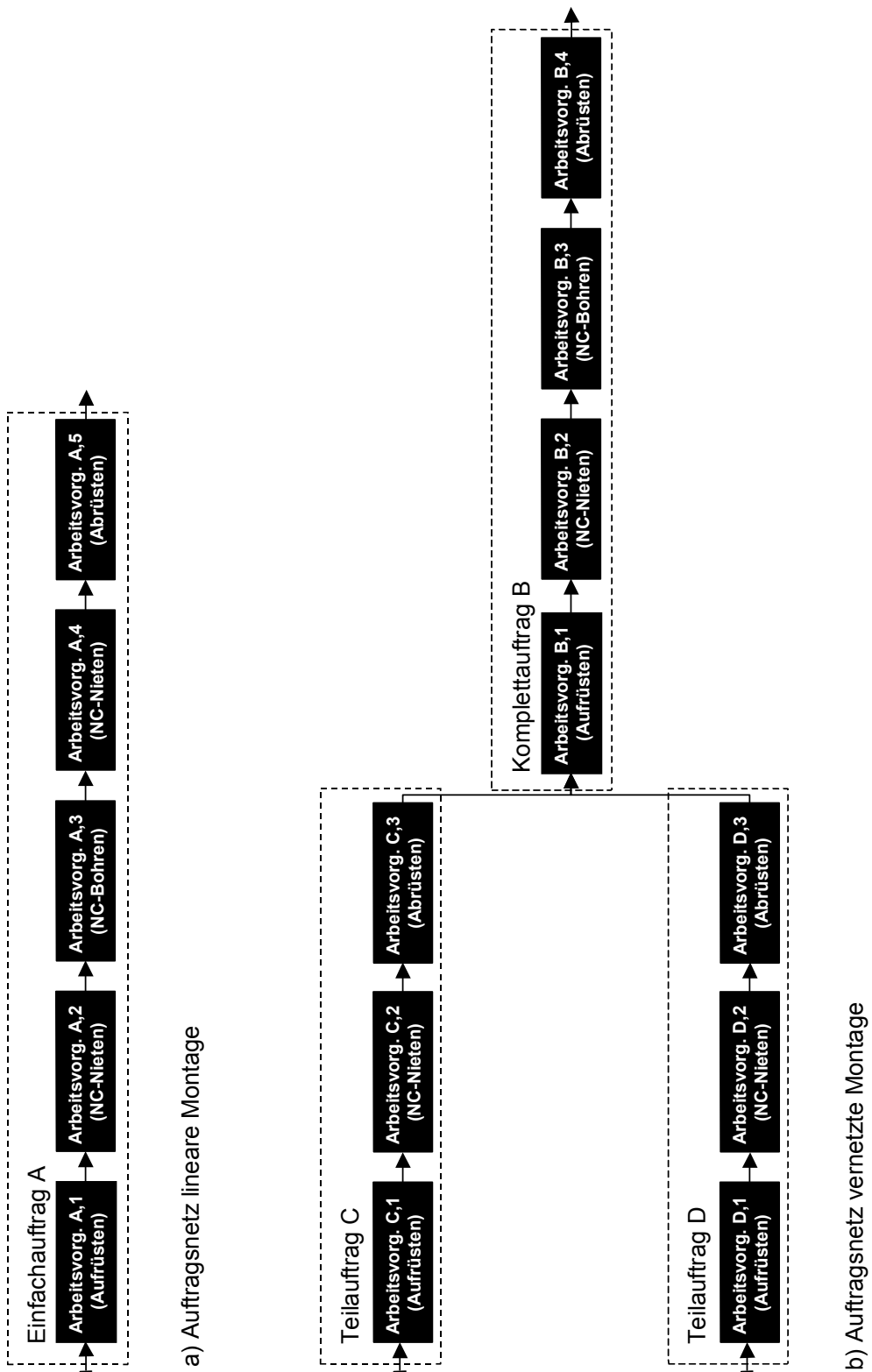


Bild 4.3 Auftragsnetz lineare und vernetzte Montage

Der anschließende Teilschritt berücksichtigt die Anordnung der Montagestationen. Die gebildeten Stationsgruppen werden entsprechend der Standorte der in ihr zusammengefassten Stationen sowie deren ablaufbedingten Verknüpfungen zu anderen Stationen bzw. deren Erreichbarkeit durch Transportmittel geteilt. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei dieser Stationsteilgruppenbildung ist die Schaffung von gemeinsamen Bestands-puffern (Bild 4.4).

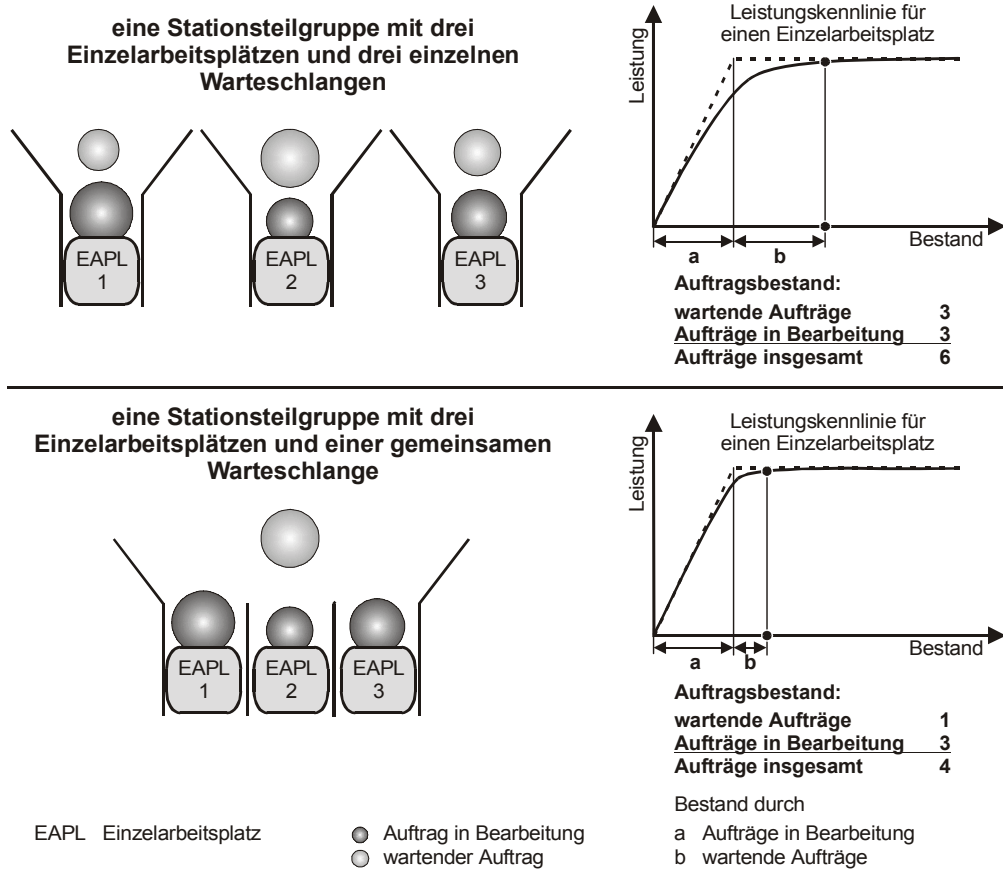


Bild 4.4 Bestandsenkung und Durchlaufzeitreduzierung durch Nutzung gemeinsamer Bestands-puffer (nach Nyhuis)

Wenn eine Stationsteilgruppe mehrere technologisch ähnliche Arbeitsplätze umfasst, reicht für diese Arbeitsplätze die Nutzung einer Warteschlange als gemeinsamer Bestands-puffer. Dadurch können zur Erreichung des Soll-Betriebspunktes die erforderlichen Pufferbestände in Summe verringert werden, ohne das Risiko eines Abrisses des Materialflusses zu erhöhen. Bei einer Stationsteilgruppe mit drei solchen Einzelarbeitsplätzen sind z.B. drei Aufträge in Bearbeitung und jeweils ein Auftrag wartet in den drei zugehörigen Warteschlangen. Bild 4.4, oben rechts zeigt einen der drei sich ergebenden Leistungskennlinienverläufe [NYH99]. Nutzen die drei Einzelarbeitsplätze dagegen eine Warteschlange als gemeinsamen Bestands-puffer, reduziert sich das Bestands-niveau bei gleicher Leistung insgesamt um 1/3 (Bild 4.4, unten rechts). Infolge der

Stationsteilgruppenbildung ändert sich der Wert des Klassifizierungsmerkmals „Gruppenzugehörigkeit“ und es wird als *Gruppenzugehörigkeit* gekennzeichnet.

4.2.2 Priorisierung der Belegungsalternativen

Die eigentliche Arbeitsvorgangs-Ressourcen-Zuordnung geschieht durch eine Priorisierung aller technologisch möglichen Belegungsalternativen. Dadurch soll zum einen gewährleistet werden, dass im dynamischen Ablauf die Wahrscheinlichkeit einer optimalen Auftrags-Ressourcenkombination hoch ist. Zum anderen soll die bestehende Flexibilität (2.1.2.4) des Montagesystems nicht eingeschränkt werden. Der zu vergebende Prioritätswert ist dabei ein Maß für die logistische Eignung eines Arbeitsvorganges, im Vergleich zu der Eignung anderer Arbeitsvorgänge an einer bestimmten Montagestation bearbeitet zu werden. Mit Hilfe des Prioritätswertes eines Arbeitsvorganges wird seine Stelle in der Zuordnungsreihenfolge gegenüber den anderen auf die Stationen zu verteilenden Arbeitsvorgänge festgelegt. Weitere Reihenfolgeregeln wie FIFO oder SZ (Kapitel 2.2.2.1) treten nur dann in Kraft, wenn mehrere gleiche Prioritätswerte für eine Arbeitsvorgangs-Station-Kombination auftreten. Innerhalb des Verfahrens hat der Wert 1 die höchste Priorität. Die Vorgehensweise zur Priorisierung ist in Bild 4.5 dargestellt.

Zunächst wird die Engpasstechnologie bestimmt (Bild 4.5a). Hierzu werden die Stationsteilgruppen ermittelt, bei denen die Wahrscheinlichkeit, dass sie in der betrachteten Planungsperiode zu einem dauernden oder temporären Engpass werden können, am größten ist. Die Bestimmung der potentiellen Engpassstationen erfolgt auf Basis einer engpassorientierte Logistikanalyse (Kapitel 3.2.3) anhand von Ist- oder Simulations-Daten (Kapitel 4.4.1). Grundsätzlich richtet sich das Belegungsverfahren nur dann an mehr als einer Engpasstechnologie aus, wenn mehrere Engpasstechnologien unabhängig voneinander parallel durchlaufen werden.

Im Anschluss wird der Kapazitätsbedarfsanteil aller nach den gebildeten Auftragsteilgruppen bzw. geclusterten Teilaufträgen zusammengefassten Montagevorgänge, die auf Stationen der Engpasstechnologie bearbeitet werden können, am dortigen Gesamtkapazitätsbedarf durch eine ABC-Analyse ermittelt (Bild 4.6). Der Kapazitätsbedarf gibt dabei an, wie viel Kapazität zur Verfügung gestellt werden muss, um die zuzuordnenden Arbeitsvorgangsgruppen zu bearbeiten. Hierzu werden die einzelnen Auftragszeiten mit der Soll-Stückzahl der betrachteten Planungsperiode multipliziert und die Summe für jede Arbeitsvorgangsgruppe gebildet. Die resultierende ABC-Zuordnung ergibt die Werte des neuen Kriteriums *Kapazitätsbedarfsanteil*. Arbeitsvorgangsgruppen mit dem Wert A binden demnach relativ viel Kapazität, Gruppen mit dem Wert C entsprechend wenig.

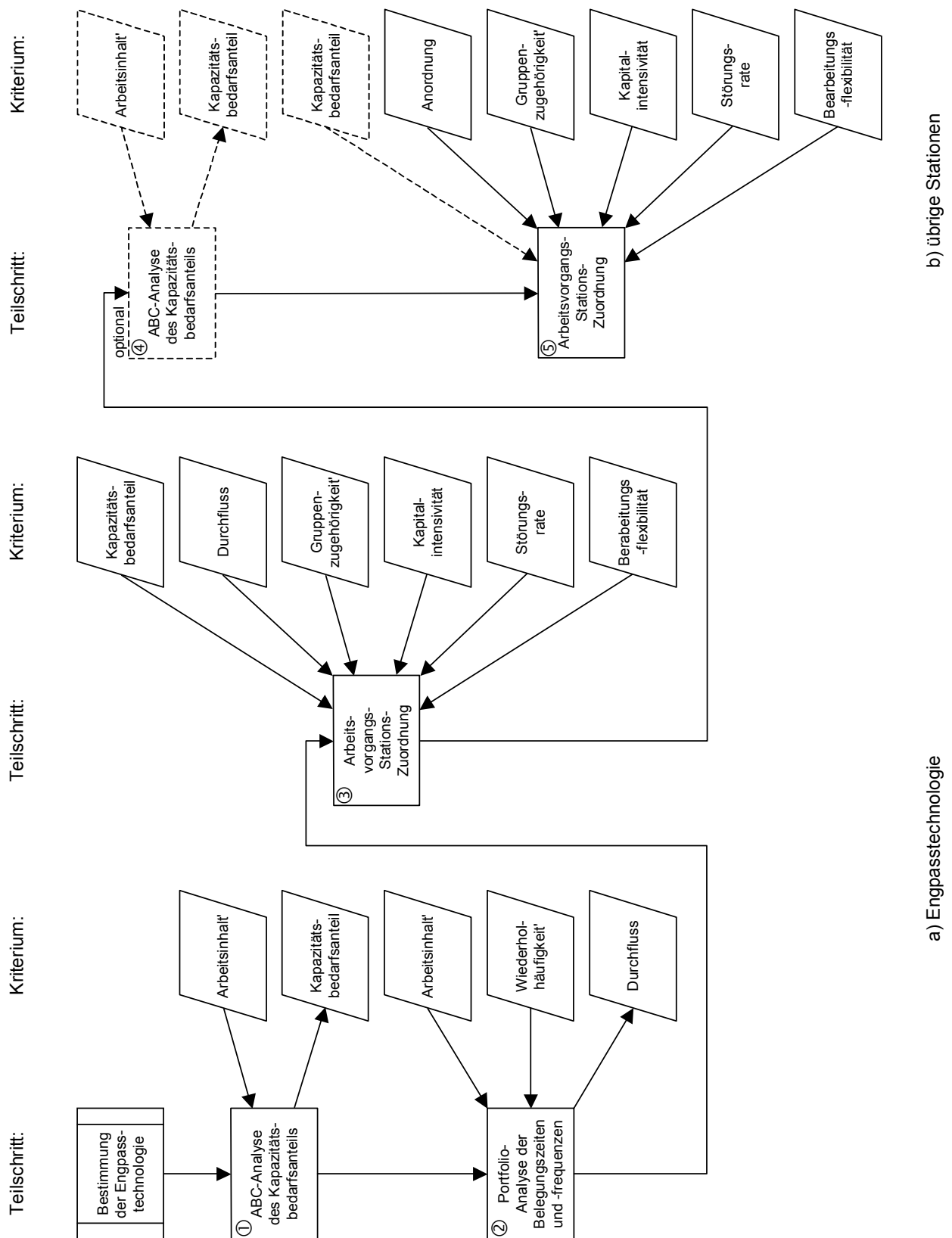


Bild 4.5 Vorgehensweise zur Priorisierung der Belegungsalternativen

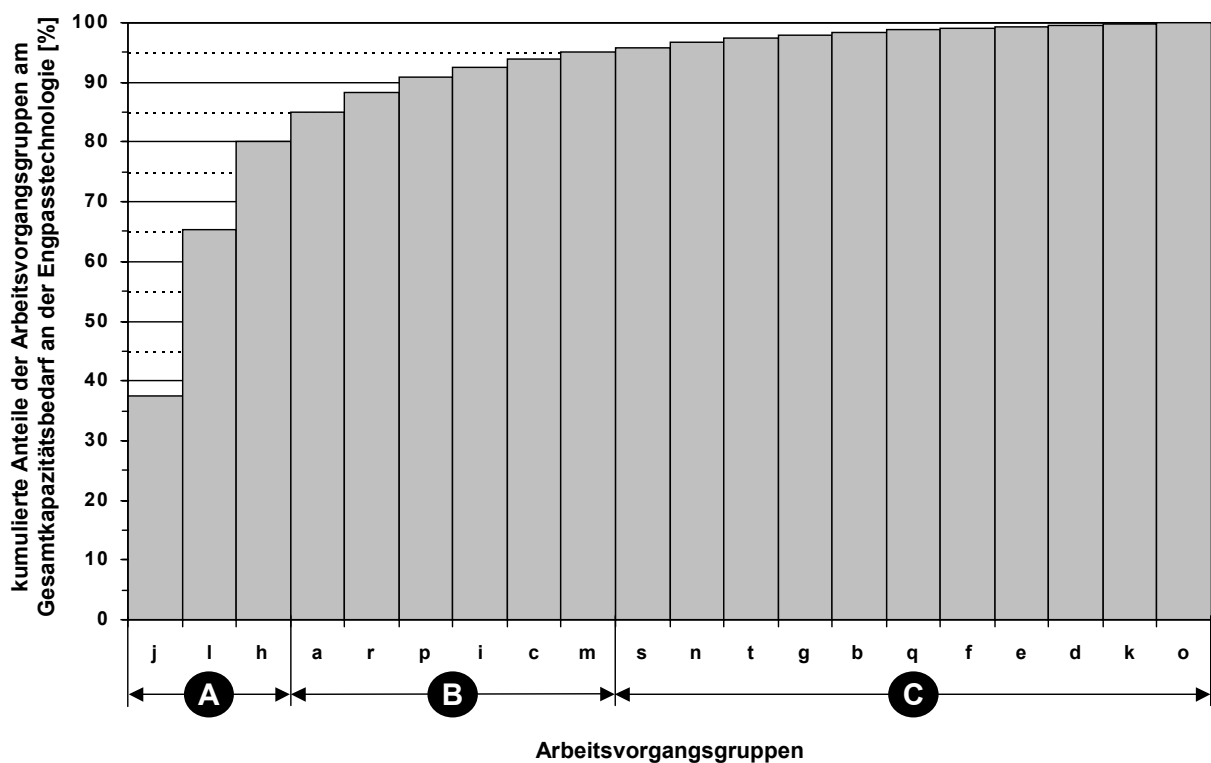


Bild 4.6 Bestimmung des Kapazitätsbedarfsanteils der Arbeitsvorganggruppen an der Engpasstechnologie durch eine ABC-Analyse (Beispiel)

Der nächste Teilschritt besteht in der Kombination der Auftragskriterien „Arbeitsinhalt“, und „Wiederholhäufigkeit“. Dies erfolgt durch eine Portfolioanalyse (Bild 4.7). Der Kapazitätsbedarf wird hierzu als Belegungszeit angegeben, die durch Division der Auftragszeiten durch den für die entsprechende Station gültigen Leistungsgrad (Kapitel 3.2.2) berechnet wird. An der Abszisse wird die Anzahl der Arbeitsvorgänge einer Arbeitsvorganggruppe an der Engpasstechnologie für die betrachtete Periode abgetragen. Die Ordinate enthält die entsprechenden Mittelwerte der Belegungszeiten je Arbeitsvorganggruppe.

In Abhängigkeit der durch die Anzahl bzw. durch die mittlere Belegungszeit je Arbeitsvorganggruppe gebildeten zweidimensionalen Verteilung lassen sich verschiedene Felder bilden, um die Werte des neuen Kriteriums *Durchfluss* zu ermitteln. So haben im dargestellten Portfolio z.B. Arbeitsvorgänge innerhalb des Feldes II eine hohe Frequenz bei geringer mittlerer Belegungszeit und Arbeitsvorgänge mit dem Kriteriumswert IV (Feld IV) entsprechend eine kleine Frequenz bei großer mittlerer Belegungszeit. Folglich fließen Arbeitsvorgänge mit dem Wert II häufiger und schneller durch eine Montagestation als Arbeitsvorgänge mit dem Wert IV.

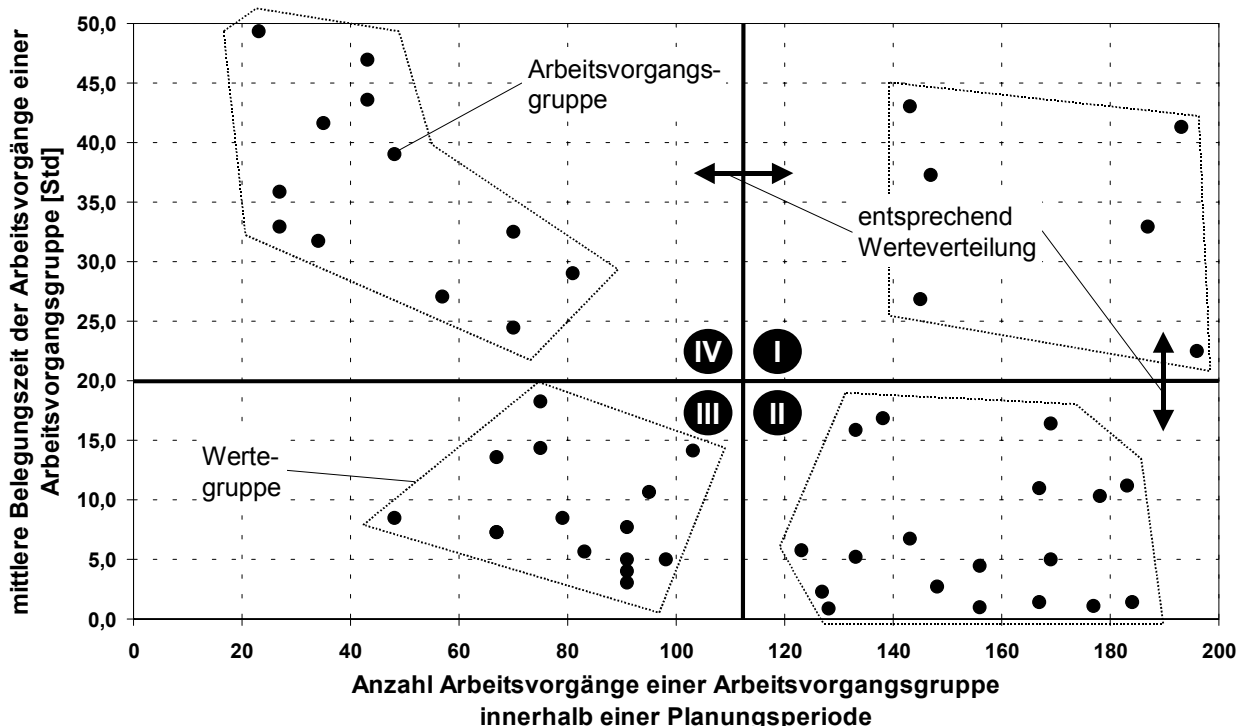


Bild 4.7 Gegenüberstellung von Belegungszeit und -frequenz an der Engpass-technologie durch eine Portfolio-Analyse (Beispiel)

Anschließend erfolgt für die gewählte Planungsperiode die Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung durch die Vergabe der Prioritätswerte. Hierzu werden primär die Kriterien „Kapazitätsbedarfsanteil“, „Durchfluss“ und „Gruppenzugehörigkeit“ sowie sekundär die Kriterien „Kapitalintensivität“, „Störungsrate“ und „Bearbeitungsflexibilität“ herangezogen. Es wird für eine technologisch mögliche Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung solange der Prioritätswert 1 vergeben, bis das Kapazitätsangebot, d.h. die in dem betrachteten Zeitabschnitt verfügbare Belegungszeit, einer in Erwägung gezogener Stationsteilgruppe ausgeschöpft ist. Danach muss der Prioritätswert 1 für eine alternative Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung festgelegt werden, die noch Kapazitätsreserven aufweist. Um das bestmögliche Ergebnis zu erhalten, ist nach folgender Berücksichtigungsreihenfolge vorzugehen:

1. Gruppen, die Arbeitsvorgänge ohne technologische Alternativen enthalten
 - ⇒ Arbeitsvorgänge, die keine Belegungsalternativen haben, müssen zuerst zugeordnet werden.
2. Auftrags- und Stationskriterien „Kapazitätsbedarfsanteil“, „Durchfluss“ sowie „Gruppenzugehörigkeit“
 - ⇒ Arbeitsvorgangsguppen mit dem Kapazitätsbedarfsanteilswert A werden aufgrund ihrer hohen Kapazitätsbindung zuerst betrachtet und entsprechend ihres

Durchflusswertes den Stationsteilgruppen zugeordnet. Arbeitsvorgangsgruppen mit dem Wert II eignen sich besonders für Stationsteilgruppen mit einem hohen Anordnungswert, da sie kurze Belegungszeiten und eine hohe Frequenz aufweisen. Der Wert IV ist entsprechend ein guter Zuordnungskompromiss für Stationsteilgruppen mit einem niedrigen Anordnungswert. Bevor Arbeitsvorgangsgruppen des Kapazitätsbedarfsanteils A und dem Durchflusswert I und III zugeordnet werden, sollten erst Arbeitsvorgangsgruppen mit den Kriterienwerten B und II sowie B und IV berücksichtigt werden.

3. Stationskriterium „Kapitalintensivität“

⇒ Kapitalintensiven Montagestationen sollten möglichst große Arbeitsinhalte zugeordnet werden.

4. Stationskriterium „Störungsrate“

⇒ Montagestationen, die häufig störungsbedingt ausfallen, sollten mit möglichst wenigen Arbeitsvorgängen belegt werden.

5. Stationskriterium „Bearbeitungsflexibilität“

⇒ Für Montagestationen mit einem hohen Bearbeitungsflexibilitätswert sollten Kapazitätsreserven eingeplant werden, da sie als Alternativstationen dienen.

Danach erfolgt die Vergabe der Prioritätswerte 1 für die Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnungen, die keine potentielle Engpasstechnologien enthalten (Bild 4.5b). Die Zuordnung folgt sinngemäß der zuvor beschriebenen Zuordnung. Allerdings wird statt des Kriteriums „Durchfluss“ nur das Kriterium „Anordnung“ berücksichtigt, da die Arbeitsvorgangsgruppen so zugeordnet werden sollen, dass eine optimale Verknüpfung zu den Engpassstationen gewährleistet ist. Darüber hinaus müssen die Werte für das Kriterium „Kapazitätsbedarfsanteil“ nur dann über eine ABC-Analyse bestimmt werden, wenn aufgrund der noch vorhandenen Planungsfreiheit die Zuordnungsreihenfolge der verbliebenden Arbeitsvorgangsgruppen geordnet werden soll.

Nachdem alle Arbeitsvorgänge genau einmal den Prioritätswert 1 für eine Stations-Zuordnungen erhalten haben, wird der Prioritätswert 2 für alle diejenigen Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnungen vergeben, welche den Wert 1 aufgrund eines erschöpften Kapazitätsangebotes für eine alternative statt ihrer logistisch idealen Zuordnung erhalten haben. Als Ergebnis hat dann ein Teil der Arbeitsvorgänge den Prioritätswert 1 für die ideale Stationszuordnung sowie der anderer Teil den Wert 1 für eine alternative und den Wert 2 für die ideale Zuordnung.

Nach Vergabe der Werte 1 und 2 müssen weitere Prioritätswerte (>2) für alle gemäß der Arbeitspläne möglichen Belegungsalternativen vergeben werden. Der Wert richtet

sich nach der jeweiligen Eignung der Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung. Kapazitätsbeschränkungen werden hierbei nicht berücksichtigt.

Die beschriebene Priorisierung der Belegungsalternativen wird zunächst einmalig durchgeführt. Eine Anpassung ist anschließend dann erforderlich, wenn sich das Kapazitätsangebot oder ein Kriteriumswert ändert. Änderungen der Kriteriumswerte können technische oder dispositive Ursachen haben. Eine technische Ursache ist z.B. ein veränderter Montageablauf. Dispositive Ursachen sind i.d.R. Stückzahlvariationen, die stark von der betrachteten Planungsperiode abhängen. Für eine Automatisierung der Belegungspriorisierung bietet sich der Einsatz eines Expertensystems an (Kapitel 2.2.4), da feste Zuordnungsregeln definiert werden können. Aufgrund der von dem vorhandenen Kapazitätsangebot unabhängigen Bewertung der logistischen und technologischen Zuordnungseignung besteht bei den Prioritätswerten, die größer als 2 sind, eine feste Verknüpfung zwischen Wert und möglicher Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnung. Die entsprechenden Kombinationen können so in einer Datenbank hinterlegt und bei Bedarf abgefragt werden.

Um möglichst häufig den Prioritätswert 1 für eine logistisch ideale Arbeitsvorgangs-Stations-Kombination vergeben und im betrieblichen Ablauf durchsetzen zu können, ist simultan zur Priorisierung ein Kapazitätsabgleich durch eine Belastungs- oder Leistungsanpassung vorzunehmen. In Bild 4.8 sind einige typische Zustände mit den geeigneten Maßnahmen skizziert [WIE97a].

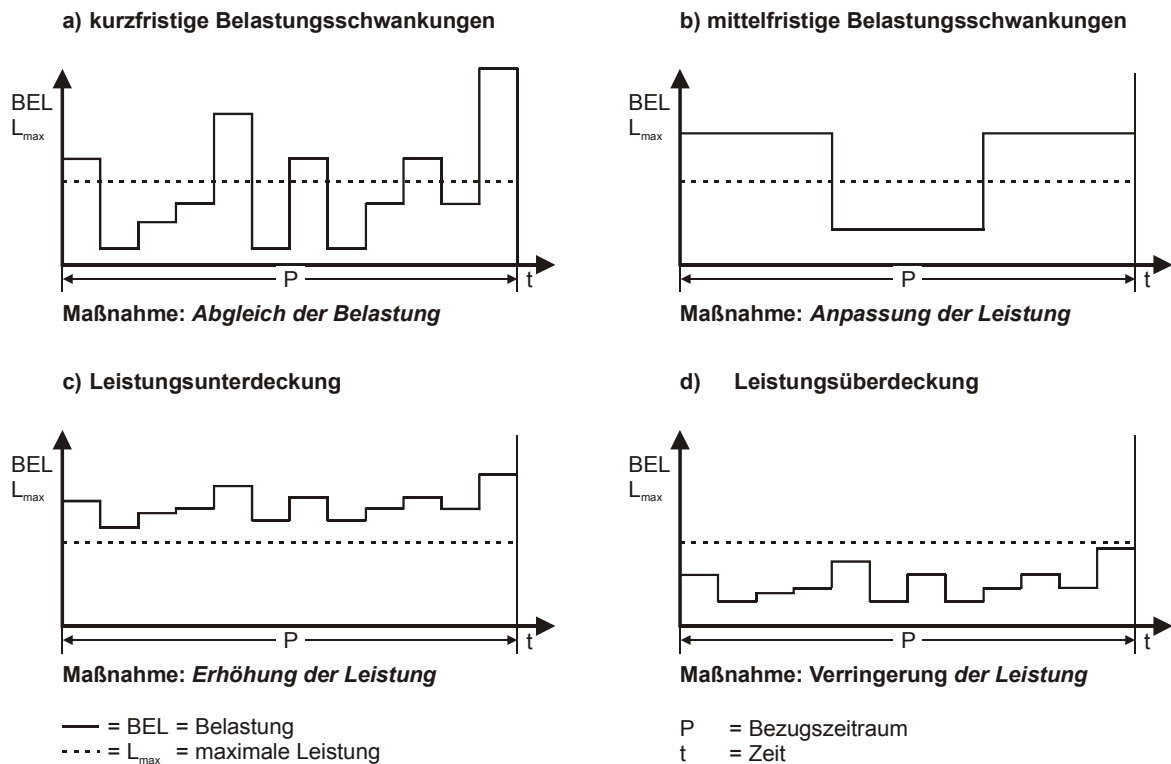


Bild 4.8 Belastungsausgleich und Leistungsanpassung (nach Wiendahl)

Im Zustand a) schwankt die Belastung kurzfristig um einen konstanten maximalen Leistungswert. In diesem Fall sollte versucht werden, durch zeitliches Verschieben von Arbeitsvorgängen eine Glättung des Belastungsprofils zu bewirken.

Im Zustand b) ist eine mittelfristige Belastungsschwankung erkennbar. In diesem Fall sollte die maximale Leistung entsprechend des Kriteriums „Automatisierungsgrad/Personalflexibilität“ z.B. durch Änderungen des Schichtmodells angepasst werden.

Im Zustand c) ist insgesamt zu wenig maximale Leistung vorhanden. Hier sind leistungssteigernde Maßnahmen erforderlich. Anderenfalls ist das Belegungsverfahren nicht durchführbar.

Im Zustand d) wird die höchste Anzahl des Prioritätswertes 1 erreicht. Trotzdem sollte zur Steigerung der Auslastung Kapazität abgebaut werden.

4.3 Bestimmung der Montagesteuerung

Bei der Anwendung des Verfahrens übernimmt die Montagesteuerung die Koordination des Arbeitsablaufs, um die für eine Planungsperiode vorgesehenen Montageaufträge mit hoher Termintreue unter bestmöglicher Nutzung der vorhandenen Ressourcen fertigzustellen. Zu ihren Aufgaben gehört insbesondere die Festlegung der zeitlichen Abfolge der Aufträge und Arbeitsvorgänge.

4.3.1 Auftragsfreigabe

Der Auftragsfreigabe kommt innerhalb des entwickelten Verfahrens eine wesentliche Bedeutung zu, da die Eingriffsmöglichkeiten innerhalb des Auftragsdurchlaufs bewusst gering gehalten werden. Die Einsteuerzeitpunkte der Aufträge müssen innerhalb der betrachteten Periode so verteilt werden, dass einerseits der bereits freigegebene Bestand nicht zu sehr anwächst und andererseits bestehende Engpässe entsprechend ihres Kapazitätsangebotes optimal ausgelastet werden. Der Vorteil eines konstanten Bestandsniveaus im Montagesystem ist, dass man innerhalb einer Planungsperiode mit konstanten Plandurchlaufzeiten für eine Auftragsvariante rechnen und zur Beschreibung des Systemzustandes Produktionskennlinien hinzuziehen kann, die für den gesamten betrachteten Zeitraum gelten.

Nach Übernahme der Montageaufträge von der Mengenplanung (Bild 2.1) und durchgeführtem Kapazitätsabgleich (Bild 4.8) erfolgt zunächst eine Durchlaufterminierung. Prinzipiell sind dabei drei verschiedene Vorgehensweisen möglich:

- Vorwärtsterminierung
- Mittelpunktterminierung
- Rückwärtsterminierung

Bei der Vorwärtsterminierung (progressive Terminierung) wird, ausgehend von einem möglichen Starttermin, in die Zukunft terminiert und der entsprechend frühestmögliche Endtermin ermittelt. Dagegen wird bei der Rückwärtsterminierung (retrograde Terminierung) von einem vorbestimmten Fertigstellungstermin des Auftrages in die Vergangenheit terminiert und der spätest zulässige Starttermin ermittelt, mit dem der gegebene Fertigstellungstermin noch eingehalten werden kann. Bei der Mittelpunktsterminierung wird von einem Mittelpunktstermin ausgegangen. Von diesem Zeitpunkt aus wird in die Zukunft eine Vorwärtsterminierung und in die Vergangenheit eine Rückwärtsterminierung vorgenommen. Mit der Mittelpunktsterminierung ist es möglich, bei einem beliebigen Arbeitsvorgang aufzusetzen. Für diesen Arbeitsvorgang kann ein fixer Termin eingeplant werden. Dieses Prinzip wird zur gesonderten Berücksichtigung von Engpassstationen angewendet.

Im Rahmen der Durchlaufterminierung werden kapazitätsspezifische Einflüsse berücksichtigt. So ergibt sich die Durchführungszeit eines Arbeitsvorganges aus dem Verhältnis seiner Auftragszeit an der mit dem Prioritätswert 1 zugeordneten Stationsteilgruppe und der dort vorhandenen mittleren Leistung:

$$ZDF_{j,k} = \frac{ZAU_{j,k}}{L_m} \quad \text{Gl. 4.1}$$

mit	ZDF	Durchführungszeit eines Arbeitsvorganges
	ZAU	Auftragszeit eines Arbeitsvorganges
	L_m	mittlere Leistung einer Stationsteilgruppe
	j	Auftragsindex
	k	Montagestationsdurchlaufindex
	l	Montagestationsteilgruppenindex

Zur Bestimmung der Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges werden neben der stationsteilgruppenspezifischen Leistung die Kriterien „Anordnung“ und „Struktur“ berücksichtigt, da diese die Übergangszeit beeinflussen. So ist die einbezogene Übergangszeit einerseits von der mit dem Prioritätswert 1 zugeordneten Stationsteilgruppe und andererseits von der Auftragsart abhängig. Mögliche Auftragsarten sind gemäß dem zugehörigen Auftragsnetz (Bild 4.3) Einfachaufträge, Teilaufträge und Komplettaufträge. Die entsprechende Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges ist dann gleich der Summe von Übergangszeit und Durchführungszeit:

$$ZDL_{j,k} = ZUE_{l,p} + ZDF_{j,k} \quad \text{Gl. 4.2}$$

mit	ZDL	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
	ZUE	Übergangszeit eines Arbeitsvorganges
	ZDF	Durchführungszeit eines Arbeitsvorganges
	j	Auftragsindex
	k	Montagestationsdurchlaufindex
	l	Montagestationsteilgruppenindex
	p	Auftragsartindex

Die Summierung der Durchlaufzeiten aller zugehörigen Arbeitsvorgänge ergibt die Durchlaufzeit eines Auftrags:

$$ZDA_j = \sum_{k=1}^{z_j} ZDL_{k,j} \quad \text{Gl. 4.3}$$

mit	ZDA	Durchlaufzeit eines Auftrages
	ZDL	Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges
	j	Auftragsindex
	k	Montagestationsdurchlaufindex
	z	Anzahl der Montagestationsdurchläufe

Eine hohe Auftragstermtreue wird über die Einplanung einer variablen Vorlaufzeit erzielt. Durch sie kann einerseits der Mittelwert und andererseits die Streuung der Terminabweichung des Fertigstellungstermins beeinflusst werden. Hierzu werden bei ihrer Berechnung die Kriterien „Arbeitsinhalt“ und „Anzahl Arbeitsvorgänge“ einbezogen:

$$ZVA_j = a_p * ZDA_j^{c_p} + b_p * z_j \quad \text{Gl. 4.4}$$

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

Die Länge der auftragsindividuellen Vorlaufzeit hängt zum einen von der entweder über den Parameter a oder über den Parameter c gestauchten Auftragsdurchlaufzeit ab. Der Parameter a hat hierbei einen linearen und der Parameter c einen exponentiellen Effekt. Zum anderen hat die Anzahl der zu durchlaufenden Montagstationen durch die Multiplikation mit dem Parameter b einen Einfluss auf die Vorlaufzeitlänge. Umfangreiche Simulationsläufe ergaben, dass die Durchlaufzeit nur über einen der Parameter a und c gewichtet werden sollte. In den meisten Fällen reichte dabei eine Variation des Parameters a aus. Zu beachten ist, dass der Parameter b die Dimension Zeit hat und

die Einheit „BKT“ trägt. Ein weiteres Ergebnis der Testläufe ist, dass die Werte der drei Parameter nur in Abhängigkeit der Auftragsarten Einfach-, Teil- und Komplettauftrag und nicht für jede Auftragsvariante einzeln gesetzt werden müssen. Oftmals waren sogar die geeigneten Werte für Einfach- und Teilaufträge gleich.

Zur Bestimmung des Freigabezeitpunktes bei der Rückwärtsterminierung werden für jeden Auftrag die Durchlaufzeit sowie die Vorlaufzeit berechnet. Die Summe beider Werte wird dann vom gegebenen Fertigstellungstermin subtrahiert:

$$TAB_j = TF_j - (ZVA_j + ZDA_j) \quad \text{Gl. 4.5}$$

mit	TAB	Bearbeitungsanfang eines Auftrages (Auftragseinstoß)
	TF	Fertigstellungstermin eines Auftrages
	ZVA	Vorlaufzeit eines Auftrags
	ZDA	Durchlaufzeit eines Auftrags
	j	Auftragsindex

In Bild 4.9 sind die Durchlaufterminierung und die Bestimmung der Vorlaufzeit schematisch dargestellt. Dabei ist die Abhängigkeit der Vorlaufzeit von der Anzahl und der Länge der Durchlaufelemente (3.1.1) sowie von den Parameterwerten ersichtlich. So hat z.B. Auftrag A2 trotz gleicher Parameterwerte wie Auftrag A1 eine kürzere Vorlaufzeit, da er eine nicht so lange Auftragsdurchlaufzeit sowie weniger Arbeitsvorgänge als Auftrag A1 aufweist. Bei Auftrag B1 werden dagegen die verhältnismäßig kurzen Übergangszeiten durch höhere Parameterwerte und somit eine längere Vorlaufzeit berücksichtigt, da sonst Durchlaufverzögerungen im Montageablauf nur sehr schwer wieder auszugleichen wären.

Im Falle der Vorwärtsterminierung wird die Vorlaufzeit gleichermaßen zur Ermittlung des zu erwartenden Fertigstellungstermins einbezogen. Bei der Mittelpunktsterminierung ist sinngemäß jeweils ein Vorlaufzeitanteil für die Vergangenheit und ein Zeitanteil für die Zukunft zu berechnen. Die Verknüpfung von Teil- und Komplettaufträgen geschieht gemäß des zugehörigen Auftragsnetzes durch Summierung der Vorlauf- und Durchlaufzeiten des Komplett- und des zeitlich längsten Teilauftrages. Für die Komplettaufträge ist dabei der letzte Fertigstellungszeitpunkt der zugehörigen Teilaufträge äquivalent zum Freigabezeitpunkt der Teil- und Einfachaufträge.

Der Schwerpunkt des Verfahrens liegt in der Berücksichtigung des Fertigstellungstermins und des Bearbeitungsanfangs sowie der Länge der Übergangszeiten. Die ebenfalls bestimmbaren Zu- und Abgangstermine sowie Rüst- und Bearbeitungsanfänge der einzelnen Arbeitsvorgänge werden nur zu Analysezwecken und nicht zur Ablaufsteuerung herangezogen. Die für eine Planungsperiode zur Durchführung der Durchlaufterminierung und Bestimmung der Vorlaufzeit benötigten Zeit- und Leistungswerte sowie Parameter werden mit Hilfe der Simulation ermittelt. Somit werden diese Größen

durch die sich im dynamischen Ablauf ergebenden Verfügbarkeiten aller am Ablauf beteiligten Ressourcen und des sich einstellenden Bestandsniveaus beeinflusst.

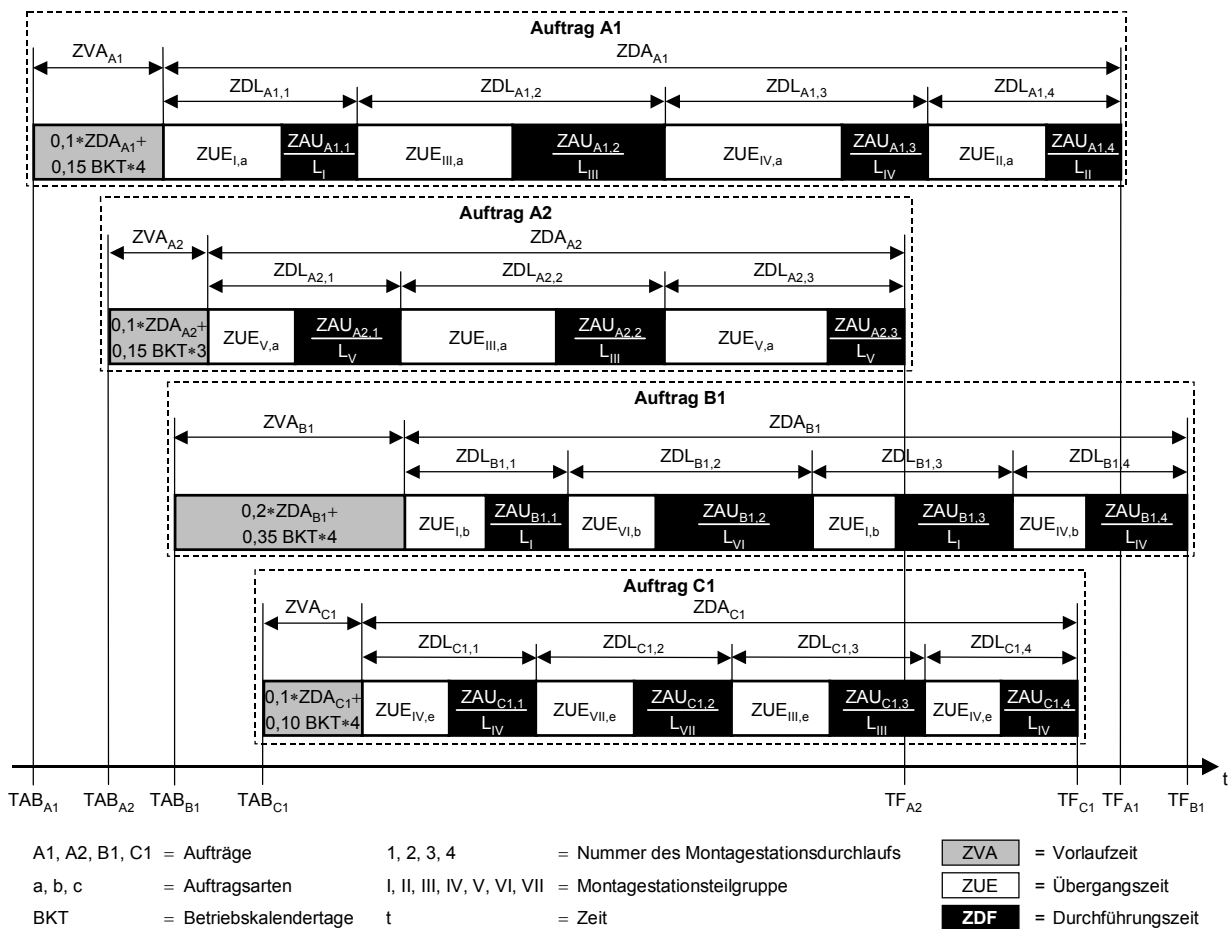


Bild 4.9 Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung (Beispiel)

4.3.2 Auftragsdurchlauf

Im Anschluss an die Freigabe übernimmt die Montagesteuerung die Durchsetzung der Aufträge durch das Montagesystem. Beginnend mit dem Einsteuerzeitpunkt wird der jeweils in der Ablauffolge nächste Arbeitsvorgang eines Auftrages einer Montagestation zugewiesen. Das hierzu festgelegte Vorgehen ist an das verteilte Problemlösen durch ein kooperatives und konkurrierendes Zusammenwirken mehrerer Agenten (Kapitel 2.2.4) angelehnt. Die Folge der zuzuweisen Arbeitsvorgänge kann entweder durch die Reihenfolgeregeln FIFO oder SZ (Kapitel 2.2.2.1) festgelegt werden.

Ein Auftragsagent verwaltet eine Gruppe von Montageaufträgen und deren Arbeitsvorgänge. Er hat die Aufgabe die Fertigstellungstermine der ihm zugewiesenen Aufträge möglichst genau einzuhalten und innerhalb des Auftragsdurchlaufs für jeden zugehörigen Arbeitsvorgang eine Montagestation bzw. Stationsteilgruppe zu finden, für deren

Belegung durch diesen Arbeitsvorgang ein möglichst niedriger Prioritätswert festgelegt ist. Innerhalb der durch die Durchlaufterminierung berechneten Plan-Durchlaufzeiten der Arbeitsvorgänge sind Zeiträume festgelegt, in denen ein entsprechender Prioritätswert für eine Stationszuordnung zugelassen ist. So werden direkt nach der Freigabe bzw. nach Ende des Vorgängerarbeitsvorgangs nur Belegungen auf Stationen mit dem Prioritätswert 1 für einen zuzuordnenden Arbeitsvorgang akzeptiert. Ist keine solche Station verfügbar, wird nach Ablauf einer bestimmten Wartezeit auch der Prioritätswert 2 angenommen, bis vor dem Verbrauch der gesamten eingeplanten Übergangszeit jede technologisch mögliche Stationszuordnung akzeptiert wird.

Die Montagestationen weisen die Verhaltensweise eines Bearbeitungsagenten auf, indem sie als Anbieter von Bearbeitungsleistungen auftreten. Sie sind dabei in Abhängigkeit ihres Bestandspuffers bestrebt, Arbeitsvorgänge zu finden, die für ihre Belegung einen geringeren Prioritätswert aufweisen. Die maximale Größe des Bestandspuffers und damit die Länge der Warteschlange ist begrenzt. Gehört eine Montagestation einer Stationsteilgruppe an, bildet die gesamte Gruppe einen Bearbeitungsagenten, da sie einen gemeinsamen Bestandspuffer haben und die jeweiligen Prioritätswerte der Arbeitsvorgänge für alle Stationen gleich sind. Unterschreitet der Arbeitsvorrat einer Station oder Stationsteilgruppe einen festgelegten Wert, dürfen nur Arbeitsvorgänge mit dem Prioritätswert 1 angenommen werden. Ist kein solcher Arbeitsvorgang verfügbar, werden nach dem Unterschreiten eines weiteren Bestandswertes auch Arbeitsvorgänge mit dem Prioritätswert 2 akzeptiert. Dieses Vorgehen setzt sich entsprechend anderer Bestands- und Prioritätswerte fort, bis nach Leerlauf des Arbeitsvorrates Arbeitsvorgänge jedes Prioritätswertes angenommen werden.

Ist ein Arbeitsvorgang der Warteschlange einer Montagestation oder Teilgruppe zugeordnet, darf er diese vor dem Bearbeitungsstart nur im Falle einer erheblichen Ressourcenstörung verlassen. Innerhalb der Warteschlangen werden die Arbeitsvorgänge nach der Reihenfolgeregel FIFO oder SZ geordnet. Ab dem Zeitpunkt der Zugehörigkeit eines Arbeitsvorgangs zu einer Warteschlange, d.h. es kann örtlich noch eine Entfernung bestehen, werden die erforderlichen Transport- und Handlungsvorgänge angestoßen und alle benötigten Ressourcen, wie Vorrichtungen und Material, bereitgestellt.

Im Falle der Realisierung der Steuerung des Auftragsdurchlaufs durch ein Multiagentensystem müssen die Auftrags- und Bearbeitungsagenten mit einem Kommunikationsmodul ausgestattet werden, das es erlaubt, Informationen auszutauschen und Entscheidungen zu treffen. Die Auftragsagenten stehen dabei in einer konkurrierenden Beziehung zueinander, da sie um die knappen Ressourcen konkurrieren. Dagegen können die Bearbeitungsagenten durchaus untereinander kooperieren, um stationsübergreifend möglichst viele Arbeitsvorgänge mit einem niedrigen Prioritätswert zu bearbeiten. Für die explizite Steuerung weiterer Ressourcen können je nach

Problemstellung zusätzliche Agenten, wie Transport-, Lager- und Vorrichtungsagenten, implementiert werden.

4.4 Integration der Simulation

4.4.1 Bildung eines Regelkreises

Bei einer *Regelung* handelt es sich um einen Vorgang, bei dem eine Größe, die *Regelgröße*, fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der *Führungsgröße*, verglichen und im Sinn einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird [DIN19]. Wesentliches Kennzeichen ist dabei der geschlossene Wirkungsablauf, bei der die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst. In gleicher Weise lässt sich der Wirkungsplan des Belegungsplanungsverfahrens als geschlossener Regelkreis darstellen (Bild 4.10).

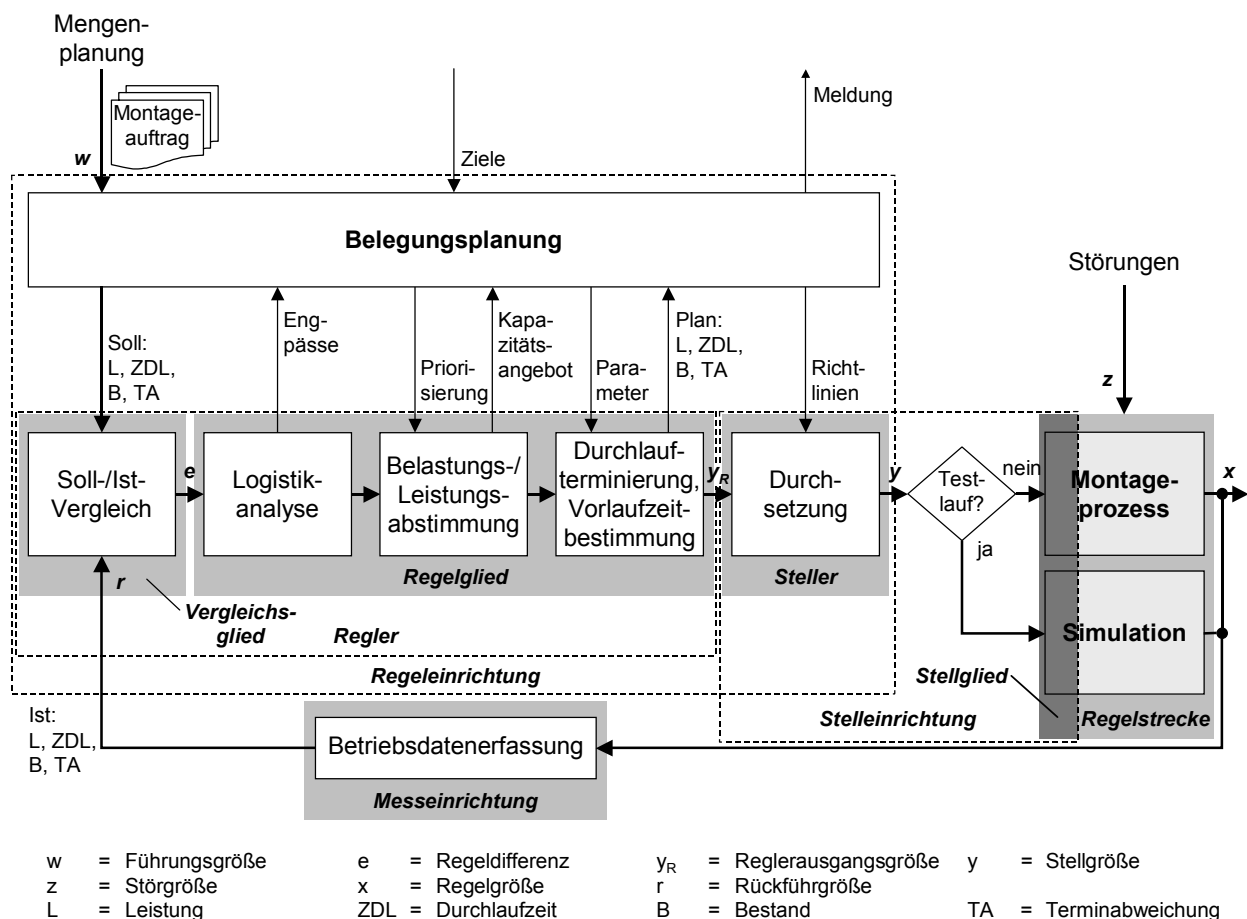


Bild 4.10 Regelkreis zur simulationsgestützten Belegungsplanung

Die Führungsgröße (w) der Belegungsregelung resultiert aus den von der Mengenplanung vorgegebenen Montageaufträgen einschließlich der zugehörigen Ecktermine. Das Regelglied besteht aus der Logistikanalyse, der Belastungs- und Leis-

tungsabstimmung sowie der Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung. Die Logistikanalyse ermittelt für den betrachteten Zeitraum die potentiellen Engpässe. Hierzu können sowohl Ist-Daten der realen Multiressourcen-Montage bei gleichbleibenden Randbedingungen als auch simulierte Daten bei wechselnden Randbedingungen, wie z.B. einer zukünftig veränderten Montagestruktur, ausgewertet werden. Die Analyseergebnisse werden an die Belegungsplanung weitergegeben, welche auf Basis der Klassifizierungskriterien die Auftrags- und Stationsgruppierung durchführt. Die Ergebnisse der Logistikanalyse sind die Eingangsdaten zur Belastungs- und Leistungsabstimmung, die in Interaktion mit der Belegungsplanung erfolgt, welche ihrerseits ausgerichtet auf die Engpasstechnologie die Priorisierung der Belegungsalternativen vornimmt. Die resultierenden Prioritätswerte sind die Eingangsgrößen der Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung. Die Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung berechnet nach Übermittlung der auf Basis der Analyseergebnisse von der Belegungsplanung festgelegten Parameterwerte a , b und c die Auftragsfreigabetermine und meldet die geplanten Leistungs-, Durchlaufzeit-, Bestands- und Terminabweichungswerte zurück an die Belegungsplanung. Die festgelegten Einsteuerzeitpunkte sowie Planübergangszeiten der Arbeitsvorgänge bilden die Reglerausgangsgröße (y_R).

Dem Steller entspricht die Durchsetzung, welche entsprechend den durch die Belegungsplanung festgelegten Richtlinien die Reglerausgangsgröße in Steueranweisungen, wie z.B. Auftragsfreigabe oder Schichtpläne, umwandelt und so die Stellgröße (y) bildet. In Abhängigkeit, ob es sich um eine Simulation oder den realen Montageprozess handelt, übernimmt das jeweilige Stellglied die Koordination des Montageablaufs. Im Simulationsmodell entspricht dies der beschriebenen Agentensteuerung, während in einer wirklichen Multiressourcen-Montage den Entscheidungsprozessen der Agenten äquivalente Handlungsanweisungen von den Mitarbeitern befolgt werden müssen.

Die aus Steller und Stellglied bestehende Stelleinrichtung steuert für die reale oder simulierte Regelstrecke alle zum Montageablauf gehörenden Prozesse, wie Lagern, Transportieren, Handhaben, Bearbeiten, etc. Die den realen Montageprozess beeinflussende Störgröße (z) ist durch entsprechende Störungsprozesse im Simulationsmodell, wie z.B. Stationsausfälle, abgebildet, so dass sich sowohl für die Realität als auch für die Simulation eine aus Bewegungsdaten bestehende Regelgröße (x) ergibt.

Die Betriebsdatenerfassung bildet die Messeinrichtung und ermittelt aus der Regelgröße die Ist-Werte der Leistungen, Durchlaufzeiten, Bestände und Terminabweichungen. Diese Werte entsprechen der Rückführgröße (r) und werden durch das Vergleichsglied mit den auf Basis der Plan-Werte durch die Belegungsplanung vorgegebenen Soll-Leistungen, -Durchlaufzeiten, -Bestände und -Terminabweichungen verglichen. Das Ergebnis des Soll-/Ist-Vergleiches ist die Regeldifferenz (e), welche die Eingangsgröße zum Regelglied bildet und so den Regelkreis schließt.

4.4.2 Planungsablauf

Im Falle einer Neuplanung ist ein iteratives Vorgehen mit i.d.R. einer Vielzahl von Simulationsläufen für eine Planungsperiode notwendig, bis die Abweichung zwischen den Ist- und den Soll-Werten innerhalb der in Abhängigkeit der Zielvorgaben definierten Toleranz liegt. So erfolgt zunächst die Identifikation der Engpassestechnologie. Dann werden die Leistungs- und Übergangszeitwerte für die Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung gemessen. Die größte Anzahl von Simulationsläufen ist für die Ermittlung einer geeigneten Kombination der Parameter a , b und c notwendig, bis die Fertigstellungsterminabweichung in Mittelwert und Streuung den Anforderungen entspricht. Ist eine Harmonisierung von Belastung und Leistung nur unzureichend möglich, muss ggf. auch die Priorisierung der Belegsalternativen zeitraumabhängig variiert werden.

Liegt die Regeldifferenz eines Simulationslaufes innerhalb der vorgegebenen Toleranz, werden die getesteten Zeiten, Termine und Parameter in das reale Montagesystem übergeben. Entsprechen die Ist-Werte des wirklichen Ablaufs ebenso der Zielvorgabe, meldet die Belegungsplanung die Zielerreichung an eine übergeordnete Stelle. Liegt dagegen die Regeldifferenz bei umfassender Parametervariation dauerhaft über der definierten Toleranz, muss entweder der geforderte Grad der Zielerreichung angepasst werden oder es müssen strukturelle Maßnahmen erfolgen.

Im Falle einer Anpassungsplanung muss die Priorisierung der Belegungsalternativen i.d.R. nur wenig geändert werden. Häufig bleiben bei ausreichend langen Betrachtungszeiträumen mit ähnlichem Kapazitätsprofil und vergleichbarer Auftragsstruktur die Leistungs- und Übergangszeitwerte konstant, so dass die Parameter a , b und c gar nicht oder nur geringfügig variiert werden müssen. In diesem Fall kann die Belegungsplanung sehr schnell durchgeführt werden und bietet trotzdem eine große Planungssicherheit. Als Erweiterung der Belegungsplanung ist entsprechend des Kriteriums „Vorrichtungsanzahl“ die Ermittlung weiterer knapper Ressourcen durch Einstellung ihrer Anzahl möglich.

5 Prototypische Realisierung eines Systems zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage

Das entwickelte Verfahren zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage ist im Rahmen eines Industrieprojektes realisiert worden und wird dort eingesetzt. Die spezifischen Randbedingungen und die verfolgte Zielsetzung sowie die erstellten Systemmodule werden in dem folgenden Kapitel erläutert. Abschließend werden die Simulationsergebnisse des Systemeinsatzes vorgestellt.

5.1 Definition der spezifischen Randbedingungen

5.1.1 Montagestruktur

Eine prototypische Realisierung erfolgte in der Vormontage des Flugzeugherstellers EADS Airbus GmbH am Standort Nordenham [WIE01]. In diesem Montagesystem werden Flugzeugschalen für alle Flugzeuge des Typs „Airbus“ montiert. Eine Flugzeugschale stellt dabei einen Ausschnitt einer Sektion dar, wobei sich ein Flugzeugrumpf aus mehreren tonnenförmigen Sektionen zusammensetzt.

In Bild 5.1a ist eine solche Flugzeugschale in einer der zwei betrachteten Montagehallen abgebildet. Für die NC-Nietung ist eine Aufspannung auf spezifische Bauteilträger (BTT) erforderlich. Alle Transportvorgänge werden in der kleineren Halle von Portalkränen und in der größeren Halle (aufgrund der Ausmaße) sowohl von Portalkränen als auch von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) durchgeführt (Bild 3.9). Die Verbindung beider Hallen erfolgt über einen sogenannten Umsetzer. Die Anzahl der Pufferplätze ist auf bis zu ungefähr 40 Schalen begrenzt.

Die vorliegende Arbeitsplanstruktur (Bild 5.1b) besteht aus 280 Auftragsvarianten, wovon 196 Einfachauftragsvarianten, 50 Teilauftragsvarianten und 34 Komplettauftragsvarianten sind (vgl. Bild 4.3). Die Auftragsvarianten enthalten 1.320 Arbeitsvorgangsvarianten und 6.580 technologisch mögliche Belegungsvarianten. Es erfolgt keine Losgrößenbildung.

Die Produktion im Werk Nordenham erfolgt auf Bestellung durch die Endmontagewerke in Hamburg und Toulouse, wobei die Menge und Varianten der jeweils zu liefernden Schalen über die Anzahl der bestellten Flugzeuge im voraus bestimmt ist. Die Mengenplanung gab im betrachteten Planungszeitraum 5.726 Montageaufträge vor, wovon 3.472 Einfachaufträge, 1.362 Teilaufträge und 892 Komplettaufträge waren. Dieses Auftragsvolumen resultierte in 25.410 durchzuführenden Arbeitsvorgängen.

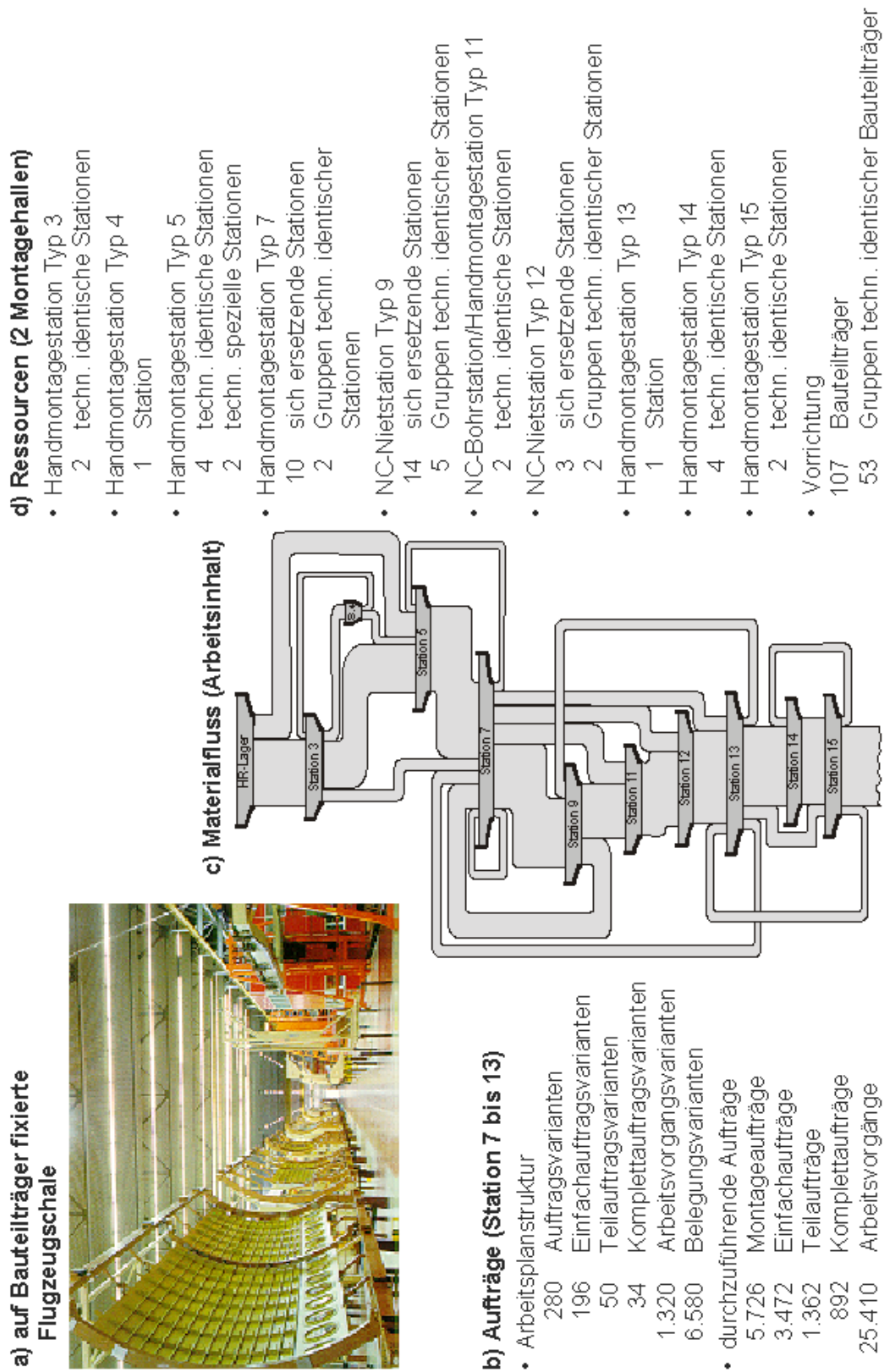


Bild 5.1 Struktur des betrachteten Montagesystems

Bei dem betrachteten Montagesystem handelt es sich um eine Reihenmontage. In Bild 5.1c ist der sich aus dieser Organisationsform ergebende Materialfluss dargestellt. Die abgebildete Materialflussintensität entspricht dem Arbeitsinhalt (vgl. Kapitel 3.2.3). Die einzelnen Trichter repräsentieren jeweils einen der bis zu 14 Einzelstationen umfassenden Stationstypen.

Neben dem Personal sind die 10 verschiedenen Stationstypen sowie die Bauteilträger als den Montagablauf bestimmende Ressourcen zu nennen (Bild 5.1d). Bei den Stationstypen können manuelle und NC-gesteuerte Montagestationen unterschieden werden. Die manuellen Montagevorgänge sind z.T. auf einfache Werkzeuge beschränkt, können aber auch mittels angetriebener Werkzeuge, wie z.B. Pressluftbohrer, mechanisiert sein. Infolge des hohen Automatisierungsgrades sind die NC-Nietstationen sehr kapitalintensiv. Aufgrund der verschiedenen technologischen Grade der Ressourcen handelt es sich somit um ein hybrides System. Die Handmontagestationen enthalten i.d.R. zwei Arbeitsplätze. Die NC-Nietstationen benötigen dagegen zum Betrieb nur einen Mitarbeiter, der Einstellungen vornimmt und den Fügeprozess kontrolliert.

Bei fast allen Stationen eines Typs werden identische oder zumindest ähnliche Montagetechnologien eingesetzt. So können z.B. 156 der 280 Auftragsvarianten auf allen 14 und die übrigen 124 Varianten auf 6 bis 12 NC-Nietstationen des Typs 9 sowie 192 Auftragsvarianten auf allen 10 und die übrigen 88 Varianten auf 5 Handmontagestationen des Typs 7 alternativ bearbeitet werden.

Die NC-Nietstationen und die Handmontagestationen des Typs 7 sind über beide Hallen verteilt. Im Falle der Folgebearbeitung eines Arbeitsvorgangs an einer benachbarten Station beträgt die Zeitspanne für Handhabung und Transport ca. 15 Minuten. Bei einem Hallenwechsel kann dagegen die Transportzeit mehrere Stunden betragen.

Die hier beispielhaft vorgestellte Belegungsplanung ist auf den Durchlauf der Arbeitsvorgänge zwischen den Stationstypen 7 bis 13 beschränkt, da dort der Großteil der Belegungen alternativ möglich ist und die Bauteilträger als zusätzliche knappe Ressource den Montageablauf beeinflussen.

5.1.2 Problemstellung und Zielsetzung der Belegung

Eine optimale Planung und Steuerung des Ablaufs im betrachteten Montagesystem ist aufgrund der großen Zahl von Belegungsmöglichkeiten sehr schwierig, da die sich aus der Stationsbelegung ergebenden Übergangszeiten infolge der Ausdehnung der Vormontage und der unterschiedlichen Materialflussanbindungen der einzelnen Stationen sehr variieren. Hinzu kommt die große Streuung der Arbeitsinhalte und Belegungszeiten, die für einen Arbeitsvorgang zwischen einigen Minuten und mehreren Tagen betragen können. Darüber hinaus müssen eine gleichmäßige Kapazitätszuteilung und

eine kontinuierliche Ressourcenbeanspruchung gewährleistet sein, da eine mittlere Auslastung der kapitalintensiven NC-Nietstationen von 85% Voraussetzung ist, das Montageprogramm bewältigen zu können. Ein Ausgleich von Stillstandszeiten durch Zusatzschichten ist kaum möglich, da die NC-Nietstationen des Typs 9 an sechs Tagen in der Woche 24 Stunden und selbst am Sonntag häufig in 2 Schichten planmäßig im Einsatz sind. Die Ausprägung des Durchlaufverhaltens der Aufträge ist zudem stark von der jeweils durchzuführenden Variantenverteilung abhängig.

Die primäre Zielsetzung der Belegungsplanung ergibt sich aus der Anzahl und den Fertigstellungsterminen der vorgegebenen Aufträge. So sollen die Endmontagen in Hamburg und Toulouse möglichst vollständig und termingerecht versorgt werden. Die hieraus resultierende Zielformulierung ist:

- Alle von der Mengenplanung vorgegebenen Montageaufträge sollen in der betrachteten Planungsperiode vollständig durchgeführt werden.
- Die maximale positive Fertigstellungsterminabweichung (Verspätung) soll 5 BKT nicht überschreiten.
- Weniger als 10% der Aufträge sollen mit Terminverzug fertiggestellt werden.

Die sekundäre Zielsetzung orientiert sich an den Logistikkosten. So wurden mit absteigender Priorität folgende Ziele festgelegt:

- Die neueren NC-Nietanlagen mit den entsprechend höheren Nummern sollen möglichst hoch ausgelastet werden.
- Die Belegungszeiten der Bauteilträger sollen so kurz wie möglich sein.
- Der Planungs- und Steuerungsaufwand soll reduziert werden.
- Das Bestandsniveau soll auf einem geringen Niveau gehalten werden.
- Der Materialfluss soll gerichtet und der Transportaufwand minimiert werden.

Ein hoher Grad der Zielerreichung erfordert somit einerseits die Ausnutzung des gesamten vorhandenen Flexibilitätspotentials und andererseits eine zeitlich so verteilte Freigabe der Aufträge, dass eine kontinuierliche Versorgung der Engpassstationen bei einem geringen Bestandsniveau gesichert ist.

5.2 System zur Belegungsplanung

Das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren wird sowohl durch die Anwendung selbst erstellter Programme als durch die Anpassung und den Einsatz am Markt verfügbarer Programme umgesetzt.

5.2.1 Systemaufbau und Datenverwaltung

Das Belegungsplanungssystem ist modular aufgebaut (Bild 5.2). Alle Module sind informationstechnisch verbunden und können mit der Hilfe von definierten Schnittstellen in die bestehende Informationsstruktur des betrachteten Unternehmens integriert werden. Mit Ausnahme der Datenbank sowie des Simulations- und Logistikanalysenmoduls wurden alle Systemmodule mit dem Programm Visual Basic der Firma Microsoft erstellt.

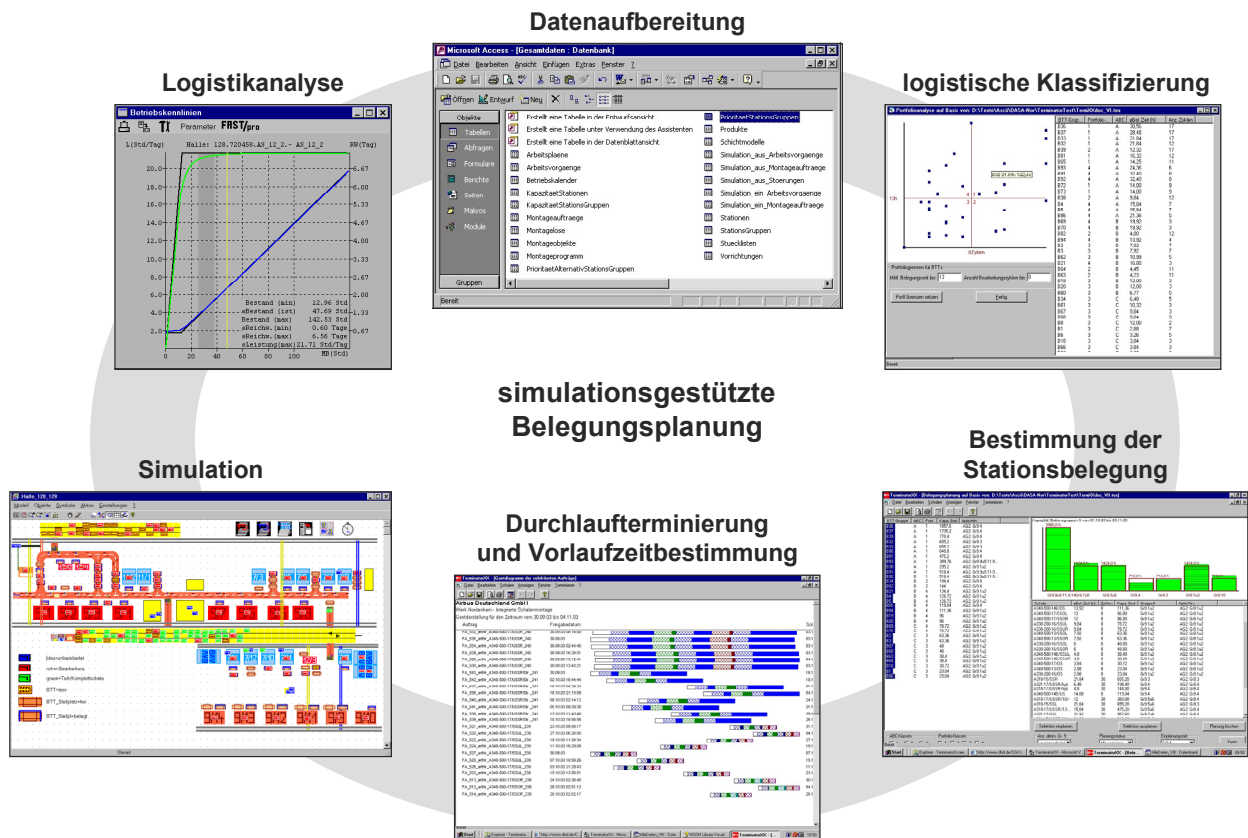


Bild 5.2 Aufbau des simulationsgestützten Belegungsplanungssystems

Zur Datenverwaltung und -aufbereitung wurde die im Rahmen der Modellierung erstellte zentrale Datenbank erweitert (Kapitel 3.3.2). Alle Module des Belegungsplanungssystems können so auf dieselbe Datenbasis zugreifen, wodurch die Datenkonsistenz gewährleistet wird. Für die Durchführung der logistischen Klassifizierung, der Bestimmung der Stationsbelegungen sowie der Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung werden die erforderlichen Arbeitsplan- und Auftragsinformationen aus der Datenbank nur ausgelesen. Sie können dann als Planungsvariante unabhängig von der Datenbank gespeichert und wieder geöffnet sowie gedruckt und auch per E-Mail versendet werden. Für die Änderung von Strukturdaten ist eine besondere Berechtigung, z.B. durch die Arbeitsvorbereitung, notwendig. Wenn eine Planungsvariante durch die Simulation getestet werden soll, können aus ihr nach Zugriffserteilung die entsprechenden Plan-Daten, wie z.B. die priorisierten Belegungsalternativen und

Freigabetermine, in die zentrale Datenbank geschrieben werden. Die Simulation und Logistikanalyse können dann auf die Plan-Daten in der Datenbank zugreifen und auch ihre Ergebnisse wieder an die Datenbank übergeben. Somit ist der Zugriff dieser beiden Module auf die gesamte Datenbasis einschließlich der aktuellen Ergebnisse anderer eingesetzter Module möglich.

Grundsätzlich kann in jedem Modul individuell der betrachtete Zeitraum eingestellt und auch jederzeit geändert werden. Darüber hinaus ist es möglich, die Stückzahlen der geladenen Montageaufträge zu verändern, um auch Variationen des Auftragsprogramms untersuchen zu können.

5.2.2 Module zur Klassifizierung der Arbeitsvorgänge

Als Voraussetzung für den Einsatz des Belegungsplanungssystems in der betrachteten Vormontage erfolgte zunächst eine Gruppierung der Aufträge und Stationen (vgl. Kapitel 4.2.1).

Die Aufträge wurden gemäß des Kriteriums „Komplexität/Dimension“ geclustert. Dies geschah entsprechend der zwischen den Stationstypen 7 bis 13 benötigten Vorrichtungen, da die jeweiligen Bauteilträger speziell auf die Maße der Montageobjekte und auf die im Montageprozess eingesetzten Technologien eingestellt sind. Aus den gebildeten Auftragsgruppen wurden immer dann zwei Teilgruppen gebildet, wenn die Belegungszeiten der einzelnen Aufträge stark unterschiedlich waren. Die Teilgruppen wurden als *BTT-Gruppen* bezeichnet und mit Nummern versehen. Alle zu einer Gruppe von Komplettaufträgen gehörenden Teilaufträge waren hierdurch bereits in einer einzigen BTT-Gruppe zusammengefasst, so dass keine individuelle Teilauftragsclustering erforderlich war.

Die Stationen wurden gemäß der an ihnen eingesetzten Montagetechnologien gruppiert. Anschließend erfolgte die Teilgruppenbildung entsprechend der Stationsstandorte in den beiden Montagehallen. Die resultierenden Stationsteilgruppen wurden als *Arbeitsplan-Gruppen* bezeichnet. Eine Stationsteilgruppe eines Stationstyps mit einer höheren Arbeitsplannummer kann grundsätzlich eine Stationsteilgruppe des gleichen Stationstyps mit einer niedrigeren Nummer ersetzen.

Die Priorisierung der Belegungsalternativen wird durch zwei Klassifizierungsmodule programmtechnisch unterstützt. Das eine Modul führt eine ABC-Analyse und das andere Modul eine Portfolio-Analyse aus (vgl. Kapitel 4.2.2).

Für die ABC-Klassifizierung berechnet das entsprechende Systemmodul aus den Arbeitsplandaten und den in dem betrachteten Planungszeitraum vorgesehenen Stückzahlen den Belegungszeitanteil jeder einzelnen BTT-Gruppe an dem Gesamtbelegungszeitbedarf an einem Stationstyp (Bild 5.3). Die BTT-Gruppen werden nach der Größe

ihres Belegungszeitanteils geordnet und nach erfolgter Einstellung der Klassendefinition erfolgt entsprechend die A-B-C-Verteilung. Eine graphische Darstellung ermöglicht eine einfache Übersicht. So binden in dem dargestellten Beispiel 1/3 der BTT-Gruppen bereits knapp 80% des Kapazitätsbedarfes an dem betrachteten Stationstypen.

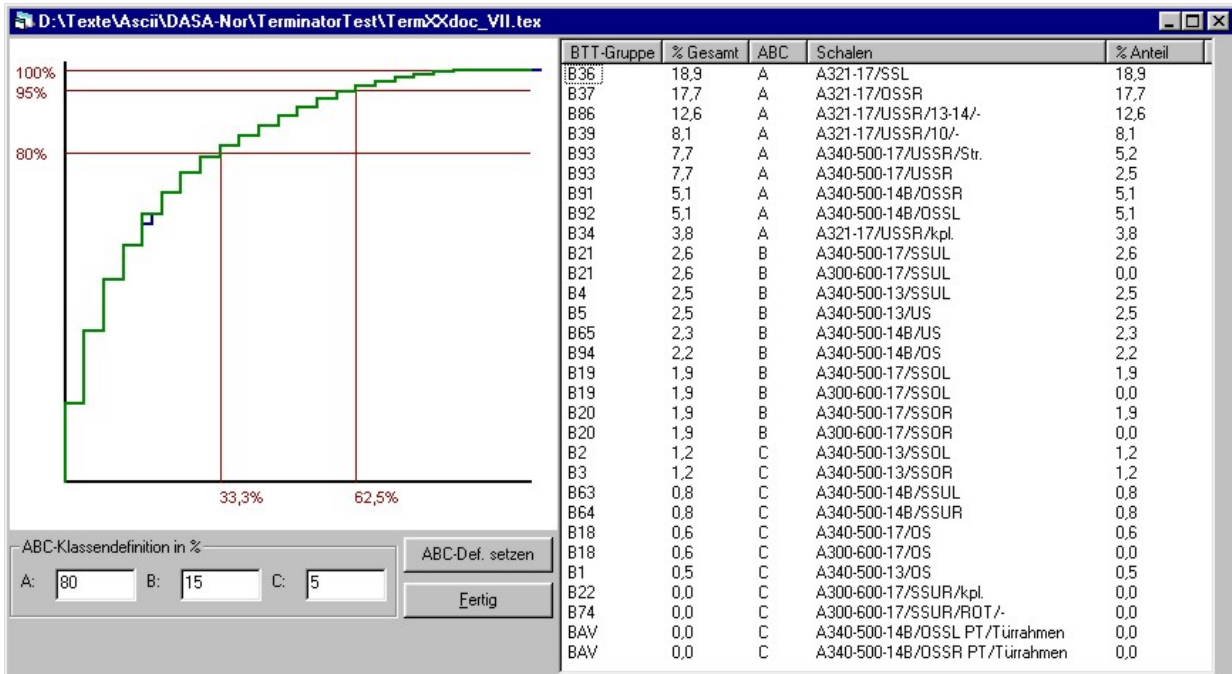


Bild 5.3 ABC-Analyse auf Basis der BTT-Gruppen

Die Portfolio-Klassifizierung (vgl. Bild 4.7) erfolgt durch ein weiteres Modul (Bild 5.4). In diesem Fall wurde zunächst der Stationstyp 9 als Engpasstechnologie durch eine Logistikanalyse bestimmt. Das Modul berechnet für jede BTT-Gruppe aus den Arbeitsplandaten und den in dem betrachteten Planungszeitraum vorgesehen Stückzahlen die mittlere Belegungszeit und die Anzahl der Stationsdurchläufe an der Engpasstechnologie. Das Ergebnis wird als zweidimensionale Verteilung dargestellt, indem die Anzahl der Stationsdurchläufe an der Abszisse und die mittlere Belegungszeit an der Ordinate abgetragen werden. Danach werden die Portfoliogrenzen durch eine Benutzereingabe gesetzt und es erfolgt die 1-2-3-4-Verteilung. In dem abgebildeten Beispiel weisen die BTT-Gruppen des Abschnitts 2 eine vergleichsweise geringe Belegungszeit bei einer hohen Wiederholungshäufigkeit auf, während die BTT-Gruppen des Abschnitts 4 seltener auftreten, dafür aber länger eine Station der Engpasstechnologie belegen.

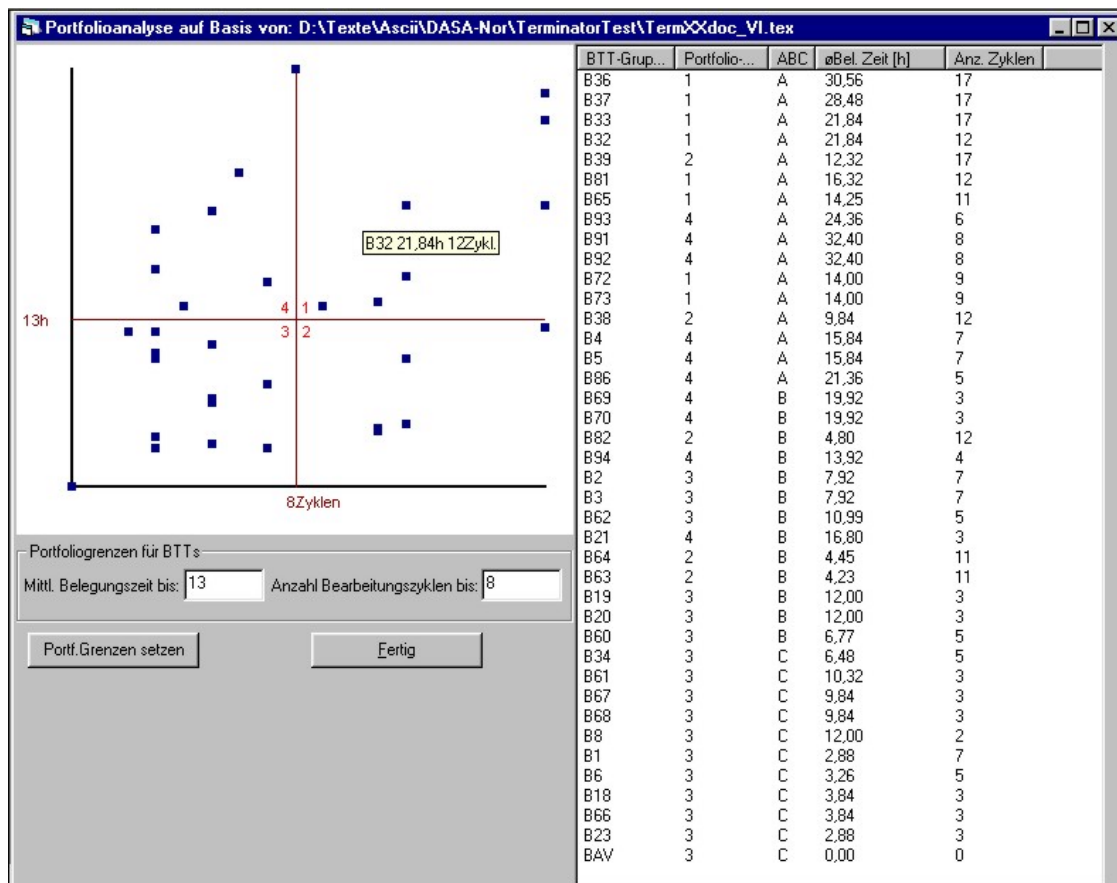


Bild 5.4 Portfolio-Analyse auf Basis der BTT-Gruppen

5.2.3 Modul zur Bestimmung der Stationsbelegung

Die Vergabe des Prioritätswertes 1 für die aus technologisch und logistischer Sicht am besten geeigneten Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnungen (vgl. Kapitel 4.2.2) erfolgt auf Basis der durchgeführten Klassifizierung. Im hierzu erstellten Stationsbelegungsmodul wird für jeden Stationstyp die Zuordnung der in den BTT-Gruppen zusammengefassten Arbeitsvorgänge zu den in Arbeitsplan-Gruppen zusammengefassten Stationen vorgenommen (Bild 5.5).

In Bild 5.5 links sind für die NC-Nietstationen des Typs 9 alle durch Selektion der ABC-Klassen A und B sowie der Portfolio-Klassen 2 und 4 ausgewählten BTT-Gruppen dargestellt. Die Selektion der jeweiligen ABC- und Portfolio-Klassen ist frei wählbar. Der Gesamtkapazitätsbedarf für den betrachteten Zeitraum und die technologisch mindestens erforderliche Arbeitsplan-Gruppe werden für jede BTT-Gruppe angezeigt.

Rechts oben in Bild 5.5 ist das Kapazitätsangebot jeder Arbeitsplan-Gruppe in Belegungszeit für die Planungsperiode als Säule dargestellt. Es wird auf Basis des Schichtkalenders tagesgenau berechnet und beinhaltet für jede Station das Minimum aus verfügbarer Stationskapazität und nutzbarer Personalkapazität und entspricht somit

der an der jeweiligen Arbeitsplan-Gruppe maximal möglichen Leistungssumme (Bild 3.6).

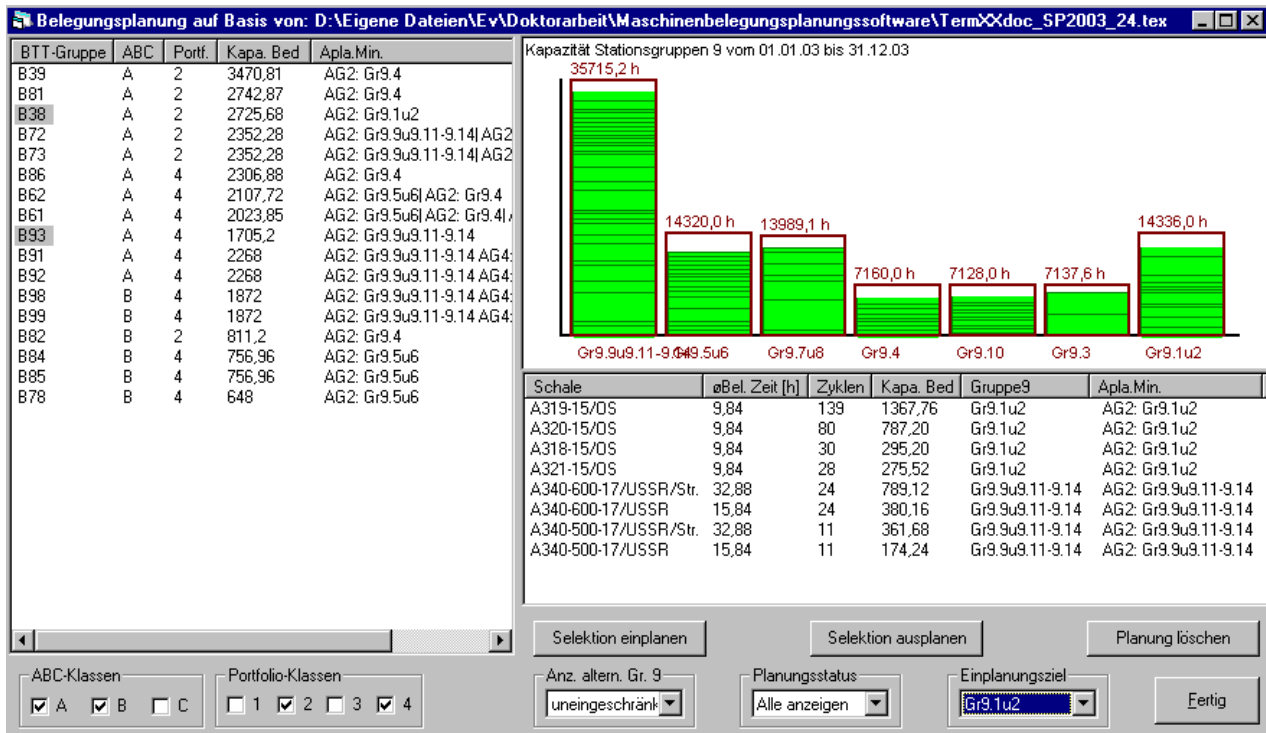


Bild 5.5 Arbeitsvorgangs-Arbeitsplan-Gruppen-Zuordnung für den Stationstyp 9

In Bild 5.5 rechts unten erscheinen die in den ausgewählten BTT-Gruppen 38 und 93 enthaltenen Arbeitsvorgangsvarianten. Angezeigt werden für jede Arbeitsvorgangsvariante die mittlere Belegungszeit, die Anzahl der Stationsdurchläufe, der Kapazitätsbedarf, die aktuelle Arbeitsplan-Gruppenzuordnung sowie die technologisch mindestens erforderliche Arbeitsplan-Gruppe. Die Auswahl der angezeigten Arbeitsvorgangsvarianten kann durch die Anzahl der alternativ möglichen Arbeitsplan-Gruppen (1, 2, 3, uneingeschränkt) sowie durch den Planungsstatus (eingepannt, nicht eingepannt) weiter eingeschränkt werden. Durch die Festlegung des Einplanungsziels erhalten alle markierten Arbeitsvorgangsvarianten den Prioritätswert 1 für die entsprechende Arbeitsplan-Gruppe und der resultierende Kapazitätsbedarf wird im oberen Fenster durch eine Fläche innerhalb der Kapazitätsangebotssäule dargestellt. Im gezeigten Beispiel sind alle im Planungszeitraum zu berücksichtigenden Arbeitsvorgänge bereits auf dem Stationstyp 9 eingepannt. Es wird deutlich, dass zu ihrer Durchführung eine hohe Auslastung erforderlich ist.

Die Zuordnung der übrigen Arbeitsvorgänge zu den verbleibenden Arbeitsplan-Gruppen erfolgt sinngemäß. Allerdings ist die bereits den anderen Arbeitsvorgängen einer Auftragsvariante zugeordnete Arbeitsplan-Gruppe des Typs 9 das entscheidende Zuteilungskriterium innerhalb der möglichen Belegungsalternativen und wird deshalb ergän-

zend angezeigt (Bild 5.6, links). Im abgebildeten Beispiel erfolgt gerade eine Zuordnung einiger Arbeitsvorgänge der BTT-Gruppen 38 und 60 zum Stationstyp 7. Die Arbeitsvorgänge der Variante „A318-15/OS“ gehören zu den selektierten und werden an der Arbeitsplan-Gruppe 7.3 und 7.5-7.8 mit dem Prioritätswert 1 eingeplant (Bild 5.6, rechts).

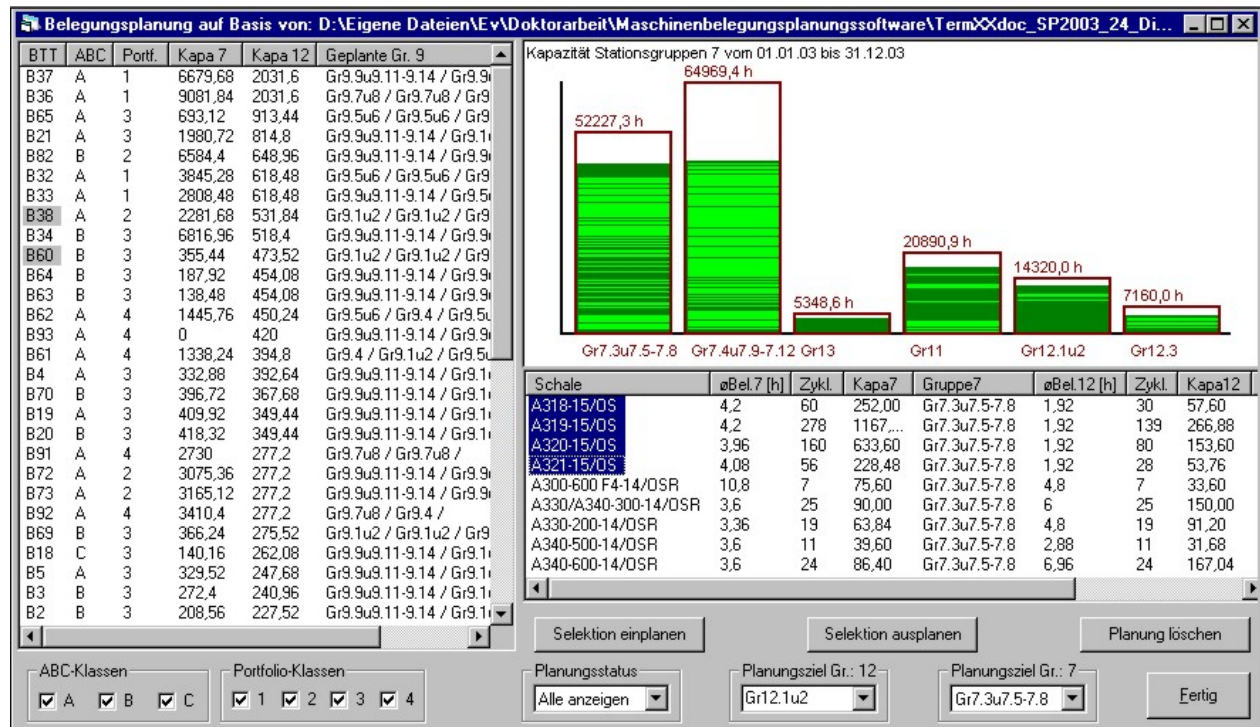


Bild 5.6 Arbeitsvorgangs-Arbeitsplan-Gruppen-Zuordnung für den Stationstyp 7 und 11 bis 13

Nachdem alle durchzuführenden Arbeitsvorgänge einmal mit dem Prioritätswert 1 einer Arbeitsplan-Gruppe zugeordnet wurden, wird der Prioritätswert 2 für diejenigen Arbeitsvorgangs-Arbeitsplan-Gruppen-Zuordnungen vergeben, welche aufgrund erschöpfter Kapazitäten den Wert 1 statt für ihre ideale Zuordnung, für eine alternative Zuordnung erhalten haben. Abschließend werden in dem hier beschriebenen Anwendungsfall die Prioritätswerte 3 und 4 für alle verbliebenen nicht idealen Belegungsalternativen entsprechend einer in der zentralen Datenbank enthaltenen Zuordnungstabelle automatisch vergeben. Den Prioritätswert 3 erhalten alle alternativ mögliche Zuordnungen in derselben Halle wie die Zuordnungen mit dem Wert 1. Folglich wird der Prioritätswert 4 vergeben, wenn sich eine Station, an der ein Arbeitsvorgang alternativ bearbeitet werden kann, in der anderen Halle als die für diesen Arbeitsvorgang technologisch und logistisch ideale Station befindet.

5.2.4 Modul zur Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung

Ein weiteres Modul unterstützt die Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung. Hierzu werden die simulierten Werte für die Leistung der Montagestationen und die Übergangzeiten der Aufträge aus der Datenbank übernommen. Die Eingabe der Parameter a, b und c erfolgt menügesteuert für jede Auftragsart (vgl. Kapitel 4.3.1). Es können die von der Mengenplanung vorgegebenen Aufträge gelöscht, erweitert oder geändert werden, um alternative Auftragsszenarien zu untersuchen oder Änderungen durch die Abnehmer berücksichtigen zu können.

Neben einer Vorwärts- und Rückwärtsterminierung ist auch eine automatische Terminierung möglich, um die Auswirkung zukünftiger Stückzahlen, für die noch keine Ecktermine vorliegen, untersuchen zu können. Im Falle einer Rückwärtsterminierung wird bei der Festlegung des Freigabetermins der Betriebskalender berücksichtigt, um sicherzustellen, dass der Starttermin eines Auftrags auf einen Arbeitstag fällt. Kapazitätsgrenzen werden bei der Ermittlung der Freigabezeitpunkte nicht direkt berücksichtigt, beeinflussen aber über die gemessenen Übergangs- und Leistungswerte die Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung.

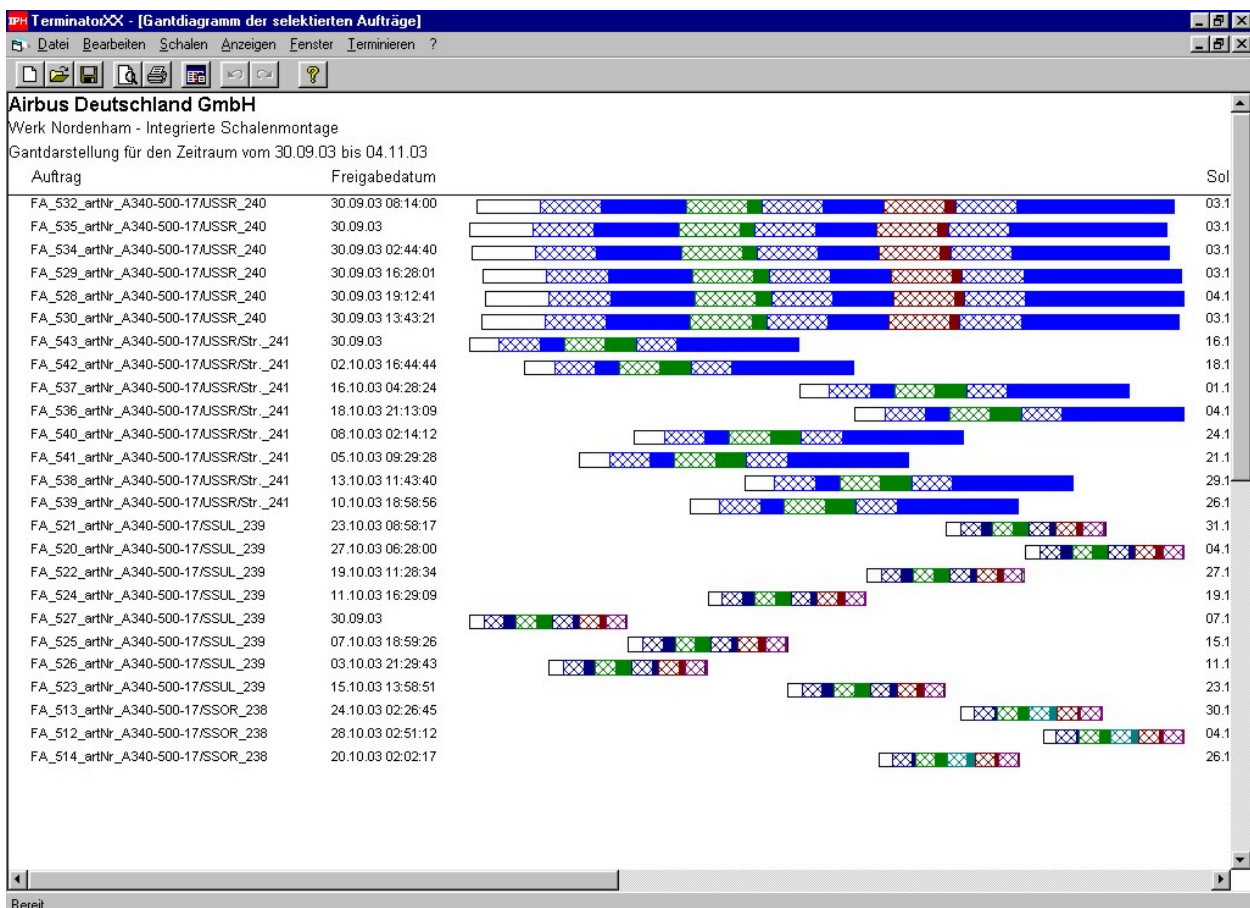


Bild 5.7 Ganttdiagramm der Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung

Die Darstellung der Planungsergebnisse erfolgt in Tabellenform oder als Gantt-diagramm (Bild 5.7). Im abgebildeten Beispiel entsprechen die transparenten Balkenteile der Vorlaufzeit, die rautierten der Übergangszeit und die ausgefüllten der Durchführungszeit. Die Ergebnisse der Durchlaufterminierung und der Vorlaufzeitbestimmung, wie z.B. die optimalen Einsteuerzeitpunkte und Übergangszeitanteile, werden an die Datenbank übermittelt.

5.2.5 Module zur Simulation und Analyse des Montagesystems

In das Simulationsmodell (Kapitel 3.3.1) wurde eine Gantt-Darstellung der Auftragsdurchlaufzeitanteile integriert (Bild 5.8). Diese Ansicht zeigt die sich aus der Simulation ergebenden Vorlauf- und Durchführungszeitanteile sowie die Start- und Endtermine je Auftrag. Hierdurch kann ein direkter Vergleich mit den geplanten Werten erfolgen.

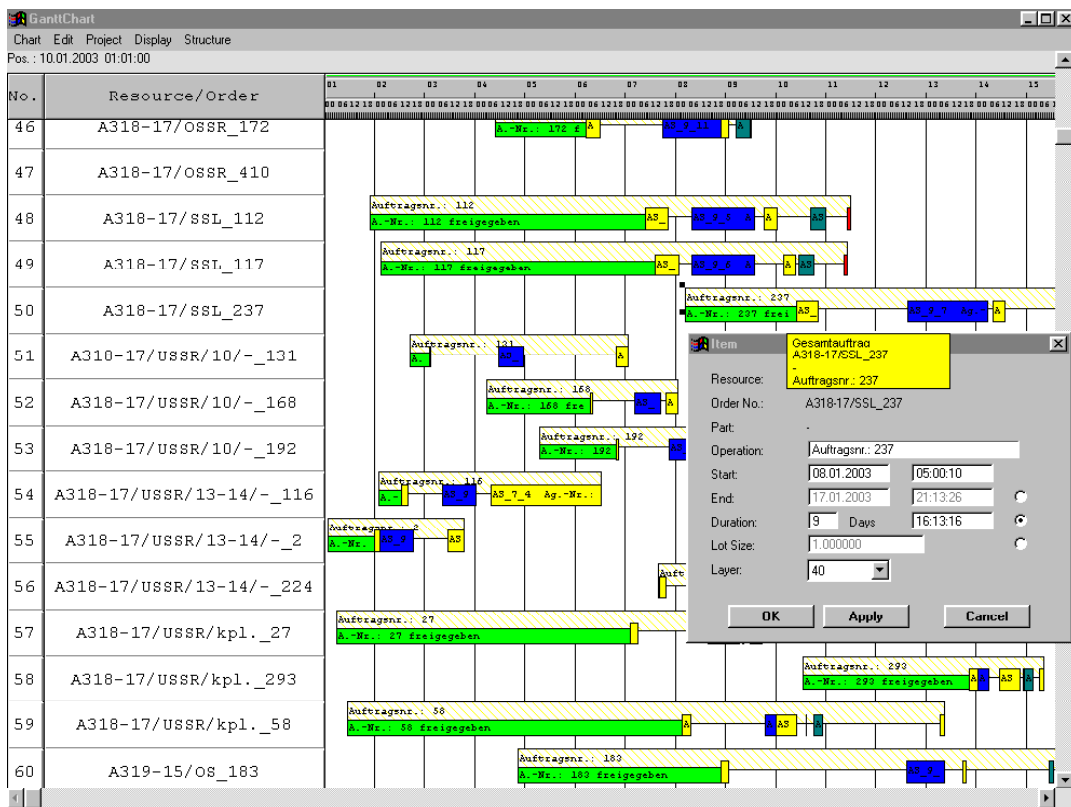


Bild 5.8 Auftragsdurchlaufzeitanteile in der Simulation

Darüber hinaus ist das Simulationsmodell über die Datenbank mit einem separaten Analysemodul verbunden. Eingesetzt wird das Produktionscontrollingprogramm Fast/Pro der Firma GTT. Dieses Programm erlaubt die Berechnung einer Fülle von Kennzahlen sowie die Darstellung verschiedenster Diagramme und Kennlinien.

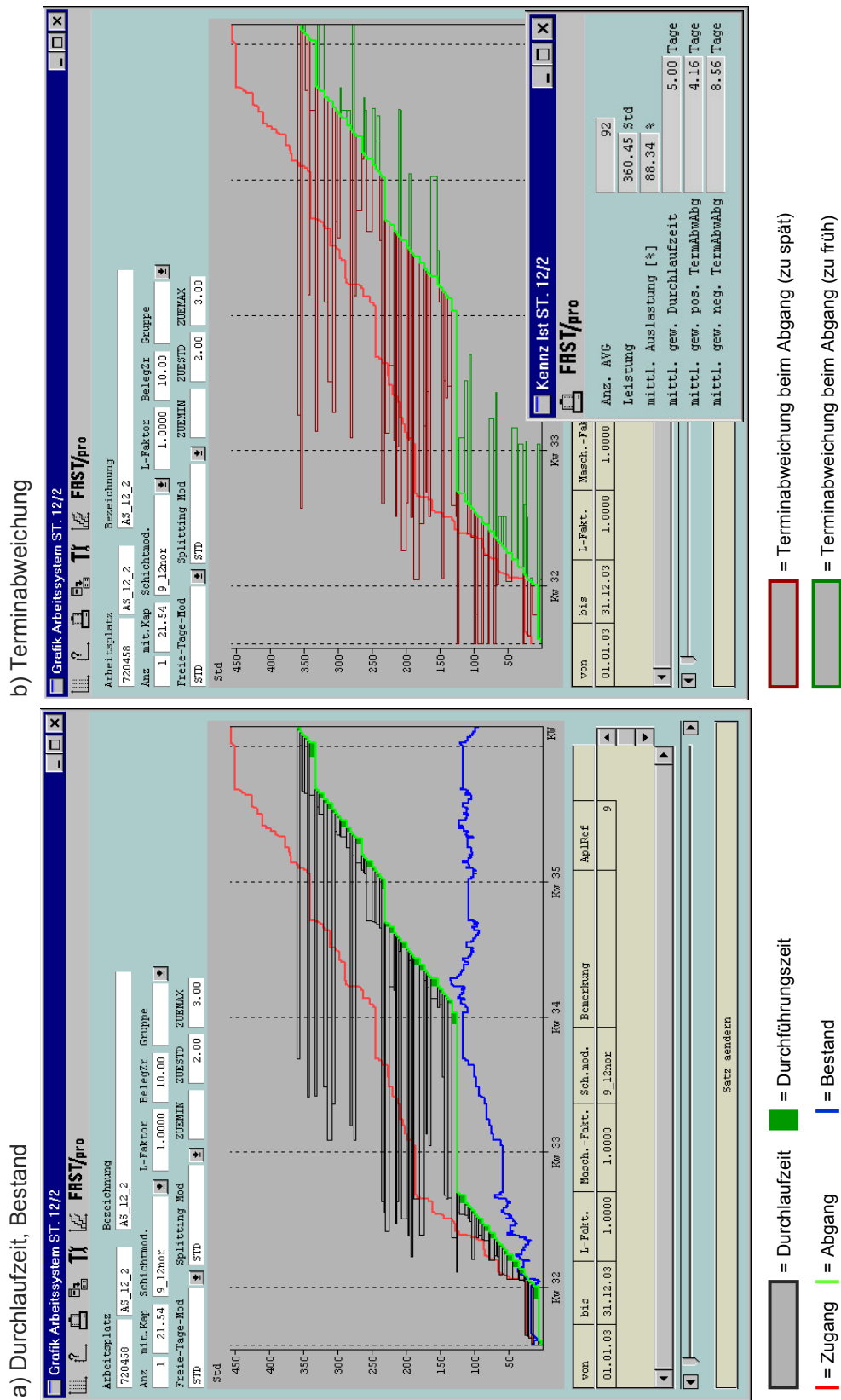


Bild 5.10 Darstellung von Durchlaufdiagrammen durch das Analysemodul

In Bild 5.10a sind der über die Zeit ansteigende Bestand und mehrere Reihenfolgevertauschungen von Aufträgen erkennbar. Bei Betrachtung der Terminabweichungen (Bild 5.10b) wird bestätigt, dass die Station den Durchlauf verzögert, da die Abgangsterminabweichung deutlich größer als die Zugangsterminabweichung ist. Offensichtlich sind der Station 12/2 zu viele Arbeitsvorgänge mit dem Prioritätswert 1 zugeordnet worden. Darüber hinaus ist die eingestellte Übergangszeit zu kurz, so dass die entsprechenden Planwerte geändert werden müssen.

Das Analysemodul erlaubt die einfache Durchführung umfangreicher Untersuchungen, um Engpässe sichtbar zu machen und die Auswirkungen eines Belegungsplans zu verdeutlichen. Somit wird mit seiner Hilfe die Güte der Planung und letztlich der Grad der Zielerreichung bestimmt. Hierzu können sowohl simulierte Daten als auch Daten des realen Montagesystems ausgewertet werden.

5.3 Simulationsergebnisse des Systemeinsatzes

Die primären Ziele konnten in der Simulation überwiegend erreicht werden. So erfolgte im vorgesehenen Zeitraum eine vollständige Bearbeitung aller von der Mengenplanung vorgegebenen Montageaufträge. Auch wurden weniger als 6,5% der Aufträge verspätet fertiggestellt. Allerdings betrug die Fertigstellungsterminabweichung bei 0,6% der Aufträge mit 7 bis 11 BKT mehr als die angestrebten 5 BKT.

Tabelle 5.1 zeigt die Ist-Prioritätswertverteilung der Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnungen des finalen Simulationslaufs. Die Charakteristik der vier in diesem Anwendungsfall möglichen Prioritätswerte ist beschrieben. So verursacht insbesondere ein zusätzlicher Hallenwechsel einen großen Steuerungs- und Transportaufwand.

Der Prioritätswert 2 kommt verhältnismäßig selten vor, demnach wurden die Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnungen mit dem Wert 1, die der Plan-Belegung entsprechen, weitgehend eingehalten. Bei den Stationen des Typs 9, welche die Engpassestechnologie bilden, wird allerdings deutlich, wie die vorhandene Flexibilität ausgenutzt wurde. Die Prioritätswerte 3 und 4 kommen auch bei den Stationen des Typs 11 vor, da sie Arbeitsinhalte der Stationen des Typs 7 übernehmen können. Weiter ist ersichtlich, dass die NC-Nietstation 12/3 8,7% der Arbeitsvorgänge von den temporären Engpassstationen 12/1 und 12/2 übernommen hat.

Auch die sekundäre Zielsetzung wurde in einem hohen Grad erreicht. Bild 5.11 zeigt hierzu einige Ist-Kennzahlen und die Ist-Produktionskennlinien der NC-Nietanlagen des finalen Simulationslaufs.

Tabelle 5.1 Ist-Prioritätswertverteilung der Arbeitsvorgangs-Stations-Zuordnungen

Station (Halle A)	Prioritätswertverteilung [%]			
	1	2	3	4
7/3	99,9	./.	./.	0,1
7/5	99,7	./.	./.	0,3
7/6	99,7	./.	./.	0,3
7/7	99,5	./.	./.	0,5
7/8	99,3	./.	./.	0,7
9/1	96,9	3,1	./.	./.
9/2	88,0	12,0	./.	./.
9/3	65,9	1,6	30,0	2,5
9/4	68,6	./.	30,1	1,3
9/5	68,4	./.	30,1	1,5
9/6	67,2	./.	31,4	1,5
9/7	64,4	./.	33,7	1,8
9/8	53,1	./.	43,9	3,0
11/1	98,0	./.	1,9	0,1
11/2	97,7	./.	1,6	0,7
12/1	100,0	./.	./.	./.
12/2	99,9	./.	./.	0,1
13/1	100,0	./.	./.	./.

Prioritätswert 1 = idealer Stationsdurchlauf
(Transportminimierung, kurze Übergangszeiten, standardisierter Ablauf)

Station (Halle B)	Prioritätswertverteilung [%]			
	1	2	3	4
7/4	100,0	./.	./.	./.
7/9	100,0	./.	./.	./.
7/10	100,0	./.	./.	./.
7/11	100,0	./.	./.	./.
7/12	100,0	./.	./.	./.
9/9	76,0	./.	12,2	11,9
9/10	64,0	./.	19,0	17,0
9/11	90,3	./.	2,0	7,7
9/12	82,0	./.	7,6	10,4
9/13	84,8	./.	7,5	7,7
9/14	77,3	./.	12,7	10,0
12/3	91,3	./.	./.	8,7

Prioritätswert 2 = idealer Stationsdurchlauf
(geringer zusätzlicher Steuerungsaufwand erforderlich)

Prioritätswert 3 = abweichender Stationsdurchlauf
(erhöhter Transport- und Steuerungsaufwand erforderlich, kurzfristige technologische Anpassungen notwendig)

Prioritätswert 4 = zu vermeidender Stationsdurchlauf
(zusätzlicher Hallenwechsel und großer Steuerungsaufwand erforderlich, kurzfristige technologische Anpassungen notwendig)

Während die älteren NC-Nietstationen 9/1 und 9/2 etwas geringer ausgelastet waren, konnte durch eine höhere Auslastung an den neueren Stationen die für das Montageprogramm benötigte Leistung erbracht werden. Zu beachten ist, dass ein gesamtes Kalenderjahr mit allen enthaltenen Kapazitätsbedarfsschwankungen, die innerhalb der vorgegebenen Auftragsecktermine nicht ausgeglichen werden konnten, simuliert wurde. Eine mittlere Auslastung von über 90% ist aufgrund der Perioden mit einer geringeren Belastung, z.B. im Sommer oder während der Weihnachtstage, auch rechnerisch nicht möglich.

Die Anzahl der benötigten Bauteilträger wurde während der Simulation aufgezeichnet. Aufgrund der variablen Vorlaufzeiten, mit deren Hilfe der optimale Freigabezeitpunkt für jeden Montageauftrag ermittelt werden konnte, sowie der Priorisierung der Belegungsalternativen nach logistischen Kriterien wurden im Mittel kurze und wenig streuende Durchlaufzeiten erreicht. Dadurch konnten die Belegungszeiten der Bauteilträger auf einem geringen Niveau gehalten werden.

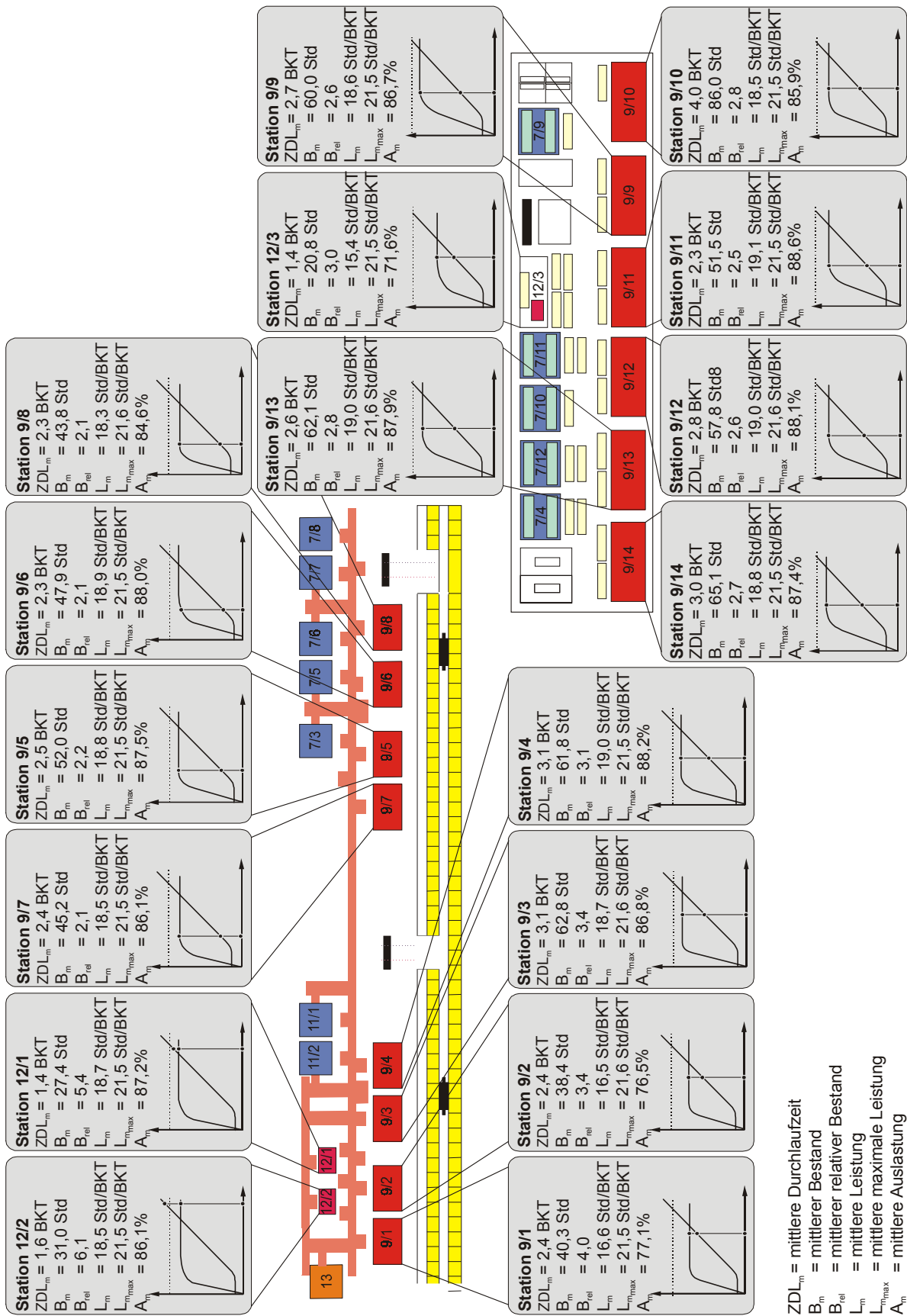


Bild 5.11 Ist-Kennzahlen und -Produktionskennlinien der NC-Nietstationen

An fast allen Stationen lag der relative Bestandswert (vgl. Kapitel 3.2.2) im idealen Bereich zwischen 2 und 3. Nur die Station 9/1 sowie die Stationen 12/1 und 12/2 wiesen ein Potential zur Bestandsreduzierung auf. Die erhöhten Bestände an den Stationen 12/1 und 12/2 resultierten aus deren hoher Belastung. Zwar können beide Stationen durch die Station 12/3 ersetzt werden, welche im Betrachtungszeitraum auch noch über Kapazitätsreserven verfügte, jedoch ist mit dieser alternativen Belegung ein erheblicher zusätzlicher Transport- und Steuerungsaufwand aufgrund des notwendigen Hallenwechsels verbunden. Aus diesem Grund wird weiterhin der Prioritätswert 4 für die Belegungsalternative an der Station 12/3 vergeben und die Vorlaufzeiten der betroffenen Aufträge werden entsprechend angepasst.

Eine weitere Folge der Priorisierung der Belegungsalternativen war die deutliche Reduzierung des Transportaufkommens. Bild 5.12 zeigt den Materialfluss, der sich aufgrund der Auswertung von 85% der Arbeitsinhalte ergeben hat. Nur die verbliebenen 15% der Arbeitsinhalte bewirkten neben einem halleninternen auch einen hallenübergreifenden Materialfluss.

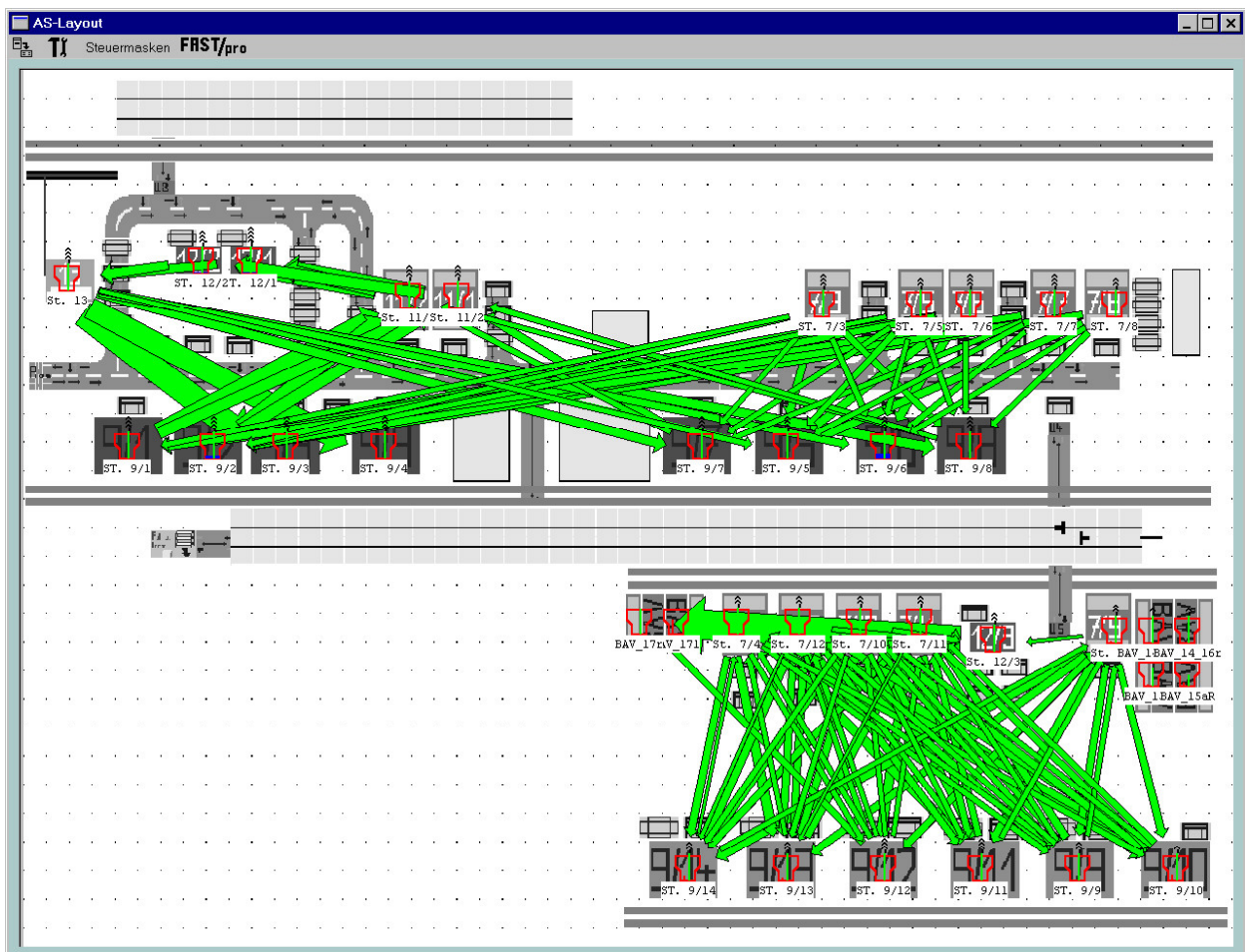


Bild 5.12 Ist-Materialfluss basierend auf 85% der Arbeitsinhalte

Darüber hinaus kann durch den Einsatz des Belegungsplanungssystems der Planungs- und Steuerungsaufwand reduziert werden. Die logistikorientierte Vergabe der Prioritätswerte bewirkt eine Standardisierung der Abläufe. So wird unter Beibehaltung der vollen Flexibilität durch die Priorisierung aller möglichen Belegungsalternativen die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass technologisch gleiche Auftragsvarianten immer wieder dieselben Montagestationen durchlaufen. Dadurch stellt sich zum einen ein Lerneffekt bei der Bearbeitung ein und zum anderen wird die Koordination weiterer Ressourcen wie Vorrichtungen und Material vereinfacht. Die Vereinfachung der Koordination des Montageablaufs wird zusätzlich dadurch unterstützt, dass optimale Freigabetermine und realistische Durchlaufzeiten frühzeitig und dynamisch getestet ermittelt werden können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Simulation als dynamische Testumgebung durch die Anwendung des entwickelten Belegungsplanungsverfahrens und einer an der Agententheorie angelehnten Steuerung fähig war, das vorgegebene Montageprogramm vollständig und termintreu durchzuführen.

6 Schlussbetrachtung

6.1 Zusammenfassung

Der Zwang zur Anpassung an die wachsenden Kosten- und Leistungsanforderungen des internationalen Absatzmarktes verlangt von produzierenden Unternehmen eine hohe Auslastung ihrer kapitalintensiven Ressourcen sowie einen hohen Grad an Lieferfähigkeit und -treue. Dieses kann in der Multiressourcen-Montage aufgrund der dort vorhandenen alternativ einsetzbaren Ressourcen mit einer Vielzahl von technologisch möglichen Belegungskombinationen nur durch eine realistische Planung und genaue Steuerung des Montageablaufs erfüllt werden.

Derzeit verfügbare Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssysteme erfüllen diese Aufgaben nur unzureichend, da sie Ressourcenverfügbarkeiten nicht oder nur unzureichend berücksichtigen sowie von starren Plandurchlaufzeiten ausgehen. Auch scheitern die in der Wissenschaft bisher entwickelten Verfahren einer rechnergestützten Belegungsplanung an den komplexen Zusammenhängen in der Multiressourcen-Montage. Nur durch den Einsatz der Simulationstechnik ist es möglich, ein anforderungsgerechtes Ablaufmodell einschließlich der vorhandenen Flexibilität zu erstellen.

Die diskrete, ereignisorientierte Ablaufsimulation berücksichtigt im Unterschied zu den heute in PPS- und Leitstandssystemen integrierten Modellen die ablaufbedingten Liegezeiten von Aufträgen vor den Arbeitssystemen. Sie sind in den Simulationsmodellen nicht festgelegt, sondern ergeben sich aus der dynamischen Belastung der einzelnen Ressourcen. Durch die Anwendung der Simulationstechnik lässt sich das dynamische Verhalten von Produktionssystemen wesentlich genauer vorherbestimmen und es kann im Planungsablauf das Zusammenspiel von Ressourcen und Aufträgen sowie der Material- und Informationsfluss abgebildet und somit analysiert werden.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage schließt die Simulation als dynamische Testumgebung zur Ermittlung von Zeit- und Leistungswerten sowie zur Parameterbestimmung ein. Hierzu erfolgt zunächst unter besonderer Berücksichtigung der Engpassressourcen eine Bewertung und Priorisierung aller technologisch möglichen Belegungskombinationen mit der Hilfe von logistischen Klassifizierungskriterien. Anschließend werden eine auftragsindividuelle Durchlaufterminierung und Vorlaufzeitbestimmung auf Basis der in den Simulationsläufen gemessenen Ressourcenleistungen und Arbeitsvorgangsübergangszeiten durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Belegungsplan, der die vorhandene Flexibilität in der Multiressourcen-Montage nicht einschränkt und für jeden durchzuführenden Auftrag einen durch die Vorlaufzeit bestimmten optimalen Freigabezeitpunkt enthält. Die ermittelten realistischen Durchlaufzeiten werden in der Montagesteuerung

dann dazu genutzt, die in Abhängigkeit der jeweiligen Belastungssituation optimalen Belegungsalternativen auszuwählen.

Durch die Bildung eines Regelkreises, der sowohl das reale Montagesystem als auch das Simulationsmodell als Regelstrecke enthält, kann über die Bestimmung der Planungsgrößen hinaus die Güte des Belegungsplans durch die Ermittlung des logistischen Zielerreichungsgrades kontinuierlich gemessen und verbessert werden. Dieses ist sowohl für eine Anpassungsplanung als auch für eine Neuplanung möglich.

Eine prototypische Anwendung des simulationsgestützten Belegungsplanungsverfahrens in der Vormontage eines Flugzeugherstellers, in der eine hohe Planungskomplexität vorhanden ist, hat gezeigt, dass bestandsbedingte Leistungsverluste an den Engpassressourcen vermieden und eine hohe Termintreue der Fertigstellungstermine erzielt werden. Darüber hinaus wird der Planungsaufwand durch die erstellten EDV-Module deutlich gesenkt. Voraussetzung für eine Anwendung der simulationsgestützten Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage ist allerdings eine hinreichend genaue Modellerstellung und das Vorhandensein aller durchführbaren Alternativarbeitspläne.

6.2 Ausblick

Die innerhalb der Verfahrensentwicklung vorgenommene Einbindung der Simulationstechnik geht konform mit der derzeitigen Entwicklung der digitalen Fabrik zum Arbeitsmedium der Zukunft. Die digitale Fabrik als realistisches, integriertes Rechnermodell einer Produktionsstätte wird in der Planung und Projektierung von Montagesystemen bereits erfolgreich eingesetzt und ist künftig das geeignete Medium, auch Aufgaben der Montageplanung und -steuerung zu unterstützen. Die Verknüpfung von digitaler Produktentwicklung und digitaler Fabrikplanung führt darüber hinaus zu einer Vereinfachung des Datenaustausches. Aufgrund der Möglichkeit einer durchgängigen Verarbeitung von Informationen kann so der Aufwand für die Modellerstellung reduziert und die Generierung von Alternativarbeitsplänen vereinfacht werden.

Für eine Weiterentwicklung des Verfahrens bieten sich als Arbeitsschwerpunkte auf der Planungsebene die Ausweitung der automatischen Prioritätswertvergabe durch ein Expertensystem sowie auf der Steuerungsebene die Detaillierung des Agentensystems an. Darüber hinaus kann der bisher erforderliche mittel- bis langfristige Planungszeitraum durch die Implementierung einer Grundlast im Simulationsmodell, die einer durchschnittlichen Betriebsfüllung entspricht, verkürzt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulationsmodell soll neben dem Einsatz in der Belegungsplanung auch für die Untersuchung einer geplanten Erweiterung der Vormontage zur Bearbeitung von Rumpfteilen des Flugzeugtyps „Airbus A380“ genutzt werden. Die objektorientierte Abbildung des derzeit vorhandenen Montagesystems er-

laubt dabei die Anpassung und Erweiterung des Modells, ohne dass die zunehmende Komplexität zu einer entstehenden Unübersichtlichkeit führt.

7 Literatur

- AAR89 Aarts, E., Korst, J.: Simulated Annealing and Boltzmann Machines. A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing. Chichester: 1989.
- ABE93 Abels, S.: Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem. Dissertation U Erlangen-Nürnberg. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1993.
- ADA77 Adam, N., Surkis, J.: A Comparison of Capacity Planning Techniques in a Job Shop Control System. MS 23 (1977) 9, S. 1011-1015.
- ADA88a Adam, D.: Fertigungssteuerung. Teil 1. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. Wiesbaden: Gabler Verlag 1988.
- ADA88b Adam, D.: Die Eignung der belastungsorientierten Auftragsfreigabe für die Steuerung von Fertigungsprozessen mit diskontinuierlichem Materialfluss. ZfB 58 (1988) 1, S. 98-115.
- ADA90 Adam, D.: Produktionspolitik. 6. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag 1990.
- ANF98 Anft, M.: Kundengerechte Produktgestaltung mit Virtual Reality. Technik für den Menschen, Gestalt und Einsatz benutzungsfreundlicher Produkte. Vorträge der ITG-Fachtagung, Eichstaett, 26.-27. Oktober 1998, ITG-Fachberichte, Bd. 154 (1998), S. 123-129.
- ANT65 Anthony, R.: Planning and Control Systems. A Framework for Analysis. Cambridge: Harvard University Press 1965.
- ARL71 Arlt, J., Miese, M.: Analyse des Produktionsbereichs Montage. Voraussetzungen und Möglichkeiten. Industrie-Anzeiger 93 (1971) 67, S. 1703-1709.
- ASI95 ASIM Jahresbericht. ARGE Simulation News 1995.
- AWK96 Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Weck, M. (Hrsg.): Veränderung erfolgreich umsetzen. Ein „Kernprozess“ zur Zukunftssicherung. Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven. AWK, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium '96. Aachen, Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- AWK99 Eversheim, W. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven. AWK, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium '99. Aachen: Verlag Shaker 1999.
- BAU95 Bauer, S., Götz, W.: Wirtschaftliche Montage am Produktionsstandort Deutschland. Stuttgart: Teubner Verlag 1995.
- BAU96 Baumann, M.: 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.

- BAU99 Baumgarten, H., Wiegand, A.: Entwicklungstendenzen und Erfolgsstrategien der Logistik. Handbuch Logistik, S. 783-800. Hrsg. Weber, J., Baumgarten, H. Stuttgart: Schaeffer-Poeschel-Verlag 1999.
- BEC84 Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation U Hannover, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 70. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984.
- BEC91 Beckendorff, U.: Reaktive Belegungsplanung für die Werkstattfertigung. Dissertation U Hannover. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 232. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- BEC93 Becker, B., Schulte, J.: Production Scheduling Using Genetic Algorithms. IFAC Symp. 4 (1993), S. 367-372.
- BEI91 Beier, H., Schwall, E.: Fertigungsleittechnik. Praxiswissen CA-Techniken. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1991.
- BEN98 Benn, W., Dürr, H., Dube, H., Löbig, S., Kunzmann, U.: ISO 10303 (STEP). Datenaustauschformat oder Modellierungsbasis? Engineering Management, Sonderheft 1997/98, GITO-Verlag.
- BER70 Berr, U., Papendieck, A.: Produktionsreihenfolgen und Losgrößen der Serienfertigung in einem Werkstattmodell. wt-Z 60 (1970) 4, S. 191-196.
- BER73 Berthel, J.: Zielorientierte Unternehmenssteuerung. Die Formulierung operationaler Zielsysteme. Stuttgart: Schaeffer-Poeschel-Verlag 1973.
- BER76 Berr, U., Tangermann, H.-P.: Einfluss von Prioritätsregeln auf die Kapazitätsterminierung der Werkstattfertigung. wt-Z 66 (1976) 1, S. 7-12.
- BER84 Berg, C.: Prioritätsregeln in der Reihenfolgeplanung. Handwörter der Produktionswirtschaft. Hrsg. Kern, W. Stuttgart: Schaeffer-Poeschel-Verlag 1984.
- BER89 Bernhardt, R., Koppermann, C., Müller-Nehler, U.: Expertensysteme für betriebsnahe Problemstellungen. atp 31 (1989) 12, S. 580-587.
- BIE89 Biegel-John, E., Wink-Lawrence, J.: Expert system can do job shop scheduling. Computers & Industrial Engineering 17 (1989) Nr. 1-4, S. 347-352.
- BLA82 Blackstone, J., Phillips, D., Hogg, G.: A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. The International Journal of Production Research (1982) 20, S. 27-45.
- BLE94 Bley, H., Jostock, J.: Von der ereignisorientierten Fertigungssteuerung zu einer ereignisorientierten Fertigungsregelung. VDI-Z 136 (1994) 3, S. 30-35.
- BRA75 Brankamp, K.: Handbuch der modernen Fertigung und Montage. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1975.

- BRI94 Brinkkötter, D., Schlottmann, R.: Simulation und intelligente BDE zur Unterstützung von PPS und Leiststand. CIM-Management 4 (1994), S. 11-15.
- BÜD91 Büdenbender, W.: Ganzheitliche Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte für Produktionsunternehmen mit kombinierter kundenanonymer und kundenbezogener Auftragsabwicklung. Dissertation TH Aachen. FIR + IAW Forschung für die Praxis Bd. 33. Hrsg. Hackstein, R. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1991.
- BUL86 Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis / REFA. Bullinger, H.-J., Ammer, D. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1986.
- BUL89a Bullinger, H.-J., Seidel, U.: Rechnergestützte Planung und Bewertung des Montageablaufs. Industrieanzeiger 111 (1989) 36, S. 18-33.
- BUL89b Bullinger, H.-J., Wasserloos, G.: Die Entwicklung praxisgerechter Expertensysteme. Knowledge Engineering. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1989.
- BUL92 Bullinger, H.-J., Seidel, U.: Neuorientierung im Produktionsmanagement. FB/IE 41 (1992) 4, S. 150-156.
- BUR92 Burger, C.: Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen. Dissertation TU München. Iwb Forschungsberichte Bd. 42. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1992.
- CHA94 Champy, J., Hammer, M.: Business Reengineering. Die Radikalkur für das Unternehmen. 2. Auflage. Frankfurt: Campus-Verlag 1994.
- CLA96 Claus, T.: Objektorientierte Simulation und genetische Algorithmen zur Produktionsplanung und -steuerung. Dissertation U Osnabrück. Schriften zur Produktion Bd. 12. Frankfurt: Lang 1996.
- COR95 Corsten, H., May, C.: Unterstützungspotential neuronaler Netze für die Produktionsplanung und -steuerung. Information Management 10 (1995) 2, S. 44-55.
- COR97 Corsten, H., Gössinger, R.: Multiagentensystem zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung. Information Management 12 (1997) 3, S. 65-75.
- CUI96 Cuiper, R., Feldmann, C., Roßgoderer, U.: Rechnerunterstützte Parallelisierung von Konstruktion und Montageplanung. Zwf 91 (1996) 7/8, S. 338-341.
- CUI97 Cuiper, R., Roßgoderer, U.: Montageplanung planen und steuern. Fertigung 25 (1997) 1-2, S. 58-60.
- DAV91a Davidor, Y.: Genetic Algorithms and Robotics. A heuristic Strategy for Optimization. Singapore: World Scientific 1991.

- DAV91b Davis, L. (Ed.): Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold 1991.
- DEL92 Delchambre, A.: Computer-aided Assembly Planning. London: Verlag Chapman & Hall 1992.
- DEL93 Dell'Amico, M., Trubian, M.: Applying Tabu Search to the Job-Shop Scheduling Problem. *Annals of Operational Research* 41 (1993), S. 231ff.
- DEU89 Deutschländer, A.: Integrierte rechnerunterstützte Monateplanung. Dissertation TU Berlin. Reihe Produktionstechnik Berlin Bd. 72. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1989.
- DIE95 Dieckhoff, C.: Darstellung und Bewertung alternativer Automobil-Montagestrukturen mit einem parallelrechnerunterstützten Simulationssystem. Dissertation TU Braunschweig. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 162. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.
- DIN19 DIN 19226: Steuerungs- und Regelungstechnik. Teil 2 bis Teil 5. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag.
- DIN85 DIN 8593: Fertigungsverfahren. Fügen. Teil 0. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag.
- DOM90a Domschke, W., Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1990.
- DOM90b Domig, M., Feißt, J., Kornblum, T.: PPS-Spezial. Neue Methoden für Auftragsfertiger. AV 27 (1990) 1, S. 26-29.
- DOM93 Domschke, W., Scholl, A., Voss, S.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Heidelberg: Springer-Verlag 1993.
- DOR90 Dorninger, C.: PPS. Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte, Methoden und Kritik. Wien: Ueberreuter Wirtschaftsverlag 1990.
- DRE94 Drexl, A., Fleischmann, B., Günther, H.-O., Staedtler, H., Tempelmeyer, H.: Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. *ZfbF* 46 (1994) 12, S. 1022-1045.
- DRE97 Drews, P., Weyrich, M.: Produktionsplanung und Anlagensimulation mit Methoden der Virtual Reality. *Industrie Management* 13 (1997) 1, S. 18-22.
- DUD93 Duden Informatik. Ein Sachlexikon für Studium und Praxis. 2. Auflage. Mannheim: Bibliographisches Institut 1993.
- DUD00 Duden. Das große Fremdwörterbuch. Herkunft und Bedeutung der Fremdwörter. 2. Auflage. Mannheim: Bibliographisches Institut 2000.
- DUE90 Dueck, G., Scheuer, T.: Threshold Accepting. A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing. *Journal of Computational Physics* 90 (1990) 1, S. 161-175.

- DUE93 Dueck, G: New Optimization Heuristics. The Great Deluge Algorithm and the Record-to-Record Travel. *Journal of Computational Physics* 104 (1993), S. 86-92.
- DUR90 Durek, G., Scheuer, T.: Threshold Accepting. A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing. *Journal of Computational Physics* 90 (1990) 1, S. 161 ff.
- EBB99 Ebbesmeyer, P., Grafe, M., Krumm, H., Gehrman, P.: Einsatz von Virtual Reality. *ZwF* 94 (1999) 9, S. 561-565.
- EDA00a Begriffsbeschreibung im Internet (2000):
http://www.edag.de/prozesskette/3_digitales.htm
- EDA00b Begriffsbeschreibung im Internet (2000):
http://www.edag.de/prozesskette/15_digitale_fabrik.htm
- EID91 Eidenmüller, B.: Die Produktion als Wettbewerbsfaktor. Herausforderungen an das Produktionsmanagement. 2. Auflage. Leitfaden für Unternehmer und Führungskräfte. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 1991.
- ESS96 Esser, H.: Integration von Montageplanung und -steuerung. Dissertation TH Aachen. *Berichte aus der Produktionstechnik* Bd. 96, 27. Aachen: Verlag Shaker 1996.
- EVE87 Eversheim, W. (Hrsg.): Strategien zur Rationalisierung der Montage. Einzel- und Kleinserienproduktion komplexer Produkte. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB). Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.
- EVE88 Eversheim, W., Kosmas, I., Konz, H.-J.: Systematisch planen und steuern. Kleinserienmontage komplexer Produkte. *Industrieanzeiger* 72/1988, S. 26-28.
- EVE89 Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 4. Fertigung und Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.
- EVE91 Eversheim, W., Goedeke, G., Grempe, R., Esser, H.: Die Montage effizient planen und steuern. Leitstand bald verfügbar. *VDI-Z* 133 (1991) 4, S. 40-47.
- EVE92a Eversheim, W. (Hrsg.): Störungsmanagement in der Montage. Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
- EVE92b Eversheim, W.: Rechnerunterstützte Simulation im Rahmen der Montageplanung und -steuerung. Abschlussbericht. Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre. TH Aachen. 1992.
- EVE94 Eversheim, W., Lipp, H.-P., Hack, T.: Die variantenreiche Serienmontage mit Fuzzy-Technologie beherrschen. *VDI-Z* 136 (1994) 11/12, S. 64-67.
- EVE96 Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 1. Grundlagen. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1996.

- FAI98 Faigle, U., Schrader, R.: On the Convergence of Stationary Distributions in Simulated Annealing Algorithms. *Informatics Process Letters* 27 (1998), S. 189 ff.
- FEL92 Feldmann, K., Reinisch, H.: Wissensbasierte Planungswerkzeuge in der automatisierten Montage. *pa Produktionsautomatisierung* 1 (1992), S. 25-29.
- FEL94 Feldmann, K., Abels, S.: Advanced Concepts for Integrated Simulation of Assembly Systems. *Production Engineering Vol. I/2* (1994). Berlin: Carl Hanser Verlag 1994.
- FEL97 Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Dissertation TU München, Iwb Forschungsberichte Bd. 104. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1997.
- FEL00a Feldmann, K. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Berlin: Springer-Verlag 2000.
- FEL00b Projektbeschreibung im Internet (2000):
<http://www.faps.uni-erlangen.de/projekte/aktuell/cap/refmodel.html>
- FIC96 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme. Dissertation TU München. Iwb Forschungsberichte Bd. 95. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1996.
- FIR96a Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen (Hrsg.): Aachener PPS-Modell. Das Aufgabenmodell. Sonderdruck 6/94. 4. Auflage. Aachen 1996.
- FIR96b Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen (Hrsg.): Aachener PPS-Modell. Das Prozessmodell. Sonderdruck 10/95. 2. Auflage. Aachen 1996.
- FIR97 Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen (Hrsg.): Aachener PPS-Modell. Das morphologische Merkmalschema. Sonderdruck 4/90. 6. Auflage. Aachen 1997.
- FIS99 Fischer, K.: Fuzzybasierte Auftragsauswahl an Schmiedeaggregaten. Dissertation U Hannover. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 504. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.
- FLE72 Flechtner, H.-J.: Grundbegriffe der Kybernetik. 5. Auflage. Eine Einführung. Stuttgart: Hirzel Verlag 1972.
- FLE88 Fleischmann, B.: Operations-Research-Modelle und -Verfahren in der Produktionsplanung. *ZfB* 58 (1988) 3, S. 347-372.
- FLE98 Fleischmann, B.: Der Unterschied zwischen MRP und Planung. *Supply Chain Management*. 2 (1998), S. 52-55.

- GAR96 Garlichs, R.: Entscheidungsorientierte Belegungsplanung von verketteten Montageanlagen. Dissertation U Hannover. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 402. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- GES98 Geske, U., Goltz, H.-J., John, U., Matzke, D., Wolf, A.: Constraint-basierte Planung und Simulation von Multiressourcen-Problemen. GMD Report 28. Sankt Augustin: GMD – Forschungszentrum Informationstechnik 1998.
- GLA92 Glaser, H., Geiger, W., Rohde, V.: PPS. Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Konzepte, Anwendungen. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag 1992.
- GLA93 Gladis, A., Wegener, R., Weiler, A.: Unscharfe Mengen. Termintreue verbessern und Durchlaufzeiten verkürzen mit Hilfe der Fuzzy-Logic. Maschinenmarkt 99 (1993) 33, S. 42-48.
- GLO86 Glover, F.: Future Path for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. Computers and Operations Research 13 (1986), S. 533 ff.
- GLO89a Glover, F.: Tabu Search. Part I. ORSA Journal on Computing 1 (1989), S. 190-206.
- GLO89b Glover, F., Greenberg, H.: New Approaches for Heuristic Search. A Bilateral Linkage with Artificial Intelligence. European Journal of Operations Research 41 (1989), S. 141 ff.
- GRA96 Grabowski, H. (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 346: Rechnerintegrierte Konstruktion und Fertigung von Bauteilen. Arbeits- und Ergebnisbericht 1.7.1993-31.12.1996. TH Karlsruhe Dezember 1996.
- GRI98 Griffel, N., Hoffmann, H.: Effiziente Ablaufsimulation durch Prozessdurchgängigkeit. Werkstatt und Betrieb 4/98. München: Carl Hanser Verlag 1998.
- GRI99 Griffel, N.: Prozesskette Ablaufsimulation. Voraussetzung zur systematischen Planung komplexer Produktionssysteme mit hohem Nutzungsgrad. Dissertation TU München. utg Forschungsberichte, Band 4. München: Hieronymus-Verlag 1999.
- GRO90 Groß, M.: Planung der Auftragsabwicklung komplexer, variantenreicher Produkte. Konzeption eines EDV-gestützten Hilfsmittels zur integrierten Auftrags- und Produktionsprogrammplanung in der Kleinserienproduktion. Dissertation TH Aachen 1990.
- GRO92a Gronau, N: Rechnergestütztes Produktionsmanagement. FB/IE 41 (1992) 4, S. 160-163.
- GRO92b Gronau, N., Krallmann, H.: Vom PPS-System zum rechnergestützten Produktionsmanagementsystem. VDI-Z 134 (1992) 10, S. 84-89.
- GRO93 Große Wienker, R.: Entwicklung eines Kommunikationssystems für die integrierte Auftragsplanung und -steuerung. Dissertation TH Aachen 1993.

- GRO94 Gronau, G., Lippstock, K.: Steuerungsstrukturen in der Fertigung. CIM-Management 4 (1994), S. 14-16.
- GRO97 Große, M., Rabe, M., Hellingrath, B.: Simulationstechnik in kleineren und mittleren Unternehmen, ZwF 92 (1997) 7-8, S. 383-385.
- GÜN92 Günther, H.: Netzplanorientierte Auftragsterminierung bei offener Fertigung. OR Spektrum 4 (1992) 14, s. 229-240.
- GÜN93 Günther, H.: Ein Fuzzy-Ansatz für die operative Führung eines Montagebandes im Fahrzeugkranbau. VDI-Berichte (1993) 1053, S. 73-89.
- GÜN95 Günther, H.-O., Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1995.
- GUT83 Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Bd. 1. Die Produktion. 24. Auflage. Berlin: 1983. S. 1 ff.
- HAC89 Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.
- HAC97 Hack, T.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Montage unter Berücksichtigung der Unschärfe. Dissertation TH Aachen. Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 97, 16. Aachen: Verlag Shaker 1997.
- HAH86 Hahn, D., Lassmann, G. (Hrsg.): Produktionswirtschaft. Controlling industrieller Produktion. Bd. 1. Grundlagen. 3. Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag 1986.
- HAM97 Hammer, M., Champy, J.: Reengineering the Corporation. A Manifesto for Business Revolution. London: Nicholas Brealey Publishing 1997.
- HAR89 Harmon, P., King, D.: Expertensysteme in der Praxis. München, Wien: Oldenbourg Verlag 1989.
- HAR91 Hartberger, H.: Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme. Dissertation TU München. Iwb Forschungsberichte Bd. 32. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1991.
- HAR93 Hartmann, M.: Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage. Ein Hilfsmittel zur Montageplanung. Dissertation TH Aachen 1993.
- HAU93 Haugeneder, H., Steiner, D.: Ein Mehragentenansatz zur Unterstützung kooperativer Arbeit. CSCW – Computer Supported Cooperative Work, S. 203-229. Hrsg. Hasenkamp, U. et. al. Bonn, Paris, Reading: Addison-Wesley 1993.
- HAX84 Hax, A., Candea, D.: Production and Inventory Management. Englewood Cliffs: Prentice-Hall 1984.

- HEC95 Hechl, C.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte. Dissertation TU München, Iwb Forschungsberichte Bd. 92. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1995.
- HEN97 Veröffentlichung im Internet (1997):
<http://www.informatik.uni-bremen.de/grp/ag-ki/papers/wspapers/henseler.ps>
- HEN99 Hentschel, B., Kindler, T.: Animationstechnik in der Produktionslogistik. Werkstatttechnik 89 (1999) 3, S. 87-90.
- HER96 Herrmann, F.: 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.
- HIL88 Hillier, F., Liebermann, G.: Operations Research. Einführung. München: Oldenbourg Verlag 1988.
- HIN87 Hinz, G.-W.: Ein wissensbasiertes System zur Produktionsplanung und -steuerung für flexible Fertigungssysteme. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.
- HIR90 Hirt, K., Sames, G., Büdenbender, W.: Entwicklung einer Handlungsanleitung zur Gestaltung von ganzheitlichen PPS-Konzepten bei inhomogener Auftragsabwicklungsstruktur. Schlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 7193. Aachen 1990.
- HIR91 Hirt, K., Köhl, E.: Probleme und Trends beim Einsatz von PPS-Systemen. VDI-Z 133 (1991) 3, S. 38-42.
- HIR97 Hirschberg, A.: Effiziente Simulation durch organisatorische und informationstechnische Integration. Rationelle Nutzung der Simulationstechnik. Entwicklungstrends und Praxisbeispiele. München: Utz Verlag 1997.
- HOF91 Hoff Industrie Rationalisierung GmbH (Hrsg.): HIR Marktstudie „Elektronische Leitstände“. Wiesbaden 1991.
- HOI93 Hoitsch, H.-J.: Produktionswirtschaft. 2. Auflage. München: Vahlen Verlag 1993.
- HOP82 Hopfield, J.: Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. Proceedings of the National Academic of Science (1982) 79, S. 2254-2258.
- HOR89 Horns, A.: Job Shop Control under Influence of Chaos Phenomena. Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control (1989), S. 227-232.
- HOY94 Ho, Y.: Heuristics, Rules of Thumb, and the 80/20 Proposition. IEEE Transactions on Automatic Control 39 (1994) 5, S. 1025-1027.

- HÜN94 Hünenberg, R.: Internationales Marketing. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1994.
- JOH54 Johnson, S.: Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup-times Included. Naval Research Logistics Quarterly 1 (1954), S. 61-68.
- KAL87 Kalde, M.: Methodik zur Festlegung der Flexibilität in der Montage. Dissertation TH Aachen. 1987.
- KAN87 Kang, M., Spur, G. (Hrsg.): Entwicklung eines Werkstattsteuerungssystems mit simultaner Termin- und Kapazitätsplanung. Forschungsberichte für die Praxis. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1987. S. 38.
- KAN93 Kanet, J., Zhou, Z.: A Decision Theory Approach to Priority Dispatching for Job Shop Scheduling. Journal of Operations Management 2 (1993) 1, S. 2ff.
- KER95 Kernler, H.: PPS der 3. Generation. Grundlagen, Methoden, Anregungen. 3. Auflage. Heidelberg: Hüthig 1995.
- KIE94 Kief, H.: NC/CNC-Handbuch. NC, CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, NC-Maschinen, NC-Roboter, LAN Fachwortverzeichnis. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1994.
- KIM93 Kim, Y.-D.: A New Branch and Bound Algorithm for Minimizing Mean Tardiness in Two-Machine Flow shops. Computers and Operations Research 20 (1993), S. 391ff.
- KIS93 Kistner, K.-P., Steven, M.: Produktionsplanung. 2. Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag 1993.
- KÖH90 Köhle, M.: Neuronale Netze. Wien: Springer-Verlag 1990.
- KÖH00 Köhrmann, C.: Modellbasierte Verfügbarkeitsanalyse automatischer Montagelinien. Dissertation U Hannover. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 538. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- KON89 Konz, H.-J.: 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.
- KOP95 Kopfer, H., Rixen, I., Bierwirth, C.: Ansätze zur Integration Genetischer Algorithmen in der Produktionsplanung und -steuerung. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 571-580.
- KOR90 Korge, A.: Rechnergestützte Montageablaufplanung für die Serienfertigung. Der Betriebsleiter 10 (1990), Seite 56-59.
- KOX67 Koxholt, R.: Die Simulation. Ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung. München: Oldenbourg Verlag 1967.

- KRÜ99a Krüger, A.: Gestaltung stückzahlflexibler Montagesysteme. Seminarberichte (1999) 42. Stückzahlflexible Montagesysteme, S. 1/1-1/23. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München.
- KRÜ99b Krüger, Th., Wiendahl, H.-P.: Simulated Optimization Strategy for Complex-Production Systems. International Conference on Quality Manufacturing. Rand Afrikaans University & University of Stellenbosch, 13.-15. Januar 1999.
- KUH90 Kuhn, H.: Einlastungsplanung von flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation TH Darmstadt. Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft Bd. 31. Heidelberg: Physica-Verlag 1990.
- KUR93 Kurbel, K.: Production Scheduling in a Leitstand System Using a Neural-Net Approach. Artificial Intelligence Technology. Proceedings of the 4th International Computing Congress. Hrsg. Balagurusamy, E., Sushila, B. Hyderabad: 1993.
- KUR95 Kurbel, K., Rohmann, T.: Ein Vergleich von Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung. Simulated Annealing, Genetische Algorithmen und mathematische Optimierung. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 581-593.
- KUR99 Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 4. Auflage. München, Wien: Oldenbourg Verlag 1999.
- LAA92 van Laarhoven, P., Aarts, E., Lenstra, J.: Job Shop Scheduling by Simulated Annealing. Operations Research 40 (1992), S. 113 ff.
- LAS75 Laßmann, G.: Produktionsplanung. Handwörterbuch der Betriebswirtschaftslehre. 4. Auflage. Hrsg. Grochla, E., Wittmann, W. Stuttgart: Schaeffer-Poeschel-Verlag 1975.
- LEH87 Lehtimäki, A.: An Approach for Solving Decision Problems of Master Scheduling by Utilizing Theory of Fuzzy Sets. International Journal of Production Research 25 (1987) 12, S. 1781-1793.
- LEH92 Lehmann, F.: 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.
- LEH97 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluss- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD und Ablaufsimulationssystem. Dissertation TU München Iwb Forschungsberichte Bd. 105. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1997.

- LIN93 Linnhoff, M.: Konzeption eines Instrumentariums zur Konfiguration von funktionalen Auftragsnetzen. Ein Beitrag zur Planung und Überwachung der Auftragsabwicklung in Unternehmen der Einzel- und Kleinserienproduktion komplexer Produkte. Dissertation TH Aachen. Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 93, 8. Aachen: Verlag Shaker 1993.
- LIT92 Littger, K.: Optimierung. Eine Einführung in rechnergestützte Methoden. Berlin: Springer-Verlag 1992.
- LOH94 Lohrbach, T.: Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen für ausgewählte betriebswirtschaftliche Aufgabenstellungen und Vergleich mit konventionellen Lösungsverfahren. Göttinger Wirtschaftsinformatik 10. Göttingen: Unitext-Verlag 1994.
- LOT92 Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
- LOT93 Lotter, B., Schilling, W.: Der Markt und die veränderte Anforderung an die Montage. Der Betriebsleiter, 7-8/93. Mainz: Verlag für Technik und Wirtschaft 1993.
- LOW85 Lowndes, J.: Production Management Concept Cuts Delays, Budget Overruns. Aviation Week & Space Technology May 13 (1985).
- LUC93 Luczak, H., Eversheim, W.: Paps-Entwicklungstrends. Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering 42 (1993) 2.
- MAI92 Mai, W., Jankowski, F.: CIM-Marktübersicht. Fertigungs- und Personalleistungsstand. Hrsg. Geitner U., Ploenzke-Informatik. Braunschweig: Vieweg Verlag 1992.
- MAR98 Martin, C., Milberg, J. (Hrsg.): Produktionsregelung. Ein modularer, modellbasierter Ansatz. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1998.
- MCH95 Much, D., Nicolai, H.: PPS-Lexikon. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen Verlag 1995.
- MEI95 Meinberg, U., Topolewski, F.: Lexikon der Fertigungsleittechnik. Begriffe, Erläuterungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1995.
- MER95 Mertens, P., Schultz, J., Weigelt, M.: Verfahren für die rechnergestützte Produktionsfeinplanung. Ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 594-608.
- MEZ98 Mezger, M.: Virtual-Reality-Modelle helfen bei der Planung von Produktionsgebäuden. Maschinenmarkt 102 (1998) 17, S. 39 ff.
- MIC92 Michalewicz, Z.: Genetic Algorithms and Data Structures equal Evolution Programs. Berlin: 1992.
- MIE72 Miese, M.: Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Einzel- und Kleinserienproduktion. Dissertation TH Aachen. 1972.

- MIL88 Milberg, J.: Wettbewerbsvorteile durch Stärkung der Integration. München, Berlin: Springer-Verlag 1988.
- MIL91 Milberg, J., Amann, W., Zetlmayer, H.: Wissensbasierte Simulation und Regelung von Produktionssystemen. CIM Management 7 (1991) 6, S. 5-9.
- MIL94 Milberg, J.: Unsere Stärken. Der Weg zur Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung. Münchner Kolloquium 24./25.02.94. München, Berlin: Springer-Verlag 1994.
- MÜL92 Müller-Merbach, H.: Operations-Research. Methoden und Modelle der Optimalplanung. 3. Auflage. München: Vahlen Verlag 1992.
- MÜL98 Müller, S., Reiners, D.: Die Mensch-Maschine-Schnittstelle. Von der Signaldarstellung zur Virtuellen Realität. Mensch, Prozess, Kommunikation, Vorträge der GMA-Fachtagung anlässlich des VDE-Kongresses '98, Stuttgart 21.-22.11.1998. GMA-Fachberichte 6 (1998), S. 35-42; Berlin Offenbach: VDE-Verlag.
- MUS00 Muschik, R.: Neue Qualitäten im CAD-Datenaustausch. Vergleich der neutralen Schnittstellen STEP und VDAFS. Produktdatenmanagement 1 (2000) 1, GITO-Verlag.
- NAK91 Nakano, R., Yamada, T.: Conventional Genetic Algorithm for Job Shop Problems. Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms in San Mateo. Hrsg. Belew, R., Booker, L. 1991, S. 474-479.
- NCH91 Noche, B., Wenzel, S.: Marktspiegel Simulationstechnik in Produktion und Logistik. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1991.
- NIE72 Niemeyer, G.: Die Simulation von Systemabläufen mit Hilfe von Fortran IV. GPSS auf Fortran-Basis. Berlin: de Gruyter Verlag 1972.
- NIE94 Nietsch, T., Rautenstrauch, C., Rehfeldt, M., Rosemann, M., Turowski, K.: Verbesserung von PPS-Systemen durch Fuzzy-Logik. CIM Management 10 (1994) 6, S. 22-26.
- NIS94 Nissen, V.: Evolutionäre Algorithmen. Darstellung, Beispiele, betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1994.
- NIS97 Nissen, V.: Einführung in evolutionäre Algorithmen. Optimierung nach dem Vorbild der Evolution. Braunschweig: Vieweg Verlag 1997.
- NOC90 Noche, B., Jünemann, R. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Materialfluss. Entscheidungsorientierte Simulationsumgebung. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1990.
- NYH99 Nyhuis, P., Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag 1999.
- PAH93 Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1993.

- PLI90 Ploenzke-Informatik (Hrsg.): Fertigungsleitstand Report. Kiedrich 1990.
- PLU90 v. Pluym, B.: Knowledge-based Decision Making for Job-shop Scheduling. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 3 (1990) 6, S. 354-363.
- RED97 Redeker, G.: Anlagenwirtschaft. Instandhaltung maschineller Anlagen. Vorlesungsskript U Hannover. Hannover: Institut für Qualitätssicherung 1997.
- REF90 REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Carl Hanser Verlag 1990.
- REI96a Reinhart, G.: Instrumente für den Erfolg am globalen Markt. Tagungsband zum 13. Deutschen Montagekongress „Die Montage im internationalen Wettbewerb“, 23./24.10.96. München: Verlag Moderne Industrie 1996.
- REI96b Reinhart, G., Lindemaier, R.: Systemfähigkeit von Montageanlagen. Eine neue Eigenschaft? Schweizer Maschinenmarkt (1996) 9, S.26-28.
- REI97 Reinhart, G., Feldmann, K.: Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven. München: Carl Hanser Verlag 1997.
- REI98 Reinhart, G.: Simultan ist gut – Gemeinsam ist besser, Kooperative Produkt- und Anlagenentwicklung. 14. Deutscher Montagekongress. München 1998.
- REI99 Reinhart, G., Grunwald, S., Rick, F.: Virtuelle Produktion. Technologie für die Zukunft. VDI-Z Integrierte Produktion 141 (1999) V Special C-Techniken, S. 26-29.
- REI00 Reichmann, T: Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten. Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption. 4. Auflage. München: Vahlen Verlag 2000.
- RIC74 Richter, E., Schilling, W., Weise, M. (Hrsg.): Montage im Maschinenbau. 1. Auflage. Berlin: Verlag Technik 1974.
- RIG94 Rigoll, G.: Neuronale Netze. Eine Einführung für Ingenieure, Informatiker und Naturwissenschaftler. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag 1994.
- RKW87 RKW (Hrsg.): PPS-Fachmann. Grundlagen, Planung, Steuerung. Bd. 2. Planung. Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1987.
- RÖH98 Röhrich, T., Gwinner, R., Welfonder, E.: GMA-Kongress 98. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Ludwigsburg. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- SAC84 Sachs, L.: Angewandte Statistik. 6. Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1984.

- SAN93 Sannomiya, N., Lima, H.: Genetic Algorithm Approach to a Production Ordering Problem in an Assembly Process with Buffers. IFAC Symp. 4 (1993), S. 403-408.
- SAU87 Sauer, H.: Mengen- und ablauforientierte Kapazitätsplanung von Montagesystemen. Dissertation U Stuttgart. 1987.
- SCÄ92 Schäfer, G.: Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung. Dissertation U Erlangen-Nürnberg. Reihe Fertigungstechnik Erlangen Bd. 27. Hrsg. Feldmann, K. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1992.
- SCE83 Scheer, A.-W.: Stand und Trends der computergestützten Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in der Bundesrepublik Deutschland. ZfB 53 (1983) 2, S. 138-155.
- SCE90a Scheer, A.-W.: EDV-orientierte Betriebswirtschaftslehre. Grundlagen für ein effizientes Informationsmanagement. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1990.
- SCE90b Scheer, A.-W.: Der computergesteuerte Industriebetrieb. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1990.
- SCE94 Schenk, M., Jaskola, A., Graf, K.: Leitstände für Fertigungs- und Montagebereiche. Stand und Trends. io Management Zeitschrift 63 (1994) 1, S. 71-74.
- SCE97 Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik. Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1997.
- SCE99 Scheid, W., Nothnagel, B.: Nutzen, Dauer und Kosten von PPS-Projekten in kleinen Unternehmen. PPS-Management 4 (1999) 2, S. 17-23.
- SCI91 Schimke, E.-F.: Montageplanung. Methoden, Fallbeispiele, Praxiserfahrung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- SCI93 Schmidt, G., Jacob, E., Lahl, B., Meyer, J.: Fuzzy Logic für die reaktive Fertigungssteuerung. Zwf 88 (1993) 2, S. 81-83.
- SCI98 Schmid, H.: Ein neues Konzept zur automatischen Klassifikation bei großen Klassenzahlen. At-Automatisierungstechnik 46 (1998) 3, S. 151-159.
- SCM92 Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Dissertation TU München. Iwb Forschungsberichte Bd. 41. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1992.
- SCN93 Schneider, B.: Neuronale Netze für betriebliche Anwendungen. Anwendungspotentiale und existierende Systeme. Institut für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster Arbeitsbericht Nr. 22. 1993.

- SCO80 Schomburg, E.: Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssysteme im Maschinenbau. Dissertation TH Aachen 1980.
- SCÖ93 Schrödel, O.: Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen. Dissertation U Erlangen-Nürnberg. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1993.
- SCÖ94 Schöneburg, E., Heinzmann, F., Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien. Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. 1. Auflage. Bonn, Paris, Reading: Addison-Wesley 1994.
- SCO96 Scholz-Reiter, B.: Prozessgestaltung in der Produktion. Symbiose zwischen Materialflusssimulation und Geschäftsprozessmodellierung. Industrie Management 12 (1996) 5, S. 3.
- SCR92 Schrödel, O.: Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen. Dissertation U Erlangen-Nürnberg. 1992.
- SCU92 Schuster, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage. Dissertation TU München. Iwb Forschungsberichte Bd. 55. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1992.
- SCU95 Schultz, J., Weigelt, M., Mertens, P.: Verfahren für die rechnerunterstützte Produktionsfeinplanung. Ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 594-608.
- SCW92 Schwinn, J.: Wissensbasierter CIM-Leitstand. Fortschritte der CIM-Technik 3. Hrsg. Geitner, U. Dissertation GH Kassel. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag 1992.
- SCW99 Schwab, J.: Gestaltungsdefizite heutiger Ablaufplanungssysteme. Industrie Management 15 (1999) 5, S. 52-57.
- SFB00 Projektbeschreibung im Internet (2000):
<http://www.sfb384.uni-hannover.de>
- SIE94 Siedentopf, J.: Anwendung und Beurteilung heuristischer Verbesserungsverfahren für die Maschinenbelegungsplanung. Ein exemplarischer Vergleich zwischen neuronalen Netzen, Simulated Annealing und genetischen Algorithmen. Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft der Universität Leipzig Arbeitsbericht Nr. 2. 1994.
- SIM92 Simon, D.: Zeitgerechte Produktionssteuerung. Technica 5/92, S. 10.
- SON91 Sonnenberg, H.: Betriebslehre und Arbeitsvorbereitung. Bd 2. Kostenrechnung, Arbeitsstudium. 8. Auflage. Braunschweig: Vieweg Verlag 1991.

- SPU86 Spur, G. (Hrsg.): Handbuch der Fertigungstechnik. Bd. 5. Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Verlag 1986.
- SPU94 Spur, G.: Fabrikbetrieb. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1994.
- STA93 Stache, U., Jünemann, R.: Untersuchung der Eignung von genetischen Algorithmen zur simultanen Termin- und Kapazitätsplanung. Dortmund: Verlag Praxiswissen 1993.
- STA99 Stadtler, H., Stockrahm, V., Engelke, H.: Einsatz von Fertigungsleitständen in der Industrie. PPS-Management 4 (1999) 4, S. 33-38.
- STE95 Steckel, K., Raman, N.: FMS Planning Decisions. Operating Flexibilities and System Performance. IEEE Transactions on Engineering Management 42 (1995) 1, S. 82-89.
- SWI89 Switalski, M.: Hierarchische Produktionsplanung. Konzeption und Einsatzbereich. Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft Bd. 25. Heidelberg: Physica-Verlag 1989.
- SYS90 Syska, A.: Kennzahlen für die Logistik. Dissertation TH Aachen. FIR + IAW Forschung für die Praxis Bd. 31. Hrsg. Hackstein, R. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1990.
- TEI98 Teich, T.: Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren. Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre Bd. 1. Hrsg. Schlüchtermann, J. Lohmar, Köln: Josef Eul Verlag 1998.
- TEM91 Tempelmeyer, H.: Simulation mit SIMAN. Ein praktischer Leitfaden zur Modellentwicklung und Programmierung. Heidelberg: Physica-Verlag 1991.
- TEM92a Tempelmeier, H.: Material-Logistik. Grundlagen der Bedarfs- und Losgrößenplanung in PPS-Systemen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1992.
- TEM92b Tempelmeier, H., Kuhn, H.: Flexible Fertigungssysteme. Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb. Berlin: Springer-Verlag 1992.
- TEM95 Tempelmeier, H.: Material-Logistik. Grundlagen der Bedarfs- und Losgrößenplanung in PPS-Systemen. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1995.
- TIN98 Ting K., Trappey, A.: A Step toward STEP-compatible Engineering Data Management. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 14 (1998) 2, S. 89-109.
- TÖN86 Tönshoff, H., Horns, A.: Petri-Netze als spezielle Inferenzsysteme und ihre Anwendung in der Werkstattfertigung und -simulation. Produktionsplanung, Produktionssteuerung in der CIM-Realisierung, 18. IPA Arbeitstagung, Stuttgart, 22./23.04.86, S. 455-480.

- TUF88 Tuffentsammer, K. (Hrsg.): Flexibles Fertigungssystem. Beiträge zur Entwicklung des Produktionsprinzips. Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich „Fertigungstechnik“ der Univ. Stuttgart / DFG, Dt. Forschungsgemeinschaft. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1988.
- VAJ99 Vanja, S.: Die neue Richtlinie VDI 2219. Praxiserprobte Hinweise zu Einführungsstrategien und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM Systemen. VDI-Berichte 1497. Beschleunigung der Produktentwicklung durch EDM/PDM- und Feature-Technologie. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- VAS93 Vasko, F., Wolf, F., Scott, K., Woodyatt, L.: Adapting Branch-and-Bound for Real-World Scheduling Problems. Journal of Operational Research Society 44 (1993), S. 483 ff.
- VDI78 VDI 2815, Blatt 5: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung. Betriebsmittel. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Ausg. Mai 1978.
- VDI83 Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1983.
- VDI92a VDI-Gemeinschaftsausschuss CIM, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB) (Hrsg.): Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion. Leitfaden des VDI-Gemeinschaftsausschusses CIM. Bd. 8. Flexible Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
- VDI92b VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Ausg. Okt. 1992.
- VDM00a Konjunkturbericht im Internet (2000):
http://www.vdma.de/vdma_root/siteinvoke.cfm?path=F97834FC-C98F-11D3-B07200105A4906C1,99B5BE1D-137D-11D4-AF2F000629385290&T=99B5BE1D-137D-11D4-AF2F000629385290&TG=E1E346D3-CA4F-11D3-B07300105A4906C1&D=F97834FC-C98F-11D3-B07200105A4906C1&method=display&objectid=0FDF5B73-5664-11D4-AF68000629385290
- VDM00b Workshopinformation im Internet (2000):
http://www.vdma.de/VDMA_Root/siteinvoke.cfm?method=display&objectid=70ECBBCD-3607-11D4-AF3D000629385290&language=DE
- WAL91 Walenda, H.: Analyse des Betriebsverhaltens elastisch verketteter automatischer Montageanlagen. Dissertation U Hannover. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 220. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- WAN95a Wang, L., Chen, H., Liu, C.: Intelligent Scheduling of FMSs with Inductive Learning Capability Using Neural Networks. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 7 (1995) 2, S. 147-175.

- WAN95b Wang, Y.: Methode für die simulationsunterstützte Optimierung am Beispiel von Montagesystemen. Dissertation TU Berlin. München: Carl Hanser Verlag 1995.
- WAR75 Warnecke, H.-J., Löhr, H.-G., Kiener, W.: Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung. Bd. 7. Produktionstechnik heute. Mainz: Otto Krausskopf-Verlag 1975.
- WAR86 Warnecke, H.-J, Dangelmaier, W., Greiner, T.: Kapazitätsorientierte Mengenplanung. Baustein eines zukunftsbezogenen PPS-Systems. wt-Z 76 (1986), S. 365-370.
- WAR99 Warnecke, H.-J, Braun, J. (Hrsg.): Vom Fraktal zum Produktionsnetzwerk. Unternehmenskooperationen erfolgreich gestalten. Berlin: Springer-Verlag 1999.
- WEC91 Weck, M. (Hrsg.): Simulation in CIM. Berlin: Springer-Verlag 1991.
- WEI85 Weichand, M.: Integration des Planungs- und Konstruktionsprozesses durch rechnerinterne Modellbildung. Dissertation U Karlsruhe. VDI-Z Bd. 127 (1985) Nr. 23/24. Düsseldorf: VDI-Verlag 1985.
- WEI93 Weinbrecht, J.: Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung. Dissertation U Karlsruhe. 1993.
- WEI95 Weingarten, U.: Ressourceneinsatzplanung bei Werkstattproduktion. Dissertation TU Braunschweig. Produktion und Logistik. Heidelberg: Physica-Verlag 1995.
- WEI97 Weinert, K., Appelt, H., Schneider, M.: Der Bildschirm zeigt, ob's funktionieren wird. Methoden und Potential von Virtual Reality im produktionstechnischen Umfeld. Technica 46 (1997) 25-26, S. 16-19.
- WEI99 Weise, H.: Aufbruch in ein neues Zeitalter. Wirtschaft und Gesellschaft im Netz der Logistik. Frankfurt: Frankfurter Allgemeine Buch 1999.
- WES97 Westkämper, E., Pirron, J., Schmidt, T.: Development of an Adaptive Simulation System. Production Engineering Vol. VI/1 (1997). Berlin: Carl Hanser Verlag 1997.
- WID94 Widl, G.: Potentiale für Effizienzsteigerungen in der Automobilzuliefererindustrie. Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft. Zulieferer, Hersteller, Handel. Internationaler Wettbewerb und globale Herausforderung, S. 145-158. Hrsg. Meining, W. Wiesbaden: Gabler Verlag 1994.
- WIE84 Wiendahl, H.-P., Lorenz, W.: Analyse von Warteschlangenmodellen mit realen Betriebsdaten einer Werkstattfertigung. wt Werkstatttechnik 74 (1984) 10, S. 619-623.

- WIE87 Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1987.
- WIE96 Wiendahl, H.-P., Fastabend, H., Helms, K., Jäger, M.: Zukünftige PPS-Systeme müssen Logistik-Netzwerke beherrschen. Industrie Management. Special. PPS Management (1996) 12, S. P6-P11.
- WIE97a Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 4. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1997.
- WIE97b Wiendahl, H.-P., Köhrmann, Krüger, T.: Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung für Produktionssysteme. ZWF 92 (1997) 3, S. 100-103.
- WIE97c Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1997.
- WIE98a Wiendahl, H.-P., Köhrmann, C.: International Strategies used for Availability Optimisation of Assembly Systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies 14 (1998) 9, S. 686-692.
- WIE98b Wiendahl, H.-P., Evers, K.: Load-Oriented Manufacturing Control. State of the Art and Methodology. Input-Output Analysis and Laplace Transforms in Material Requirements Planning, S. 75-96. Hrsg. Bogataj, L., Grubbström, R. Portorož: Faculty of Maritime Studies and Transport 1998.
- WIE98c Wiendahl, H.-P., Nyhuis, P.: Engpassorientierte Logistikanalyse. Methoden zur kurzfristigen Leistungssteigerung in Produktionsprozessen. München: Transfer-Centrum 1998.
- WIE01 Wiendahl, H.-P., Evers, K., Frackenpohl, D., Wolf, M.: Simulationsgestützte Fabrikentwicklung. Konzept zur variantenflexiblen Herstellung von Flugzeuggroßbauteilen. wt Werkstattstechnik 91 (2001) 4, S. 208-210.
- WIL96 Wilke, P.: Soft-Computing. Prinzip, Simulation und Anwendung. Habilitationsschrift U Erlangen-Nürnberg 1996.
- WIL98 Wildemann, H.: Die modulare Fabrik. Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. 5. Auflage. München: Transfer-Centrum-Verlag 1998.
- WIT94 Witte, Th., Claus, Th., Helling, K.: Simulation von Produktionssystemen mit SLAM. Eine praxisorientierte Einführung. Bonn, Paris, Reading: Addison-Wesley 1994.
- WOL98 Wollstadt, H.: Die Zukunft ist heute. Integriertes Computermodell für die digitale Fabrik. Der Betriebsleiter 39 (1998) Heft 6, Seite 30-31.
- ZÄP82 Zäpfel, G.: Produktionswirtschaft. Operatives Produktionsmanagement. Berlin, New York: de Gruyter Verlag 1982.

- ZÄP89a Zäpfel, G.: Strategisches Produktions-Management. Berlin, New York: de Gruyter Verlag 1989.
- ZÄP89b Zäpfel, G.: Taktisches Produktions-Management. Berlin, New York: de Gruyter Verlag 1989.
- ZEL90 Zelewski, S.: PPS-Expertensysteme für die Terminfeinplanung und -steuerung. Teil 1. Konzepte. Information Management 5 (1990) 1, S. 56-65.
- ZEL92 Zell, M.: Simulationsgestützte Fertigungssteuerung. Dissertation U Saarbrücken. München, Wien: Oldenbourg Verlag 1992.
- ZEN00 Zentes, J.: Ökonomie. Wettbewerbsstrategien und Logistik. Logistik-Management. Strategien, Konzepte, Praxisbeispiele, S. 3.03.02/1-3.03.02/12. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2000.
- ZIL95 Zilahi-Szabó M.: Kleines Lexikon der Informatik. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1995.
- ZIM86 Zimmermann, H.-J.: Operations Research. München: Oldenbourg Verlag 1986.
- ZÜH94 Zühlke, D., Schneider, G.: Bedienung moderner Produktionsanlagen. pa Produktionsautomatisierung 3 (1994) 3, S. 36-39.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Karsten Evers
Adresse	Emmerker Str. 23 31180 Giesen
Geburtsdatum	7. April 1967
Geburtsort	Hildesheim
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

Ausbildung

08/73 bis 06/86	Besuch der Grundschule und des Gymnasiums in Münster
07/86 bis 06/88	Soldat auf Zeit bei der Heeresfliegertruppe der Bundeswehr
07/88 bis 09/88	Grundpraktikum im Fahrzeugbau
10/88 bis 09/93 und 01/96 bis 03/96	Studium des Maschinenbaus mit der Vertiefungsrichtung Produktionstechnik an der Universität Hannover, einschließlich mehrerer Fachpraktika im In- und Ausland
10/93 bis 01/94	Bearbeitung eines europäischen Forschungsprojektes im Bereich Qualitätsmanagement an der University of Birmingham, GB
01/94 bis 12/95	Masterstudium des Industrial Engineering an der Purdue University, USA

Berufstätigkeit

01/94 bis 12/95	Graduate Assistant an der School of Industrial Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
04/96 bis 03/01	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
seit 04/01	Unternehmensberater bei A.T. Kearney GmbH, Düsseldorf