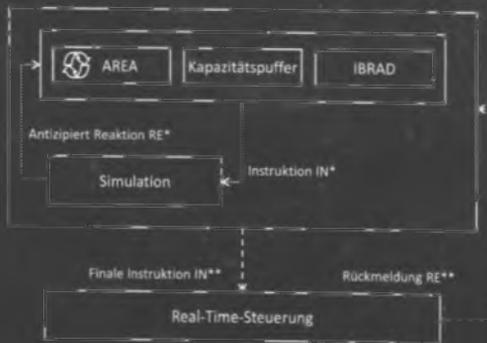


Christian Gahm

Robuste Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen



Konzeption und Umsetzung eines
Decision-Support-Systems

40

QP
550
G136

λογος

40/QP 550

G436

Robuste Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen

Konzeption und Umsetzung eines Decision-Support-Systems

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)
an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Augsburg

vorgelegt von

Dipl.-Inf. Christian Gahm

Erstgutachter: Prof. Dr. Axel Tuma
Zweitgutachter: Prof. Dr. Marco C. Meier
Vorsitzender der mündlichen Prüfung: Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl

Mündliche Prüfung: 30. November 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

D 3005
1/2

©Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2010

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-2746-4



Logos Verlag Berlin GmbH
Comeniushof, Gubener Str. 47,
10243 Berlin
Tel.: +49 (0)30 42 85 10 90
Fax: +49 (0)30 42 85 10 92
INTERNET: <http://www.logos-verlag.de>

Geleitwort

Die derzeitige Situation produzierender Unternehmen ist durch einen globalen Wettbewerb, dem Wandel der Marktbeziehungen und einen rasanten technologischen Fortschritt geprägt. Auf diese Entwicklung hat der deutsche Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau mit einer Segmentierung und Differenzierung seines Leistungsangebots reagiert, um so die heterogenen Kundenbedürfnisse nach individualisierten Produkten und individuellem Service zu befriedigen und so seine globale Spitzenposition zu behaupten. Eine kosteneffiziente Fertigung der Produkte ist dabei Grundvoraussetzung und definiert neben der Kundenorientierung die zweite zentrale Zielsetzung der Unternehmen. Um diese Zielsetzungen zu erreichen, muss bei der operativen Produktionsplanung die vorliegende Unsicherheit berücksichtigt werden.

Von besonderer Bedeutung für den Spezialmaschinenbau ist die Berücksichtigung von Unsicherheit deshalb, weil sie auf Grund verschiedener produkt- und produktionsprozessspezifischer Eigenschaften in erhöhtem Maße auftritt. Zur zielführenden Berücksichtigung der Unsicherheit werden in der Literatur verschiedene robuste Planungsmethoden und -konzepte diskutiert, um so Pläne berechnen zu können, welche die Eigenschaft der Robustheit aufweisen.

Vor diesem Hintergrund entwickelt Herr Gahm in seiner Dissertationsschrift einen Planungsansatz für die robuste Ressourcenbelegungsplanung im Spezialmaschinenbau. Dieser Planungsansatz umfasst dabei ein Konzept zur Integration der Ressourcenbelegungsplanung in die Gesamtplanungsaufgabe des Unternehmens, eine robuste Planungsmethode, welche die Unsicherheit durch Kapazitätspuffer antizipiert, und ein heuristisches Lösungsverfahren zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans. Bemerkenswert ist, dass Herr Gahm nicht nur einen umfassenden Planungsansatz entwirft, sondern auch dessen informationstechnische Umsetzung als Decision-Support-System beschreibt und anhand der Daten eines Unternehmens aus der Luftfahrtindustrie evaluiert. Die Ergebnisse belegen zum einen große Einsparpotentiale und zeigen zum anderen wichtige Erkenntnisse bezüglich der Anwendung robuster Planungsmethoden. Damit liefert die Arbeit von Herrn Gahm einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der

betriebswirtschaftlichen Forschung.

Ich wünsche der Schrift eine weite Verbreitung und Wirkung auf die Weiterentwicklung des Production Managements in Wissenschaft und Praxis.

Prof. Dr. Axel Tuma

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist Ergebnis meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Production & Supply Chain Management an der Universität Augsburg. Die Entstehung dieses Buches wäre nicht ohne die großartige Hilfe vieler Menschen möglich gewesen, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Zuallererst gilt mein Dank Prof. Dr. Axel Tuma, der mir eine äußerst lehrreiche und interessante Zeit am Lehrstuhl ermöglicht und auch die notwendigen Freiräume für meine wissenschaftliche Entfaltung gegeben hat. Insbesondere möchte ich mich auch für die vielfältigen und wertvollen Erfahrungen von zahlreichen Praxisprojekten bedanken. Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr. Marco C. Meier für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl als Prüfungsvorsitzenden.

Bedanken möchte ich mich auch beim gesamten Lehrstuhl-Team, welches durch viele Diskussionen und besonders durch das sehr gute Arbeitsklima zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Besonderen Dank schulde ich meinem Kollegen und Freund Dominik Böhnlein, der meine Betätigung als Wissenschaftler zu „verantworten“ und mich auch während der Erstellung der Arbeit stets unterstützt hat. Weiterhin zu danken habe ich Gudrun Hänig und Melanie Stetter für das Lektorat meiner Arbeit.

Die großen Herausforderungen, die bei der Erstellung dieser Arbeit zu meistern waren, hätte ich jedoch nicht ohne den Rückhalt meiner Familie und Freunde bewältigen können. Dabei gilt mein Dank allen, die mir während schwieriger Zeiten zur Seite standen und insbesondere meiner Co-Autorin vergangener Werke. Für die vielfältige Unterstützung, Fürsorge und die Möglichkeit zu dieser Ausbildung möchte ich meinen Eltern Angelika und Hans Gahm ganz besonders danken.

Augsburg, Dezember 2010

Christian Gahm

I. Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	III
Vorwort	V
I. Inhaltsverzeichnis	VI
II. Abbildungsverzeichnis	IX
III. Tabellenverzeichnis	XI
IV. Abkürzungsverzeichnis	XII
V. Symbolverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Problemstellung	7
1.3 Vorgehensweise	9
2 Anforderungen und Ziele einer robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen	13
2.1 Einordnung der Ressourcenbelegungsplanung in die Supply Chain Planning Matrix .	13
2.2 Literaturüberblick zur operativen Produktionsplanung bei Einzelfertigung.....	17
2.3 Spezifikation des Anforderungsprofils	25
2.3.1 Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung.....	25
2.3.1.1 Planungsinhalte	25
2.3.1.2 Planungsvorgaben	27
2.3.1.3 Planreichweite (Planungshorizont)	28
2.3.1.4 Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad	30
2.3.2 Zielsystem der Ressourcenbelegungsplanung	35
2.4 Erweiterung der Ziele zur robusten Ressourcenbelegungsplanung	43
2.4.1 Unsicherheit bei der Ressourcenbelegungplanung	44
2.4.1.1 Informationsdynamik	46

2.4.1.2 Störungen.....	48
2.4.2 Robuste Planung.....	51
2.4.2.1 Robustheit und verwandte Eigenschaften.....	52
2.4.2.2 Kriterien zur Beurteilung der Robustheit.....	55
2.4.3 Ziele der robusten Ressourcenbelegungsplanung.....	60
3 Konzeption eines Planungsansatzes zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen.....	63
3.1 Analyse und Entwicklung von Konzepten für die robuste Ressourcenbelegungsplanung.....	63
3.1.1 Analyse allgemeiner Konzepte für robuste Planung.....	64
3.1.1.1 Hierarchische Planung.....	64
3.1.1.2 Rollierende Planung.....	70
3.1.1.3 Flexibilitätsplanung.....	75
3.1.2 Entwicklung eines Konzepts der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche.....	79
3.2 Analyse und Entwicklung von Methoden zur robusten Ressourcenbelegungsplanung.....	87
3.2.1 Analyse reaktiver und proaktiver Methoden.....	88
3.2.1.1 Reaktive Methoden.....	88
3.2.1.2 Proaktive Methoden.....	92
3.2.1.2.1 Einwertige bzw. indirekte Berücksichtigung der Unsicherheit.....	92
3.2.1.2.2 Mehrwertige bzw. direkte Berücksichtigung der Unsicherheit.....	97
3.2.2 Entwicklung einer proaktiven Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer.....	103
3.2.2.1 Festlegung der Kapazitätspuffer.....	106
3.2.2.2 Statistikbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer.....	110

3.2.2.3	Simulationsbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer	118
3.3	Analyse und Entwicklung von Verfahren zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans	124
3.3.1	Formulierung des Entscheidungsmodells	124
3.3.2	Literaturüberblick	127
3.3.3	Lösungsverfahren	130
3.4	Zusammenfassung.....	135
4	Umsetzung und Evaluation des Planungsansatzes für die robuste Ressourcenbelegungsplanung.....	139
4.1	Informationstechnische Umsetzung als Decision-Support-System	140
4.1.1	Aspekte der Implementierung	141
4.1.1.1	3-Schichten-Architektur	141
4.1.1.2	Komponenten und Schnittstellen	143
4.1.2	Simulationsmodell.....	149
4.1.2.1	Steuerungsnetzwerk – „ModelController“	149
4.1.2.2	Simulationsnetzwerk – „MainModel“	151
4.2	Evaluation des Planungsansatzes.....	155
4.2.1	Anwendungsfall.....	156
4.2.2	Ergebnisse.....	158
5	Zusammenfassung.....	165
VI.	Literaturverzeichnis	176

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bedeutung der Globalisierung für die Zukunft des deutschen Maschinenbaus ..	1
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Reihenmontage mit Montagestationen	5
Abbildung 3: Die Supply Chain Planning Matrix.....	14
Abbildung 4: Einflussgrößen (Inputfaktoren) der Ressourcenbelegungsplanung	17
Abbildung 5: Hierarchisches Framework nach Hans et al.....	24
Abbildung 6: Hierarchische Integration	26
Abbildung 7: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung nach Wiendahl	36
Abbildung 8: Minimierung der Durchlaufzeit vs. Maximierung der Starttermine.....	43
Abbildung 9: Robustheit und verwandte Eigenschaften	54
Abbildung 10: Kriterien zur Bewertung der Robustheit	55
Abbildung 11: Hierarchische Planung eines zweistufigen Systems	66
Abbildung 12: Schematischer Ablauf der rollierenden Planung.....	71
Abbildung 13: Schematische Darstellung der auftragsorientierten Planungsbereiche.....	81
Abbildung 14: Rollierende Planung mit auftragsorientierten Planungsbereichen.....	85
Abbildung 15: Abstrahierter Regelkreis zur Bestimmung der Kapazitätspuffer.....	109
Abbildung 16: „Iterative Backward Resource Allocation and Dispatching - IBRAD“	134
Abbildung 17: Übersicht des Planungsansatzes – Hierarchische Integration.....	136
Abbildung 18: Integration des Softwaremoduls in ein APS	139
Abbildung 19: RoRAP – Software-Architektur und Schnittstellen	141
Abbildung 20: RoRAP – Klassenmodell (Ausschnitt)	144
Abbildung 21: Funktionalitäten der Komponente „Scenario Management“ (Ausschnitt)	146
Abbildung 22: RoRAP – Benutzeroberfläche.....	148
Abbildung 23: RoRAP – „batch presetting“-Dialog	148
Abbildung 24: „ModellController“	150
Abbildung 25: Auftragsorientiertes Gantt-Diagramm des Ressourcenbelegungsplans	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 26: Simulationsmodell – „MainModel“ (Hauptnetzwerk).....	151
Abbildung 27: Simulationsmodell – „AssemblyStation“ (Subnetzwerk).....	153
Abbildung 28: Simulationsmodell – „AssemblyArea“ (Subnetzwerk).....	154
Abbildung 29: Allgemeiner Ablauf der Simulationsanalyse.....	155
Abbildung 30: Variabilität der Arbeitspakete (Box-Whisker-Plot).....	157

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auftragsorientierte Kennzahlen	123
Tabelle 2: Ressourcenorientierte Kennzahlen	123
Tabelle 3: Pufferkonfigurationen	159
Tabelle 4: Kennzahlen – Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit (Teil 1)	160
Tabelle 5: Kennzahlen – Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit (Teil 2)	160
Tabelle 6: Kennzahlen – Planungsrobustheit (Teil 1)	162
Tabelle 7: Kennzahlen – Planungsrobustheit (Teil 2)	162

IV. Abkürzungsverzeichnis

AC	Average-Case
APS	Advanced Planning System
AREA-F	Fixierter Bereich
AREA-O	Offener Bereich
ATO	Assemble-to-Order
abw.	abweichend
BC	Best-Case
CTO	Configure-to-Order
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DLZ	Durchlaufzeit
DSS	Decision-Support-System
durchs.	durchschnittlich
ETO	Engineer-to-Order
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise Resource Planning
GUI	Graphical User Interface (graphischen Benutzeroberfläche)
HFS	Hybrid-Flow-Shop
IBRAD	Iterative Backward Resource Allocation and Dispatching
JSP	Job-Shop-Problem
KPI	Key Performance Indicator
MTO	Make-to-Order
MTS	Make-to-Stock
Neupl.	Neuplanungen
OLAP	Online Analytical Processing
OLTP	Online Transaction Processing

Op.	Operation
PK	Pufferkonfiguration
RCCP	Rough-cut capacity planning
RCPSp	Resource-constrained project scheduling problem
RoRAP	Robust Ressource Allocation Planning
SCM	Supply Chain Management
SCP	Supply Chain Planning
ST	Station
UML	Unified Modeling Language
WiA	Ware in Arbeit
WIP	Work-in-Process
WC	Worst-Case
zw.	zwischen

V. Symbolverzeichnis

\emptyset	Durchschnitt
α	Zulässigkeitswahrscheinlichkeit
θ_s^{add}	Ausprägung des zusätzlichen Ressourcenbedarfs bzgl. Montagestation s
θ_s^{delay}	Ausprägung des verzögerten Ressourcenbedarfs bzgl. Montagestation s
θ_s^{end}	Ausprägung der Änderungen des frühesten Starttermins bzgl. Montagestation s
$\theta_s^{mat.add}$	Ausprägung des zusätzlichen Ressourcenbedarfs (auf Grund von Fehlteilen) bzgl. Montagestation s
$\theta_s^{mat.delay}$	Ausprägung des verzögerten Ressourcenbedarfs (auf Grund von Fehlteilen) bzgl. Montagestation s
θ_s'	Ausprägung der Schwankungen des Ressourcenangebots bzgl. Montagestation s
θ_s^{wp}	Ausprägung der Änderungen des Arbeitspakets bzgl. Montagestation s
ρ_s^{add}	Relatives Auftreten an zusätzlichem Ressourcenbedarf bzgl. Montagestation s
ρ_s^{delay}	Relatives Auftreten an verzögertem Ressourcenbedarf bzgl. Montagestation s
ρ_s^{end}	Relative Anzahl an Änderungen des frühesten Starttermins bzgl. Montagestation s
$\rho_s^{mat.add}$	Relatives Auftreten von zusätzlichem Ressourcenbedarf (auf Grund von Fehlteilen) bzgl. Montagestation s
$\rho_s^{mat.delay}$	Relatives Auftreten von verzögertem Ressourcenbedarf (auf Grund von Fehlteilen) bzgl. Montagestation s

ρ'_s	Relative Anzahl an Schwankungen des Ressourcenangebots bzgl. Montagestation s
ρ_s^{vp}	Relative Anzahl an Änderungen des Arbeitspakets bzgl. Montagestation s
τ	Zeitpunkt der Planung
ΔAF	Intervallgrenze des fixierten Bereichs
ΔAO	Intervallgrenze des offenen Bereichs
ΔFOR	Minimale Vorlaufzeit
AP	Ressourcenbelegungsplan (engl. „resource allocation plan“)
AP_z	Zu Szenario z gehörender Ressourcenbelegungsplan
ACT	Kennzeichnung von Kennzahlen der Montagedurchführung
$alloc_{jst}$	Zur Bearbeitung zugeordneter Anteil des Arbeitspakets einer Operation $o_{j,s}$ in Schicht t
$alloc_{jst}^{MAX}$	Maximaler Anteil des Arbeitspakets einer Operation $o_{j,s}$, der in Schicht t eingeplant werden kann
$aveEAR$	Durchschnittliche Verfrühungen eines Ressourcenbelegungsplans
$aveDiffFLT^{AP}$	Durchschnittliche Durchlaufzeitabweichung bezüglich der berechneten Durchlaufzeiten
$aveDiffFLT^{OPT}$	Durchschnittliche Durchlaufzeitabweichung bezüglich der minimalen Durchlaufzeiten
$aveDiffFLT_s^{OPT}$	Durchschnittliche Durchlaufzeitabweichung auf einer Montagestation s bezüglich der minimalen Durchlaufzeiten
$aveDiffFLT^{ST}$	Durchschnittliche Durchlaufzeitverbesserung bezüglich der Plandurchlaufzeiten
$aveDiffFLT_s^{ST}$	Durchschnittliche Durchlaufzeitverbesserung auf einer Montagestation s bezüglich der Plandurchlaufzeiten

Symbolverzeichnis

$aveC$	Durchschnittliche Abweichung von Montageendterminen
$aveNotCOMP_s$	Durchschnittlicher nicht kompensierbarer zusätzlicher Ressourcenbedarf von Montagestation s
$aveRES^{AREA-F}$	Durchschnittliche Anzahl an Neuplanungen von AREA-F
$aveST$	Durchschnittliche Abweichung von Montagestartterminen
$aveUTIL$	Durchschnittliche Auslastung aller Montagestationen
$aveUTIL_s$	Kumulierte durchschnittliche Auslastung einer Montagestation s
$c_{j,s}^{ACT}$	Tatsächlicher Montageendtermin von Operation $o_{j,s}$
$c_{j,s}^{AP}$	Montageendtermin von Operation $o_{j,s}$ in Ressourcenbelegungsplan AP
$c_{j,s}^{AP-FIX}$	Fixierter Montageendtermin von Operation $o_{j,s}$ in Ressourcenbelegungsplan AP
$c_{j,s}^{MAX}$	Spätester Montageendtermin von Operation $o_{j,s}$
$cb_{j,s}$	Kapazitätspuffer einer Operation $o_{j,s}$
dev	Quotient der Termineinhaltung
dev_j	Terminabweichung (Verfrühung/Verspätung) eines Auftrags j
D	Planabstand
$D^{F,D}$	Planabstand bei simultaner Planung von AREA-F und AREA-O
D^O	Planabstand bei Planung von AREA-F
$diffC$	Anzahl an Abweichungen von Montageendterminen
$diffFLT_j^{OPT}$	Durchlaufzeitabweichung eines Auftrags j bezüglich seiner minimalen Durchlaufzeit
$diffFLT_{j,s}^{OPT}$	Durchlaufzeitabweichung einer Operation $o_{j,s}$ bezüglich ihrer minimalen Durchlaufzeit

$diffFLT_j^{ST}$	Durchlaufzeitverbesserung eines Auftrags j bezüglich seiner Plandurchlaufzeit
$diffFLT_{j,s}^{ST}$	Durchlaufzeitverbesserung einer Operation $o_{j,s}$ bezüglich ihrer Plandurchlaufzeit
$diffST$	Anzahl an Abweichungen von Montagestartterminen
$diffUTIL_s$	Differenz der geplanten und der tatsächlichen durchschnittlichen Ressourcenauslastung einer Montagestation s
dl_j	Fertigstellungstermin eines Auftrags j
EAR_j	Verfrühung eines Auftrags j
$EARL$	Anzahl der Überschreitungen von frühesten Startterminen
$esd_{j,s}$	Frühester Starttermin (Materialverfügbarkeitstermin) von Operation $o_{j,s}$
$esd_{j,s}^{FIX}$	Fixierter frühester Starttermin (Materialverfügbarkeitstermin) von Operation $o_{j,s}$
f_j^{ACT}	Tatsächliche Durchlaufzeit eines Auftrags j
$f_{j,s}^{ACT}$	Tatsächliche Durchlaufzeit von Operation $o_{j,s}$
f_j^{AP}	Durchlaufzeit eines Auftrags j in Ressourcenbelegungsplan AP
$f_{j,s}^{AP}$	Durchlaufzeit von Operation $o_{j,s}$ in Ressourcenbelegungsplan AP
f_j^{AP-FIX}	Fixierte Durchlaufzeit eines Auftrags j in Ressourcenbelegungsplan AP
$f_{j,s}^{AP-FIX}$	Fixierte Durchlaufzeit von Operation $o_{j,s}$ in Ressourcenbelegungsplan AP
f_j^{MIN}	Minimale Durchlaufzeit eines Auftrags j
$f_{j,s}^{MIN}$	Minimale Durchlaufzeit von Operation $o_{j,s}$
f_j^{PLAN}	Plandurchlaufzeiten eines Auftrags j
$f_{j,s}^{PLAN}$	Plandurchlaufzeiten von Operation $o_{j,s}$
$i_{j,s,t}$	Bearbeitungsintensität einer Operation $o_{j,s}$ in Schicht t

i_s^{MAX}	Maximale Bearbeitungsintensität der Montagestation s
$isDiff_{j,s}$	Start- bzw. Endtermin einer Operation $o_{j,s}$ unterscheiden sich
$isEarl_j$	Zu früher Montagebeginn von Operation $o_{j,s}$
$isLate_j$	Verspätung von Auftrag j
$isOver_{s,t}$	Überauslastung auf einer Montagestation s in Schicht t
J	Anzahl aller Aufträge
j	Index eines (Montage-)Auftrags
$LATE$	Anzahl verspäteter Aufträge
$IB_{j,s}$	Linke Grenze des Einlastzeitfensters von Operation $o_{j,s}$
$notCOMP_s$	Anzahl an unvollständigen Kompensationen zusätzlicher Ressourcenbedarfe von Montagestation s
$O_{s,t}^{active}$	Menge der in Schicht t auf Station s aktiven Operationen
$OVER$	Anzahl der Überschreitungen des Ressourcenangebots
$o_{j,s}$	Montageoperationen eines Auftrags j auf einer Montagestation s
PSC	Planungsszenario
p	Periode
p_z	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios z
$priority_{j,s}$	Einlastpriorität
$r_{s,t}$	Ressourcenangebot der Montagestation s in der Schicht t
$res_z(AP)$	Ergebnis eines Ressourcenbelegungsplans AP bezüglich eines Szenarios z
$res_z^*(AP)$	Optimales Ergebnis eines Ressourcenbelegungsplans AP bezüglich eines Szenarios z
$rB_{j,s}$	Rechte Grenze des Einlastzeitfensters von Operation $o_{j,s}$
S	Anzahl an Montagestationen

$SiSC$	Simulationsszenario
s	Index einer Montagestation
$slack_{j,s}$	„slack“ von Operation $o_{j,s}$
$st_{j,s}^{ACT}$	Tatsächlicher Montagestarttermin von Operation $o_{j,s}$
$st_{j,s}^{AP}$	Montagestarttermin von Operation $o_{j,s}$ in Ressourcenbelegungsplan AP
$st_{j,s}^{AP-Fix}$	Fixierte Montagestarttermin von Operation $o_{j,s}$ in Ressourcenbelegungsplan AP
$st_{j,s}^{MIN}$	Minimaler (frühester) Montagestarttermin von Operation $o_{j,s}$
T	Planreichweite (Planungshorizont)
T_{Ges}	Gesamtplanungsreichweite
t	Index einer Schicht
th_i^{cb}	Grenzwert einer Montagestation s der definiert, bis zu welchem Grad zusätzliche Ressourcenbedarfe mit dem Kapazitätspuffer verrechnet werden dürfen
$u_{s,t}^{ACT}$	Tatsächlich genutztes Ressourcenangebot der Montagestation s in der Schicht t
$u_{s,t}^{AP}$	Genutztes Ressourcenangebot der Montagestation s in der Schicht t in Ressourcenbelegungsplan AP
w_s^{MAX}	Maximal zulässige Anzahl an Mitarbeitern, die auf Montagestation s eine Operation gleichzeitig bearbeiten können
$wp_{j,s}$	Arbeitspaket einer Operation $o_{j,s}$
$wp_{j,s}^{cb}$	Gesamter Ressourcenbedarf (Arbeitspaket und Kapazitätspuffer) einer Operation $o_{j,s}$
Z	Anzahl an Szenarien

z

Index eines Szenarios

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Eine Analyse der Rahmenbedingungen produzierender Unternehmen zeigt, dass die Anforderungen an die Unternehmen und deren Management enorm gestiegen sind und sich im Zuge der Globalisierung, dem Wandel der Marktbeziehungen und dem technologischen Fortschritt die Wettbewerbssituation weltweit verschärft und zu einem starken Druck zur Kostenreduktion geführt hat.¹ Der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt hat dazu geführt, dass die Unternehmen die Bedürfnisse des Kunden zum zentralen Aspekt ihres Handelns bestimmt haben und sich die Kundenorientierung neben der Kostenreduktion zum zweiten entscheidenden Wettbewerbsfaktor entwickelt hat. Ziel der Kundenorientierung ist es, die zunehmend heterogenen Kundenbedürfnisse nach individualisierten Produkten, geringen Preisen, hoher Qualität, kurzer Lieferzeit, hoher Liefertreue und individuellem Service zu befriedigen und so eine hohe Kundenzufriedenheit zu erreichen. Diese Überlegungen treffen auch auf den deutschen Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau zu.



Abbildung 1: Bedeutung der Globalisierung für die Zukunft des deutschen Maschinenbaus²

¹ Vgl. Christopher (2005): S. 28 ff., Stadler (2008) und Finkler (2006).

² Siehe Brecher (30.10.2008). Zu diesen Schlussfolgerungen kommen auch Vieweg et al. (2002), Evers (2002) und Schuh (2007).

Aus den in Abbildung 1 dargestellten Herausforderungen für das einzelne Unternehmen des Maschinenbaus lassen sich demzufolge zwei grundlegende Ansätze zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit auf den globalen Märkten ableiten:

- Individualisierung und Segmentierung des Leistungsangebots (Scope)
- Reduzierung der Kosten durch Ausnutzen von Größeneffekten (Scale)

Traditionell besetzen deutsche Unternehmen im Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau die Position eines Premiumanbieters, der ein hochkomplexes technologisches Spitzenprodukt für bestimmte Marktsegmente anbietet. Zur weiteren Differenzierung werden bei der Konstruktion und Produktion auch individuelle Kundenbedürfnisse und spezielle Anforderungen an das Produkt berücksichtigt, es werden **Spezialmaschinen**³ nach Kundenspezifikation gefertigt.⁴ Spezialmaschinen lassen sich dabei durch folgende Eigenschaften charakterisieren:

- hohe Produktkomplexität
- aktuellster Stand der Technik
- hohe Kundenspezifität
- hoher manueller Aufwand (geringe Automation)
- lange Montagedauer (mehrere Monate)
- hohe Wertigkeit (mehrere Millionen Euro)

³ Der Begriff „Spezialmaschine“ wird in Literatur und Praxis unterschiedlich gebraucht. Innerhalb dieser Arbeit wird damit eine „Maschine“ bezeichnet, welche nach kundenspezifischen Anforderungen gefertigt wird und bestimmte Eigenschaften aufweist. Dabei muss es sich nicht zwangsläufig um eine Maschine im originären Sinne handeln, auch Anlagen und Fahrzeuge, welche die entsprechenden Eigenschaften aufweisen sind darunter zu verstehen.

⁴ Diese Art der Fertigung ist nach ihrem Repetitionstyp in den Bereich der *Einzelfertigung* einzuordnen – vgl. Schneeweiß (2002): S. 11. Nach Angaben des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. überwiegt im Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau die *Einzelfertigung* (65 bis 70%). *Serienfertigung* nimmt einen Anteil von maximal 35% ein, wohingegen *Massenfertigung* kaum bis gar nicht anzutreffen ist – vgl. Steven (1994): S. 137. Bezüglich der Spezialmaschinen kann auch von einer *Einzelfertigung* im strengen Sinne gesprochen werden.

- lange Vorlaufzeiten für Leitteile⁵ (mehrere Monate)

Diese Art von Produkt gilt es nach obigen Überlegungen unter den Gesichtspunkten der Minimierung der Kosten und der Maximierung der Kundenzufriedenheit zu fertigen. Dabei erweisen sich jedoch obige Eigenschaften als problematisch in Bezug auf den Leistungserstellungsprozess. So geht die Herstellung der kundenindividuellen Spezialmaschinen häufig zu Lasten effizienter und leistungsfähiger Prozesse, was neben erhöhten Produktionskosten (Kostensenkungen durch Skaleneffekte sind zum Beispiel kaum zu realisieren) auch zu Problemen bezüglich der Erreichung einer hohen Kundenzufriedenheit führt. Eine Lösung dieser Problematik besteht in einer verbesserten Planung der Leistungserstellungspotentiale und -prozesse auf strategischer sowie taktischer Ebene und im Einsatz innovativer Konzepte und Methoden zur Planung der Prozessdurchführung auf operativer Ebene.⁶

Zur Umsetzung einer kundenauftragsspezifischen Produktion existieren grundsätzlich verschiedene Strategien (Prinzipien), die unterschiedliche Zeitpunkte vorsehen, an denen die Kundenspezifität Einfluss auf den Prozess der Leistungserstellung nimmt. Diese als Entkopplungspunkte⁷ bezeichneten Zeitpunkte definieren den Übergang zwischen der kundenanonymen und der kundenspezifischen Produktion. In der Vergangenheit wurden Spezialmaschinen zumeist nach dem Prinzip *Engineer-to-Order* (ETO) oder *Make-to-Order* (MTO) gefertigt.⁸ Als problematisch haben sich hierbei die lange Lieferzeit und die hohe Komplexität bei der Abstimmung der Prozesse erwiesen. In Folge dessen ist man dazu

⁵ Als Leitteile werden in dieser Arbeit Komponenten und Teile bezeichnet, die für die Fertigung einer Spezialmaschine unverzichtbar und von Kundenspezifikation unabhängig sind sowie eine hohe Wertigkeit besitzen.

⁶ Das Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) haben analog zu diesen Überlegungen das „produktionstechnische Polylemma“ abgeleitet. Hierbei werden die konträren Zielsetzungen „Scale“ und „Scope“ bzw. „Planorientierung“ und „Wertorientierung“ gegenübergestellt. Die Reduzierung dieser Dilemmata wird als Grundvoraussetzung für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen genannt. Zur Lösung des Polylemmas werden für die unterschiedlichen Zielsetzungen „Individualisierte Produktion“, „Produktion auf hohem technischen Niveau“, „Selbstoptimierende Produktion“ und „Virtuelle Produktion“ vorgeschlagen – vgl. Brecher (30.10.2008): S. 7-19.

⁷ Auch als „(customer order) decoupling point“ oder „order penetration point“ bezeichnet. Ein Entkopplungspunkt definiert „die letzte Stelle im Materialfluss, ab der weitere Bearbeitungsschritte an einem Endprodukt bzw. an dessen Vorprodukten oder ein Ortswechsel dieser Produkte nur ausgeführt werden, wenn dafür ein Kundenauftrag vorliegt“ – vgl. Meyr (2003). Vergleiche hierzu auch Hoekstra und Romme (1992) sowie Fleischmann und Meyr (2004).

⁸ Zur Lage von Entkopplungspunkten im Spezialmaschinenbau vergleiche Fleischmann und Meyr (2004): S. 302.

übergegangen, die Kundenspezifität durch eine **kundenindividuelle Montage** von Komponenten und Teilen zu erlangen (*Assemble-to-Order* – ATO oder *Configure-to-Order* – CTO). Die Komplexität des Produkts lässt diese Art der Herstellung von Spezialmaschinen allerdings nicht in einer reinen Form zu, was zu einer Vermischung und Kombination der Prinzipien führt: ein möglichst großer Anteil der Kundenspezifität soll durch die kundenspezifische Montage von Komponenten und Teilen realisiert werden (ATO/CTO). Dabei können die benötigten Materialien durch andere Unternehmenseinheiten gefertigt oder von externen Zulieferern beschafft werden, wobei diese wiederum Standardkomponenten sein können, die nach dem *Make-to-Stock* Prinzip gefertigt (MTS) werden oder kundenindividuell gefertigt werden (MTO) bzw. sogar kundenspezifisch konstruiert und gefertigt werden (ETO).

Mit der Verlagerung einzelner Produktionsstufen auf andere Unternehmen ist eine Verringerung der Fertigungstiefe im eigenen Unternehmen verbunden. Durch diese, in Literatur und Praxis präferierte, Konzentration auf Kernkompetenzen können Skaleneffekte erzielt werden, wenn beispielsweise die Fertigung der Komponenten und Teile beim internen oder externen Zulieferer nach dem MTS-Prinzip erfolgen kann. Auf Grund dieser Reduzierung der Fertigungstiefe, dem hohen Anteil der Montagekosten an den Herstellungskosten am Standort Deutschland (durchschnittlich 25%) und dem Ziel einer hohen Kundenzufriedenheit, rückt die (End-)Montage mehr und mehr in den Fokus jedes Unternehmens.⁹ Zu berücksichtigen ist, dass die Komplexität des Produkts in Verbindung mit der Kundenspezifität und der stetigen technologischen Weiterentwicklung verhindern, dass bei der Montage der Spezialmaschine von Standardprozessen und -tätigkeiten ausgegangen werden kann, und somit auch bei einer ATO/CTO-Strategie von einer hohen Prozesskomplexität in der Montage auszugehen ist.

Die Durchführung der Montageprozesse kann grundsätzlich auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen.¹⁰ Die Montage von Spezialmaschinen ist gekennzeichnet durch eine *Anordnung nach dem Objektprinzip* (Anordnung der Arbeitssysteme nach den Arbeitsplänen des Produkts) und einen *einheitlichen Materialfluss*, was bedeutet, dass der Montageablauf

⁹ Vgl. Evers (2002): S. 1 ff.

¹⁰ Die hier vorgenommene Einordnung des Produktionssystems basiert auf der von Schneeweiß (2002). Vergleiche hierzu auch Günther und Tempelmeier (2007).

grundsätzlich für jedes konfigurierte Produkt die gleiche Reihenfolge besitzt.¹¹ Die Reihenfolge der Arbeitsschritte ist dabei grundsätzlich identisch. Die Montageabläufe unterscheiden sich von Spezialmaschine zu Spezialmaschine nur durch die durchzuführenden Arbeitsschritte (Arbeitsvorgänge der Arbeitspläne) sowie Komponenten und Teile (Stücklisten). Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Montage mit zeitlicher Bindung (Taktfertigung) auf Grund der heterogenen Arbeitspläne und des geringen Automatisierungsgrads der Montage nicht zielführend ist.¹² Aus diesen Überlegungen lässt sich als erfolgversprechendste Form der Durchführung der Montage von Spezialmaschinen die **Reihenmontage** ableiten, die auf Grund der zeitlichen Entkopplung der einzelnen Bearbeitungsschritte die notwendige Flexibilität gewährleistet.



Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Reihenmontage mit Montagestationen

Diese strategische Grundausrichtung der Herstellung von Spezialmaschinen (ATO/CTO) und die Struktur des Produktionssystems (Reihenmontage) definieren die grundlegenden Rahmenbedingungen für die Prozessdurchführung auf operativer Ebene und damit auch deren Planung. Diese Planung ist Aufgabe der *operativen Produktionsplanung und -steuerung*. Grundsätzliches Ziel der operativen Produktionsplanung und -steuerung ist dabei die Ausschöpfung der durch die vorangegangenen Entscheidungen auf strategischer und taktischer Ebene zur Verfügung gestellten Leistungspotentiale, um die Zielsetzungen des Unternehmens zu erreichen.¹³ Als (noch wenig) konkrete Aufgaben der operativen Produktionsplanung sind unter anderem die Festlegung des Produktionsprogramms, die Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Planung der Produktionsdurchführung zu nennen. Für die planmäßige Durchführung der Produktion zeichnet sich die Produktionssteuerung

¹¹ z.B. Montage der Baseinheit – mechanische Grundausstattung – elektronische Grundausstattung – Basistests – mechanische Sonderausstattung – elektronische Sonderausstattung – Test der Sonderausstattung – Feinabstimmung – Qualitätskontrolle.

¹² Diese Untersuchungen bezüglich Fließmontage haben gezeigt, dass deren Effektivität und Produktivität von vielfältigen Faktoren abhängen, die bei der Montage von Spezialmaschinen nicht gegeben sind. In mehreren simulationsbasierten Analysen wurde gezeigt, dass die „[...] Fertigung variantenreicher Maschinen und Anlagen in Klein- oder Mittelserien [...] prinzipiell am wenigsten für eine Fließfertigung geeignet“ ist – siehe Schmidt et al. (2009): S. 3. Vergleiche auch Flemming et al. (2006).

¹³ Vgl. Günther und Tempelmeier (2007): S. 141 sowie Schneider et al. (2005): S. 21.

verantwortlich. Insbesondere für die Planung der Reihenmontage von Spezialmaschinen lässt sich als Planungsaufgabe die **Ressourcenbelegungsplanung** definieren, welche mehrere der genannten Aufgaben umfasst.¹⁴ Diese integriert neben der Termin- und Kapazitätsplanung auch die Planung der Produktionsdurchführung. Auch Aufgaben aus dem Bereich der Produktionssteuerung können integriert werden. Die Ressourcenbelegungsplanung besetzt damit eine zentrale Rolle innerhalb der operativen Produktionsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen.

Auf Grund der zentralen Bedeutung der Endmontage für das Unternehmen und damit der Ressourcenbelegungsplanung bedarf es der besonderen Beachtung eines der grundlegenden Probleme jeder Planung: der **Unsicherheit** über die planungsrelevanten Informationen.¹⁵ Diese Problematik trifft insbesondere auf die Ressourcenbelegungsplanung bei einer Reihenmontage von Spezialmaschinen zu. Die genannten Eigenschaften der Spezialmaschine (z.B. die Produktkomplexität, die Kundenspezifität oder die stetige technologische Neu- und Weiterentwicklung des Produkts) führen beispielsweise dazu, dass sich die Bearbeitungszeiten oder die Anzahl der Montageschritte ändern und damit als unsicher einzuschätzen sind. Insbesondere die lange Durchlaufzeit in der Montage verstärkt diese Unsicherheit, da hieraus eine erhöhte **Informationsdynamik** der Planungsdaten folgt. Zudem besteht das Risiko, dass wie in jeder Fertigung auch bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen **Störungen** während der Produktionsdurchführung auftreten.¹⁶ Der Berücksichtigung von Störungen bei der Ressourcenbelegungsplanung muss auch deshalb besondere Aufmerksamkeit zu Teil werden, da in der Endmontage nicht nur Störungen in der Montage selbst auftreten, sondern sich auch Störungen auswirken, deren Ursache nicht in der Montage selbst liegen und somit nicht direkt beeinflussbar sind (z.B. durch

¹⁴ Die Integration verschiedener Planungsaufgaben wird auch als Querschnittsfunktion bezeichnet – vgl. Evers (2002): S. 13. Zur hier vorgenommenen Zusammenfassung von Planungsaufgaben vergleiche insbesondere Drexel et al. (1994b).

¹⁵ Nach Schneeweiß „[...] kann man Planung als Gestaltung zukünftiger Ereignisse, d.h. als gedankliche Vorwegnahme künftigen Handelns begreifen“ – vgl. Schneeweiß (1991): S. 1. In diesem Bezug auf die Zukunft liegt auch die Unsicherheit der planungsrelevanten Informationen begründet, da zukünftige Entwicklungen grundsätzlich nicht mit hundertprozentiger Gewissheit vorhergesagt werden können. Vergleiche zum Begriff der Unsicherheit auch Jacob (1974b), Schneeweiß (1988), Berry (1993), Zimmermann (2000) sowie Scholl (2001): S. 90.

¹⁶ Störungen äußern sich beispielsweise in einer Erhöhung der Bearbeitungszeit oder zusätzlichen Arbeitsschritten – vgl. Lehmann (1992): S. 2 ff.

Qualitätsmängel, welche erst bei der Montage bemerkt werden).¹⁷ Von besonderer Bedeutung für die Endmontage der Spezialmaschinen sind Informationsdynamik und Störungen nicht zuletzt deshalb, weil sie sich unmittelbar auf den Liefertermin und damit die Kundenzufriedenheit auswirken können. Zur Bewältigung dieser Unsicherheitsproblematik wird in der Literatur unter anderem **robuste Planung** vorgeschlagen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Unternehmen des Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbaus auf die veränderte globale Wettbewerbssituation mit einer Differenzierungsstrategie reagiert haben, welche darauf abzielt ein hochkomplexes technologisches Spitzenprodukt nach Kundenbedürfnissen zu montieren. Die Montage dieser Spezialmaschinen definiert dabei mitunter sehr spezifische Anforderungen und Ziele an die operative Produktionsplanung und -steuerung. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Planungsansatz zur **robusten Ressourcenbelegungsplanung der Reihenmontage von Spezialmaschinen** zu entwickeln, welcher die genannten Anforderungen erfüllt, die Unternehmensziele der Kostenreduktion und Kundenzufriedenheit adressiert sowie die vorherrschende Unsicherheit bei der Planung berücksichtigt.

1.2 Problemstellung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines robusten Planungsansatzes zur Ressourcenbelegungsplanung. Dabei gilt es einen Ansatz zu entwickeln, welcher die Minimierung der Kosten und die Maximierung der Kundenzufriedenheit (insbesondere der Termintreue) verfolgt, und dabei die Unsicherheit über die der Planung zu Grunde liegenden Informationen explizit berücksichtigt. Um diesen Anforderungen und Zielen zu entsprechen, sind ein Konzept, welches die Ressourcenbelegungsplanung in den Kontext aller unternehmerischen Planungsprozesse einbindet, eine Methode, welche der Zielsetzung nach einer robusten Ressourcenbelegungsplanung Rechnung trägt, und ein Verfahren zur Berechnung dieses Plans zu entwickeln. Eine zusätzliche Anforderung an den Planungsansatz ist die Forderung nach seiner Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis.¹⁸

¹⁷ Vgl. Lehmann (1992): S. 1 ff.

¹⁸ Die Forderung nach der Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis impliziert die Forderung nach einem transparenten, nachvollziehbaren Planungsansatz (bzw. seiner Konzepte und Methoden) zur Gewährleistung seiner Akzeptanz in der Montage und seine möglichst einfache informationstechnische Umsetzbarkeit.

Grundsätzliche Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung ist die Sicherstellung der termingerechten Durchführung der Montageaufträge unter Berücksichtigung des durch Montageressourcen zur Verfügung gestellten Kapazitätsangebots.¹⁹ Bisherige Ansätze zur Produktionsplanung bei Einzel- oder Kleinserienfertigung adressieren zumeist eine Fertigung nach den Prinzipien MTO oder ETO, deren Produktionssystem nach dem Funktionsprinzip ausgelegt ist (Werkstattfertigung).²⁰ Da diese Annahme nicht auf die dargestellte Ausgangslage zutrifft, sondern eine ATO und Reihenfertigung vorliegen, muss ein neuer Ansatz zur Ressourcenbelegungsplanung entwickelt werden, welcher den grundlegenden Annahmen Rechnung trägt, die Besonderheiten der Montage von Spezialmaschinen berücksichtigt und die Ziele Kostenminimierung und Maximierung der Kundenzufriedenheit fokussiert. Dazu bedarf es, neben einer detaillierten **Spezifikation der Planungsaufgaben und -inhalte**, der Entwicklung eines adäquaten **Zielsystems**, welches die Ziele Kostenminimierung und Maximierung der Kundenzufriedenheit beinhaltet. Zur Realisierung dieser Ziele ist es auf Grund der oben beschriebenen Problematik der Unsicherheit unabdingbar, das Zielsystem um das **Ziel der Robustheit** zu erweitern.²¹

Die Analyse aktueller Konzepte zur robusten Planung zeigt, dass diese zwar grundsätzlich auf die dargestellte Ausgangslage anwendbar sind, jedoch problemspezifisch erweitert und angepasst werden müssen. Konsequenz dieser Analyse ist die Entwicklung eines **Konzepts der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche**, welches zum einen die Ressourcenbelegungsplanung im Sinne der hierarchischen Planung in den gesamten Planungsprozess des Unternehmens einbettet, und zum anderen durch eine rollierend ablaufende Planung gewährleistet, dass veränderte Informationen durch die Planung berücksichtigt werden. Dieses Konzept bildet wiederum den Rahmen, in dem die zu entwickelnde Planungsmethode die Planung durchzuführen hat.

¹⁹ Montageressourcen (im Falle der Montage von Spezialmaschine fast ausschließlich Mitarbeiter) stellen ein gewisses Kapazitätsangebot zur Verfügung, welches nicht ohne weiteres erweitert werden kann. Zum einen entstehen durch eine Erweiterung grundsätzlich zusätzliche Kosten. Zum anderen ist es nicht möglich, das Kapazitätsangebot kurzfristig zu erweitern, da die Anforderungen und der Spezialisierungsgrad der Tätigkeiten in der Montage von Spezialmaschinen so hoch sind, dass auf dem Arbeitsmarkt nur wenig Personal mit den notwendigen Qualifikationen und Kenntnissen zur Verfügung steht.

²⁰ Vgl. Drexel et al. (1994a), Carravilla und de Sousa (1995), Geselle (1997), Franck et al. (1997), Drexel und Kolisch (2000), Kolisch (2001) und Neureuther et al. (2004).

²¹ Robustheit ist dabei als eine bestimmte Eigenschaft von Plänen zu verstehen – vgl. Abschnitt 2.4.2.

Bei der Entwicklung einer Planungsmethode muss neben den Rahmenbedingungen und den Zielen insbesondere der Forderung nach Umsetzbarkeit und vor allem der Anwendbarkeit besondere Beachtung geschenkt werden. Unter Anwendbarkeit ist dabei zu verstehen, dass der erstellte Ressourcenbelegungsplan nicht nur realisierbar, sondern sein Zustandekommen auch transparent und nachvollziehbar ist, da sonst die Akzeptanz und damit die Durchführung nicht gewährleistet werden kann.²² Vor diesem Hintergrund werden proaktive und reaktive Methoden zur robusten Planung analysiert und ausgehend von dieser Analyse eine **proaktive Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer** entwickelt. Das Planungsproblem der robusten Ressourcenbelegungsplanung bzw. dessen Entscheidungsmodell kann in Folge dessen als deterministisches Korrekturmodell formuliert werden.

Zur Lösung dieses Entscheidungsmodells ist ein Verfahren zu entwickeln, bei dem die Ziele der Ressourcenbelegungsplanung mit einem akzeptablen Aufwand erreicht werden. Hierbei muss auf Grund der Komplexität des Planungsproblems zwischen der Güte des Ergebnisses und der Dauer zur Berechnung dieses Ergebnisses abgewogen werden. Die Dauer spielt dabei eine wichtige Rolle in Bezug auf die Akzeptanz und damit die erzielbaren Ergebnisse des gesamten Planungsansatzes. Unter diesen Gesichtspunkten und den vorgegebenen Zielen und Rahmenbedingungen wird ein effizientes, auf einer Kombination von Prioritätsregeln basierendes, **heuristisches Lösungsverfahren** entwickelt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der zu entwickelnde Planungsansatz zur robusten Ressourcenbelegungsplanung der Reihenmontage von Spezialmaschinen sowohl ein umfassendes Konzept zur Planungsdurchführung, eine Methode zur Erstellung von robusten Ressourcenbelegungsplänen als auch ein Verfahren zur Berechnung dieser Pläne umfassen muss.

1.3 Vorgehensweise

Der Aufbau der Arbeit lässt sich in drei Abschnitte untergliedern. Zunächst werden die Anforderungen und Ziele einer robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der

²² Vgl. MacCarthy und Wilson John R. (2001) sowie Fischer et al. (2008).

Reihenmontage von Spezialmaschinen spezifiziert. Im zweiten Teil wird dann ein Planungsansatz konzipiert, welcher basierend auf aktuellen Konzepten, Methoden und Verfahren zur robusten Planung, jeweils problemspezifische Weiter- und Neuentwicklungen beinhaltet. Im dritten Teil wird erläutert, wie sich der vorgestellte Planungsansatz innerhalb eines **Decision-Support-Systems** umsetzen lässt und anschließend anhand eines Anwendungsfalls evaluiert.

Die ersten beiden Hauptkapitel umfassen dabei die **Entwicklungsphase**, welche die folgenden Schritte umfasst:

- Anforderungen und Ziele einer robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen: Die Entwicklung eines Planungsansatzes erfordert zunächst die Einordnung der vorliegenden Problemstellung in den Kontext des *Supply Chain Planning*, um daraus – basierend auf aktuellen Planungsansätzen – die problemspezifischen Aufgaben und Ziele der Ressourcenbelegungsplanung abzuleiten und zu spezifizieren. Die nachfolgend diskutierte Berücksichtigung von Informationsdynamik und Störungen in der Planung resultiert in einer Erweiterung des Zielsystems um Kriterien zur Beurteilung der Robustheit eines Ressourcenbelegungsplans.
- Konzeption eines Planungsansatzes zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen: Ausgehend von der Analyse allgemein anerkannter Konzepte zur robusten Planung wird das Konzept der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche entwickelt, welches bisherige Konzepte erweitert und die Integration der Ressourcenbelegungsplanung in den Rahmen der operativen Produktionsplanung und -steuerung sowie deren rollierenden Ablauf beschreibt. Im Folgenden werden reaktive und proaktive Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Berechnung eines robusten Ressourcenbelegungsplans analysiert. Die daraus entwickelte Methode sieht eine indirekte Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer vor. Die Konfiguration dieser Kapazitätspuffer und die Überprüfung der Pläne bezüglich ihrer Robustheit basiert dabei auf statistik- bzw. simulationsbasierten Analysen. Ausgehend von der Spezifikation des deterministischen Korrekturmodells als Entscheidungsmodell der

Ressourcenbelegungsplanung werden zu dessen Lösung verschieden Lösungsverfahren diskutiert und anschließend ein heuristisches Lösungsverfahren entwickelt.

Das dritte Hauptkapitel dieser Arbeit beinhaltet die **Umsetzungs-** und **Evaluationsphase**:

- **Umsetzung und Evaluation des Planungsansatzes für die robuste Ressourcenbelegungsplanung:** Die informationstechnische Umsetzung des entwickelten Ansatzes als Decision Support System basiert auf einer 3-Schicht-Architektur, verfolgt einen komponentenbasierten Ansatz und stellt Schnittstellen zu dessen Integration in die betriebliche Systemlandschaft bereit. Zur simulationsbasierten Festlegung der Kapazitätspuffer und Analyse des Planungsansatzes wird ein generisches Simulationsmodell entwickelt. Die anschließende Evaluation des Ansatzes, seiner Planungsmethode und des Lösungsverfahrens dient der Abschätzung seines Potentials für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung und wird anhand realer Daten eines Unternehmens aus der Luftfahrtindustrie durchgeführt.

2 Anforderungen und Ziele einer robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen

Die Entwicklung eines Planungsansatzes zur Ressourcenbelegungsplanung erfordert zunächst deren Einordnung in die *Supply Chain Planning Matrix* (SCP-Matrix), um die Rahmenbedingungen und Einflüsse der Planung zu definieren. Die darauf aufbauende Spezifikation des Anforderungsprofils umfasst die Anforderungen und Ziele der Ressourcenbelegungsplanung. Zur Erweiterung des Zielsystems um Aspekte der Robustheit bedarf es vorab einer Klärung der Begrifflichkeiten Unsicherheit, Informationsdynamik und Störungen. Davon ausgehend werden dann Robustheit und verwandte Eigenschaften sowie unterschiedliche Kriterien zu deren Beurteilung in Bezug auf die robuste Ressourcenbelegungsplanung diskutiert.

2.1 Einordnung der Ressourcenbelegungsplanung in die Supply Chain Planning Matrix

Um eine genaue Spezifikation der Anforderungen und Ziele der Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen vornehmen zu können, müssen die die Planung beeinflussenden Größen (**Planungsvorgaben**) bestimmt werden. Hierzu wird die Ressourcenbelegungsplanung in die Supply Chain Planning Matrix, welche die unterschiedlichen Planungsaufgaben innerhalb eines Unternehmens in den zwei Dimensionen „Prozessbereich“ (Beschaffung, Produktion, Disposition oder Vertrieb) und „Planungshorizont“ (kurz-, mittel- oder langfristig) klassifiziert, eingeordnet.²³

Die langfristige Planung umfasst dabei Entscheidungen strategischer Natur, welche die Rahmenbedingungen für die zukünftige Entwicklung des Unternehmens bestimmen, und besitzt einen Planungshorizont von mehreren Jahren. Die Ressourcenbelegungsplanung beeinflusst sie durch Entscheidungen bezüglich des Supply Chain Typs (kundenindividuelle Auftragsfertigung nach dem ATO-Prinzip) und der Wahl des Produktionssystems

²³ Vgl. Abbildung 3 sowie Rhode et al. (2000), Fleischmann und Meyr (2003): S. 471 und Fleischmann et al. (2008). Die vorgenommene Einordnung betrachtet im Detail nur den Prozessbereich der Produktion bzw. die für die Ressourcenbelegungsplanung relevanten Planungsaufgaben der anderen Bereiche.

(Reihenmontage). Die mittelfristige Planungsebene bestimmt auf taktischer Ebene, wie die auf der strategischen Ebene festgelegten Ziele unter den dort definierten Rahmenbedingungen erreicht werden sollen. Für einen Planungshorizont zwischen sechs und 24 Monaten werden Vorgaben für die untergeordnete Planungsebene ermittelt. Im Prozessbereich der Produktion wird hier das Produktionsprogramm festgelegt und eine Kapazitätsplanung auf aggregierter Ebene durchgeführt. Die Planungen auf der kurzfristigen Ebene dienen der Planung der operativen Durchführung. Dabei gilt es, die durch vorangegangene Entscheidungen der strategischen bzw. taktischen Ebene geschaffenen Potentiale zielführend auszuschöpfen. Der Planungshorizont kann dabei von wenigen Tagen bis zu mehrere Monate reichen.

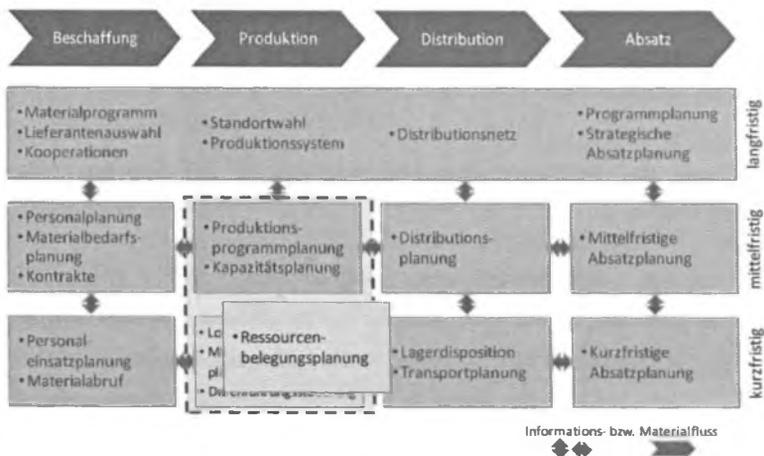


Abbildung 3: Die Supply Chain Planning Matrix²⁴

Die Aufgaben der mittel- und kurzfristigen Ebene im Bereich der Produktion werden unter dem Begriff der *operativen Produktionsplanung und -steuerung* zusammengefasst.²⁵

Als maßgeblich für die Anforderungen und Ziele der Ressourcenbelegungsplanung zeigt sich auf der übergeordneten, mittelfristigen/taktischen Ebene die *Produktionsprogrammplanung*

²⁴ In Anlehnung an Rhode et al. (2000). Die Ressourcenbelegungsplanung ist kein originärer Bestandteil der SCP-Matrix und ersetzt in der Abbildung als Querschnittsfunktion die Losgrößenplanung, die Maschinenbelegungsplanung sowie die Durchführungssteuerung. Eine detaillierte Darstellung der Aufgaben und Ziele der Ressourcenbelegungsplanung wird in Abschnitt 2.3 vorgenommen.

²⁵ In Abbildung 3 durch den gestrichelten Rahmen hervorgehoben.

sowie die *Kapazitätsplanung*. Die Kapazitätsplanung hat auf einer aggregierten Ebene dafür Sorge zu tragen, dass die vom Produktionsprogramm benötigte Kapazität grundsätzlich zur Verfügung steht und gegebenenfalls Bedarfe an die Personalplanung meldet. Die Produktionsprogrammplanung (engl. „Master Production Schedule – MPS“) ist innerhalb der Planungsaufgaben eines produzierenden Unternehmens von zentraler Bedeutung und definiert die wesentlichen Rahmenbedingungen der Ressourcenbelegungsplanung.²⁶ Ihre Hauptaufgabe besteht in der Festlegung der konkreten Endproduktmengen für den unmittelbar bevorstehenden Planungszeitraum. Um auf dieser Ebene bestmögliche Planungsergebnisse erzielen zu können, ist die konkrete Ausprägung dieser Planungsaufgabe – ebenso wie die Ressourcenbelegungsplanung – an den gegebenen Bedingungen (Spezialmaschinen, ATO, Reihenmontage) auszurichten.²⁷ Der Planungshorizont hängt dabei im Wesentlichen von der Vorlaufzeit (Wiederbeschaffungszeit) der Leiteile ab, welche 12 bis 24 Monate betragen kann, und deren Wiederbeschaffung demzufolge auch mittelfristig geplant werden muss. Die Folge dieses langen Planungshorizontes ist, dass die Produktionsprogrammplanung im Spezialmaschinenbau nicht ausschließlich auf Kundenaufträgen, sondern bis zu einem gewissen Zeitpunkt auf Prognosen (Plan- oder Prognoseaufträge) der mittel- und kurzfristigen Absatzplanung basiert, um die Lieferzeit für den Kunden nicht auf diese Zeitspanne festlegen zu müssen. Die lange Durchlaufzeit von Spezialmaschinen in der Montage (einige Wochen bis Monate) sollte bereits bei der Leiteileplanung berücksichtigt werden, da diese Teile eine hohe Wertigkeit aufweisen und sich demnach stark auf die Lagerhaltungs- bzw. Kapitalbindungskosten auswirken. In diesem Zusammenhang kann die Grundstruktur der Montage (Reihenfertigung) herangezogen werden, um Materialverfügbarkeitstermine für jede Station festzulegen. Ausgehend von einem Starttermin oder einem Fertigstellungstermin (definiert durch einen Kundenauslieferungstermin) können für jeden Plan- bzw. Kundenauftrag mittels Plandurchlaufzeiten die Materialverfügbarkeitstermine und der Fertigstellungstermin bzw. der Starttermin und die Gesamtdurchlaufzeit eines Auftrags bestimmt werden.²⁸ Resultat dieser Vorgehensweise ist ein Produktions-

²⁶ Vgl. Vollmann et al. (2005): S. 168–173.

²⁷ Vgl. Steven (1994): S. 128.

²⁸ Die Plandurchlaufzeiten schätzen (je Montagestation) die Anzahl an Tagen, die zur Montage benötigt werden, ab. Diese Abschätzung der Plandurchlaufzeiten basiert für Plan- und Kundenaufträge auf Vergangenheitswerten. Für die Planung der Planaufträge wird ein bestimmtes Produktportfolio unterstellt,

programmplan, der für jeden Auftrag (Plan- oder Kundenauftrag) so genannte **Montagezeitfenster** festlegt, welche für jede Montagestation durch den Materialverfügbarkeitstermin und durch einen Fertigstellungstermin für jeden Auftrag definiert sind.²⁹ Diese Zeitfenster bilden einen Rahmenterminplan, der von der Ressourcenbelegungsplanung einzuhalten ist und auch die Vorgaben für die Materialbedarfsplanung und insbesondere die Leitteileplanung darstellt.

Auf operativer Ebene muss von Seiten der Beschaffung gewährleistet werden, dass das richtige Material zu den Materialverfügbarkeitsterminen zur Verfügung steht, damit die durch die Ressourcenbelegungsplanung erstellten Pläne auch durchgeführt werden können. Von besonderer Bedeutung für die Ressourcenbelegungsplanung im Falle der Spezialmaschinenmontage ist die kurzfristige Absatzplanung, welche hierbei durch die „(Kunden-) Auftragsplanung“ ersetzt wird. Aufgabe der Auftragsplanung ist es, Kundenaufträge zu erfassen, in eine Produktspezifikation umzusetzen und davon ausgehend den Kundenauftrag einem Planauftrag des Produktionsprogrammplans zuzuordnen, dessen Fertigstellungstermin dem Kundenwuschtermin am besten entspricht und dessen Typ die benötigten Plandurchlaufzeiten beinhaltet. Erst die Spezifikation bzw. Konfiguration der Spezialmaschine durch einen Kunden determiniert durch die resultierenden Materialstücklisten und Arbeitspläne die exakten Arbeitsinhalte auf jeder Montagestation.³⁰ Abbildung 4 fasst die Einflussgrößen der Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen zusammen.

welches unterschiedliche Plandurchlaufzeiten für unterschiedliche Spezialmaschinen-Typen annimmt. Jeder Planauftrag besitzt also einen bestimmten Typ, welchem bestimmte Plandurchlaufzeiten zu Grunde liegen.

²⁹ Der Materialverfügbarkeitstermin der ersten Montagestation kennzeichnet dabei den Termin, zu dem die Fertigung frühestens beginnen darf, und wird deshalb auch als Fertigungsbeginn bezeichnet.

³⁰ Die Prozesse im Bereich der Distribution können vernachlässigt werden, da sie keinen direkten Einfluss auf die Ressourcenbelegungsplanung haben.

Anforderungen und Ziele

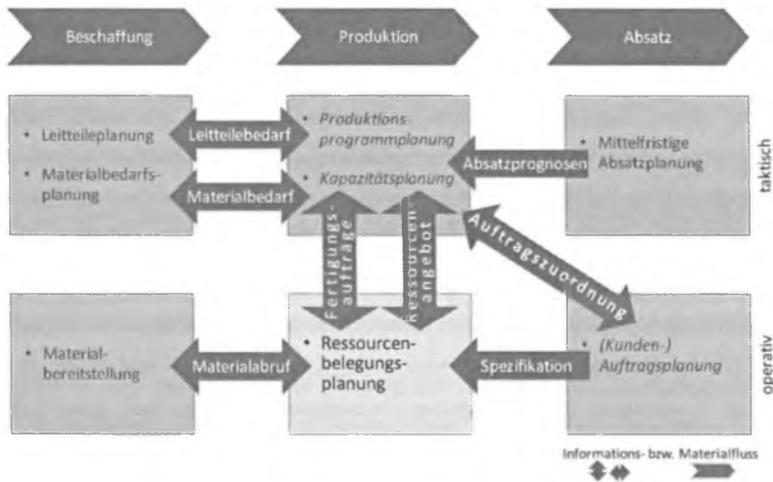


Abbildung 4: Einflussgrößen (Inputfaktoren) der Ressourcenbelegungsplanung³¹

Zur weiteren Analyse und nachfolgenden Spezifikation der Anforderungen und Ziele werden im Folgenden bisherige Ansätze zur operativen Produktionsplanung und -steuerung bei Einzelfertigung diskutiert.

2.2 Literaturüberblick zur operativen Produktionsplanung bei Einzelfertigung

In der wissenschaftlichen Literatur werden zur operativen Produktionsplanung und -steuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung unterschiedliche Planungsansätze vorgeschlagen.³²

Bereits 1994 haben Drexel et al.³³ in ihrer wegweisenden Veröffentlichung „Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme“ einen allgemeingültigen Ansatz zur Produktionsplanung und -steuerung formuliert, der die Schwächen bis dato existierender Konzepte beheben sollte. Grundlage dieses Ansatzes ist eine hierarchische Struktur, welche die Planungsebenen „Aggregierte Gesamtplanung“, „Kapazitiertes Hauptproduktions-

³¹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Reuter und Rohde (2008).

³² Allen gemein ist dabei eine grundsätzlich hierarchische Struktur, wie sie auch in der SCP-Matrix wiederzufinden ist. Zu hierarchische Planung vgl. Abschnitt 3.1.1.1.

³³ Vgl. Drexel et al. (1994b).

programm“, „Detaillierte Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung“, „Segmentspezifische Feinplanung“ und „Real-Time-Steuerung“ umfasst.³⁴ Aufgabe der „Aggregierten Gesamtplanung“ (engl. „aggregate production planning“) ist es, „die erlös- und kostenwirksamen Entscheidungen unternehmensweit für einen mittelfristigen Zeitraum entsprechend den Unternehmenszielen funktionsübergreifend zu koordinieren“.³⁵ Sie umfasst neben der Standort- und Produktionssystemwahl auch die Festlegung des Produktprogramms und die Absatzplanung. Die daran angeschlossene „kapazitierte Hauptproduktionsprogrammplanung“ (engl. „master production schedule“) basiert grundsätzlich auf kurzfristigen Absatzprognosen sowie Kundenaufträgen und dient der Aufstellung und Koordination der dezentralen Produktionsprogramme (auf Basis von Hauptezeugnissen) für alle Produktionssegmente (Teilefertigung, Komponentenfertigung, Vormontage, ...) innerhalb eines Werkes.³⁶ Ergebnis der Planung sind Fertigungsaufträge für alle Produktionssegmente sowie Ecktermine, welche den Übergang der Fertigungsaufträge zwischen den Fertigungssegmenten festlegen. Im Unterschied zu den beiden bisher erläuterten Planungsebenen werden die nachfolgenden Ebenen „Detaillierte Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung“, „Segmentspezifische Feinplanung“ und „Real-Time-Steuerung“ in Abhängigkeit der Gegebenheiten des Produktionssegments geplant. Auf Ebene der „Detaillierten Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung“ gilt es, die vorgegebenen Aufträge für Endprodukte in Fertigungsaufträge bzw. Losgrößen der jeweils benötigten Teile, Komponenten, etc. umzusetzen. Ziel ist es, unter Einhaltung der Ecktermine terminierte Fertigungsaufträge und Beschaffungsmengen festzulegen. Die „Segmentspezifische Feinplanung“ bildet die unterste Planungsebene und muss nach Drexl et al. notwendigerweise die jeweiligen Organisations-, Layout-, Materialfluss- und technischen Bedingungen des Produktionssegments widerspiegeln. Die Planungsinhalte sind von diesen Bedingungen unmittelbar abhängig und können deswegen auch nicht allgemein betrachtet werden. Für die vorliegende Problemstellung der Einzelfertigung schlagen Drexl et al. die

³⁴ Dem geeigneten Leser wird an dieser Stelle die Ähnlichkeit zwischen den genannten Ebenen und denen der SCP-Matrix nicht entgangen sein. Die Arbeit von Drexl et al. kann als diejenige angesehen werden, auf die die Inhalte der Matrix im Prozessbereich der Produktion zurückzuführen sind (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 6).

³⁵ Siehe Drexl et al. (1994b): S. 1031.

³⁶ Als Produktionssegmente werden hierbei einzelne Bereiche der Produktion angesehen die sich nach dem Organisationsprinzip (Anordnungstyp) unterscheiden (z.B. Baustellen-, Werkstatt-, Fließ- oder Zentrenfertigung). Bezogen auf die verschiedenen Produktionssegmente wird demzufolge eine segmentspezifische Planung durchgeführt.

Zusammenfassung der Planungsebenen „Detaillierte Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung“ und „Segmentspezifische Feinplanung“ zur „detaillierten Belegungsplanung von Montageressourcen“ vor (vgl. Abbildung 6 rechte Seite), da eine Losgrößenplanung bei einer Losgröße von eins nicht notwendig, sondern lediglich in vorgelagerten Produktionsstufen von Bedeutung ist. Zur Verdeutlichung dieser Herangehensweise wird auf den direkt nachfolgenden Ansatz verwiesen. Unmittelbar an die Feinplanung gekoppelt ist die „Real-Time-Steuerung“, welche die Informationen bezüglich des Produktionsfortschritts und der Kapazitätsverfügbarkeit zeitgerecht bereitzustellen hat.

Drexl et al.³⁷ sehen für die Planung der Montage von Werkzeugmaschinen drei Planungsebenen vor. Die „Grobplanungsebene“ ermittelt auf Basis eines Grobnetzplans mittels Netzplantechnik realistische Ecktermine und berücksichtigt dabei grob die verfügbaren Kapazitäten. Auf der zweiten Ebene, der „Feinplanungsebene“, werden einzelne Elemente des Grobnetzplans jeweils in einem Feinnetzplan mit Montagevorgängen abgebildet und eine Termin- und Kapazitätsplanung durchgeführt. Die Montagevorgänge besitzen jeweils eine zeitliche Dauer, definieren einen Kapazitätsbedarf (Personal, Betriebsmittel, Montageflächen) und können in der Regel unter Verwendung unterschiedlicher Arbeitspläne (Modi) ausgeführt werden (Vorgangsdauer und Kapazitätsbedarf hängen dabei direkt vom Modus ab). Die Planung selbst kann manuell oder automatisch erfolgen, wobei letztere Möglichkeit entweder eine termintreue oder eine kapazitätstreue Planung vorsieht und mittels zufallsbasierter Prioritätsregeln erfolgt. Letzte Ebene des Ansatzes bildet die „Werkstattebene“, welche auf Basis der Arbeitspläne und den darin enthaltenen zeitlichen Vorgaben den Montagefortschritt überwacht.

Carravilla et al.³⁸ schlagen im Falle der Einzelfertigung einen dreistufigen Ansatz, bestehend aus „Aggregate Planning“, „Master Production Schedule“ und „Optimized Loading“, vor. Das „Aggregate Planning“ ist dabei eher strategischer Natur und legt beispielsweise die Maschinenausstattung fest. Die nachfolgende Ebene des „Master Production Schedule“ ist ähnlich zu obiger Hauptproduktionsprogrammplanung definiert und legt unter anderem die

³⁷ Vgl. Drexl et al. (1994a).

³⁸ Vgl. Carravilla und de Sousa (1995).

Zuordnung von Aufträgen zu Produktionslinien fest. Die unterste Ebene bestimmt für den Zeitraum von einer Woche für jeden Produktionstag die Auftragsreihenfolge.

In seiner Arbeit „Hierarchische Produktionsplanung bei Werkstattproduktion“ stellt Geselle³⁹ einen segmentspezifischen Ansatz vor, der – ausgehend von der Hauptproduktionsprogrammplanung – die Ebenen „Losgrößenplanung“ und „Ressourceneinsatzplanung“ vorsieht. Auf Ebene der Losgrößenplanung findet eine kapazitierte mehrstufige Mehrprodukt-Losgrößenplanung (engl. „resource constrained material requirements planning“) statt, welche die durchzuführenden Fertigungsaufträge und zudem Bestellanforderungen für Teile und Komponenten festlegt. Aufgabe der Ressourceneinsatzplanung (engl. „resource constrained scheduling“) ist es, die einzelnen Fertigungsaufträge den einzelnen Ressourcen zuzuweisen, zu terminieren und freizugeben. Zur Abstimmung der beiden Ebenen sieht Geselle einen hierarchischen Regelkreis mit Vor- und Rückkopplungsbeziehungen vor.

Franck et al.⁴⁰ schlagen einen vierstufigen Ansatz vor, wobei die oberste Stufe der oben angeführten Hauptproduktionsprogrammplanung entspricht und die nachfolgenden Stufen sich in die Losgrößenplanung, die detaillierte Ablaufplanung und die Feinplanung untergliedern. Die Hauptproduktionsprogrammplanung wird mit dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen Ressourcenauslastung vor dem Hintergrund beschränkter Ressourcen durchgeführt und als Ressourcen-Nivellierungsproblem (engl. „resource-leveling problem“) formuliert. Auf der Stufe der Losgrößenplanung definieren die Autoren ein mehrstufiges, kapazitiertes Losgrößenproblem (engl. „multi-item, multi-level capacitated lot-sizing problem“). Die anschließende detaillierte Ablaufplanung (Termin- und Kapazitätsplanung, engl. „temporal and capacity planning“) dient der Berechnung eines schichtgenauen Produktionsplans für Teile, Komponenten und Endprodukte unter Beachtung der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Das Problem ist als „resource-constrained project scheduling problem – RCPSP“ formuliert, mit dem Ziel der Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit (engl. „makespan“), und dient auch der Überprüfung der Zulässigkeit der vorangegangenen Losgrößenplanung. Der Feinplanung obliegt die Aufgabe der zeitlichen

³⁹ Vgl. Geselle (1997).

⁴⁰ Vgl. Franck et al. (1997).

Planung der Produktionsdurchführung eines Auftrags auf einer Maschine. Diese Aufgabe kann als „job-shop problem – JSP“ oder RCPSP formuliert werden. Stehen Maschinen mit unterschiedlichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten zur Auswahl ist zudem ein „mode-assignment problem“ zu lösen. Neumann und Schwindt⁴¹ greifen die vorangegangenen Überlegungen auf, formulieren die Termin- und Kapazitätsplanung jedoch als „resource-constrained project scheduling problem with minimum and maximum time lags – RCPSP /max“ und präsentieren zudem eine Möglichkeit zur integrierten Losgrößen-, Termin- und Kapazitätsplanung.

Kolisch⁴² sieht für die Planung der Montage in einer MTO-Umgebung drei Planungsebenen vor und setzt dabei grundsätzlich adaptierte Modelle und Verfahren der Projektplanung zur Lösung der Planungsprobleme ein.⁴³ Die erste Ebene „Order Selection“ entspricht obiger Hauptproduktionsprogrammplanung insofern, dass aus der Planung ein Auftragsportfolio mit definierten Lieferterminen hervorgeht. Nach Definition des Autors entspricht die Aufgabe dieser Ebene einer simultanen Projektauswahl und -ablaufplanung unter Berücksichtigung knapper Ressourcen und dem Ziel der Deckungsbeitragsmaximierung.⁴⁴ Die Ablaufplanung plant dabei den Kapazitätsbedarf unterschiedlicher Auftragsabschnitte (z.B. Teilefertigung, Komponentenmontage und Montage) in den unterschiedlichen Produktionssegmenten ein. Die nachfolgende, zweite Ebene des Ansatzes („Manufacturing Planning“) umfasst je nach Produktionssegment unterschiedliche Planungsinhalte: In der Teilefertigung eine kapazitierte Losgrößenplanung und in der Montage eine kapazitierte Mehrprojektplanung. Die kapazitierte Mehrprojektplanung unterteilt den Abschnitt Montage in einzelne Montageabschnitte, welche jeweils einen bestimmten Ressourcenbedarf besitzen. Ziel der Planung ist ein lagerkostenminimaler und bezüglich der Ressourcen und Termine zulässiger Ablaufplan. Die kapazitierte Losgrößenplanung zielt auf eine Minimierung der Rüst- und Lagerkosten ab. Ergebnis dieser Planungsebene sind Ecktermine für die einzelnen Montageabschnitte bzw. Losgrößen für die Teilefertigung. In der nachfolgenden dritten

⁴¹ Vgl. Neumann und Schwindt (1998).

⁴² Vgl. Kolisch (2001).

⁴³ Der vorgestellte Ansatz von Kolisch kann als Weiterführung des Ansatzes von Drexel et al. (1994a) angesehen werden.

⁴⁴ Die hier als Projektauswahl bezeichnete Planungsaufgabe entspricht der in Abschnitt 2.1 definierten (Kunden-)Auftragsplanung.

Ebene, der Montagefeinplanung („Operations Scheduling“), erfolgt eine detaillierte zeitliche (schichtgenaue) Ablaufplanung der einzelnen Montageschritte jedes Montageabschnitts, wobei montagespezifische Ressourcen wie Montageflächen und Monteure berücksichtigt werden. Ziel ist die Minimierung der Summe der gewichteten Eckterminüberschreitungen. Das Planungsproblem selbst wird als spezielles kapazitiertes Mehrprojektplanungsproblem abgebildet.

Neureuther et al.⁴⁵ präsentieren eine hierarchische Vorgehensweise, welche die drei Stufen „Aggregate Plan“, „Disaggregate Plan“ und „Master Production Schedule“ umfasst. Auf der ersten Ebene wird auf Basis von monatlichen Bedarfsprognosen ein rollierender Plan für zwölf Monate erstellt, der Produktionskapazitäten den Bedarfen von Produktarchetypen gegenüberstellt und dabei die Kosten, z.B. für Zusatzkapazitäten, minimiert. Die nachfolgende Ebene disaggregiert die Produktarchetypen der vorangegangenen Planung und führt eine Losgrößenplanung durch. Der Begriff des „Master Production Schedule“ der untersten Ebene ist hier missverständlich im Vergleich zu anderen Ansätzen. Es wird ein JSP gelöst und einzelne Aufträge bestimmten Maschinen zugewiesen.

Neben diesen Ansätzen aus dem Forschungsbereich Produktionswirtschaft wurden auch im Bereich der Projektplanung Ansätze entwickelt, die der Planungsproblematik bei Einzel- fertigung (insbesondere bei Werkstattfertigung) sehr ähnlich ist.

De Boer⁴⁶ schlägt ein hierarchisches Planungsframework bestehend aus vier Planungsebenen vor: „Strategic resource planning“, „Rough-cut capacity planning – RCCP“, „Resource-constrained project scheduling“ und „Detailed scheduling“. Die Ebene des „Strategic resource planning“ umfasst dabei strategische Entscheidungen bezüglich der Produktionsflächen, der Anordnung der Produktionsmittel, der Maschinenausstattung und anderer kritischer Ressourcen. Aufgabe des RCCP ist es, während der Verhandlungs- und Auftragsannahmephase verlässliche Liefertermine und (möglichst kurze) Lieferzeiten zu bestimmen, bei gleichzeitiger Minimierung der Kosten für Zusatzkapazitäten, Überstunden oder Auswärtsvergabe. De Boer formuliert auf dieser Ebene ein „multi-project RCCP“-

⁴⁵ Vgl. Neureuther et al. (2004).

⁴⁶ Vgl. de Boer (1998).

Problem, welches den Kapazitätsbedarf von Arbeitspaketen⁴⁷ durch reguläre und nicht-reguläre (Zusatz-)Kapazitäten zu decken hat. Unterschieden wird hier (ähnlich zum Ansatz von Drexel et al.⁴⁸) zwischen „resource driven RCCP“ und „time driven RCCP“. Das „resource driven RCCP“ versucht mit den vorhandenen Kapazitäten einen vorgegebenen Fälligkeitstermin möglichst wenig (oder überhaupt nicht) zu überschreiten, wohingegen das „time driven RCCP“ einen gegebenen Fertigstellungstermin unbedingt einhält und dies mit möglichst wenig Zusatzkapazität zu erreichen versucht. Die nächste Ebene formuliert als Planungsproblem ein RCPSP. Hier werden die Arbeitspakete in Aktivitäten mit fixer Dauer und konstantem Ressourcenbedarf aufgeteilt. Zudem müssen zwischen den einzelnen Aktivitäten die Reihenfolgebeziehungen definiert werden. Ergebnis der Planung ist die Festlegung der Zeitpunkte, zu denen einzelne Aktivitäten durch eine bestimmte Ressource bearbeitet werden. Die genaue Festlegung der Person, der Personengruppe oder der Maschine, welche die Aktivität zu einem bestimmten Zeitpunkt bearbeitet, ist Gegenstand der untersten Ebene, dem „detailed scheduling“.

Neumann et al.⁴⁹ definieren drei Planungsebenen, wobei auf der obersten Ebene („long term“) ein einzelnes Mehrprojektproblem mit aggregierten Aktivitäten und knappen Schlüssel-Ressourcen gelöst wird, auf der mittleren Ebene („medium term“) ein „resource leveling“ durchgeführt wird und auf der untersten Ebene („short term“) wiederum ein RCPSP gelöst wird, jedoch mit einzelnen detaillierten Aktivitäten.

Hans et al.⁵⁰ geben in ihrer Arbeit einen zusammenfassenden Überblick über bis dato entwickelte Ansätze und entwickeln ein, im Wesentlichen auf (oben beschriebener) Arbeit von de Boer basierendes, hierarchisches Framework zur Projektplanung und -steuerung („hierarchical project planning-and-control framework“ – Abbildung 5). Insbesondere betrachten Hans et al. Multi-Projektplanung unter Unsicherheit, d.h. dass Unsicherheit über die der Planung zugrunde liegenden Daten (Bearbeitungszeiten, Ressourcenverfügbarkeit, etc.) herrscht. Für die Ebenen „rough-cut capacity planning“ und „resource constrained

⁴⁷ Zu Arbeitspaketen sei auf Kapitel 2.3.1.4 verwiesen.

⁴⁸ Vgl. Drexel et al. (1994a).

⁴⁹ Vgl. Neumann et al. (2002).

⁵⁰ Vgl. Hans et al. (2007).

project scheduling“ stellen die Autoren verschiedene Quellen der Unsicherheit vor und verweisen auf unterschiedliche Methoden zur Handhabung der Unsicherheit.

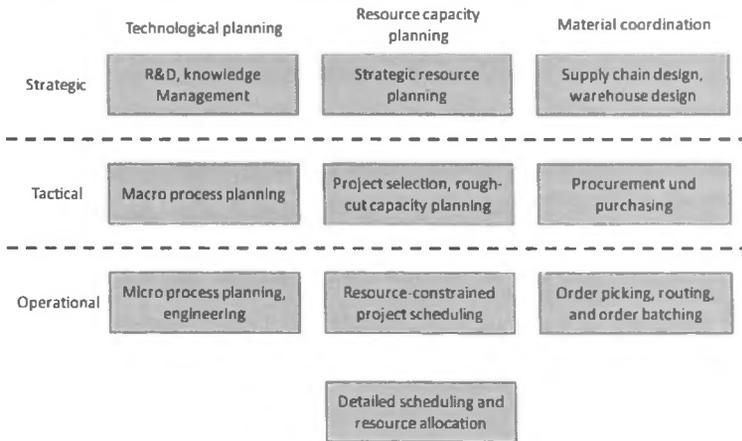


Abbildung 5: Hierarchisches Framework nach Hans et al.⁵¹

Der Literaturüberblick zeigt, dass eine große Anzahl an Planungsansätzen zur Produktionsplanung bei Einzelfertigung bzw. im Bereich der Projektplanung existiert. Da jedoch keine dieser Arbeiten die Gegebenheiten der Ausgangslage (Reihenmontage, Spezialmaschine, Unsicherheit) umfassend berücksichtigt, wird in dieser Arbeit ein Ansatz entwickelt, der diesen Gegebenheiten Rechnung trägt. Die Reihenmontage bzw. deren Planungsprobleme lassen sich zwar grundsätzlich durch die allgemeineren Planungsprobleme der Werkstattfertigung bzw. Projektplanung abbilden, diese weisen jedoch eine weit höhere Komplexität auf und sind deshalb schwieriger zu lösen.⁵² Zudem lassen sich bei einer problemspezifischeren Ausrichtung weitere Optimierungspotentiale erschließen. Auch die speziellen Eigenschaften von Spezialmaschinen und deren Montage sowie die daraus resultierende erhöhte Unsicherheit müssen bei der Planung explizit berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen werden im nächsten Schritt, ausgehend von der vorangegangenen Einordnung der Ressourcenbelegungsplanung in den Kontext der SCP-Matrix und dem

⁵¹ Vgl. Hans et al. (2007).

⁵² Aus diesem Grund wird zum Beispiel in fast allen Fällen die Unterbrechbarkeit von Aktivitäten und Arbeitsvorgängen ausgeschlossen.

Literaturüberblick, die Aufgaben und Ziele der Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen im Detail spezifiziert.

2.3 Spezifikation des Anforderungsprofils

Basierend auf der Einordnung der Ressourcenbelegungsplanung in die SCP-Matrix und den daraus abgeleiteten Einflussgrößen und Rahmenbedingungen sowie dem Literaturüberblick wird im Folgenden das Anforderungsprofil der Ressourcenbelegungsplanung, bestehend aus Aufgaben und Zielen, im Detail spezifiziert.

2.3.1 Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung

Grundsätzliche Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung ist die Festlegung, zu welchem Zeitpunkt ein Montageauftrag⁵³ durch eine bestimmte Ressource abgearbeitet wird. In diesem Zusammenhang konkurrieren die einzelnen Aufträge mit ihrem jeweiligen **Ressourcenbedarf** (Kapazitätsbedarf) um die zur Verfügung stehenden Montageressourcen, d.h. das **Ressourcenangebot** (Kapazitätsangebot). Diese allgemeine Formulierung bedarf einer Konkretisierung, einer detaillierten Beschreibung der *Planungsinhalte* und *Planungsvorgaben* (des Planungsinputs), der Festlegung der *Planreichweite* sowie der Bestimmung des *Detaillierungs-* bzw. *Aggregationsgrads* von Ressourcenbedarf und Ressourcenangebot im Kontext der gegebenen Problemstellung.

2.3.1.1 Planungsinhalte

Die Planungsinhalte der Ressourcenbelegungsplanung stellen sich wie folgt dar: Da bei der Montage von Spezialmaschinen ein kundenindividuelles Produkt gefertigt wird, sind in Analogie zu Drexl et al.⁵⁴ keine Losgrößenplanung, aber eine Zusammenfassung der Planungsebenen Ressourceneinsatzplanung und der segmentspezifischen Feinplanung vorgesehen. Die Ressourcenbelegungsplanung kann demnach als Querschnittsfunktion der

⁵³ Im Fortgang der Arbeit sind, bezogen auf die Ressourcenbelegungsplanung, die Begriffe „Montageauftrag“ und „Auftrag“ gleichzusetzen.

⁵⁴ Vgl. oben bzw. Drexl et al. (1994b).

operativen Produktionsplanung bei Einzelfertigung angesehen werden.⁵⁵ Abbildung 6 stellt die Zusammenfassung der Planungsebenen auf der rechten Seite dar.

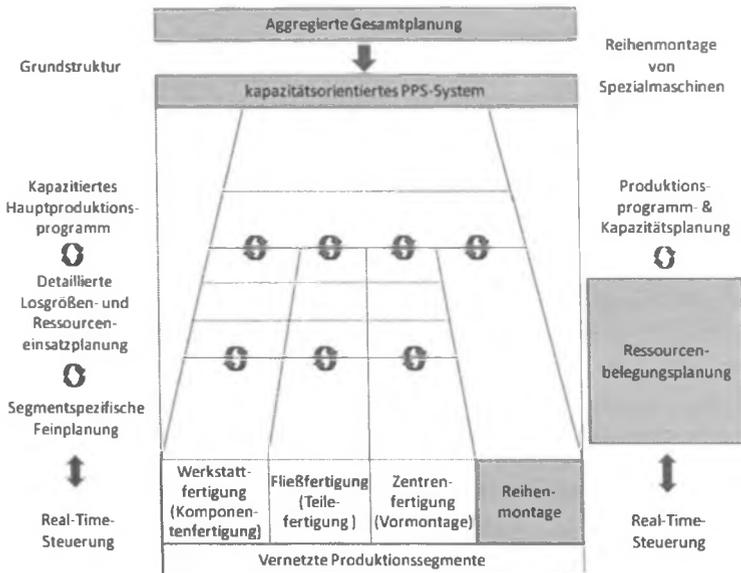


Abbildung 6: Hierarchische Integration⁵⁶

Einer der Vorteile dieser Zusammenfassung der Planungsebenen zur Ressourcenbelegungsplanung ist der geringere Planungs- und Koordinationsaufwand bei der Durchführung der Planung. Der Planungsaufwand selbst sinkt durch das Wegfallen einer Planungsebene und damit des zu lösenden Planungsproblems, wodurch Planungsressourcen (Mitarbeiter und Rechenkapazitäten) freigesetzt werden. Von besonderer Bedeutung ist bei Planungsansätzen mit mehreren Ebenen die Koordination zwischen den Ebenen. Der entstehende Koordinationsaufwand ist insbesondere dann sehr hoch, wenn sich auf „oberen“ Planungsebenen häufig Änderungen ergeben, die die Planungsvorgaben für die

⁵⁵ Diese Zusammenfassung der Ebenen zu einer Querschnittsfunktion spiegelt sich auch im Begriff der Ressourcenbelegungsplanung wider, der aus den Begriffen Ressourceneinsatzplanung und Maschinenbelegungsplanung, einem Synonym für Feinplanung, hervorgeht. Zu Belegungsplanung vergleiche auch Evers (2002).

⁵⁶ In Anlehnung an Drexl et al. (1994b): S. 1030 wird auf der linken Seite die grundlegende Struktur kapazitätsorientierter PPS-Systeme, in der Mitte potentielle Produktionssegmente eines Unternehmens welches Spezialmaschinen produziert und auf der rechten Seite eine mögliche Ausprägung der Planungsebenen bei Einzelfertigung dargestellt.

untergeordneten Ebenen betreffen. Diese Planvorgabeänderungen können sich über alle Ebenen sukzessive fortsetzen, wodurch eine große Planungs nervosität auf allen Ebenen entsteht.⁵⁷ Planungs nervosität verstärkt dabei auch unmittelbar die Unsicherheit auf den nachgelagerten Ebenen, da sich die Planungsinformationen für diese fortwährend ändern. Im Falle der Ressourcenbelegungsplanung tritt dieser Koordinationsaufwand lediglich zwischen den Ebenen Produktionsprogrammplanung und Ressourcenbelegungsplanung auf, da keine weitere Unterteilung der Planungsebenen vorgesehen ist.⁵⁸

Inhalt der Ressourcenbelegungsplanung ist damit eine detaillierte, segmentspezifische Planung der Montageabläufe, deren Ergebnis ein Ablaufplan ist, welcher die Zeitpunkte festlegt, zu denen ein Auftrag von einer Montageressource bearbeitet wird.

2.3.1.2 Planungsvorgaben

Die Planungsvorgaben bzw. der Input der Planung werden/wird im Wesentlichen durch die Produktionsprogrammplanung und die Kapazitätsplanung der übergeordneten Planungsebene definiert. Die Kapazitätsplanung legt das verfügbare Ressourcenangebot, im Falle der Reihenmontage von Spezialmaschinen in Form von Mitarbeitern fest. Da die einzelnen Montagestationen sehr spezifische Tätigkeiten durchzuführen haben, ist ein Wechseln der Mitarbeiter zwischen verschiedenen Stationen nicht ohne Weiteres möglich und die Kapazitätsplanung muss stationsspezifisch die Anzahl der verfügbaren Mitarbeiter planen. Resultat dieser Kapazitätsplanung und damit Input der Ressourcenbelegungsplanung ist ein Ressourcenplan, der die Anzahl der an einem Produktionstag zur Verfügung stehenden Mitarbeiter je Station festlegt. Diese Anzahl an Mitarbeitern kann sich dabei im Zeitverlauf ändern (Mitarbeiteraufbau bzw. -abbau). Die Spezifikation jeder einzelnen Spezialmaschine durch den Kunden legt für jede Montagestation neben dem Materialbedarf auch die notwendigen Montageschritte (Arbeitspläne) und damit den Ressourcenbedarf je Montageauftrag fest (Kundenauftragsplanung). Die Produktionsprogrammplanung definiert durch die Festlegung der Montagezeitfenster einen Zeitrahmen, der die Material-

⁵⁷ Vgl. de Kok und Inderfurth (1997) sowie Scholl (2001), Kurbel (2005): S. 43 und Inderfurth und Jensen (1997).

⁵⁸ Im Vergleich dazu wurde in Drexel et al. (1994b) zwar die Zusammenfassung der Ebenen zur „detaillierten Belegungsplanung von Montageressourcen“ vorgesehen, in Drexel et al. (1994a) wurde diese jedoch beispielsweise nicht konsequent umgesetzt, da hier zwei Planungsebenen festgelegt wurden.

verfügbarkeitstermine je Auftrag und Montagestation sowie den Fertigstellungstermin umfasst. Beide Planungsaufgaben zusammen spezifizieren damit einen Montageauftrag. Neben dem Ressourcenbedarf besitzt jeder Auftrag j (engl. „job“) die zu respektierenden Zeitfenster, innerhalb derer die Montage der Spezialmaschine ablaufen muss. Für jede Montagestation s ist ein frühester Starttermin $esd_{j,s}$ (engl. „earliest start date“) definiert, der dem Materialverfügbarkeitstermin der übergeordneten Produktionsprogrammplanung entspricht. Die Ressourcenbelegungsplanung hat diesen Termin absolut zu berücksichtigen, da der Materialbedarf jeder Station erst zu diesem Zeitpunkt gedeckt ist. Ein früherer Beginn auf einer Station würde unweigerlich zu einer Unterdeckung des Materialbedarfs (Fehlteile) und damit zu Störungen des Montageablaufs führen. Ein Endtermin je Montagestation ist nicht vorgegeben.⁵⁹ Allerdings ist für jeden Auftrag ein Fertigstellungstermin dl_j (engl. „deadline“) vorgegeben, der das Ende der Bearbeitung auf der letzten Montagestation festlegt und der unbedingt einzuhalten ist.

2.3.1.3 Planreichweite (Planungshorizont)

Die Konkretisierung der Planungsaufgaben bedarf neben der Festlegung von Planungsinhalt (detaillierte, segmentspezifische Feinplanung) und Planungsvorgaben (Ressourcenangebot, Ressourcenbedarf, Terminrestriktionen) einer Festlegung der Planungsparameter Planreichweite (Planungshorizont)⁶⁰ und Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad von Ressourcenbedarf und Ressourcenangebot.

Nach Schlüchtermann⁶¹ ist die Bestimmung der Planreichweite eine „notwendige Voraussetzung sämtlicher Planungsüberlegungen“. Da zur Festlegung der Planreichweite keine allgemeingültigen Vorgehensweisen existieren, muss eine problemspezifische Abwägung zwischen *verfügbaren Informationen* (bzw. deren Qualität) und *bestehenden Interdependenzen* (Kopplungen, Wechselwirkungen) vorgenommen werden. Verschiedene Autoren geben Hinweise, welche Aspekte dabei zu berücksichtigen sind.⁶²

⁵⁹ Im Allgemeinen würde man den frühesten Starttermin der nachfolgenden Station bzw. den Fertigstellungstermin als rechte Grenze heranziehen, um so den termingerechten Ablauf der Montage zu gewährleisten. Hierdurch würde jedoch eine nicht notwendige Einschränkung getroffen.

⁶⁰ Ein Plan mit einer Planreichweite von T Perioden besitzt einen Planungshorizont $[t, t+1, \dots, t+T-1]$, d.h. der Plan wird für die Perioden $t, t+1, \dots, t+T-1$ aufgestellt.

⁶¹ Siehe Schlüchtermann (1996): S. 20.

⁶² Vgl. Schlüchtermann (1996): S. 21 ff., Klein und Scholl (2004): S. 203 ff. und Scholl (2001): S. 143 ff.

Zusammenfassend sprechen für eine große Planreichweite – und der damit einhergehenden frühzeitigen Festlegung künftiger Vorhaben – die bessere Berücksichtigung zeitlicher Kopplungen (zeitlich-vertikaler Interdependenzen) und die Erleichterung von arbeitsvorbereitenden Tätigkeiten (z.B. der Materialbereitstellung) und deren Ausführung. Für eine eher kürzere Reichweite sprechen, dass die Unsicherheit über die erforderlichen Informationen mit wachsender Reichweite stark zunimmt, dass eine Fortschreibung aktueller Entwicklungen nur bei stabiler Umweltlage sinnvoll ist und dass der Aufwand zur Datenanalyse und -beschaffung sowie zur Modellbildung und -lösung häufig überproportional mit der Reichweite ansteigt.⁶³ Weitere Entscheidungshilfen zur Bestimmung der Planreichweite können die Ansatzpunkte „Natürliche Reichweite“, „Ökonomischer Horizont“ und das „Entscheidungshorizont-Theorem“ liefern. Innerhalb eines hierarchischen Planungssystems ist die *Reichweitenkongruenz* zwischen den einzelnen Planungsebenen ein zentraler Aspekt, den es zu berücksichtigen gilt.

Bezogen auf die Planreichweite der Ressourcenbelegungsplanung bei Spezialmaschinen spielt die Berücksichtigung der Interdependenzen eine entscheidende Rolle. Die lange Durchlaufzeit eines einzelnen Auftrags (bis zu sechs Monate) definiert zunächst eine untere Grenze für die Planreichweite, wenn alle Interdependenzen eines Auftrags berücksichtigt werden sollen, also grundsätzlich jeder Auftrag vom Montagebeginn bis zur Fertigstellung Gegenstand der Planung sein soll.⁶⁴ Hieraus ergibt sich eine minimale Planreichweite entsprechend der längsten Plandurchlaufzeit (definiert durch die Montagezeitfenster der Produktionsprogrammplanung) aller planungsrelevanten Aufträge. Demzufolge ist die Planreichweite eng mit der Menge der planungsrelevanten Aufträge verbunden bzw. wird durch diese bestimmt.⁶⁵ Da die arbeitsvorbereitenden Tätigkeiten einen gewissen Vorlauf zum Montagebeginn benötigen, wird die Menge der planungsrelevanten Montageaufträge

⁶³ Als weiterer Aspekt wird auch die sinkende Prognosequalität bei wachsender Reichweite aufgeführt. Auf Ebene der Ressourcenbelegungsplanung kann dieser Aspekt jedoch vernachlässigt werden, da keine auf Prognose basierenden Informationen zur Planung herangezogen werden.

⁶⁴ Hier besteht ein enger Zusammenhang mit dem in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Zielsystem der Ressourcenbelegungsplanung, da zum einen die termingerechte Fertigstellung jedes Fertigungsauftrags maßgeblich für das Ziel der Kundenzufriedenheit ist und zum anderen die Reduzierung der Durchlaufzeit einen möglichst späten Montagebeginn anvisiert.

⁶⁵ Bis hierhin umfasst die Menge der planungsrelevanten Aufträge diejenigen Aufträge, deren Montagebeginn zum Zeitpunkt der Planung in der Vergangenheit liegt oder unmittelbar bevorsteht.

um diejenigen Aufträge erweitert, deren Montagebeginn innerhalb der minimalen Vorlaufzeit liegt. Eine Verlängerung der Planreichweite ist die Folge.

Als grundsätzliche Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung wurde die Festlegung der Zeitpunkte, an denen ein Montageauftrag durch eine Ressource bearbeitet wird, definiert. Durch diese Konkurrenz der Montageaufträge um das Ressourcenangebot entsteht eine Interdependenz zwischen den Aufträgen. Diese Interdependenz gilt es bei der Festlegung der Planreichweite insofern zu betrachten, als auch Aufträge, deren Montagebeginn in weiter Zukunft liegen, Einfluss auf die Ressourcenverfügbarkeit zu früheren Zeitpunkten nehmen können. Aus diesem Grund würde man prinzipiell alle zur Verfügung stehenden Montageaufträge bei der Planung berücksichtigen. Die Überlegungen zur Problematik der Unsicherheit mit wachsender Planreichweite widersprechen jedoch einer solchen Herangehensweise. An dieser Stelle lassen sich demnach keine eindeutigen Folgerungen zur Festlegung der Planreichweite mehr ableiten. Die endgültige Festlegung der Planreichweite kann oder muss dann durch „Ausprobieren“ erfolgen.⁶⁶

2.3.1.4 Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad

In Abhängigkeit von Planungsinhalt, -vorgaben und Planreichweite ist der Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad der planungsrelevanten Daten zu definieren.⁶⁷ Allgemein gilt: je höher der Detaillierungsgrad der Daten, desto genauer die Planung, was grundsätzlich als vorteilhaft erachtet wird. Ein hoher Detaillierungsgrad hat allerdings den Nachteil der hohen Komplexität des Planungsproblems (in Abhängigkeit von der Probleminstanz) und dem damit einhergehenden erhöhten Planungsaufwand, wobei auch der Aufwand zur Datenbereitstellung und die damit verbundenen Kosten berücksichtigt werden müssen. Einen weiteren, den Detaillierungsgrad der Daten bestimmenden Faktor, stellt die Planreichweite dar. Mit zunehmender Reichweite sinkt die Qualität, wobei gleichzeitig die Unsicherheit der Daten und der Aufwand zu deren Beschaffung ansteigt (siehe oben). Aus diesen Gründen muss eine

⁶⁶ Vgl. Klein und Scholl (2004): S. 202. Zur Festlegung der Planreichweite bzw. der Menge der planungsrelevanten Aufträge sei an dieser Stelle auf Abschnitt 3.1.2 verwiesen.

⁶⁷ Mit Detaillierungsgrad wird im Allgemeinen die Granularität der planungsrelevanten Daten bezeichnet (z.B. Sekunden, Minuten oder Stunden), mit Aggregationsgrad der Grad der Zusammenfassung bzw. die Gruppierung einzelner Objekte unter einem Oberbegriff/übergeordneten Objekt (Produkt-Produkttyp-Produktfamilie). Vergleiche hierzu Schneeweiß (1992): S. 79–81, Steven (1994) und Fleischmann und Meyr (2003): S. 476.

Abwägung zwischen dem Detaillierungsgrad der Planungsdaten, dem Aufwand zur Datenbereitstellung sowie der Planungsdurchführung und dem angestrebten Planungsergebnis erfolgen. Da die Ressourcenbelegungsplanung zwei Planungsebenen abdeckt und der Detaillierungsgrad grundsätzlich von höheren Planungsebenen zu niedrigeren zunimmt, muss der Definition des Detaillierungsgrades besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.⁶⁸

In der vorliegenden Problemstellung gilt es, die durch die Montageaufträge definierten Ressourcenbedarfe dem Ressourcenangebot gegenüberzustellen und die Zeitpunkte der Bearbeitung eines Auftrags auf der jeweiligen Montagestation festzulegen. Die Montageaufträge ihrerseits beinhalten – neben den genannten Rahmenterminen – die auftragspezifischen Stücklisten und Arbeitspläne, wobei erstere den Materialbedarf und letztere die Arbeitsvorgänge (Montageschritte) je Montagestation festlegen. Die Arbeitsvorgänge besitzen dabei untereinander eine Reihenfolgebeziehung, welche die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der Arbeitsvorgänge einer Station definiert, und eine Vorgabezeit, welche die Bearbeitungszeit (Anzahl an Minuten) spezifiziert, die zur Durchführung des Vorgangs benötigt wird. Diesem Ressourcenbedarf steht das Ressourcenangebot gegenüber. Dieses Ressourcenangebot wird durch die Anzahl der Mitarbeiter je Montagestation definiert, wobei jeder Mitarbeiter wiederum seine Arbeitskraft eine bestimmte Anzahl an Stunden je Schicht zur Verfügung stellt. Auf Basis dieser Daten und ihrer Granularität (Minuten bzw. Stunden) ließe sich nun eine minutengenaue Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu einzelnen Mitarbeitern unter Berücksichtigung der Reihenfolgebeziehungen sowie der Rahmentermine vornehmen. Ein solches Problem lässt sich generell als Problem der Mehr-Projektplanung mit eingeschränkten Ressourcen (RCPSPP) formulieren.⁶⁹ Diese Art der Problemstellung weist an sich schon eine sehr hohe Komplexität (und damit einen hohen Planungsaufwand) auf.⁷⁰ Betrachtet man nun zudem die angestrebte Planreichweite von mehreren Monaten, sieht man sich verschiedenen Problemen gegenübergestellt: Zum einen ist durch die große Planreichweite eine große Anzahl an Aufträgen bzw. an Arbeitsvorgängen (mit ihren

⁶⁸ Vgl. Drexl et al. (1994b): S. 1029.

⁶⁹ Vgl. Brucker et al. (1999), Blazewicz et al. (2001), Neumann et al. (2002) und Brucker (2007).

⁷⁰ Ebd.

Reihenfolgebeziehungen) zu betrachten,⁷¹ wodurch die Problematik der ohnehin hohen Planungskomplexität durch die sehr große Problemistanz verstärkt wird. Zum anderen ist davon auszugehen, dass durch die große Planreichweite häufig die Arbeitsvorgänge betreffende Änderungen auftreten. Diese Änderungen führen unmittelbar zu Neuplanungen, wodurch eine hohe Planungsnervosität entsteht, die prinzipiell möglichst gering zu halten ist.⁷² Diese Nervosität entsteht auch, sobald Änderungen des Kapazitätsangebots vorliegen. In diesem Kontext erscheint es auch als nicht unmittelbar notwendig, die Arbeitsvorgänge dezidiert einzelnen Mitarbeitern zuzuordnen, da hierdurch die Flexibilität bei der Durchführung der Montage zu sehr eingeschränkt würde. Vorrangiges Problem stellt jedoch zunächst die Reduktion der Problemkomplexität dar, um überhaupt den geforderten Ressourcenbelegungsplan errechnen zu können.

Ein in der Literatur als probates Mittel genanntes Instrument zur Reduktion der Planungskomplexität stellt die Aggregation der Planungsdaten dar.⁷³ Eine Aggregation kann dabei nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen: nach der Zeit (z.B. Unterteilung nach Jahr, Monat, Woche, Tag, Schicht, Stunde, etc.), nach dem Ort (z.B. Land, Bundesland, Postleitzahl, Absatzregion, Kunde, etc.), nach Produkt (z.B. Produktgruppen, Produktfamilien, Endprodukte, etc.) oder nach den benötigten Ressourcen (z.B. Unternehmen als Ganzes, Produktionsbereiche, Maschinengruppe, etc.). Zur Reduzierung der Problemkomplexität werden in dieser Arbeit sowohl die den Ressourcenbedarf definierenden Arbeitsvorgänge als auch die das Ressourcenangebot definierenden Mitarbeiter aggregiert:

- Die Arbeitsvorgänge die je Montageauftrag j auf einer bestimmten Montagestation s abgearbeitet werden sollen, werden zu **Montageoperationen** $o_{j,s}$ zusammengefasst. Jede dieser Operationen besitzt in Folge dessen einen frühesten Starttermin

⁷¹ Die große Anzahl an Arbeitsvorgängen ist auch der hohen Produktkomplexität einer Spezialmaschine geschuldet, die zu Arbeitsplänen mit mitunter mehreren tausend Arbeitsvorgängen je Fertigungsauftrag führt.

⁷² Vgl. Drexel et al. (1994b): S. 1029, Inderfurth und Jensen (1997) und Scholl (2001) sowie Abschnitt 2.4.2 zur Bedeutung der Planungsnervosität für die Produktionsplanung.

⁷³ Vgl. Axsäter (1978), Axsäter (1981), Switalski (1998) und Kleindienst (2004). Nach Steven ist „die Aggregation [...] ein Verfahren zur Problemvereinfachung durch sinnvolle Gruppierung von Daten und Entscheidungsvariablen“ – Steven (1994): S. 43.

$esd_{j,s}$ und ein abzuarbeitendes **Arbeitspaket** $wp_{j,s}$ (engl. „work-package“),⁷⁴ welches den Ressourcenbedarf (in Stunden) je Station definiert. Die Größe des Arbeitspakets errechnet sich aus der Summe der Bearbeitungszeiten aller Arbeitsvorgänge eines Auftrags, die einer bestimmten Station zugeordnet sind. Durch die eindeutige Zuordnung der Operationen zu einer Station, welche von jedem Auftrag in der gleichen Reihenfolge zu durchlaufen sind (Reihenmontage), müssen die Reihenfolgebeziehungen der einzelnen Arbeitsvorgänge bei der Planung nicht mehr berücksichtigt werden. Hierdurch und durch die wesentlich geringere Anzahl an Operationen im Vergleich zur Anzahl der Arbeitsvorgänge kann eine wesentliche Reduzierung der Planungskomplexität erzielt werden.⁷⁵

- Das durch die einzelnen Mitarbeiter einer Station bereitgestellte Ressourcenangebot wird über alle Mitarbeiter einer Schicht aufsummiert, wodurch ein **aggregiertes, zeitvariables Ressourcenangebot** $r_{s,t}$ (in Stunden) pro Schicht t für jede Montagestation s definiert wird. Gleichzeitig wird hierdurch eine Einteilung des Planungshorizontes T in Perioden (Schichten: $t = 0, \dots, T$) gleicher Länge vorgenommen und damit auch der Detaillierungsgrad der Planung, nämlich schichtgenaue Planung, festgelegt. Von einer schichtgenauen Festlegung der Bearbeitungszeitpunkte kann ausgegangen werden, da diese eine ausreichende Genauigkeit zur Erreichung der im nachfolgenden beschriebenen Ziele bietet. Zudem wird dadurch ein gewisses Flexibilitätspotential für die Durchführung der Montage geschaffen, da die einzelnen Arbeitsgänge nicht minutiös festgelegt werden.

Bei der Planung mit Arbeitspaketen steht a priori jedoch nicht fest, mit welcher Intensität in einer Schicht an der Operation gearbeitet wird. Somit ist auch die Dauer (Zeitspanne zwischen Bearbeitungsbeginn und -ende auf einer Station) einer Operation nicht vorgegeben, sondern Ergebnis der Planung. Ergo muss für jede Schicht, in der eine Operation eingeplant ist, festgelegt werden, mit welcher Intensität $i_{j,s,t}$ die Ressource belastet bzw. wie viele Stunden ($alloc_{j,s,t}$) des Arbeitspakets einer Operation zur Bearbeitung in dieser Schicht

⁷⁴ In der Literatur auch als Arbeitsvolumen, in englisch-sprachigen Arbeiten auch als „work content“ bezeichnet.

⁷⁵ Zur Planung mit Arbeitspaketen vergleiche zum Beispiel de Boer (1998), Hans (2001), Tereso et al. (2004), Wullink et al. (2004b) oder Wullink (2005). Vanhouke und Debels geben einen Überblick zur Thematik - vgl. Vanhouke und Debels (2008).

zugeordnet sind.⁷⁶ In der vorliegenden Problemstellung gilt es also festzulegen, wie viele Mitarbeiter mit ihrem persönlichen Kapazitätsangebot (Stunden) in einer Schicht eine Operation bearbeiten. Aus technischen Gründen ist diese Anzahl an Mitarbeitern nach oben begrenzt (w_s^{MAX}). Hieraus lässt sich eine maximale Intensität i_s^{MAX} (in Stunden) für jede Montagestation s ableiten. Durch die maximale Intensität ist gleichzeitig eine minimale Durchlaufzeit $f_{j,s}^{MIN}$ für jede Operation bzw. jeden Auftrag (f_j^{MIN}) festgelegt.

Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung ist es somit, für eine vorgegebene Menge der planungsrelevanten Aufträge j für jede der Operationen $o_{j,s}$ dieser Aufträge die Schichten t zu bestimmen, an denen das Arbeitspaket $wp_{j,s}$ der Operationen durch die Ressourcen der jeweiligen Montagestation ($r_{s,t}$) abgearbeitet wird (die Reihenfolge der Operationen jedes Auftrags ist dabei auf Grund der Reihenmontage identisch). Gleichzeitig ist festzulegen, mit welcher Intensität $i_{j,s,t}$ die Operation $o_{j,s}$ in Schicht t bearbeitet wird. Durch die Belegung der Schichten durch die Operationen wird auch ein (Operations-)Starttermin ($st_{j,s}^{AP}$) bzw. Endtermin ($c_{j,s}^{AP}$) und die Durchlaufzeit ($f_{j,s}^{AP}$) für jede Operation festgelegt. Hierbei müssen sowohl die Zeitrestriktionen, die jeweiligen frühesten Starttermine $esd_{j,s}$ und die Fertigstellungstermine dl_j , als auch die beschränkte in einer Schicht t zur Verfügung stehende Kapazität $r_{s,t}$ berücksichtigt werden. Jede Operation kann dabei während ihrer Durchführung beliebig oft unterbrochen werden, die Unterbrechbarkeit (engl. „preemption“) der Operationen ist also zulässig. Planungsprobleme, deren Aufträge die Bearbeitungsstationen jeweils in identischer Reihenfolge durchlaufen, werden allgemein als Flow-Shop-Probleme bezeichnet. Stehen auf den Bearbeitungsstationen mehrere Maschinen/Ressourcen parallel zur Verfügung, wird das Problem als **Hybrid-Flow-Shop** (HFS) bezeichnet.⁷⁷ Die hier formulierte Planungsaufgabe kann damit als **Hybrid-Flow-Shop-Problem mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen** bezeichnet werden.

⁷⁶ In diesem Zusammenhang wird im Bereich der Projektplanung auch von Aktivitäten mit variablen (kontinuierlichen) Intensitäten (engl. „variable-intensity“ – vgl. Leachman et al. (1990), Wullink et al. (2004a), Kis (2005) und Wullink (2005)) bzw. von Aktivitäten, welche in unterschiedlichen (diskreten) Modi (engl. „multi-modal/multi-mode“ – vgl. de Boer (1998), Tereso et al. (2004) und Wullink et al. (2004b)) ausgeführt werden können, gesprochen. Als Teilproblem ergibt sich damit die Bestimmung der Intensität bzw. des Modus mit der eine Operation ausgeführt wird (engl. „mode assignment problem“) – vergleiche bspw. Schwindt (2005): S. 131.

⁷⁷ In der Literatur oftmals auch als Flexible-Flow-Shop oder als Multi-Processor-Flow-Shop Problem bezeichnet – vgl. Pinedo (2008): S. 15 und Domschke et al. (1997): S. 394.

Nach dieser Spezifikation der Aufgaben der Ressourcenbelegungsplanung bzw. der Spezifikation des zu lösenden Planungsproblems wird im folgenden Abschnitt das Zielsystem⁷⁸, welches die Ziele der Planung im Detail festlegt, spezifiziert.

2.3.2 Zielsystem der Ressourcenbelegungsplanung

Grundsätzliches Ziel von (modellbasierter) Planung ist es, ein vorliegendes Entscheidungsproblem (hier das Planungsproblem der Ressourcenbelegungsplanung) zu lösen und dabei eine möglichst optimale Ausprägung des entsprechenden Zielsystems zu erreichen.⁷⁹ Nachdem das Planungsproblem in den vorangegangenen Abschnitten definiert wurde, wird nun das Zielsystem der Ressourcenbelegungsplanung spezifiziert. Hierzu wird – ausgehend von den grundlegenden Zielsetzungen und auf Basis eines allgemein definierten Zielsystems zur Produktionsplanung und -steuerung – ein konkretes Zielsystem für die Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen abgeleitet.

Wie bereits zu Beginn der Arbeit erläutert, rücken insbesondere die Zielsetzungen **Reduktion der Kosten** und **Erhöhung der Kundenorientierung** in den Fokus. Zum Erreichen dieser Zielsetzungen müssen entsprechende *produktionswirtschaftliche Ziele* festgelegt werden (*Operationalisierung der Zielsetzungen*), um einerseits diese Zielsetzungen in den Geschäftsbereich Produktion zu übertragen und andererseits das Erreichen dieser Ziele bzw. Zielsetzungen auch messen und kontrollieren zu können. Die Grundlage des in dieser Arbeit entwickelten Zielsystems bildet das in Abbildung 7 dargestellte Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung von Wiendahl.⁸⁰

⁷⁸ Ein Zielsystem definiert allgemein eine Ordnung zwischen mehreren Zielen. Zur Festlegung der einzelnen Ziele müssen zunächst die Fundamentalziele (strategische Zielsetzungen) bzw. die (daraus abgeleiteten) Instrumentalziele der Unternehmung definiert werden. Das Zielsystem definiert davon ausgehend die operativen bzw. operationalen Ziele, häufig mittels Zielfunktionen auf der Basis von Zielgrößen (z.B. Kosten) in Verbindung mit einem Entscheidungskriterium (Maximierung, Minimierung, Satisfizierung oder Fixierung).

⁷⁹ Vgl. Klein und Scholl (2004) und Adam (1997).

⁸⁰ Vgl. Wiendahl (2008). Dieses Zielsystem wurde als Ausgangsbasis gewählt, da dessen übergeordnete Zielsetzungen weitestgehend den in dieser Arbeit adressierten entsprechen. Analoge bzw. ähnliche Ziele sind zum Beispiel bei Kistner und Steven (1990): S. 251 oder Lödning (2008) zu finden.

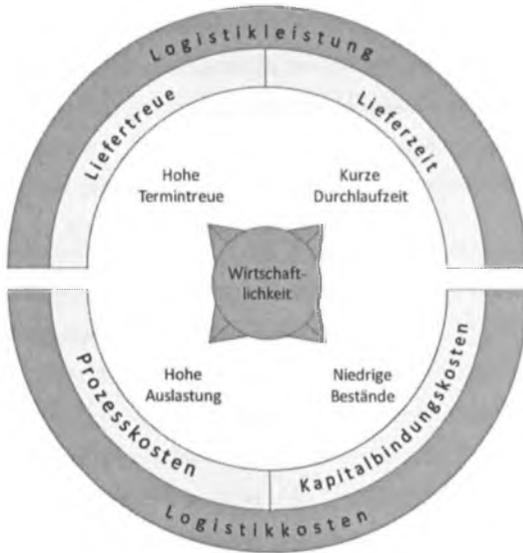


Abbildung 7: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung nach Wiendahl⁸¹

Wie in Abbildung 7 dargestellt, können die einzelnen Ziele nach ihrem Einfluss auf die Logistikleistung und die Logistikkosten differenziert werden. Die Logistikleistung umfasst dabei diejenigen Ziele (*Lieferzeit* und *Liefertreue*), die vom Markt bzw. Kunden wahrgenommen werden, damit die Erhöhung der Kundenorientierung (Kundenzufriedenheit) direkt adressiert und durch eine verbesserte Produktionsplanung direkt beeinflusst werden können.⁸² Die Logistikkosten umfassen die Ziele *Prozesskosten* und *Kapitalbindungskosten*, welche gemäß der Zielsetzung der Kostenreduktion zu minimieren sind. Aus diesen Zielen (*Lieferzeit*, *Liefertreue*, *Prozesskosten* und *Kapitalbindungskosten*) lassen sich unmittelbar die operativen produktionswirtschaftlichen Ziele bzw. Zielgrößen *hohe Termintreue*, *kurze Durchlaufzeit*, *hohe Auslastung* und *niedrige Bestände* ableiten.⁸³

⁸¹ Siehe Wiendahl (2008): S. 252. Der Begriff „Logistik“ ist hier als Synonym für „Produktionslogistik“ zu verstehen.

⁸² Die anderen eingangs der Arbeit erwähnten Zielsetzungen zur Erhöhung der Kundenorientierung, wie zum Beispiel individualisierte Produkte, geringer Preis, hohe Qualität und individueller Service, können durch die operative Produktionsplanung nicht beeinflusst werden.

⁸³ Eine Operationalisierung der Ziele ist insbesondere bei den die Logistikkosten betreffenden Zielen notwendig, da diese häufig Kosten mit Opportunitätscharakter sind und einen erheblichen Aufwand zur Festlegung bzw. Erfassung verursachen – vgl. Zäpfel (1982): S. 191 und Kurbel (2005): S. 9. Demzufolge werden

Diese Ziele der Produktionsplanung (Produktionsablaufplanung) dürfen jedoch keinesfalls isoliert betrachtet werden, da zwischen den Zielen Zielbeziehungen existieren.⁸⁴ Beispielsweise besteht zwischen der Minimierung der Durchlaufzeit und der Minimierung der Bestände eine Zielkomplementarität. Auf Grund der Zielbeziehungen muss deshalb innerhalb eines Zielsystems eine Ordnung der Ziele erfolgen. Besondere Beachtung wurde dabei in der Vergangenheit dem Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Durchlaufzeit und der Maximierung der Kapazitätsauslastung geschenkt (Dilemma der Ablaufplanung).⁸⁵ Da jedoch in den letzten Jahren eine Verschiebung der Prioritäten dieser Ziele stattgefunden hat, ist dieses Dilemma nicht mehr im Fokus wissenschaftlicher Debatten. Von weit höherer Priorität als die Auslastung werden nunmehr die Ziele *hohe Termintreue, kurze Durchlaufzeit und niedrige Bestände* angesehen.⁸⁶

Zur Spezifikation des Zielsystems der Ressourcenbelegungsplanung sind die genannten Ziele bzw. Zielgrößen zu präzisieren, ihre Interdependenzen bezüglich der definierten Zielsetzungen zu untersuchen und eine Priorisierung der Ziele vorzunehmen.

▪ Hohe Auslastung

Die Auslastung eines Arbeitssystems ist definiert durch das Verhältnis der mittleren zur maximal möglichen Auslastung.⁸⁷ Wie bereits angedeutet, wurde diesem Ziel in der Vergangenheit große Bedeutung beigemessen, insbesondere dann, wenn sehr teure Maschinen durch eine hohe Auslastung ihre Refinanzierung sichern sollten. Mittlerweile hat sich jedoch die Meinung durchgesetzt, der zufolge die Anschaffungskosten als „sunk costs“ zu betrachten sind und damit nicht Gegenstand der Entscheidungen auf operativer Ebene sind. Analog hierzu kann die

sogenannte Ersatzziele (Ersatzzielgrößen), im vorliegenden Fall Zeit- und Mengenziele, definiert – vgl. Kurbel (2005): S. 10 und Kistner und Steven (1990): S. 251.

⁸⁴ Grundsätzlich können zwischen den verschiedenen Zielen eines Zielsystems Zielbeziehungen (Zielkonkurrenz, Zielkomplementarität oder Zielindifferenz) existieren. Zielkonkurrenz bzw. ein Zielkonflikt liegt vor, wenn die Verbesserung der einen Zielgröße gleichzeitig zur Verschlechterung einer anderen Zielgröße führt. Bei vorliegen einer Zielkomplementarität führt die Verbesserung der einen Zielgröße unmittelbar zur Verbesserung der anderen Zielgröße. Zielindifferenz liegt vor, wenn die Änderung einer Zielgröße keinerlei Auswirkungen auf die andere Zielgröße besitzt – vgl. Klein und Scholl (2004): S. 99 und Domschke et al. (1997): S. 28.

⁸⁵ Vgl. Gutenberg (1983): S. 216.

⁸⁶ Vgl. Kurbel (2005): S. 12, Kistner und Steven (1990): S. 252 und Wiendahl (2008): S. 253.

⁸⁷ Vgl. Lödding (2008): S. 35 ff.

Ressourcenbelegungsplanung keinen direkten Einfluss auf die von den Mitarbeitern der Montagestationen bereitgestellte Produktionskapazität mehr nehmen.

Ein weiterer Aspekt, der gegen die hohe Auslastung als vorrangiges Ziel spricht, ist, dass die Prozesskosten des Spezialmaschinenbaus im Verhältnis zu den Kapitalbindungskosten verhältnismäßig gering ausfallen und deswegen die Kapitalbindungskosten als der wichtigere, die Kosten beeinflussende, Faktor anzusehen ist. Demzufolge ist eine hohe Auslastung kein vorrangiges Ziel der Ressourcenbelegungsplanung.

- **Niedrige Bestände**

Die Bestände eines Unternehmens wirken sich zum einen durch ihre Kapitalbindung unmittelbar auf die Finanzsituation eines Unternehmens aus (Kapitalbindungskosten), zum anderen entstehen durch höhere Bestände auch höhere Lager-, Transport-, und Handhabungskosten.⁸⁸ Insbesondere bei der Montage von Spezialmaschinen gilt es auf Grund der hohen Wertigkeit des Endproduktes und seiner Komponenten und Teile den Bestand so gering wie möglich zu halten. Durch die Ressourcenbelegungsplanung beeinflussbar sind einerseits die Bestände an Fertigerzeugnissen und andererseits die Fertigungsbestände in der Montage.⁸⁹

Grundsätzlich unterstützt das Ziel „niedrige Bestände“ die Zielsetzung der Kostenminimierung und sollte auch durch Kosten quantifiziert werden. Da hierbei jedoch häufig die entsprechenden Kosten nicht oder nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand erfasst werden können, wird diesem Ziel häufig durch Zeitziele Ausdruck verliehen.

⁸⁸ Bestände lassen sich grundsätzlich nach Lager- und Fertigungsbestand unterscheiden. Lagerbestand umfasst die Rohmaterialien, Komponenten und Enderzeugnisse, welche sich in einem Lager befinden. Im Gegensatz dazu werden hier diejenigen Bestände als Fertigungsbestand (auch als Umlaufbestand, „Ware-in-Arbeit – WIA“ oder engl. „work-in-process – WIP“) bezeichnet, die nicht mehr im Lager sind, deren Bearbeitung bereits begonnen hat und noch nicht abgeschlossen worden ist.

⁸⁹ Die Lagerbestände an Rohmaterialien bzw. Komponenten können durch die Ressourcenbelegungsplanung nicht unmittelbar beeinflusst werden, da sie durch die Hauptproduktionsprogrammplanung (Materialverfügbarkeitstermine) bzw. Materialbedarfsplanung determiniert werden.

Der Bestand an Fertigerzeugnissen kann durch eine termingenaue Lieferung reduziert werden, indem die Fertigstellung der Spezialmaschine nicht vor dem geplanten Fertigstellungstermin erfolgt. Hier besteht eine enge Beziehung zum Ziel der Termintreue (Terminabweichung).

Der Reduzierung des Fertigungsbestands kommt auf Grund der langen Fertigungsdauer und der hohen Wertigkeit eine besondere Bedeutung zu. Der Wertaufbau steigt von Montagestation zu Montagestation an. Dabei steht das Material grundsätzlich ab dem frühesten Starttermin (Materialverfügbarkeitstermin) je Montageoperation im Lager zum Abruf bereit. Nach dem Beginn der Montage auf einer Station bzw. dem Materialabruf wird aus dem Lagerbestand ein Fertigungsbestand. Je später ein Materialabruf also erfolgt, desto niedriger ist der Bestand in der Fertigung.⁹⁰ Demzufolge sollte die Montage auf den einzelnen Stationen so spät wie möglich beginnen. Ist das Material in der Montage angeliefert und demnach Fertigungsbestand, gilt es die Montage in möglichst kurzer Zeit abzuschließen. Diesem Aspekt wird durch das Ziel der möglichst kurzen Durchlaufzeit Rechnung getragen.

Das Ziel niedriger Bestände ist eines der zentralen Ziele der Ressourcenbelegungsplanung, welches jedoch durch die komplementären Ersatzziele „hohe Termintreue“ und „geringe Durchlaufzeiten“ adressiert wird.

- **Hohe Termintreue**

Die Termintreue wird häufig als der „Key Performance Indicator“ (KPI) zur Messung der Kundenzufriedenheit herangezogen. Dabei wird zwischen der Terminabweichung dev_j (engl. „deviation“) eines einzelnen Auftrags j und der allgemeinen Termin-einhaltung dev unterschieden.⁹¹

Die Terminabweichung misst dabei die Differenz zwischen dem geplanten Termin (bzgl. der Problemstellung der vorgegebene Fertigstellungstermin $d_{i,j}$) und dem

⁹⁰ Die Reduzierung der Fertigungsbestände führt erst zu einer Reduzierung der Kapitalbindungskosten, wenn entsprechende Beschaffungskonzepte umgesetzt werden.

⁹¹ In der Literatur sind hierzu, wie zu den anderen Zielen auch, unterschiedliche Definitionen und Begriffe zu finden. Im Fortgang der Arbeit gelten die hier vorgenommenen Definitionen und Begrifflichkeiten.

tatsächlichen Fertigstellungstermin $c_{j,S}^{ACT}$ (dem tatsächlichen Montageendtermin der letzten Operation: $s = S$).

$$dev_j = c_{j,S}^{ACT} - dl_j \quad (2.1)$$

Entsprechend dieser Definition beschreibt eine positive Terminabweichung eine Verspätung (engl. „tardiness“), eine negative Terminabweichung eine Verfrüfung (engl. „earliness“).

Die Termineinhaltung dev hingegen definiert die Termineinhaltungsquote aller Aufträge, wobei allgemein nur verspätete Aufträge sich negativ auf diese auswirken und damit unmittelbar die Zielsetzung der Kundenorientierung adressiert wird.

$$dev = \frac{\text{Anzahl aller Aufträge ohne Verspätung } (dev_j \leq 0)}{\text{Anzahl aller Aufträge}} * 100 \quad (2.2)$$

Verfrühte Aufträge betreffen nicht die Logistikleistung, sondern stehen in direktem Bezug zu den Logistikkosten bzw. den Kapitalbindungskosten (niedrige Fertigerzeugnisbestände) und könnten auch durch den Quotienten der Termineinhaltung berücksichtigt werden. Des Weiteren wirkt sich eine suboptimale Termineinhaltung nicht nur negativ auf die Zielsetzung der Kundenzufriedenheit aus, sondern kann sich auch unmittelbar in messbaren Kosten (z.B. in Konventionalstrafen oder in Zusatzkosten für „Expresslieferungen“) niederschlagen.⁹²

Das Ziel der Termintreue (Terminabweichung und Termineinhaltung) aus dem Bereich Logistikleistung stellt im Kontext der Ressourcenbelegungsplanung ein komplementäres Ziel bezüglich der Logistikkosten bzw. des Ziels der niedrigen Bestände (Fertigerzeugnisse) dar. In Folge dessen ist von der Ressourcenbelegungsplanung als primäres Ziel eine absolute Termintreue zu verfolgen.

⁹² Insbesondere die Konventionalstrafen für eine verspätete Lieferung fallen hier ins Gewicht, da es sich bei Spezialmaschinen zumeist um Investitionsgüter handelt, von deren rechtzeitigem Einsatz die Kunden mitunter abhängig sind und sich deswegen gegenüber Verspätungen vertraglich schützen.

▪ **Kurze Durchlaufzeit**

Die Durchlaufzeit wird im Allgemeinen durch den Bereitstellungszeitpunkt und den Fertigstellungszeitpunkt eines Auftrags definiert.⁹³ Im Kontext der Ressourcenbelegungsplanung wird in dieser Arbeit die Zielgröße Auftragsdurchlaufzeit f_j^{AP} (engl. „flow time“) eines Auftrags j definiert und ist durch den tatsächlichen Fertigstellungstermin c_j^{AP} und den geplanten Montagebeginn $st_{j,1}^{AP}$ der ersten Station bestimmt.

$$f_j^{AP} = c_j^{AP} - st_{j,1}^{AP} \quad (2.3)$$

Eine Verminderung der Durchlaufzeit zielt im Allgemeinen auf die Verkürzung der Lieferzeit des Produktes ab. Die Lieferzeit der Spezialmaschine ist jedoch durch die Ressourcenbelegungsplanung nicht direkt beeinflussbar, sondern wird nach obigen Überlegungen durch die Produktionsprogrammplanung und den daraus resultierenden Fertigstellungsterminen determiniert. Aus diesem Grund wirkt sich eine kurze Durchlaufzeit nicht unmittelbar auf die Logistikleistung und damit die Kundenzufriedenheit aus.

Eine kurze Durchlaufzeit wirkt sich jedoch unmittelbar auf die Höhe der Fertigungsbestände aus und aus diesem Grund wird die Durchlaufzeit damit zum zweiten wichtigen Ziel der Ressourcenbelegungsplanung.

Zur Messung des Zielerreichungsgrads wird die tatsächliche Durchlaufzeit eines Auftrags wie folgt definiert:

$$f_j^{AP} = dl_j - st_{j,1}^{AP} \quad (2.4)$$

Zusammenfassend lässt sich damit folgendes Zielsystem für die Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen spezifizieren:

⁹³ Vgl. Domschke et al. (1997): S. 292.

Das oberste Ziel der Termintreue wird als Satisfizierungziel definiert, da jede Verspätung als nicht akzeptabel und Verfrühungen als nicht wünschenswert – bezüglich der Zielsetzung der Maximierung der Kundenzufriedenheit bzw. der Minimierung der Kosten – angesehen werden. Dabei wird eine **absolute Termintreue** angestrebt.

Das Ziel der kurzen Durchlaufzeit und damit gleichzeitig das Ziel der niedrigen Bestände wird damit zum vorrangigen Extremierungsziel der Planung (Minimierung der Kosten). Da eine kürzere Durchlaufzeit bei identischen Montagestartterminen eine frühere Fertigstellung und damit einen erhöhten Bestand an Fertigerzeugnissen zur Folge hätte, werden stattdessen, durch eine Verkürzung der Durchlaufzeit, spätere Montagestarttermine angestrebt.⁹⁴ Das Ziel „kurze Durchlaufzeiten“ wird in dieser Arbeit damit durch das Ziel „möglichst später **Starttermine**“ substituiert.⁹⁵ Bei Betrachtung eines aufsteigend indizierten Zeitstrahls kann auch von einer **Maximierung der Montagestarttermine** gesprochen werden. Durch die von der Ressourcenbelegungsplanung errechneten späteren Starttermine wird zunächst lediglich ein Transfer von Fertigungsbestand in Lagerbestand vorgenommen. Um die Kapitalbindungskosten durch spätere Starttermine tatsächlich senken zu können, müssen die Beschaffungsprozesse dahingehend ausgerichtet werden, dass die späteren Starttermine auch in späteren Materiallieferungen bzw. deren Fakturierung resultieren. Hierzu können Konzepte wie „Konsignationslager“, „Just-in-Time“ oder „Just-in-Sequence“ herangezogen werden.⁹⁶

Das Ziel „hohe Auslastung“ wird bei der Planung zwar nicht explizit verfolgt, die Auslastung sollte jedoch bestimmte Grenzen nicht unter- bzw. überschreiten.

Ziel der Ressourcenbelegungsplanung ist nach obigen Überlegungen damit die Maximierung der Montagestarttermine, wodurch gleichzeitig eine Minimierung der Durchlaufzeiten und eine Minimierung der Verfrühungen erreicht wird (Abbildung 8 stellt die Zusammenhänge

⁹⁴ Eine frühere Fertigstellung führt im Spezialmaschinenbau nicht zu einer früheren Auslieferung bzw. Fakturierung des Produkts, sondern schlägt sich in erhöhten Kapitalbindungskosten nieder.

⁹⁵ Die Reduzierung der Durchlaufzeiten kann auch zu einer Anpassung der Plandurchlaufzeiten der übergeordneten Ebene, der Produktionsprogrammplanung, herangezogen werden, wodurch die Materialbedarfsplanung beeinflusst und eine Reduzierung der Lagerbestände möglich wird.

⁹⁶ Insbesondere eine gestaffelte Abrufsystematik mit unterschiedlichen Reichweiten und Detaillierungsgraden (bspw. eine Einteilung in Rahmenvereinbarung, Rahmenauftrag und Lieferabruf) kann hier Anwendung finden – vgl. Melzer-Ridinger (2008): S. 168 und Inderfurth (1998).

der Ziele grafisch dar), wobei die Fertigstellungstermine unter allen Umständen einzuhalten sind (absolute Termintreue).

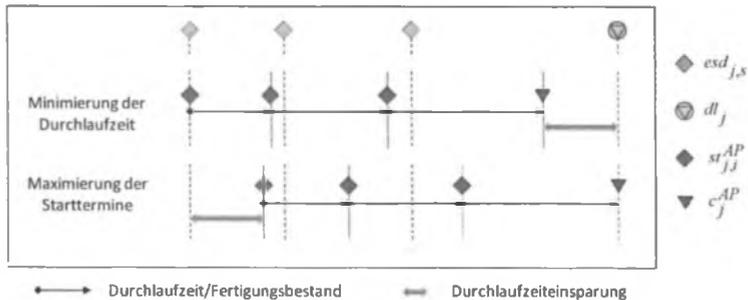


Abbildung 8: Minimierung der Durchlaufzeit vs. Maximierung der Starttermine

Durch die Maximierung der Starttermine auf den Montagestationen werden nicht nur die Durchlaufzeit und damit die Fertigungsbestände minimiert, sondern auch ein maximal dichter Plan zur Abarbeitung der Arbeitspakete erzeugt. Hieraus verstärkt sich das bereits eingangs erwähnte Problem der Unsicherheit, insbesondere das Problem von Störungen bei der Montagedurchführung. Jede Verzögerung während der Durchführung kann sich negativ auf den Fertigstellungstermin eines Auftrags und damit auf das primäre Ziel „Termintreue“ auswirken. Aus diesen Überlegungen lässt sich unmittelbar ein weiteres Ziel der Ressourcenbelegungsplanung ableiten, dass Ziel der **Robustheit der Ressourcenbelegungspläne**.

2.4 Erweiterung der Ziele zur robusten Ressourcenbelegungsplanung

Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung ist es, ein Hybrid-Flow-Shop-Problem mit variablen Bearbeitungsintensitäten zu lösen, mit dem Ziel, die Starttermine der einzelnen Operationen zu maximieren und eine absolute Termintreue zu gewährleisten. Beide Ziele stehen insbesondere dann im Konflikt, wenn vermehrte Unsicherheit über die planungsrelevanten Daten, wie zum Beispiel über die Inhalte der Arbeitspakete oder die Materialverfügbarkeit, besteht.⁹⁷ Diese Unsicherheit resultiert zum einen aus dem

⁹⁷ In der betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre wird je nach Informationsstand zwischen Entscheidungen unter Sicherheit bzw. Unsicherheit unterschieden. Bei Entscheidungen unter Sicherheit sind alle Informationen

dynamischen Umfeld, in dem operative Planung grundsätzlich stattfindet (**Informationsdynamik**)⁹⁸, zum anderen aus stochastischen Einflüssen auf den Produktionsprozess (**Störungen**). Dem Aspekt der Informationsdynamik muss im Falle der Montage von Spezialmaschinen besondere Beachtung zukommen, da die langen Montagedauern und die Kundenspezifität des Produkts zu einer erhöhten Informationsdynamik führen. Neben der Informationsdynamik ist bei der Montage von Spezialmaschinen auf Grund der hohen Produktkomplexität, der stetigen Produktentwicklung (aktuellster Stand der Technik), der Montage nach Kundenspezifikation und nicht zuletzt auf Grund des geringen Automatisierungsgrads der Montage mit einem hohen Ausmaß an Störungen bei der Montagedurchführung zu rechnen.

Um diesen beiden Aspekten Rechnung zu tragen, wird im Folgenden eine Analyse der Ursachen für Informationsdynamik und Störungen sowie ihrer Auswirkungen vorgenommen. Basierend auf dieser Analyse sind dann, im Sinne der robusten Planung (deren Zielsetzung die Erstellung von robusten Plänen ist), diejenigen Eigenschaften und Kriterien der Robustheit zu identifizieren, welche dem spezifizierten Anforderungsprofil gerecht werden.

2.4.1 Unsicherheit bei der Ressourcenbelegungsplanung

Grundlegend lässt sich Unsicherheit nach dem „Ort“ ihrer Entstehung klassifizieren.⁹⁹ Hierbei wird zwischen *exogenen Ursachen*, die außerhalb des Einflussbereichs des Unternehmens liegen, und *endogenen Ursachen*, die innerhalb des Einflussbereichs des Unternehmens liegen, unterschieden.¹⁰⁰ In der Literatur wird mitunter auch zwischen *Planstörungen* und *Prozessstörungen* unterschieden, wobei sich erstere auf den Planungsprozess und letztere auf den Fertigungsprozess auswirken.¹⁰¹ Im Fortgang dieser Arbeit werden Störungen, die

und Daten als bekannt und deterministisch anzunehmen, wohingegen bei Entscheidungen unter Unsicherheit diese (zumindest teilweise) als unbekannt oder dynamisch angesehen werden. Im zweiten Fall wird nach der Existenz von Wahrscheinlichkeiten nach Entscheidungen unter Risiko (falls diese vorhanden) und Entscheidungen unter Ungewissheit (falls nicht vorhanden) unterschieden – vgl. Schneeweiß (1991): S. 34, Adam (1997): S. 215 sowie Klein und Scholl (2004): S. 40. In dieser Arbeit wird keine explizite Unterscheidung zwischen beiden letzteren Arten von Entscheidungen vorgenommen, es werden allgemein Entscheidungen unter Unsicherheit betrachtet.

⁹⁸ Vgl. Scholl et al. (2004).

⁹⁹ Vgl. Greve (1970) und REFA (1978).

¹⁰⁰ Mula et al. (2006) unterscheidet hier zwischen „environmental uncertainty“ bzw. „system uncertainty“.

¹⁰¹ Vgl. Schneeweiß (1988).

sich als Planstörungen erweisen, also Änderungen der planungsrelevanten Informationen nach sich ziehen, unter dem Begriff der **Informationsdynamik** und diejenigen, die sich als Prozessstörungen erweisen, unter dem Begriff der **Störung** subsummiert.¹⁰²

Grundsätzlich wirken sich sowohl Informationsdynamik als auch Störungen auf den Kapazitätsbedarf bzw. das Kapazitätsangebot aus. Dabei ist zwischen zwei unterschiedlichen Auswirkungen zu unterscheiden. Zum einen wirken sich beide darin aus, dass ein **zusätzlicher Kapazitätsbedarf** zum Beispiel durch ein verändertes Arbeitspaket oder Nacharbeit entsteht.¹⁰³ Zum anderen kann die Situation entstehen, dass zum Beispiel durch die Verschiebung von Materialverfügbarkeitsterminen oder Lieferverzögerungen ein Kapazitätsbedarf zu einem späteren Zeitpunkt als ursprünglich vorgesehen gedeckt werden muss und demzufolge ein **verzögerter Kapazitätsbedarf** zu decken ist.¹⁰⁴ Der Fall, dass ein Kapazitätsbedarf zu einem früheren Zeitpunkt (verfrühter Kapazitätsbedarf) gedeckt werden muss, würde nur dann auftreten, wenn der Fertigstellungstermin und damit die jeweiligen Starttermine eines Auftrags auf einen früheren als ursprünglich geplanten Termin verschoben würden. Diese Verschiebung würde jedoch in der übergeordneten Planungsebene in der Produktionsprogrammplanung stattfinden und so alle davon abhängigen Planungsebenen betreffen. Da insbesondere die Leitteileplanung (sowie jede weitere Materialplanung) nach diesen Terminen ausgerichtet wird, ist eine Verschiebung derselben auf einen früheren Termin nicht möglich bzw. stellt einen absoluten Ausnahmefall dar.¹⁰⁵ Bezüglich der in dieser Arbeit formulierten Problemstellung stellen demzufolge verfrühte Kapazitätsbedarfe, im Gegensatz zu verzögerten und zusätzlichen Kapazitätsbedarfen, keine relevante Auswirkung dar.

¹⁰² Diese Einteilung wird hier vorgenommen, um die Begrifflichkeiten deutlich voneinander abzugrenzen. In der Literatur werden unter Unsicherheit bzw. Störungen häufig alle Arten von „Störgrößen“ zusammengefasst. Nach Meinung des Autors sollte hier eine eindeutige Trennung erfolgen.

¹⁰³ Prinzipiell kann auch ein reduzierter Kapazitätsbedarf eine Auswirkung sein. Da diese jedoch nicht mindernd auf die oben formulierten, zu fokussierenden Ziele wirkt (lediglich auf das untergeordnete Ziel der hohen Auslastung), wird diese Auswirkung in dieser Arbeit nicht betrachtet.

¹⁰⁴ Die Problematik eines verzögerten Kapazitätsbedarfs besteht darin, dass eingeplante Kapazität, falls sie nicht durch den ursprünglich geplanten Auftrag oder einen anderen genutzt wird, im Allgemeinen unwiderruflich verloren ist. Allenfalls organisatorische Regelungen wie Arbeitszeitkonten oder Ähnliches können diesem Effekt begrenzt entgegenwirken.

¹⁰⁵ Ein früherer Fertigstellungstermin auf Kundenwunsch kann im Zweifelsfall nur durch eine geänderte Zuordnung von Kundenauftrag zu Planauftrag erfolgen und ist damit Gegenstand der Kundenauftragsplanung – vgl. Abschnitt 2.1. Materialverfügbarkeitstermine und Fertigstellungstermin des Planauftrags dürfen auch in diesem Fall nicht an einen früheren Termin verschoben werden.

2.4.1.1 Informationsdynamik

Grundsätzlich basiert jede betriebliche Planung zu einem erheblichen Teil auf unsicheren Informationen und Daten.¹⁰⁶ Als unsicher werden Informationen bezeichnet, wenn sie zum Zeitpunkt der Planung nicht bekannt sind (und deswegen prognostiziert werden müssen) oder mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass sie sich zukünftig ändern, also dynamisch sind. Diese Informationsdynamik¹⁰⁷ ist dabei nicht als Ausnahmefall zu sehen, sondern stellt den Normalfall jeder realen Planung dar.¹⁰⁸ Grundlage der Ressourcenbelegungsplanung bilden die Informationen, die als Input bzw. Planungsvorgaben von der Produktionsprogrammplanung, der Kapazitätsplanung bzw. der Kundenauftragsplanung definiert werden.¹⁰⁹ Hier sind im Einzelnen zu nennen:

- die frühesten Starttermine (Materialverfügbarkeitstermine),
- die Fertigstellungstermine,
- die Arbeitspakete und
- die Anzahl an Mitarbeitern (und deren Kapazitätsangebot je Schicht).

Diese Daten sind zum Zeitpunkt der Planung zwar bekannt, können auf Grund unterschiedlicher Ursachen jedoch nicht als statisch und deterministisch, sondern müssen als dynamisch bzw. stochastisch angesehen werden. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen exogen und endogen bedingten Ursachen dieser Dynamik.

Exogene Ursachen der Informationsdynamik:

- Grundsätzlich herrscht Unsicherheit darüber, ob externe Zulieferer die mittelfristig in der Leitteile-, Materialbedarfs- und Produktionsprogrammplanung vereinbarten Liefertermine und Liefermengen einhalten oder nicht. Wird eine Verzögerung vorab bekannt, sollte diese unmittelbar in die Planung aufgenommen und der Material-

¹⁰⁶ Vgl. Jacob (1974b): S. 299 und Scholl (2001): S. 7 ff. Die Begriffe „Daten“ und „Information“ sind in diesem Zusammenhang als gleichwertig anzusehen.

¹⁰⁷ Vgl. Scholl et al. (2004).

¹⁰⁸ Vgl. Schlüchtermann (1996): S. 2 ff, Kouvelis und Yu (1997): S. 1 und insbesondere McKay und Wiers (2004) zur Produktionsplanung und -steuerung in der Praxis.

¹⁰⁹ Vgl. Abbildung 4 bzw. Abschnitt 2.3.1.2.

verfügbarkeitstermin entsprechend angepasst werden.¹¹⁰ Hierdurch kann ein verzögerter Kapazitätsbedarf entstehen.

- Im Allgemeinen spielt die Nachfrageunsicherheit bei der nicht-auftragsorientierten Produktion eine große Rolle. Im auftragsorientierten Spezialmaschinenbau (wie er dieser Arbeit zu Grunde liegt) ist die Menge der Aufträge für einen bestimmten Zeitraum bekannt und als deterministisch einzuschätzen. Auftragsstornierungen sind so gut wie nicht existent.¹¹¹
- Eine sehr problemspezifische Ursache der Informationsdynamik liegt in der langen Montagedauer (und damit verbundenen langen Lieferzeit) und der Kundenspezifität der Spezialmaschine begründet. Um einen möglichst hohen Grad an Kundenzufriedenheit zu erreichen, werden dem Kunden Änderungen der Produktspezifikation häufig bis zum Beginn der Montage und darüber hinaus ermöglicht. Hierdurch stellen Änderungen der frühesten Starttermine und der Arbeitspakete keinen Ausnahmefall, sondern den Regelfall dar, wobei sich diese Änderungen in einem zusätzlichen und/oder verzögerten Kapazitätsbedarf niederschlagen können.
- Eine weitere spezifische Ursache liegt in der Verfügbarkeit von zusätzlichen Mitarbeitern im Falle einer Steigerung der Stückzahlen (engl. „ramp up“), wodurch in der Kapazitätsplanung ein erhöhter Kapazitätsbedarf zu berücksichtigen ist. In der Montage von Spezialmaschinen sind überwiegend hochspezialisierte und qualifizierte Mitarbeiter tätig, die nicht ohne Weiteres (zum Beispiel ohne Schulungen etc.) auf dem Arbeitsmarkt verfügbar sind und eingestellt werden können. Hierdurch kann das Kapazitätsangebot durch fehlende oder minderqualifizierte Mitarbeiter unter die Planwerte absinken, was dazu führt, dass ein Kapazitätsbedarf nicht mehr zum ursprünglich geplanten Zeitpunkt gedeckt werden kann. Die Folge ist ein verzögerter Kapazitätsbedarf.

Endogene Ursachen der Informationsdynamik:

¹¹⁰ Vgl. Günther und Tempelmeier (2007): S. 253 und Graves (2006): S. 4.

¹¹¹ Vgl. Gfrerer und Zäpfel (1995), Günther und Tempelmeier (2007): S. 253 und Graves (2006): S. 3.

- Neben den externen Zulieferern sind auch die internen Zulieferer als Ursache der Informationsdynamik zu nennen. Auch hier können Verzögerungen auftreten, die zur Verschiebung der Materialverfügbarkeitstermine und damit zu einem verzögerten Kapazitätsbedarf führen.
- Eine wiederum problemspezifische Ursache ist der hohen Produktkomplexität in Verbindung mit der technologischen Weiterentwicklung des Produkts (aktuellster Stand der Technik) geschuldet. Konstruktionsänderungen resultieren in Materialbedarfs- und Arbeitsplanänderungen, wodurch wiederum Änderungen der Materialverfügbarkeitstermine bzw. der Arbeitspakete verursacht werden können und in einem zusätzlichen und/oder verzögerten Kapazitätsbedarf resultieren.

Obwohl die Ursachen der Informationsdynamik zumeist anderen Planungsebenen bzw. anderen Planungsbereichen zuzuordnen sind, beeinflussen sie unmittelbar die Planungsvorgaben bzw. -daten der Ressourcenbelegungsplanung (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die durch unterschiedlichste Ursachen hervorgerufene Informationsdynamik (bzw. die daraus resultierenden zusätzlichen und/oder verzögerten Kapazitätsbedarfe) muss demnach, insbesondere unter der Zielsetzung der absoluten Termintreue, bei der Ressourcenbelegungsplanung unbedingt berücksichtigt werden.

2.4.1.2 Störungen

„Störungen sind Ereignisse, die unerwartet eintreten und eine Unterbrechung oder zumindest Verzögerung der Aufgabendurchführung zur Folge haben; sie bewirken eine wesentliche Abweichung der Ist- von den Soll-Daten“.¹¹² Im Unterschied zur Unsicherheit der Planungsdaten (Planstörungen) wirken sich Störungen (Prozessstörungen) unmittelbar innerhalb des Produktionssystems auf die Montagedurchführung aus.¹¹³ Um diese Störungen bei der Ressourcenbelegungsplanung berücksichtigen zu können, müssen die potentiellen Ursachen und die jeweiligen Auswirkungen analysiert werden.

¹¹² Vgl. REFA (1978): S. 300.

¹¹³ In diesem Zusammenhang werden Störungen auch als „executional uncertainty“ bezeichnet – vgl. Aytug et al. (2005).

Störarten:¹¹⁴

- **Dispositionsbedingte Störungen** werden durch fehlende oder fehlerhafte Informationen verursacht, wie zum Beispiel durch fehlende oder fehlerhafte Montageunterlagen (Arbeitspläne).¹¹⁵ Hierdurch können ein zusätzlicher Kapazitätsbedarf durch Nacharbeit und/oder ein verzögerter Kapazitätsbedarf durch nachgebesserte Unterlagen entstehen.
- **Personalbedingte Störungen** sind insbesondere bei der Montage von Spezialmaschinen zu erwarten, da hier ein hoher manueller Aufwand und eine komplexe individuelle Produktstruktur vorliegt, die zudem noch häufigen technologischen Änderungen unterworfen ist.¹¹⁶ Hierbei sind durch Arbeitsfehler (die zu Nacharbeit führen) und Abweichungen vom geplanten Leistungsgrad (Überschreitungen der Vorgabezeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge) induzierte, zusätzliche Kapazitätsbedarfe wahrscheinlicher als in anderen Montagesystemen. Zudem unterliegt das durch die Mitarbeiter der Montagestationen bereitgestellte Kapazitätsangebot kurzfristigen Schwankungen (z.B. Krankheit, kurzfristige Urlaubsinanspruchnahmen, unentschuldigtes Fernbleiben von der Arbeit etc.), woraus ein verzögerter Kapazitätsbedarf folgt.
- **Betriebsmittelbedingte Störungen** sind durch Abweichungen von der geplanten Aufgabendurchführung durch unerwartet auftretende Ereignisse an Betriebsmitteln (Maschinen, Werkzeugen, Transportvorrichtungen etc.) gekennzeichnet. Maschinenausfälle, unerwartete Verlängerungen von Wartungsarbeiten oder Leistungsminderungen führen auch hier zu verzögerten bzw. zusätzlichen Kapazitätsbedarfen.
- **Materialbedingte Störungen** treten im Moment des Materialabrufs auf, wenn das erforderliche Material (Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffe) nicht in der benötigten Menge (Fehlteile) und/oder Qualität verfügbar ist. Dies kann durch externe oder

¹¹⁴ Differenzierung der Störungsarten nach Zäpfel (1982): S. 243.

¹¹⁵ Andere Dispositionsbedingte Störungen wie Stornierungen von Aufträgen und kurzfristige Termin- und Mengenänderungen werden in dieser Arbeit als unsichere Daten und damit als Unsicherheit interpretiert.

¹¹⁶ Vgl. Schuh et al. (2008) und Eversheim (1992).

interne Lieferanten verursacht sein. Fehlendes Material kann unmittelbar dazu führen, dass ein Auftrag nicht wie geplant bearbeitet werden kann, sondern die Bearbeitung zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden muss (verzögerter Kapazitätsbedarf). Qualitätsmängel können teilweise durch Nacharbeiten behoben werden, wodurch ein zusätzlicher Kapazitätsbedarf entsteht.

Im Allgemeinen sind die Behebung der Störungen durch vorsorglich getroffene Maßnahmen (z.B. die Bereitstellung von Springern) und deren zielgerichteter Einsatz (welcher Springer in welcher Schicht an welcher Station) Aufgabe der Produktionssteuerung (Real-Time-Steuerung) bzw. des Störungsmanagements.¹¹⁷ Unter Betrachtung des spezifizierten Ziels der Maximierung der Starttermine und der Annahme, dass durch die Planung dieses auch erreicht wird und somit ein sehr dichter Ressourcenbelegungsplan vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Maßnahmen des Störungsmanagements allein nicht ausreichen, um die geforderte absolute Einhaltung der Termine zu gewährleisten. In Konsequenz dessen müssen potentielle Störungen und ihre Auswirkungen (zusätzlicher und verzögerter Kapazitätsbedarf) bereits in der der Produktionssteuerung übergeordneten Ebene der Ressourcenbelegungsplanung berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich damit die Anforderung an die Ressourcenbelegungsplanung stellen, dass sowohl die gegebene Unsicherheit über die Planungsinformationen (Informationsdynamik) als auch die potentiellen Störungen während der Produktionsdurchführung bei der Planung berücksichtigt werden müssen. Dieser Anforderung kann durch die Erstellung robuster Ressourcenbelegungspläne Rechnung getragen werden, also durch eine robuste Planung.¹¹⁸

¹¹⁷ Vgl. Lehmann (1992): S. 17.

¹¹⁸ Schwartz und Voß geben in Schwartz und Voß (2004) bzw. Schwartz und Voß (2005) einen Überblick über unterschiedliche Vorgehensweisen zum Umgang mit Störungen und Unsicherheit. Diese können nach Meinung des Autors jedoch unter dem Begriff der Robusten Planung zusammengefasst werden. Welche dieser und anderer Vorgehensweisen bezüglich der vorliegenden Problemstellung zieladäquat eingesetzt werden können, wird in Kapitel 3 eingehend analysiert.

2.4.2 Robuste Planung

Eine grundlegende Annahme der robusten Planung ist, dass die Einstellung der Entscheidungsträger grundsätzlich risikoavers ist.¹¹⁹ Diese Entscheidungsträger werden an den erzielten Ergebnissen gemessen und zumeist auch erfolgsabhängig vergütet. Demnach spielen hier neben den Zielsetzungen der Unternehmung selbst auch persönliche Zielsetzungen eine Rolle. Zielsetzung der Ressourcenbelegungsplanung muss es also sein, das Risiko, die absolute Termintreue nicht zu erreichen, zu minimieren, wobei gleichzeitig die Chance einer Reduzierung der Kosten durch die Maximierung der Starttermine nicht ungenutzt bleiben soll. Das Risiko liegt dabei in der Informationsdynamik und den potentiellen Störungen bei der Produktionsdurchführung begründet. Wie oben beschrieben, muss es Ziel der Planung sein, nicht nur die formulierten produktionswirtschaftlichen Ziele zu erreichen, sondern auch die Unsicherheit durch eine entsprechende Planung zu „neutralisieren“ oder zumindest in ihren Auswirkungen abzuschwächen. Dies kann durch robuste Ressourcenbelegungspläne erreicht werden, d.h. durch Pläne, die die *Eigenschaft der Robustheit* aufweisen.

Die **robuste Planung** zielt auf die Erstellung dieser robusten Pläne ab. Dabei handelt es sich nicht um ein grundlegend neues Konzept der Planung, sie ist vielmehr als „[...] eine spezielle Form der Planung [zu, C.G.] verstehen, die für Entscheidungssituationen mit *ausgeprägter Unsicherheit* der verfügbaren Informationen [und einem erhöhten Störungsrisiko, C.G.] bei *grundsätzlicher Risikoscheu* der Entscheidungsträger besonders geeignet ist“.¹²⁰ Dabei können verschiedenste existierende, adaptierte oder neu entwickelte Planungskonzepte und -methoden zum Einsatz kommen, wenn sich diese für die beschriebene Entscheidungssituation bzw. das vorliegende Planungsproblem als adäquat im Sinne einer robusten Planung erweisen.

¹¹⁹ Risikoaversion (Risikoscheu) bedeutet, dass der Entscheidungsträger bei der Auswahl aus unterschiedlichen Alternativen mit (nahezu) gleichem zu erwartenden Nutzen diejenige auswählt, die das geringste Risiko birgt – vgl. Bamberg und Coenenberg (2002): S. 92. Bezüglich der vorliegenden Problemstellung sind die Entscheidungsträger die für die operative Produktionsplanung und -durchführung verantwortlichen Führungskräfte.

¹²⁰ Siehe Scholl (2001): S. 116; Auch Kouvelis und Yu schlagen zur Entscheidungsfindung bei Unsicherheit („[...] significant data uncertainty, with particular emphasis on operations and production management [...]“) einen robusten Ansatz vor („[...] we suggests the use of the robustness approach [...]“) – vgl. Kouvelis und Yu (1997): S. xi. Zur Bedeutung der Robusten Planung für den Umgang mit Unsicherheit im Supply Chain Management siehe auch Ziegenbein et al. (2003), van Landeghem und Vanmaele (2002) sowie die dort aufgeführte Literatur.

Bevor eine Analyse existierender Konzepte und Methoden und darauf aufbauend die Konzeption eines problemspezifischen Planungsansatzes möglich ist, werden in den nächsten beiden Abschnitten zunächst die Eigenschaft der Robustheit und verwandte Eigenschaften in Bezug auf robuste Planung näher erläutert und anschließend verschiedene Kriterien zur Beurteilung der Robustheit eines Plans aus unterschiedlichen Blickwinkeln diskutiert.

2.4.2.1 Robustheit und verwandte Eigenschaften

Nach Schneeweiß versteht man allgemein unter Robustheit die Unempfindlichkeit eines Objektes oder Systems gegenüber (zufälligen) Umwelteinflüssen.¹²¹ Scholl greift diesen Gedanken auf und definiert, dass Robustheit eines Plans dann vorliegt, wenn "die Realisierung des Plans – ggf. in modifizierter Form – für (nahezu) jede denkbare zukünftig eintretende Umweltlage zu guten bzw. akzeptablen Ergebnissen im Hinblick auf die bei der Planung verfolgten Ziele führt".¹²² Diese noch nicht sehr präzise Definition der Robustheit kann durch die miteinander in Beziehung stehenden Eigenschaften „Optimalität“, „Elastizität“, „Stabilität“, „Flexibilität“ und „Nervosität“ konkretisiert werden.¹²³

- Ein Plan besitzt die Eigenschaft der **Optimalität**, wenn er unter allen vorstellbaren Plänen für die tatsächlich eintretenden Umweltbedingungen den höchsten Grad der Zielerreichung besitzt. Da die Umweltentwicklungen zum Zeitpunkt der Planung nicht bekannt sind, lässt sich dieser perfekte Plan in der Regel nicht bestimmen. Stattdessen muss versucht werden, Pläne zu erstellen, welche die gesetzten Ziele für möglichst viele potentielle Umweltentwicklungen zu einem möglichst hohen Grad erreichen.

In diesem Zusammenhang ist auch die Eigenschaft der **Zulässigkeit** eines Plans zu nennen. Zulässigkeit heißt, dass der Plan die vorgegebenen (Neben-)Bedingungen für alle zu erwartenden Umweltentwicklungen (weitestgehend) einhält.

¹²¹ Vgl. Schneeweiß (1992): S. 157.

¹²² Siehe Scholl (2001): S. 93.

¹²³ Vergleiche hier und in den folgenden Absätzen Scholl (2001): S. 94 ff. sowie Schneeweiß und Kühn (1990) und die dort angegebene Literatur.

- **Elastizität** bezeichnet die grundsätzliche Fähigkeit eines Systems (Plans), sich an neue bzw. veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Das System besitzt somit ein *Aktionsvolumen*, mit dem es zeitnah auf Änderungen reagieren kann (*Reagibilität*). Im Unterschied zur Flexibilität wird keine Aussage zur Zielwirkung der Anpassung getroffen.
- Als **Stabilität** wird die Eigenschaft eines Plans bezeichnet, dass bei veränderten Umweltbedingungen (Datenänderungen und Störungen) sich dieser im Zeitablauf nicht oder nur in geringem Maße ändert bzw. keine oder nur geringe Anpassungen erforderlich sind. Dabei ist zu unterscheiden, ob sich die Anpassungen auf bereits umgesetzte oder vorläufige Entscheidungen beziehen.¹²⁴ Erstere Anpassungen resultieren unter Umständen in einem hohen Revisionsaufwand, letztere in einer erhöhten Nervosität (siehe unten).
- Unter **Flexibilität** versteht man die Fähigkeit eines Systems (Plans), die vorhandene Elastizität *zielgerichtet* (ökonomisch) zu nutzen. Flexibilität ist grundsätzlich mit Kosten für das Bereithalten und Ausnutzen von Flexibilitätpotentialen (z.B. zusätzliche Mitarbeiter oder Maschinen) verbunden. Deswegen muss eine Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen von Flexibilität vorgenommen werden.¹²⁵ Zudem verursacht das Ausnutzen von Flexibilitätpotentialen ein hohes Maß an Nervosität und beeinträchtigt so die Stabilität eines Plans.
- **Nervosität** eines Plans ist den Änderungen von vorläufigen Entscheidungen (den Veränderungen eines Plans) im Zeitablauf geschuldet. Planungs nervosität resultiert zum einen aus mangelnder Stabilität und zum anderen aus hoher Flexibilität. Insbesondere zwei Auswirkungen von Nervosität muss besondere Beachtung geschenkt werden: Zum einen verlieren sich fortwährend ändernde Pläne schnell an Akzeptanz bei den Ausführenden. Dies kann zur völligen Missachtung jeglicher Pläne führen und damit die Ziele der Unternehmung gefährden. Zum anderen wirken sich Plananpassungen der einen Ebene in fast allen Fällen durch veränderte

¹²⁴ Bezüglich der Reihenmontage von Spezialmaschinen wird zwischen bereits begonnenen Operationen/Aufträgen und nicht begonnenen Operationen/Aufträgen unterschieden.

¹²⁵ Vgl. Adam (1997): S. 287 ff.

Planungsvorgaben auf die nachfolgenden Planungsebenen aus und stellen somit eine Ursache der Informationsdynamik auf diesen Ebenen dar.¹²⁶

Im Kontext dieser Eigenschaften lässt sich die Eigenschaft der Robustheit differenzierter betrachten. Ein Plan ist demnach als robust zu bezeichnen, wenn er für nahezu alle möglichen Umweltentwicklungen eine hohe Stabilität und Optimalität (sowie Zulässigkeit) aufweist, wobei unvermeidbare Plananpassungen unter minimaler Ausnutzung der Flexibilität vorzunehmen sind, um die Nervosität auf ein Minimum zu reduzieren. Eine hohe Stabilität ist bei einer ausgeprägten Informationsdynamik und erhöhtem Störungsrisiko, wie sie bei der Planung der Reihenmontage von Spezialmaschinen vorliegen, nur schwer zu erreichen. Liegt diese Planungssituation vor, kann mit einer Erhöhung der Flexibilität bzw. des Flexibilitätspotentials vorgesorgt werden, um auf unvorhergesehene Abweichungen zu reagieren. Hierbei sei nochmals auf die damit verbundenen Kosten verwiesen, die auch dann den Grad der Zielerreichung verringern (Reduktion der Kosten), wenn das bereitgestellte Flexibilitätspotential nicht abgerufen wird. Abbildung 9 verdeutlicht die Beziehungen und Wechselwirkungen, die zwischen den Eigenschaften existieren.

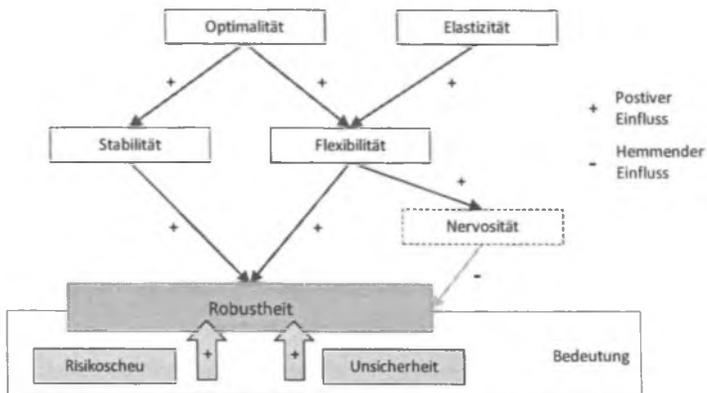


Abbildung 9: Robustheit und verwandte Eigenschaften¹²⁷

¹²⁶ Vgl. Inderfurth und Jensen (1997), sowie Abschnitt 2.3.1 und 2.4.1.1.

¹²⁷ Siehe Scholl (2001): S. 98.

Abschließend lässt sich feststellen, dass, je größer die Risikoscheu der Entscheidungsträger und die Unsicherheit ausgeprägt sind, desto größer die Bedeutung der Robustheit eines Plans ist.

2.4.2.2 Kriterien zur Beurteilung der Robustheit

Zur Beurteilung von (Ressourcenbelegungs-)Plänen bedarf es konkreter Kriterien, um Aussagen über die Robustheit treffen zu können. Dabei kann die Robustheit eines Plans aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und bewertet werden.

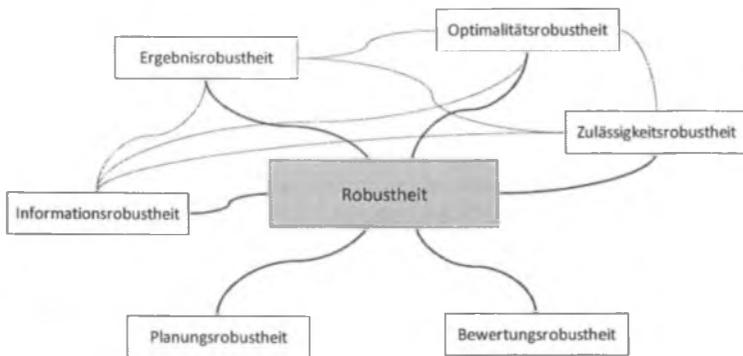


Abbildung 10: Kriterien zur Bewertung der Robustheit¹²⁸

Die in Abbildung 10 dargestellten Kriterien werden nachfolgend näher erläutert und auf ihre Relevanz bezüglich der Ressourcenbelegungsplanung hin untersucht.¹²⁹ Grundsätzlich wird hier angenommen, dass sich zukünftige Umweltentwicklungen durch Szenarien $z = 1, \dots, Z$ (mit Eintrittswahrscheinlichkeiten p_z) beschreiben lassen¹³⁰, jeder Plan AP ein Ergebnis

¹²⁸ Siehe Scholl (2001): S. 99. Durch die gepunkteten Linien werden Beziehungen zwischen den Kriterien angedeutet. Die gestrichelten Linien deuten in der Abbildung eine enge Verknüpfung zwischen den jeweiligen Kriterien an.

¹²⁹ Zu weiterführenden Erläuterungen zu den einzelnen Kriterien sei auf Scholl (2001): S. 98 ff verwiesen. In der englischsprachigen Literatur wird nur eine Unterscheidung zwischen „quality robustness“, „solution robustness“ und „model robustness“ vorgenommen, wobei deren Bedeutung teilweise unterschiedlich ist. Kouvelis und Yu verstehen unter „solution robustness“ Optimalitätsrobustheit und unter „model robustness“ Zulässigkeitsrobustheit – vgl. Kouvelis und Yu (1997). Wohingegen Herroelen und Leus mit „quality robustness“ Optimalitätsrobustheit und mit „solution robustness“ sinngemäß Planungsrobustheit bezeichnen – vgl. Herroelen und Leus (2004a).

¹³⁰ Nach Scholl kann bei Ungewissheit (d.h. es liegen keine Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien vor) nach dem Prinzip des unzureichenden Grundes davon ausgegangen werden, dass alle Szenarien gleich wahrscheinlich sind – Scholl (2001): S. 55 und 99.

$res_z(AP)$ bei Eintreten des Szenarios z erzielt und dass für jedes Szenario das optimale Ergebnis $res_z^*(AP)$ ermittelbar ist.¹³¹

- Die **Ergebnisrobustheit** bezieht sich auf die durch einen Ressourcenbelegungsplan für alle Szenarien erzielbare Höhe der Ergebnisse. In der Regel entsteht hier ein Zielkonflikt, da die Verbesserung des Plans bezüglich eines Szenarios zumeist zur Verschlechterung bezüglich eines anderen Szenarios führt. Um dieser Problematik zu entgehen, kann ein Anspruchsniveau für jedes Ziel definiert werden. Dabei wird je nach Ziel (Maximierungs- und Satisfizierungsziel oder Fixierungsziel) zwischen *total ergebnisrobust* bzw. *total ergebnisstabil* unterschieden. Wird das definierte Anspruchsniveau weitgehend eingehalten oder die Abweichungen sind als gering anzusehen, dann kann von *relativer Ergebnisrobustheit* (bzw. *relativer Ergebnisstabilität*) gesprochen werden.

Das Zielsystem der Ressourcenbelegungsplanung sieht zum einen das Satisfizierungsziel der absoluten Termintreue und das Maximierungsziel der möglichst späten Starttermine vor. Bezüglich ersterem sollte ein total ergebnisstabiler Plan, bezüglich letzterem zumindest eine relative Ergebnisrobustheit angestrebt werden. Die Festlegung eines Anspruchsniveaus stellt im ersten Fall kein Problem dar, ist jedoch für das Ziel der Maximierung der Starttermine nur sehr schwer zu formulieren. Deswegen wird in dieser Arbeit die Ergebnisrobustheit an sich nicht zur Bewertung der Robustheit herangezogen.

- Ein Plan besitzt die Eigenschaft der **Optimalitätsrobustheit**, wenn seine Ergebnisse für jedes Szenario nicht bzw. möglichst wenig vom szenariooptimalen Wert abweichen (relative Ergebnishöhe in Bezug auf das jeweilige Szenario). Je geringer also die Abweichungen in allen betrachteten Szenarien sind, desto optimalitätsrobuster ist der Plan. Diese Abweichung, auch als *Regret* bezeichnet, kann dabei *absolut* oder *relativ* (prozentual) gemessen werden. Hier tritt das Problem auf, dass ein total optimalitätsrobuster (perfekter) Plan (mit optimalen Ergebnissen für alle Szenarien) in der Regel nicht existiert und demnach ein relativ

¹³¹ Diese Annahmen sind bei realen Problemstellungen zumeist nicht gegeben (wie in dieser Arbeit), dienen hier aber der Verdeutlichung und Definition der einzelnen Kriterien.

optimalitätsrobuster Plan (mit geringen und/oder unwahrscheinlichen Abweichungen) gefunden werden muss. Zudem ergibt sich in der Praxis das Problem der Bestimmung des szenariooptimalen Wertes.

Bei der Bewertung der Optimalitätsrobustheit eines Ressourcenbelegungsplans stellt sich die Frage, wie das Optimum eines solchen Plans bestimmt werden kann. Bezogen auf die absolute Termintreue lässt sich der Optimalwert mit den vorgegebenen Fertigstellungsterminen gleichsetzen. Eine optimale, d.h. maximale Verzögerung der Starttermine ist dagegen schwierig bis unmöglich zu bestimmen. Stattdessen wird zur Abschätzung der optimalen (maximalen) Starttermine die minimale Durchlaufzeit $f_{j,s}^{MX}$ der einzelnen Operationen und der Fertigstellungstermin dl , des Auftrags herangezogen. Hieraus lässt sich ein maximaler Starttermin $st_{j,s}^{OPT}$ für jede Operation bestimmen. Unter der Annahme, dass diese optimalen Starttermine für alle Szenarien identisch sind, kann hierdurch auch eine Bewertung der Ergebnisrobustheit vorgenommen werden.

- Mit **Zulässigkeitsrobustheit** bezeichnet man die Eigenschaft eines Plans, für jedes Szenario zulässig zu sein bzw. nur wenig von der Zulässigkeit abzuweichen, d.h. wenn er wie geplant oder mit geringen Modifikationen durchführbar ist. Ein Plan wird demnach umso besser beurteilt, je weniger ungeplante Anpassungen (Kompensationsmaßnahmen) notwendig sind bzw. je geringer die Wahrscheinlichkeit seiner Unzulässigkeit ist. Ein *total zulässigkeitsrobuster* Plan liegt eben dann vor, wenn er für alle denkbaren Szenarien ohne Anpassungen zulässig ist. Ein *relativ zulässigkeitsrobuster* Plan ist dann gegeben, wenn bei der Ausführung des Plans ein gegebenes Flexibilitätspotential nur in geringem Maße und/oder einer geringen Wahrscheinlichkeit genutzt werden muss.

Für die beschriebene Problemstellung der Ressourcenbelegungsplanung bedeutet „zulässig“ an sich, dass weder das vorhandene Ressourcenangebot überschritten, noch die frühesten Starttermine (Materialverfügbarkeitstermine) der Operationen unterschritten werden dürfen. Bezüglich der Einhaltung der Restriktionen kann aus praktischen Überlegungen ein *Zulässigkeitsgrad* definiert oder die endgültige

Entscheidung über die Zulässigkeit eines Plans dem Entscheidungsträger übertragen werden, um so in bestimmten Fällen Unzulässigkeiten zu akzeptieren.

- **Informationsrobustheit** bezieht sich auf die Unempfindlichkeit eines Plans gegenüber der Güte und des Umfangs des bei der Erstellung verfügbaren Informationsstands. Ein Plan ist dabei als (*total bzw. relativ*) *informationsrobust* zu bezeichnen, wenn er bei einem geringeren Informationsstand mindestens oder annähernd so ergebnis-, optimalitäts- und zulässigkeitsrobust ist, wie bei einem höheren (oder dem bestmöglichen) Informationsstand. Dieses Kriterium dient der Abschätzung, ob ein erhöhter Aufwand für die Informationsbeschaffung oder zur Steigerung der Qualität von Planungsinformationen durch eine erhöhte Robustheit des Plans gerechtfertigt ist oder nicht.

Der Informationsstand für die Ressourcenbelegungsplanung könnte nur insofern verbessert werden, dass die Planungsvorgaben (Materialverfügbarkeitstermine, Arbeitspaket und Fertigstellungstermine) einmalig unveränderlich festgelegt würden oder die Anzahl der planungsrelevanten Aufträge durch prognostizierte Aufträge und ihren Daten vergrößert würde. Ersteres würde jedoch der Zielsetzung der erhöhten Kundenorientierung widersprechen, letzteres eine weitere Ursache für Unsicherheit darstellen. Im Kontext der Informationsrobustheit kann jedoch eine Beurteilung der minimalen Anzahl an einzuplanenden Aufträgen durchgeführt werden (unter der Vorgabe, dass keine Beeinträchtigung der Ergebnis-, Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit festzustellen ist). Durch eine möglichst geringe Anzahl an Aufträgen kann der Planungsaufwand reduziert werden.

- Das Kriterium der **Planungsrobustheit** bezieht sich direkt auf die erwünschten Eigenschaften der Planungsstabilität bzw. die nicht erwünschte Nervosität. In Zusammenhang mit der Planung in einem dynamischen, zeitlich offenen System und der damit einhergehenden Umweltentwicklung ist ein Plan dann als (*total bzw. relativ*) *planungsrobust* zu bezeichnen, wenn vollständig oder teilweise realisierte sowie vorläufige Entscheidungen nicht bzw. nur in geringem Umfang revidiert werden müssen. Die Bedeutung der Planungsrobustheit hängt dabei stark von den Auswirkungen der Planänderungen ab. Änderungen, die sich erst weit in der Zukunft

auswirken, können in vielen Fällen als unkritisch beurteilt werden, wohingegen kurzfristige Änderungen sich zum einen negativ auf die Plandurchführung auswirken und zum anderen auch unmittelbar den Grad der Zielerreichung beeinflussen können (z.B. Kosten durch höhere Bestände oder durch Konventionalstrafen).

Die Planungsrobustheit stellt für die Ressourcenbelegungsplanung ein zentrales Kriterium zur Beurteilung der Robustheit dar. Kurzfristige Änderungen der Montagestarttermine von Operationen führen unter Umständen zu Fehlmengen (bei früheren Startterminen) bzw. zu unnötigen Fertigungsbeständen, wenn die Materialabrufe bereits stattgefunden haben. Zudem stellen die durch die Ressourcenbelegungsplanung bestimmten Operationsstarttermine Vorgaben für andere Planungsbereiche dar – bspw. für die kurzfristige Materialplanung (Materialbereitstellung, Lieferabrufe) –, die nur zielführend agieren können, wenn eine ausreichende Planungsstabilität bzw. Planungsrobustheit vorliegt. Auch eine Änderung des Kapazitätsbedarfs durch neue, geänderte oder wegfallende Arbeitspakete oder die Änderung der Rahmentermeine kann die Zulässigkeit des Plans beeinträchtigen. Diese Effekte werden oftmals nicht (oder nicht vollständig) durch die Zulässigkeitsrobustheit erfasst und deswegen durch die Planungsrobustheit beurteilt.¹³²

- Die **Bewertungsrobustheit** bezieht sich nicht unmittelbar auf die Unsicherheit der Umweltentwicklungen, sondern bewertet nicht eindeutige Bewertungsansätze (z.B. Nutzenfunktionen oder Zielgewichte), die in der Regel nicht zweifelsfrei bestimmbar sind. Die Fuzzy-Theorie spricht diesbezüglich auch von der *Unschärfe* der Informationen.¹³³ Hierbei steht nicht die Bewertung eines einzelnen Plans im Vordergrund, sondern die induzierte Reihung von unterschiedlichen Plänen. Ein Plan gilt als (*total* bzw. *relativ*) *bewertungsrobust*, wenn er bei allen Bewertungsansätzen die ersten bzw. vorderen Ränge belegt.

Für die Ressourcenbelegungsplanung kann dieses Kriterium außer Acht gelassen werden, da keine unscharfen Bewertungen vorliegen.

¹³² Vgl. Scholl (2001): S. 110.

¹³³ Vgl. Rommelfanger (1994).

Zusammenfassend lässt sich für die Ressourcenbelegungsplanung feststellen, dass zur Bewertung der Robustheit eines Ressourcenbelegungsplans die Kriterien Planungs-, Zulässigkeits- und Optimalitäts-/Ergebnisrobustheit von Bedeutung sind.

2.4.3 Ziele der robusten Ressourcenbelegungsplanung

Die Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen verfolgt, wie in Abschnitt 2.3.2 spezifiziert, das Ziel der Maximierung der Starttermine unter der Prämisse der absoluten Termintreue. Auf Grund der vorliegenden Unsicherheit über planungsrelevante Informationen und dem erhöhten Störungsrisiko bei der Montage von Spezialmaschinen muss die Ressourcenbelegungsplanung zusätzlich das Ziel verfolgen, robuste Pläne zu erstellen. Zur Bewertung dieses Ziels der Robustheit werden die Kriterien Planungs-, Zulässigkeits-, Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit herangezogen.

Grundsätzliche Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung ist die Festlegung der Schichten (und der jeweiligen Arbeitsintensität), in denen eine Operation durch Mitarbeiter der jeweiligen Montagestation bearbeitet wird. Der resultierende Ressourcenbelegungsplan AP legt damit gleichzeitig für jede Operation einen Starttermin $st_{j,s}^{AP}$ fest, der den Materialabruftermin bestimmt. Die Bestimmung dieses (möglichst späten) Starttermins hängt dabei jeweils von den Planungsdaten eines Auftrags (Fertigstellungstermin dl_j , früheste Starttermine $esd_{j,s}$ und Arbeitspakete $wp_{j,s}$) und dem Ressourcenangebot $r_{s,t}$ ab. Diese Daten sind auf Grund der Unsicherheit nicht statisch und deterministisch, sondern dynamisch und stochastisch, und führen zu zusätzlichem und/oder verzögertem Kapazitätsbedarf (vgl. Abschnitt 2.4.1), mit der Konsequenz, dass ein berechneter Plan (und seine Starttermine) bereits kurz nach dessen Berechnung nicht mehr zulässig (z.B. bezüglich der Ressourcenauslastung) oder optimal (z.B. bezüglich der absoluten Termintreue) ist. Damit ersteres nicht eintritt, muss der berechnete Plan ein gewisses Maß an Zulässigkeitsrobustheit besitzen. Konkret sollte der Plan das zum Zeitpunkt der Planung zur Verfügung stehende Ressourcenangebot derart nutzen, dass Schwankungen auf Bedarfs- oder Angebotsseite nicht unmittelbar dazu führen, dass das Ressourcenangebot überschritten wird. Gleiches gilt bezüglich der Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit, da zusätzlicher oder verzögerter Kapazitätsbedarf sonst unmittelbar in der Problematik resultiert, dass die Fertigstellungstermine nicht mehr eingehalten werden können und somit

die Erreichung des primären Ziels gefährdet ist. Beide Anforderungen, sowohl die nach einer hohen Zulässigkeitsrobustheit und die nach einer hohen Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit sind unter der Vorgabe einer hohen Planungsrobustheit zu gewährleisten. Diese betrifft insbesondere die durch die Planung festgelegten Montagestarttermine, da an diesen Terminen beispielsweise arbeitsvorbereitende Maßnahmen und die Materialbereitstellung ausgerichtet werden. Häufige Änderungen dieser Termine würden unweigerlich zu einer Erhöhung des Störungsrisikos bei der Montagedurchführung führen und damit eine negative Zielwirkung entfalten. Zudem mindern häufige Änderungen die Akzeptanz eines Plans bei den ausführenden Akteuren, was unter Umständen dazu führt, dass jeweils „eigene Pläne“ verfolgt werden, die in den wenigsten Fällen den spezifizierten Ziel zuträglich sind.

3 Konzeption eines Planungsansatzes zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen

Aus den in Kapitel 2 dargestellten speziellen Anforderungen und Zielen der Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen resultiert die Notwendigkeit der Konzeption eines neuen, robusten Planungsansatzes. Dieser Planungsansatz muss neben den produktionswirtschaftlichen Zielen der Maximierung der Starttermine (Kostenreduktion) und der Gewährleistung einer absoluten Termintreue (Erhöhung der Kundenzufriedenheit) auch die notwendige Robustheit des Ressourcenbelegungsplans erreichen. Hierzu bedarf es der Entwicklung eines Konzepts welches festlegt, wie eine robuste Ressourcenbelegungsplanung in den Gesamtplanungskontext der Unternehmung einzubetten ist und der Festlegung der (zeitlichen) Planungsabläufe. Weiterhin ist eine geeignete Methode zu entwickeln, welche die vorliegende Unsicherheit zielführend bei der Planung berücksichtigt, um so die Robustheit des erstellten Plans zu gewährleisten. Eine problemspezifische, robuste Planungsmethode erfordert zudem die Entwicklung eines entsprechenden Lösungsverfahrens, welches die notwendige Lösungsqualität in angemessener Rechenzeit erreicht.¹³⁴

3.1 Analyse und Entwicklung von Konzepten für die robuste Ressourcenbelegungsplanung

Grundlegender Bestandteil des Planungsansatzes ist die Entwicklung eines Konzepts zur Einbettung der Ressourcenbelegungsplanung in den Kontext aller planerischen Tätigkeiten des Unternehmens und zum Ablauf der Planung in seinem dynamischen Umfeld – im Sinne einer robusten Planung. Dazu werden zunächst allgemeine und existierende Konzepte analysiert, um davon ausgehend ein problemspezifisches Konzept zu entwickeln.

¹³⁴ Die hier verwendeten Begriffe und Bezeichnungen (Ansatz, Konzept, Methode) werden in der Literatur nicht einheitlich verwandt, bspw. wird die hierarchische Planung als Konzept, Planungsansatz und Methode bezeichnet. Zur Strukturierung wird in dieser Arbeit zwischen dem Konzept (Einbettung in den Gesamtplanungskontext und Durchführung Ressourcenbelegungsplanung), der Methode (zur Erstellung eines robusten Plans) und dem Lösungsverfahren (Berechnung des Ressourcenbelegungsplans) unterschieden.

3.1.1 Analyse allgemeiner Konzepte für robuste Planung

Wie der Literaturüberblick in Abschnitt 2.2 gezeigt hat, hat sich im Bereich der operativen Produktionsplanung das Konzept der *hierarchischen Planung* durchgesetzt. Diese dezentrale Form der Planung basiert auf den Grundprinzipien *Dekomposition*, *Hierarchisierung* und *Koordination*, wobei das Gesamtproblem in einzelne, miteinander in Beziehung stehende Teilprobleme zerlegt wird.¹³⁵ Diese Form der Planung bildet die Grundlage der SCP-Matrix und stellt eine Grundvoraussetzung für die Erstellung robuster Pläne für komplexe Systeme dar.¹³⁶

Zur Einbettung der Ressourcenbelegungsplanung in die Hierarchie der Planungsaufgaben eines Spezialmaschinenherstellers wird zunächst das Konzept der hierarchischen Planung analysiert, um dann eine konkrete Vorgehensweise zur sachlich-vertikalen Koordination der verschiedenen Planungsebenen beschreiben zu können. Diese Koordination muss dabei stets vor dem Hintergrund einer robusten Planung erfolgen.

In engem Zusammenhang mit der sachlich-vertikalen Koordination von Plänen steht auch deren zeitliche Koordination. Dabei muss insbesondere die Informationsdynamik berücksichtigt werden. Hierzu werden unterschiedliche Konzepte zur Plananpassung und -fortschreibung, und dabei insbesondere das Konzept der *rollierenden Planung*, analysiert. Im Rahmen dieser Konzepte wird auch ein weiterer Ansatz zur Bewältigung von Unsicherheit auf seine zielführende Anwendbarkeit hin überprüft, die *Flexibilitätsplanung*.

3.1.1.1 Hierarchische Planung

Die hierarchische Planung ist aus der Erkenntnis heraus entstanden, dass eine simultane Lösung aller Planungsaufgaben des Unternehmens innerhalb eines Totalmodells (Gesamtplanung) wenig praktikabel und eine reine Sukzessivplanung in der Regel nicht ausreichend ist.¹³⁷ Die grundlegende Idee der hierarchischen Planung ist es, die Gesamtplanungsaufgabe anhand zeitlicher und sachlicher Kriterien in einzelne, untereinander gekoppelte Teilaufgaben (Teilmodelle) von geringerer Komplexität

¹³⁵ Vgl. Klein und Scholl (2004): S. 219 ff.

¹³⁶ Vgl. Scholl (2001): S. 119.

¹³⁷ Vgl. Meal (1984); Fleischmann und Meyr (2003): S. 475.

aufzuspalten (Dekomposition). Diese Teilaufgaben werden nach den Gesichtspunkten *Unsicherheit der Informationen, zeitliche Tragweite und Planungsfrequenz, Wichtigkeit der Entscheidung und angemessener Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad der Daten* bestimmt.¹³⁸ Zudem müssen die Interdependenzen zwischen den Teilaufgaben sowohl bei der Problemaufspaltung als auch bei der Planung der einzelnen Teilaufgaben berücksichtigt werden. Diese Problemaufspaltung resultiert in der Notwendigkeit einer Koordination der Teilaufgaben, um ein optimales Gesamtplanungsergebnis zu erzielen.¹³⁹ Die Koordination der Teilaufgaben erfolgt dabei im Sinne der Sukzessivplanung durch Vorgaben einer übergeordneten an eine untergeordnete Ebene (Hierarchisierung). Das resultierende hierarchische System ist nach Kistner und Steven gekennzeichnet durch

- „eine vertikale Anordnung der Planungsebenen, die durch die Festlegung von Über-/Unterordnungsbeziehungen entsteht;
- das Recht der oberen Ebenen, Vorgaben zu setzen, die das Entscheidungsfeld der untergeordneten Ebenen einschränken;
- die Erfolgsabhängigkeit der oberen Ebenen von den Ergebnissen der unteren.“¹⁴⁰

Die alleinige Koordination durch Vorgaben (*Instruktionen*) von übergeordneten an untergeordnete Ebenen (engl. „Top down“) allein reicht jedoch nicht aus, da die Gefahr besteht, dass diese Vorgaben zu einer übermäßigen Einschränkung des Entscheidungsfeldes der untergeordneten Ebene führen. Dies könnte die erreichbare Lösungsgüte der Teilaufgaben bzw. der Gesamtplanungsaufgabe zu sehr einschränken oder sogar die Bestimmung einer zulässigen Lösung verhindern. Aus diesem Grund sind als weitere Koordinationsmechanismen *Vorkopplung* (engl. „feed forward“) mittels *Antizipation* (antizipierte Modelle) sowie *ex-ante Rückkopplungen* (engl. „ex-ante-feedback“) und *ex-post Rückkopplungen* (engl. „ex-post-feedback“) vorgesehen.¹⁴¹ Diese, auch als *Reaktion*

¹³⁸ Vgl. Hax und Meal (1973), Bitran et al. (1981), Bitran und Hax (1982), Steven (1994) und Kistner und Steven (1990): S. 302.

¹³⁹ Vgl. Kistner und Steven (1990): S. 305 und Steven (1994): S. 33.

¹⁴⁰ Siehe Kistner und Steven (1990): S. 303.

¹⁴¹ Vgl. Schneeweiß (1992): S. 84 und Scholl (2001): S. 36. Für weiterführende Betrachtungen bezüglich Koordinationsmechanismen sei auf Schneeweiß (2003) verwiesen. Schneeweiß betrachtet hier die hierarchische Planung allgemeiner als „Distributed Decision Making“. Speziell zu den unterschiedlichen Formen der Antizipation vergleiche Schneeweiß (2003): S. 243.

bezeichneten Koordinationsmechanismen, können als „Instruktionen“ der untergeordneten an die übergeordnete Planungsebenen (engl. „bottom up“) interpretiert werden. Abbildung 11 illustriert ein solches hierarchisches Planungssystem mit den zwei Ebenen Top-Level und Base-Level sowie dem Objektsystem. Das Objektsystem stellt im Rahmen der hierarchischen Produktionsplanung dabei die zu lenkenden Produktionseinheiten dar. Die beiden Planungsebenen repräsentieren zwei Teilplanungsprobleme, welche durch Interdependenzen voneinander abhängen und ein gemeinsames Ziel verfolgen. Zur Bestimmung eines Ergebnisses berücksichtigt der Top-Level in einem ersten Schritt die charakteristischen Eigenschaften des Base-Levels mittels eines antizipierten Base-Modells (Vorkopplung), um die Anzahl an Planungszyklen¹⁴² möglichst gering zu halten.

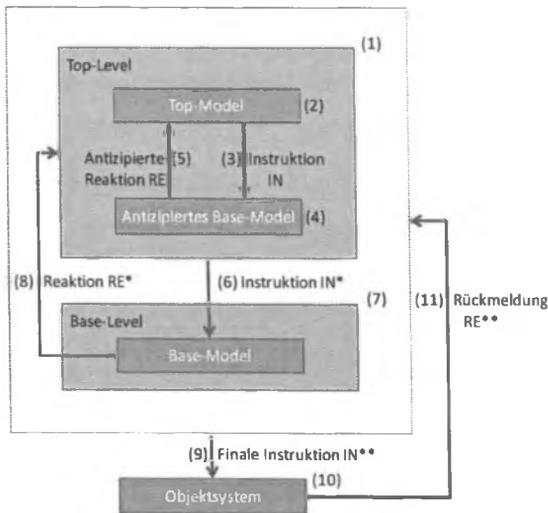


Abbildung 11: Hierarchische Planung eines zweistufigen Systems¹⁴³

Der Top-Level (1) versucht dabei Planungszyklen durch sein eigenes Top-Model (2), das Antizipierte Base Model (4), entsprechenden Instruktionen IN (3) und antizipierten Reaktionen RE (5) im Voraus zu simulieren. Die daraus resultierende Instruktion IN* (6) wird in einem nächsten Schritt dem Base-Level (7) übergeben. Für den Fall, dass der Base-Level

¹⁴² Ein Planungszyklus bezeichnet hier den sequentiellen Ablauf der Schritte (1), (6), (7) und (8).

¹⁴³ In Anlehnung an Schneeweiß (2003): S. 26.

mit dieser Instruktion nicht einverstanden ist (z.B. aufgrund einer Abweichung des antizipierten Base-Modells zum Base-Model; fehlende Kapazität), kann er durch eine Reaktion RE^* (8) eine Neuplanung des Top-Levels auslösen. Hierdurch wird ein Kommunikations- bzw. Verhandlungsprozess zwischen den Ebenen initiiert. Nach Durchführung weiterer Planungszyklen steht das endgültige Ergebnis, in Form der Instruktion IN^{**} (9), fest und wird dem Objektsystem (10) übermittelt. Die (zeitlich verzögerte) Rückmeldung RE^{**} des Objektsystems (11) (z.B. die Rückmeldung von Produktionsdaten aus der Betriebsdatenerfassung des Produktionssystems) steht gleichermaßen dem Top-Level und dem Base-Level zur Verfügung und beeinflusst somit den nächsten Planungszyklus.

Diese Struktur und die Abläufe eines zwei-stufigen Systems lassen sich grundsätzlich auf eine beliebige Anzahl an Stufen erweitern, indem jeweils die zunächst untergeordnete Ebene zur übergeordneten Ebene wird und die nächst nachfolgende zu deren untergeordneten Ebene. Weiterhin gibt der Top-Level Instruktionen zumeist nicht nur an einen Base-Level, sondern an mehrere Base-Level weiter. Ein Top-Level definiert also die Vorgaben für verschiedene Teilplanungsprobleme, wobei diese sich wiederum durch Instruktionen und Reaktionen gegenseitig beeinflussen können.

Dieses Grundkonzept der hierarchischen Planung bildet zum einen die Grundlage der SCP-Matrix (vgl. Abschnitt 2.1) und zum anderen die Ausgangsbasis für die aktuellen Planungsansätze zur operativen Produktionsplanung bei Einzelfertigung bzw. zur Mehrprojektplanung (vgl. Abschnitt 2.2). An dieser Stelle sei explizit auf die Arbeit von Drexl et al. verwiesen, die eine „Hierarchische Integration kapazitätsorientierter PPS-Systeme“ vorschlagen.¹⁴⁴ Abbildung 6 zeigt diese hierarchische Integration für die Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen. Dabei stellt die aggregierte Gesamtplanung die oberste Planungsebene, die Produktionsprogrammplanung die mittlere (sie ist damit unter- und übergeordnete Ebene gleichzeitig) und die Ressourcenbelegungsplanung die unterste Ebene dar.¹⁴⁵ Abbildung 4 stellt die Informationsflüsse

¹⁴⁴ Vgl. Abschnitt 2.2 und 2.3.1, sowie Drexl et al. (1994b): S. 1030.

¹⁴⁵ Die Real-Time-Steuerung stellt im eigentlichen Sinn keine Planungsebene mehr dar, sondern ist für die Durchführung des erstellten Ressourcenbelegungsplans verantwortlich.

zwischen den zwei Ebenen Produktionsprogrammplanung und Ressourcenbelegungsplanung bzw. den einzelnen Teilaufgaben der Ebenen dar.

Die Produktionsprogrammplanung bzw. die Kapazitätsplanung stellen zunächst den Top-Level, die Ressourcenbelegungsplanung den Base-Level dar. Die Instruktionen (IN^*) bestehen dabei aus den Montageaufträgen (jeweils mit den entsprechenden Daten: $esd_{j,s}$, $wp_{j,s}$ und dl_j) bzw. aus dem Ressourcenangebot ($r_{s,j}$). Als antizipiertes Base-Model kann zum Beispiel eine Überprüfung des kumulierten Kapazitätsangebots und -bedarfs (IN) je Montagestation je Arbeitstag herangezogen werden. Ist entweder das Kapazitätsangebot nicht ausreichend oder die Anzahl an Aufträgen übersteigt einen Grenzwert, dann kann durch eine antizipierte Reaktion (RE) eine Neuplanung des Produktionsprogramms bzw. der Kapazität ausgelöst werden. Die Reaktion (RE^*) des Base-Modells fungiert dabei als ex-ante Rückkopplung und löst beispielsweise eine Neuplanung des Top-Levels aus, falls das Kapazitätsangebot nicht ausreicht, um die Montagezeitfenster bzw. den Fertigstellungstermin einzuhalten. Die durch die Ressourcenbelegungsplanung definierten Schichten, in denen ein Auftrag bearbeitet wird, stellen die finale Instruktion (IN^{**}) an das Objektsystem dar. Treten bei der Durchführung Probleme (z.B. durch Störungen) auf, werden die entsprechenden Informationen über Rückmeldungen (RE^{**}) sowohl dem Base-Model als auch dem Top-Model übermittelt. Neben diesen negativen Reaktionen des Base-Levels bzw. des Objektsystems auf die jeweiligen Instruktionen ist für die gegebenen Zielsetzungen Kostenreduktion bzw. Erhöhung der Kundenzufriedenheit insbesondere die Rückmeldung über die Einhaltung der Montagezeitfenster bzw. des Fertigstellungstermins von Bedeutung. Können beispielsweise die Montagezeitfenster grundsätzlich eingehalten werden, d.h. dass die tatsächliche Durchlaufzeit ($f_{j,s}^{ACT}$) der Montage (Objektsystem) und die durch die Ressourcenbelegungsplanung (Base-Model) festgelegte Durchlaufzeit ($f_{j,s}^{AP}$) stets kleiner als die Plandurchlaufzeiten ($f_{j,s}^{PL-AN}$) sind, dann sollte eine Verkürzung der Plandurchlaufzeiten in Erwägung gezogen werden. Hierdurch könnten die Kapitalbindungs-kosten gesenkt und die Lieferzeit verkürzt werden.¹⁴⁶

¹⁴⁶ Zur Problematik der Festlegung und Änderungen von Durchlaufzeiten siehe Selcuk et al. (2006) und Selcuk et al. (2009).

Betrachtet man weiterhin die Ressourcenbelegungsplanung als Top-Level, dann ist das Objektsystem (bzw. die für Produktionsdurchführung verantwortliche Produktionssteuerung) als Base-Model zu sehen. Die Instruktionen *IN** und *IN*** bzw. die Reaktionen *RE** und *RE*** sind dann identisch. Die Vorgabe der Schichten, in denen ein Montageauftrag auf einer Montagestation mit einer bestimmten Intensität bearbeitet wird, stellt die Instruktionen, die Rückmeldung über abgearbeitete Arbeitspaketeile bzw. fertig gestellte Arbeitspakete und Aufträge die Reaktionen dar. Auf Basis dieser Rückmeldung lässt sich der Produktionsfortschritt bestimmen und somit auch auf Ebene der Ressourcenbelegungsplanung überwachen.¹⁴⁷ Zeichnet sich, beispielsweise auf Grund von Störungen und dem damit verbundenen unzureichenden Produktionsfortschritt, eine Gefährdung der termingerechten Fertigstellung eines Auftrags ab, dann kann durch eine Neuplanung auf Ebene der Ressourcenbelegungsplanung darauf reagiert werden. Da bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen von einem erhöhten Störungsrisiko ausgegangen werden kann, folgt daraus, dass Neuplanungen mit einer hohen Häufigkeit durchgeführt werden müssen, wodurch eine hohe Planungsnervosität entsteht. Diese Nervosität beeinträchtigt die Erreichung des angestrebten Ziels der Robustheit. Die Erstellung eines robusten Ressourcenbelegungsplans setzt demzufolge die Einbeziehung von Störungen in die Planung voraus. Diese Einbeziehung kann auch als spezielle Form einer Vorkopplung durch die Antizipation von Störungen angesehen werden. Ein antizipiertes Base-Model (Objektsystem), zum Beispiel in Form eines Simulationsmodells, würde dann auf Basis von Instruktionen (*IN*) und entsprechenden antizipierten Reaktionen (*RE*) dazu beitragen, die Anzahl der Neuplanungen zu verringern oder diese gänzlich unnötig werden zu lassen und somit die Erreichung des Ziels Robustheit positiv beeinflussen.

Die hierarchische Planung trägt zur Erhöhung der Robustheit zum einen durch die Aufspaltung der Gesamtplanungsaufgabe in einzelne Teilaufgaben bei, wodurch die jeweilige Ausprägung der Unsicherheit je Ebene durch angepasste Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrade, Planungsrhythmen und -reichweiten adäquat berücksichtigt werden kann.¹⁴⁸ Zum anderen wird eine Erhöhung der Robustheit durch die verschiedenen

¹⁴⁷ Die Ressourcenbelegungsplanung übernimmt damit auch die Aufgabe der Auftragsfortschrittsüberwachung, welche originär der Produktionssteuerung (Real-Time-Steuerung) zuzuordnen ist (vgl. Tuma (1999): S. 12).

¹⁴⁸ Vgl. Scholl (2001): S. 119.

Möglichkeiten zur Koordination, und im Falle der Ressourcenbelegungsplanung insbesondere durch eine geeignete Antizipation des Base-Levels, erreicht.

3.1.1.2 Rollierende Planung

Neben der sachlichen Koordination der Teilaufgaben durch Instruktionen und Reaktionen stellt die zeitliche Koordination eine der zentralen Herausforderungen der hierarchischen Planung bzw. von Planung überhaupt dar. Die zeitliche Koordination entspricht dabei der Berücksichtigung von zeitlich-vertikalen Interdependenzen bei der Planung in zeitlich offenen Entscheidungsfeldern.¹⁴⁹ Bezüglich der Ressourcenbelegungsplanung besteht diese Interdependenz in den konkurrierenden Ressourcenbedarfen der einzelnen Montageaufträge bzw. Operationen.

Zur zeitlichen Koordination existieren in der Literatur unterschiedliche Konzepte: *Totalplanung*, *Anschlussplanung* und *rollierende Planung*.¹⁵⁰ Da die rollierende Planung zum einen grundsätzlich das Konzept zur zeitlichen Koordination der hierarchischen Planung darstellt¹⁵¹ und zum anderen als adäquates Konzept zur robusten Planung angesehen wird,¹⁵² wird diese nachfolgend in ihren Grundzügen erläutert und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung analysiert.

Die rollierende Planung trifft in jedem Planungsschritt (zum Planungszeitpunkt τ) Entscheidungen für einen Planungshorizont $[\tau, \tau + T - 1]$ bei einer Planreichweite von T Perioden. Im nächsten Planungsschritt wird für einen Planungshorizont $[k, k + T - 1]$ mit $k > \tau$ und $k < \tau + T$ geplant. Durch diese Vorgehensweise sind lediglich diejenigen zum Beginn von Periode τ getroffenen Entscheidungen für die Perioden p mit $p \geq \tau$ und $p < k$ als *verbindlich*, und alle anderen für die Perioden p mit $p \geq k$ als *vorläufig* anzusehen. Alle Entscheidungen, die die Perioden zwischen τ und k betreffen, sind also *fixiert*, man spricht

¹⁴⁹ Vgl. Schüchtermann (1996) und Scholl et al. (2004).

¹⁵⁰ Vgl. Klein und Scholl (2004): S. 197 und Scholl et al. (2004). Rollierende Planung wird mitunter auch als „rollende“, „revolvierende“ oder „revidierende“ Planung bezeichnet. Teilweise unterscheiden sich diese in Details – vgl. Troßmann (1992) und Klein und Scholl (2004): S. 202 –, werden in der Literatur jedoch oft synonym verwendet.

¹⁵¹ Teilweise wird die rollierende Planung sogar als notwendiger Bestandteil der hierarchischen Planung angesehen – vgl. Kistner und Steven (1990) und Steven (1994).

¹⁵² Vgl. Schneeweiß (2002): S. 105 und Scholl (2001): S. 138.

auch von einem „eingefrorenen Horizont“ (engl. „frozen horizon“)¹⁵³ und können im Allgemeinen nicht mehr verändert werden. Die vorläufigen Entscheidungen können hingegen durch nachfolgende Planungsschritte wieder revidiert bzw. modifiziert werden, um so veränderte Umweltbedingungen (Informationen) berücksichtigen zu können. Die Planungsschritte werden dabei (zumeist) in einem konstanten Abstand (Planabstand) $D = k - \tau$ durchgeführt. Bei einem konstanten Planabstand definiert dieser folglich zugleich die Länge (Anzahl an Perioden) des eingefrorenen Horizonts. Dieser in Abbildung 12 dargestellte Ablauf wiederholt sich bis zum Ende des Gesamtplanungszeitraums oder falls dieser nicht gegeben ist, bis zum Ende der Existenz des Planungsgegenstandes.

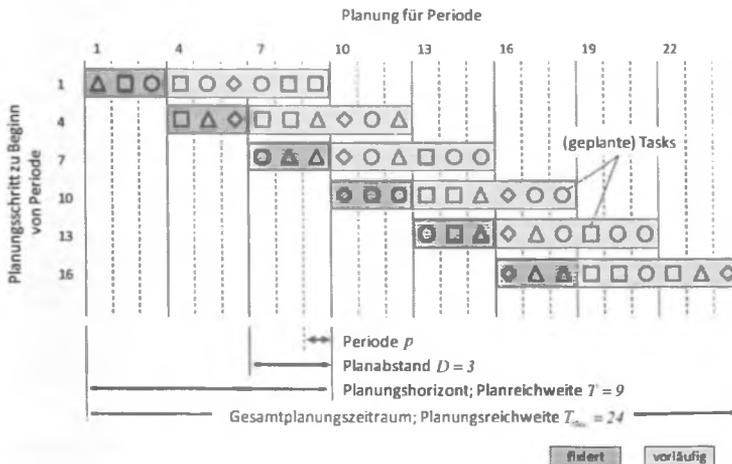


Abbildung 12: Schematischer Ablauf der rollierenden Planung¹⁵⁴

Die rollierende Planung koordiniert zwei aufeinanderfolgende Pläne anhand des durch den Vorgängerplan definierten Endzustandes, wobei durch die Überlappungen der Pläne zeitliche Kopplungen berücksichtigt werden und Anpassungen an eintretende Umweltentwicklungen möglich sind. Entscheidend für die konkrete Ausgestaltung der rollierenden Planung und damit für die Erreichung der Ziele ist die Festlegung der Parameter

¹⁵³ Zur Einteilung des Planungshorizonts vergleiche Feser et al. (1985), Günther (1986), Russell und Urban (1993), Steven (1994): S. 202 und Fleischmann und Meyr (2003): S. 475.

¹⁵⁴ Siehe Klein und Scholl (2004): S. 201. Die verschiedenen Entscheidungen sind hier durch unterschiedliche geometrische Formen dargestellt.

Planreichweite, *Periodenlänge* und *Planabstand* sowie der *Endzustände*. Für die Ressourcenbelegungsplanung wird die Planreichweite, wie in Abschnitt 2.3.1.3 dargestellt, in Abhängigkeit von den planungsrelevanten Aufträgen festgelegt.

Wie zur Bestimmung der Planreichweite existiert auch für die Bestimmung der Periodenlänge kein allgemeingültiges Rezept dafür, wie diese zu bestimmen ist, da sie von einer Vielzahl von Aspekten beeinflusst wird.¹⁵⁵ Je nach Planungsebene kann dabei kalenderorientiert (obere Planungsebenen) bzw. mit starren oder flexiblen Periodenlängen (untere Planungsebenen) geplant werden. Auch problemspezifische Aspekte wie Lösungsverfahren und Komplexität oder die realen Arbeitsbedingungen können maßgebend sein. Weiterhin besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Festlegung der Planreichweite und dem Detaillierungsgrad der Planung. In Anbetracht der großen Planreichweite und der Festlegung des Detaillierungsgrads auf schichtgenaue Planung wird die Periodenlänge mit der Länge einer Schicht gleichgesetzt (starre Periodenlänge). In Verbindung mit dem, durch eine bestimmte Anzahl an Perioden definierten, Planabstand wird hierdurch zudem der Forderung Rechnung getragen, dass Entscheidungen (bei der Ressourcenbelegungsplanung die Festlegung der Schichten, in denen ein Auftrag bearbeitet wird) nur zu den die Perioden begrenzenden Zeitpunkten getroffen werden sollten, um die organisatorische Durchführung derselben gewährleisten zu können.¹⁵⁶

Der Planabstand kann entweder starr (zeitorientiert) oder flexibel (ereignisorientiert) definiert werden. Auch eine Kombination beider Vorgehensweisen ist denkbar, so dass standardmäßig mit einem starren Planungsabstand von beispielsweise zehn Perioden geplant wird und bei Auftritt eines außergewöhnlichen Ereignisses (z.B. einer Störung) außer der Reihe eine Planung durchgeführt wird.¹⁵⁷ Bei der Festlegung des Planabstandes muss grundsätzlich auf ein geeignetes Verhältnis zwischen T und D , auf die Zerlegbarkeit von Entscheidungen, auf die Geschwindigkeit der Planrealisierung und auf die Ausprägung zeitlicher Kopplungen geachtet werden. Zudem spielen die Zeitpunkte, zu denen neue planungsrelevante Informationen oder Änderungen derselben bekannt werden, eine

¹⁵⁵ Vergleiche hier und im folgenden Steven (1994): S. 58 ff.

¹⁵⁶ Vgl. Klein und Scholl (2004): S. 205.

¹⁵⁷ An dieser Stelle sei auf die Gemeinsamkeiten von ereignisorientierter rollierender Planung und den reaktiven Methoden hingewiesen, weswegen eine detailliertere Analyse dieser Vorgehensweise in diesem Abschnitt vorgenommen wird – vgl. 3.2.1.1 sowie Church und Uzsoy (1992).

wichtige Rolle.¹⁵⁸ Als besonders problematisch erweist sich dabei in Bezug auf die Ressourcenbelegungsplanung die nicht gegebene Zerlegbarkeit der Entscheidungen,¹⁵⁹ auf Grund der Forderung, dass sämtliche zeitliche Kopplungen berücksichtigt werden müssen, um die Ziele „absolute Termintreue“ und „Maximierung der Starttermine“ zu erreichen. Weiterhin muss bezüglich der Planrealisierung von einer minimalen Vorlaufzeit (ΔFOR) für die Arbeitsvorbereitung und Materialbereitstellung ausgegangen werden. Von dieser Vorlaufzeit abgesehen, könnte die Durchführung der Montage auch unmittelbar nach der Berechnung begonnen werden, d.h. vor jeder Schicht kann entschieden werden, welcher Auftrag bearbeitet wird. Neue Informationen werden zum einen von der vorgelagerten Produktionsprogramm-, Kapazitäts- und Auftragsplanung in Form von neuen oder geänderten Aufträgen (Fertigstellungstermine $dl_{j,t}$, früheste Starttermine $esd_{j,t}$ und Arbeitspakete $wp_{j,t}$) sowie dem Ressourcenangebot $r_{j,t}$, zum anderen durch die Rückmeldungen über abgearbeitete Arbeitsvorgänge aus der Montage bereitgestellt.¹⁶⁰ In beiden Fällen liegen neue Informationen (potentiell bzw. grundsätzlich) täglich vor. Aus diesen Überlegungen lässt sich ein starrer Planabstand ableiten, der nur in Ausnahmefällen durch eine ereignisorientierte Neuplanung (flexibler Planabstand) in Abhängigkeit der planungsrelevanten Informationen unterbrochen wird. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass sich Informationsänderungen bei der Ressourcenbelegungsplanung in Folge der langen Montagedauern nicht nur auf zukünftige Aufträge beziehen, sondern auch auf die sich bereits in Bearbeitung befindlichen Aufträge. Hieraus resultiert eine spezielle Problematik, welche bei der Entwicklung eines problemspezifischen Konzepts explizit berücksichtigt werden muss. Die Festlegung eines zielführenden Endzustandes ist für die Ressourcenbelegungsplanung nicht ohne weiteres möglich, kann infolge des in Bezug auf die Planreichweite relativ kleinen Planabstandes jedoch vernachlässigt werden.¹⁶¹

In Bezug auf eine robuste Planung bewertet Scholl die rollierende Planung nach unterschiedlichen Aspekten,¹⁶² die teilweise auch für die Ressourcenbelegungsplanung der

¹⁵⁸ Vgl. Klein und Scholl (2004): S. 205 f.

¹⁵⁹ Die Entscheidungen wären beispielsweise dann zerlegbar, wenn keine Kopplung zwischen den Entscheidungen einer Periode und denen der nachfolgenden Periode vorliegen würde.

¹⁶⁰ Abgearbeitete Arbeitsvorgänge vermindern das entsprechende Arbeitspaket, welches bei einer erneuten Planung mit entsprechend weniger Stunden an Ressourcenbedarf einzuplanen ist.

¹⁶¹ Vgl. Klein und Scholl (2004): S. 206.

¹⁶² Vgl. Scholl (2001): S. 139 f.

Reihenmontage von Spezialmaschinen relevant sind. Der wichtigste Aspekt, auch im Vergleich zur Anschlussplanung, ist die *Berücksichtigung der zeitlich-vertikalen Interdependenzen* bei der Festlegung der (verbindlichen) Entscheidungen, die für eine bestimmte Anzahl an Perioden notwendigerweise zu treffen sind. Dabei werden zukünftige Entwicklungen über diesen Entscheidungszeitraum hinaus antizipiert, wodurch einerseits eine unnötige Einschränkung zukünftiger Entscheidungen vermieden, andererseits jedoch auch notwendige Einschränkungen getroffen werden können. Als problematisch im Hinblick auf die Ressourcenbelegungsplanung zeigt sich hier insbesondere die lange Fertigungsdauer in der Montage, wodurch zeitlich-vertikale Interdependenzen über einen langen Zeitraum hinweg berücksichtigt werden müssen. Die bei der Ressourcenbelegungsplanung von Spezialmaschinen vorliegende Informationsdynamik und das erhöhte Störungsrisiko können durch die Berücksichtigung neuer bzw. veränderter Informationen bei jedem Planungsschritt verarbeitet werden, ohne den durch den Planungsabstand vorgegebenen Planungsrhythmus zu unterbrechen. In Folge dieser im Konzept vorgesehenen *Reaktionsmöglichkeit* auf veränderte Umweltentwicklungen durch eine Revision und Modifikation vorläufiger Entscheidungen ist zu erwarten, dass vor allem die Zulässigkeitsrobustheit, aber auch die Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit positiv beeinflusst werden. In Ausnahmefällen können, bei gänzlich unerwarteten Informationsänderungen auch ereignisorientierte Planungsschritte ausgelöst werden. Diese Reaktionsmöglichkeiten durch zeit- bzw. ereignisorientierte Planungsschritte führen jedoch bei kleinem Planabstand bzw. bei häufig auftretenden planungsrelevanten Ereignissen zu einer erhöhten *Planungs nervosität* und damit zu einer verminderten Planungsrobustheit. Zur Verminderung der Planungs nervosität kann die Durchführung eines Planungsschritts auf dem *Net-change-Prinzip* beruhend durchgeführt werden, bei dem nur die tatsächlichen Informationsänderungen (bspw. eines einzelnen Arbeitspakets) zum Gegenstand der Planung werden, und so nur Teile des bisherigen Plans geändert werden.¹⁶³ Im Gegensatz dazu wird bei einem Neuaufwurf jegliche vorangegangene Planung ignoriert und ein „völlig“ neuer Plan errechnet.

Ein weiteres Problem der rollierenden Planung stellt im Allgemeinen der erhöhte *Informationsbedarf* dar. Bezüglich der Ressourcenbelegungsplanung kann jedoch davon

¹⁶³ Vgl. Kurbel (2005): S. 44. Auch hier besteht wiederum ein enger Zusammenhang mit den reaktiven Methoden robuster Planung (vgl. 3.2.1.1).

ausgegangen werden, dass die planungsrelevanten Informationen grundsätzlich verfügbar sind, jedoch auf Grund der langen Montagedauern in der Montage und der damit verbundenen großen Planreichweite großer Unsicherheit unterliegen.

Die rollierende Planung kann diesen Überlegungen zufolge einen bedeutsamen Beitrag zur Robustheit eines Plans leisten, unter der Voraussetzung, dass die erhöhte Planungsnervosität nicht die positiven Effekte überwiegt. Bezüglich der vorliegenden Problemstellung reicht dabei eine alleinige Anpassung der einzelnen Parameter – auf Grund der nicht gegebenen Zerlegbarkeit der Entscheidungen und den langen Montagedauern – nicht aus, sondern eine Adaption des Konzepts der rollierenden Planung ist notwendig und erfordert somit die Entwicklung eines problemspezifischen Konzepts.

3.1.1.3 Flexibilitätsplanung

Grundsätzlicher Ansatz der Flexibilitätsplanung ist es, zur Bewältigung von Unsicherheit Flexibilitätspotentiale aufzubauen (zu planen), um diese dann gegebenenfalls zielgerichtet nutzen zu können.¹⁶⁴ Dabei wird generell das Ziel verfolgt, durch aktuell notwendige Entscheidungen keine bzw. eine möglichst geringe Einschränkung des Entscheidungsfeldes von zukünftigen Entscheidungen vorzunehmen.¹⁶⁵ Die bewertete Flexibilität eines Plans wird in Folge dessen neben den produktionswirtschaftlichen Zielen Zielgröße der Planung.¹⁶⁶ Zur Umsetzung dieser grundlegenden Idee existiert in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze, von denen die bekanntesten im Folgenden kurz skizziert und auf ihre Anwendbarkeit hin analysiert werden.

Der Ansatz von Gupta und Rosenhead¹⁶⁷, die *Methode des robusten ersten Schrittes*, basiert grundsätzlich auf den Prinzipien, Entscheidungen so spät wie möglich zu treffen, um die aktuellsten Informationen berücksichtigen zu können und bei jeder Entscheidung darauf zu achten, ausreichende Entscheidungsspielräume für zukünftige Entscheidungen offen zu halten. Zum aktuellen Zeitpunkt wird lediglich eine erste Entscheidung (*erster Schritt*) getroffen, die für zukünftige Entscheidungen ein ausreichendes Maß an Flexibilität aufweist.

¹⁶⁴ Vgl. Schlüchtermann (1996): S. 92 ff., Adam (1997): S. 287 ff. und Laux (2005): S. 282 ff.

¹⁶⁵ Vgl. Adam (1997): S. 290.

¹⁶⁶ Zu Flexibilität vergleiche Abschnitt 2.4.2.1.

¹⁶⁷ Vgl. Gupta und Rosenhead (1968) und Scholl (2001): S. 146 ff. sowie die dort angegebene Literatur.

Zur Bewertung der Flexibilität wird hier ein Häufigkeitsindex vorgeschlagen. Dieser Ansatz und seine zahlreichen Weiterentwicklungen werden insbesondere im Bereich der strategischen Planung eingesetzt. Die Anwendung dieses Konzeptes bei der Ressourcenbelegungsplanung ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Zum einen tritt das Problem der Festlegung des ersten Schrittes auf. Im Speziellen stellt sich die Frage, welche Aufträge oder Operationen eingeplant werden müssen und welche nicht.¹⁶⁸ Zum anderen ist die grundsätzlich nötige Überprüfung aller potentiellen Entscheidungen zur Bestimmung des Häufigkeitsindex nur bei einer kleinen Anzahl an Variablen möglich.¹⁶⁹ Dies gilt allenfalls für stark aggregierte, strategische Problemstellungen, jedoch nicht für die vorliegende Problemstellung.

Auch die *opportunistische Koordinierung* (engl. „opportunistic scheduling“)¹⁷⁰ zielt darauf ab, Flexibilitätspotentiale durch das Offenhalten von Entscheidungsräumen zu generieren. Dabei legt sie analog zu obiger Methode zwei ähnliche Prinzipien zu Grunde: Das *Prinzip größtmöglicher Auswahlfreiheit* (engl. „principle of opportunism“) und das *Prinzip kleinstmöglicher Entscheidungsbindung* (engl. „principle of least commitment“). Eine detaillierte Beschreibung dieses Konzeptes ist auch bei Zelewski¹⁷¹ zu finden, der zu dem Schluss kommt, dass die opportunistische Koordinierung und seine Grundprinzipien als Meta-Konzept zu verstehen sind, deren Anwendung weiterer Konkretisierungen bedarf. Generell treten hier dieselben Probleme wie bei der Methode des robusten ersten Schrittes auf, weshalb auch die opportunistische Koordinierung für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung nicht geeignet ist.

Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Konzepten der Flexibilitätsplanung, die auf die Berechnung eines weiterreichenden Plans gänzlich verzichten, sehen die unter dem Begriff „flexible Planung“ zusammenfassbaren Konzepte (optimale) *Eventualpläne* für jede denkbare zukünftige Umweltentwicklungen vor.¹⁷² Die flexible Planung wird häufig auch als

¹⁶⁸ Hierbei gilt es insbesondere zu beachten, dass die Starttermine der Operationen die Materialabruftermine darstellen, und damit eine gewisse Vorlaufzeit benötigt wird, die sich auf die „Länge“ eines Planungsschrittes auswirkt. Zudem sind die Interdependenzen zwischen den Aufträgen zu beachten.

¹⁶⁹ Vgl. Scholl (2001): S. 152.

¹⁷⁰ Vgl. Fox und Kempf (1986), Fox (1987) und Corsten und Gössinger (1998).

¹⁷¹ Vgl. Zelewski (1999).

¹⁷² Vgl. Laux (2005): S. 308 f., Scholl (2001): S. 155 und Adam (1997): S. 299.

Gegenpol der starren Planung angesehen, bei der für alle Perioden fixe (starre) Entscheidungen unabhängig von potentiellen Umweltentwicklungen getroffen werden. Die starre Planung muss in Folge dessen auf jede Informationsänderung mit einer Anpassungsmaßnahme reagieren, wohingegen die flexible Planung diese vorhersieht und einen entsprechenden Eventualplan bereithält.¹⁷³

Grundlage der flexiblen Planung ist ein Entscheidungsbaum, in dem die zeitliche Abfolge und die Zusammenhänge von Entscheidungen und Umweltentwicklungen schematisch dargestellt werden. Ein solcher Entscheidungsbaum stellt eine Erweiterung eines Zustandsbaums (Szenariobaums) um Entscheidungsknoten dar.¹⁷⁴ Die Verzweigungen repräsentieren dabei unterschiedliche potentielle Datenkonstellationen mit ihren jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Zur Lösung eines Planungsproblems mit Hilfe der flexiblen Planung gilt es also zunächst, einen (möglichst) vollständigen Entscheidungsbaum aufzubauen, um dann eine optimale *Strategie* zu bestimmen. Eine Strategie bestimmt diejenigen Aktionen, die zu bestimmten Zeitpunkten jeweils ausgewählt bzw. durchgeführt werden. Diese Strategie wird jedoch nicht endgültig festgelegt, sondern je nach Umweltentwicklung kann auf eine andere Strategie gewechselt werden (Eventualplan). Die Strategien selbst können dabei mittels einer Ergebnismatrix oder dem „Roll-Back“-Verfahren bestimmt werden.¹⁷⁵ Eine ausführliche Diskussion der flexiblen Planung in Bezug auf robuste Planung wird von Scholl gegeben.¹⁷⁶ Dieser kommt zu dem Schluss, dass die flexible Planung „prinzipiell geeignet [ist], wenn die Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers sinnvoll widerspiegelnde Entscheidungskriterien verwendet werden und die Aufstellung eines die Wirklichkeit gut und möglichst vollständig repräsentierenden Szenariobaums gelingt“.¹⁷⁷ Vor allem bezüglich der Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit ist die flexible Planung dabei als günstig zu beurteilen. Als problematisch hingegen zeigt sich diese Art der Planung sowohl bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit als auch der Planungsnervosität, falls Umweltentwicklungen eintreten, die bei der Planung nicht vorhergesehen bzw. berücksichtigt wurden. Dann müssten, ebenso wie bei der starren Planung, Anpassungen vorgenommen

¹⁷³ Vgl. Inderfurth (1982).

¹⁷⁴ Für eine detaillierte Darstellung siehe Schlüchtermann (1996): S. 47 und Laux (2005): S. 288 ff.

¹⁷⁵ Vgl. Laux (2005): S. 294 f.

¹⁷⁶ Vgl. Scholl (2001): S. 159 ff.

¹⁷⁷ Siehe Scholl (2001): S. 163.

werden. In Bezug auf die Planungsrobustheit, insbesondere in Bezug auf die Akzeptanz der Pläne, stellen die gegebenenfalls sehr unterschiedlichen Eventualpläne eine große Schwierigkeit dar. Ergebnis der Ressourcenbelegungsplanung sind neben der Zuordnung von Aufträgen zu Schichten auch die Montagestarttermine für jede Station, an denen zum einen die Materialabrufe und zum anderen die Arbeitsvorbereitung ausgerichtet wird. Weichen diese von Eventualplan zu Eventualplan stark voneinander ab, würde dies die Durchführung und damit die Zielerreichung beeinträchtigen. Aus diesem Grund und auf Grund der Tatsache, dass die Bestimmung eines vollständigen Szenariobaums für die Ressourcenbelegungsplanung eine kaum zu bewältigenden Aufgabe darstellt, wird die flexible Planung, wie sie hier skizziert wurde, als nicht zielführend eingeschätzt.

Neben diesen Formen der Flexibilitätsplanung existieren in der Literatur noch viele weitere, die jedoch auf den gleichen Grundprinzipien beruhen, und damit für die Ressourcenbelegungsplanung als ungeeignet einzustufen sind.¹⁷⁸

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass die unterschiedlichen Konzepte zur Flexibilitätsplanung für eine konkrete Ausgestaltung der Ressourcenbelegungsplanung wenig geeignet erscheinen. Neben den jeweils aufgeführten Gründen spricht insbesondere die Tatsache gegen den Einsatz dieser Konzepte, dass entweder zu keinem Zeitpunkt ein vollständiger Plan existiert (Methode des robusten ersten Schrittes, opportunistische Koordinierung) bzw. ein solcher Plan häufig durch einen Eventualplan ersetzt werden muss (Flexible Planung). Da von diesem Plan bzw. den berechneten Operationsstartterminen jedoch Materialbereitstellung, Lieferabrufe und die Arbeitsvorbereitung abhängen, ist ein Plan erforderlich, der „vollständiger“ und von höherer Stabilität ist als diejenigen, die auf Basis der vorgestellten Konzepte der Flexibilitätsplanung erstellt werden.¹⁷⁹ Dennoch sollten deren grundsätzliche Überlegungen bei der Entwicklung eines robusten Planungsansatzes zur Ressourcenbelegungsplanung Berücksichtigung finden. Die Festlegung des Detaillierungsgrads der Ressourcenbelegungsplanung auf schichtgenaue Planung verfolgt den Gedanken der Bereitstellung von Flexibilitätspotentialen insofern, dass für die konkrete

¹⁷⁸ Vergleiche beispielsweise die Flexibilitätsplanung nach Jacob – vgl. Jacob (1974a), Jacob (1974b) und Jacob (1974c) – oder die von Scholl zusammengefasste Theorie der Sekundäranpassung nach Koch und Mellwig – vgl. Scholl (2001): 167.

¹⁷⁹ Zur Notwendigkeit von stabilen vordefinierten Plänen (engl. „pre-computed baseline schedules – pre-schedules“) vergleiche Mehta und Uzsoy (1998), Aytug et al. (2005) und Herroelen und Leus (2004b).

Durchführung der einzelnen Arbeitsgänge keine explizite Reihenfolge, sondern nur das abzuarbeitende Arbeitspaket festgelegt wird. Hierdurch wird dem Entscheidungsträger vor Ort (Stationsleiter) die Flexibilität gewährt, diejenigen Arbeitsgänge durchzuführen, welche möglich sind (bzgl. der Material- und Ressourcenverfügbarkeit) und weitere Handlungsspielräume offen halten. Die zielführende Nutzung des Flexibilitätspotentials wird also dem für die Durchführung der Montage verantwortlichen Entscheidungsträger übertragen.¹⁸⁰

3.1.2 Entwicklung eines Konzepts der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche

Die Analyse existierender Konzepte für die robusten Planung hat gezeigt, dass diese für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen angewendet werden sollten (hierarchische Planung), jedoch problemspezifisch adaptiert werden müssen (rollierende Planung) bzw. nur als Meta-Konzept angewendet werden können (Flexibilitätsplanung).

Die hierarchische Integration der Ressourcenbelegungsplanung in den Kontext der Gesamtplanungsaufgabe eines Spezialmaschinenherstellers definiert durch die von verschiedenen Planungsebenen vorgegebenen Instruktionen die Planungsinhalte und Planungsvorgaben (Planungsinformationen). Diese Informationen sind dabei keineswegs statisch, sondern unterliegen im Zeitverlauf Änderungen, welche bei der Planung zu berücksichtigen sind. Zur Berücksichtigung dieser *Informationsänderungen* wird das Konzept der rollierenden Planung herangezogen. Als Hauptschwachpunkt der rollierenden Planung wurde dabei die erhöhte Planungsnervosität erkannt. Die nachfolgenden Adaptionen und Weiterentwicklungen sollen diese Nervosität reduzieren und die folgenden problemspezifischen Besonderheiten berücksichtigen:

¹⁸⁰ Dieser kann dabei durch entsprechende Information über die Material- und Ressourcenverfügbarkeit etc. unterstützt werden oder, falls notwendig, durch eine weitere Planungsebene (Steuerungsebene), wie sie beispielsweise von Patig und Thorbauer (2002) oder Kolisnyk (2006) vorgeschlagen wird.

- Die Festlegung eines eingefrorenen Horizonts durch einen starren (zeitgesteuerten) Planabstand ist in Folge der langen Durchlaufzeit in der Montage nicht ohne Weiteres möglich.
- Auf Grund der ausgeprägten Informationsdynamik bzw. des hohen Störungsrisikos würde ein flexibler (ereignisgesteuerter) Planabstand zu einer beträchtlichen Erhöhung der Planungsnerovität führen.

Aus diesen Gründen wird eine Einteilung der planungsrelevanten Aufträge in „Planungsbereiche“ vorgenommen, die nicht nur einzelne Operationen von Aufträgen umfassen, sondern jeweils vollständige Aufträge, vom Montagebeginn bis zum Fertigstellungstermin des Auftrags.¹⁸¹ Der erste, so genannte „fixierte Bereich“ (engl. „frozen area“ – AREA-F) beinhaltet dabei zum Planungszeitpunkt τ all diejenigen Aufträge, deren Montagebeginn in der Vergangenheit liegt ($esd_{j,t} \leq \tau$) und diejenigen, deren frühester Starttermin der ersten Station ($esd_{j,t}$) innerhalb eines durch τ und Parameter ΔAF definierten Intervalls liegt ($\tau < esd_{j,t} \leq \tau + \Delta AF$). Der Parameter ΔAF definiert dabei eine bestimmte Anzahl an Werktagen, die die minimale Vorlaufzeit für die Materialbereitstellung bzw. Arbeitsvorbereitung der jeweils ersten Operationen eines Auftrags gewährleisten muss. Der zweite, so genannte „offene Bereich“ (engl. „open area“ – AREA-O), beinhaltet alle Aufträge, deren frühester Starttermin außerhalb des durch ΔAF definierten Intervalls liegt ($esd_{j,t} > \tau + \Delta AF$). In diesen Bereich könnten prinzipiell alle Aufträge, über die Daten vorliegen, aufgenommen werden. Da die Unsicherheit mit zunehmender Reichweite der Planung jedoch steigt, kann, um diese zu reduzieren, ein weiteres Intervall durch den Parameter ΔAO definiert werden, welcher diesen Bereich künstlich schließt. Hierbei muss jedoch bei der Festlegung von ΔAO auf eine ausreichende Informationsrobustheit geachtet werden. Durch die Festlegung von ΔAO wird auch die Planreichweite festgelegt. Abbildung 13 stellt die beiden Planungsbereiche, die jeweils zugeordneten Aufträge und die Intervallgrenzen schematisch dar. Durch diese Aufteilung der Aufträge in zwei Planungsbereiche kann die Planungsnerovität durch jeweils unterschiedliche Planabstände gesteuert und reduziert werden. Dazu werden Planabstände

¹⁸¹ Vergleiche hierzu Abschnitt 2.3.1.3 und die dort geführte Diskussion zur Berücksichtigung zeitlicher Interdependenzen.

D^O bzw. $D^{F,O}$ definiert, die jeweils festlegen, zu welchen Zeitpunkten nur AREA-O bzw. zu welchen Zeitpunkten AREA-F und AREA-O simultan neu geplant werden.¹⁸² Durch diese Unterscheidung können Informationsänderungen, die lediglich die Aufträge von AREA-O betreffen bzw. Aufträge, die bisher bei der Planung nicht berücksichtigt wurden (da für diese bisher $esd_{i,t} > \tau + \Delta AO$ galt), in die Planung aufgenommen werden, ohne eine Erhöhung der Planungsnervosität in AREA-F zu verursachen.

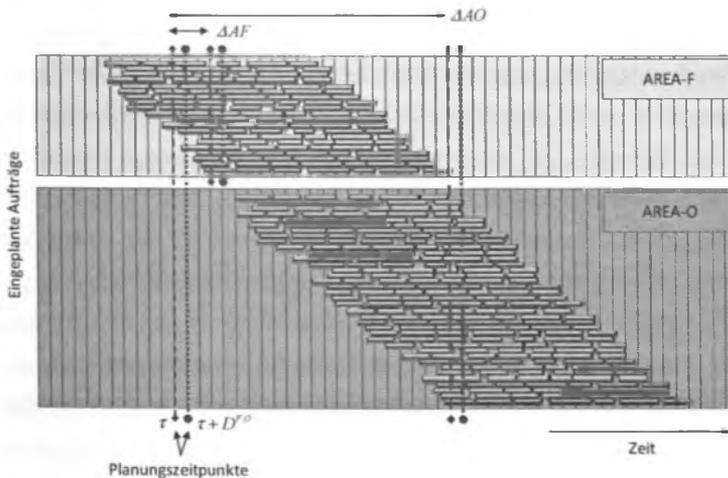


Abbildung 13: Schematische Darstellung der auftragsorientierten Planungsbereiche

Die erhöhte Planungsnervosität von AREA-O hat keinerlei Auswirkung auf die Durchführung der Montage bzw. die von den Startterminen abhängige Materialbereitstellung, da auf Grund der Berücksichtigung der Vorlaufzeiten durch ΔAF kein Handlungsbedarf diesbezüglich besteht. D^O wird als starrer (zeitorientierter) Planabstand definiert. Bezüglich AREA-F müssen die Parameter $D^{F,O}$ und ΔAF jeweils so gewählt werden, dass die minimale Vorlaufzeit zu jedem Zeitpunkt gewährleistet wird, neue Informationen möglichst zeitnah in die Planung aufgenommen werden, und dabei ein Minimum an Planungsnervosität

¹⁸² Im Falle einer alleinigen Planung von AREA-O sind die Operationen der Aufträge von AREA-F als Vorbelegung der Montageressourcen zu betrachten, die das jeweilige Ressourcenangebot um den jeweils eingeplanten Anteil des Arbeitspakets verringern.

entsteht.¹⁸³ Unter der Annahme, dass zu einem bestimmten Planungszeitpunkt Informationsänderungen nur bei Aufträgen von AREA-O auftreten, könnte auf eine Neuplanung von AREA-F gänzlich verzichtet werden und die Parameter $D^{F,O} = \infty$ bzw. $\Delta AF = \Delta FOR$ Werkzeuge gewählt werden. Planungsnervosität innerhalb AREA-F könnte damit gänzlich verhindert werden. Da diese Situation in der Realität jedoch auf Grund der vorliegenden Informationsdynamik und der potentiellen Störungen bei der Durchführung keineswegs vorliegt, müssen auch Änderungen die Aufträge von AREA-F betreffend in die Planung einfließen. Bei der Festlegung des Planungsparameters $D^{F,O}$ muss darauf geachtet werden, die Planungsnervosität so gering wie möglich zu halten und dennoch neue Informationen möglichst zeitnah einzuplanen. In Abhängigkeit dieses Planabstandes muss dann der Planungsparameter ΔAF so gewählt werden, dass die minimale Vorlaufzeit ΔFOR zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist ($\Delta AF - D^{F,O} \geq \Delta FOR$). Sollten keine planungsrelevanten Informationen AREA-F betreffend vorliegen, kann auf eine Neuplanung verzichtet werden. $D^{F,O}$ stellt damit eine Mischung aus zeit- und ereignisorientiertem Planabstand dar. Auch wenn AREA-F zu diesen Zeitpunkten nicht neu geplant wird, eine Neuplanung des AREA-O wird stets durchgeführt. In beiden Fällen werden neue Aufträge, gemäß ΔAO , in die Planung mit aufgenommen und fertiggestellte Aufträge aus der Menge der planungsrelevanten Aufträge entfernt.

Für die Durchführung der **(Neu-)Planung**, die bei jedem Planungsschritt durchzuführen ist, wird in den nachfolgenden Abschnitten eine entsprechende Planungsmethode bzw. ein entsprechendes Lösungsverfahren zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans entwickelt.¹⁸⁴ Dabei müssen, neben dem bisher definierten Anforderungsprofil, weitere durch das neue Planungskonzept bedingte Anforderungen erfüllt werden.

Die Zuordnung der Aufträge zu den Bereichen wird ebenfalls im Abstand von $D^{F,O}$ vorgenommen, auch dann, wenn ein planungsrelevantes Ereignis stattgefunden hat. Dieser als **Bereichsübergang** (engl. „area transition“) bezeichnete Vorgang stellt eine weitere zentrale Komponente des Konzeptes der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche dar.

¹⁸³ In diesem Planungsbereich kommt der Planungsnervosität auf Grund der vom Ressourcenbelegungsplan abhängenden Arbeitsvorbereitung und Materialbereitstellung eine große Bedeutung zu.

¹⁸⁴ Zur Planungsmethode siehe Abschnitt 3.2, zum Lösungsverfahren siehe Abschnitt 3.3.

Ziel der Ressourcenbelegungsplanung ist es, neben der absoluten Termintreue, möglichst späte Starttermine für die Operationen zu berechnen, um durch möglichst späte Materialabrufe die Kapitalbindungskosten zu senken. Damit die Einsparungen realisiert werden können, müssen die berechneten Starttermine ($st_{j,s}^{AP}$) den internen und externen Lieferanten kommuniziert werden und, besonders bei externen Lieferanten, die entsprechenden Vorlaufzeiten eingehalten werden. Diese Vorlaufzeiten müssen bei der Festlegung von ΔAF berücksichtigt werden. Damit die Lieferanten Planungssicherheit für Produktion und Transport des Materials haben, sollten diese Starttermine (Materialabruftermine) ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr verändert (allenfalls auf einen späteren Zeitpunkt verschoben) werden. Aus diesem Grund werden beim Bereichsübergang eines Auftrags j von AREA-O nach AREA-F alle aktuell geplanten Starttermine $st_{j,s}^{AP}$ der Operationen des Auftrags fixiert, und damit zu neuen frühesten Startterminen $esd_{j,s}^{FIX}$ für alle weiteren Planungsschritte, bei denen AREA-F neu geplant wird. Diese fixierten Starttermine werden auch bei Neuplanungen von AREA-F nicht geändert. In Folge dessen können sukzessive die fixierten Starttermine als Materialbereitstellungstermine an die relevanten Unternehmensbereiche und Lieferanten weitergegeben und so durch die später als ursprünglich geplanten Termine die Kapitalbindungskosten gesenkt werden.¹⁸⁵ Durch diese Fixierung von späteren Startterminen können auch die Auswirkungen von (durch die Produktionsprogrammplanung veranlassten) Änderungen von frühesten Startterminen ausgeglichen werden, wenn die fixierten Starttermine später als die veränderten liegen. Dadurch wird die Planungsrobustheit erhöht.

Für die Gewährleistung der Planungsrobustheit ist ausdrücklich zu beachten, dass beim Bereichsübergang eines oder mehrerer Aufträge die Zulässigkeit¹⁸⁶ von AREA-F zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist, um Konflikte möglichst frühzeitig zu lösen und spätere Neuplanungen von AREA-F zu verhindern. Abbildung 14 stellt den Ablauf der Planung mit Planungsbereichen durch ein UML-Aktivitätsdiagramm dar.¹⁸⁷

¹⁸⁵ Vgl. Abschnitt 2.3.2.

¹⁸⁶ Zulässig bedeutet hier, dass weder das vorhandene Ressourcenangebot und die frühesten Starttermine der Operationen, noch die Fertigstellungstermine überschritten werden dürfen.

¹⁸⁷ Die „Unified Modeling Language“ (UML) ist eine standardisierte, von der Object Management Group entwickelte, Modellierungssprache zur Beschreibung von Software und anderen Systemen. Ein

Zu den durch die Planabstände definierten Zeitpunkten werden die neuen Daten dahingehend abgeglichen, ob sie neue Informationen über Aufträge aus AREA-O oder AREA-F beinhalten und anschließend die Menge der zu diesem Zeitpunkt planungsrelevanten Aufträge bestimmt (fertigestellte Aufträge werden entfernt, „neue“ zu AREA-O hinzugefügt). Sind von den Informationsänderungen lediglich Aufträge aus AREA-O betroffen, wird eine Neuplanung von AREA-O durchgeführt und AREA-F bleibt stabil (unverändert). Sind auch Aufträge aus AREA-F betroffen, müssen beide Bereiche neu geplant werden, wobei die fixierten Starttermine $esd_{j,t}^{FIX}$ berücksichtigt werden müssen. Nach Berechnung des neuen Ressourcenbelegungsplans wird der Bereichsübergang durchgeführt und Aufträge entsprechend ihres Starttermins AREA-F zugeordnet. Nach dem Übergang wird die Zulässigkeit von AREA-F bezüglich der Termine und der Ressourcen überprüft. Ist AREA-F zulässig, ist die Neuplanung abgeschlossen, ist AREA-F unzulässig, müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden, um die Zulässigkeit wiederherzustellen.

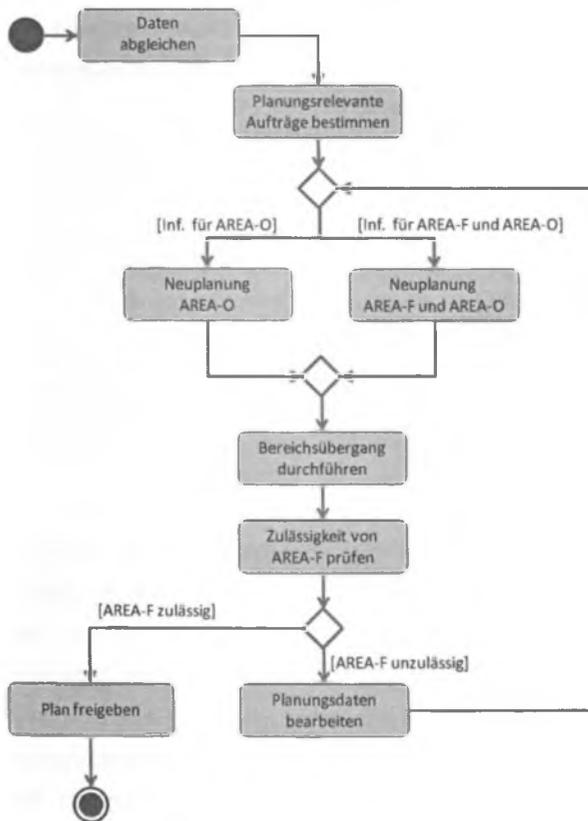


Abbildung 14: Rollierende Planung mit auftragsorientierten Planungsbereichen

Die Unzulässigkeit eines berechneten Ressourcenbelegungsplans sollte dabei grundsätzlich einen seltenen Ausnahmefall darstellen. Da in diesem Fall ein enger Zusammenhang zwischen geplantem Ressourcenangebot und -bedarf in Verbindung mit den Montagezeitfenstern und Fertigstellungsterminen besteht, muss dieses Problem mittelfristig auf den übergeordneten Planungsebenen (Produktionsprogramm- und Kapazitätsplanung) gelöst bzw. ein entsprechendes Feedback an diese Ebenen – im Sinne einer hierarchischen Planung – weitergeleitet werden. Jedoch müssen auch kurzfristig auf Ebene der Ressourcenbelegungsplanung Maßnahmen ergriffen werden können, um die Zulässigkeit des Ressourcenbelegungsplans zu erreichen. Allgemein kommen als Maßnahmen entweder eine Verschiebung von Terminen, eine Erhöhung des Ressourcenangebots oder eine Kombination

aus beiden Möglichkeiten in Frage. Da eine Verschiebung der Fertigstellungstermine auf Grund des Ziels „absolute Termintreue“ nicht ohne weiteres möglich ist und innerhalb AREA-F eine Verschiebung der frühesten Starttermine an einen früheren Termin auf Grund der davon abhängenden Materialbereitstellung unter allen Umständen vermieden werden sollte, kann die Zulässigkeit nur durch eine kurzfristige Erhöhung des Ressourcenangebots erreicht werden. Eine kurzfristige Erhöhung des Ressourcenangebots kann dabei durch Überstunden und/oder zusätzliche Schichten erfolgen. Grundsätzlich sind zwei Vorgehensweisen denkbar, wie die notwendige Zusatzkapazität durch Überstunden oder Zusatzschichten geplant werden können: Automatisiert durch eine entsprechende Planungsmethode, die bereits bei der Berechnung des Ressourcenbelegungsplans notwendige Überstunden und Zusatzschichten plant, oder durch eine manuelle Anpassung des Ressourcenangebots durch den Entscheidungsträger (Planer).¹⁸⁸

Durch das Konzept der **rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche** kann zum einen die vorherrschende Informationsdynamik zumindest teilweise unschädlich gemacht werden, zum anderen die notwendige Stabilität der Operationsstarttermine erreicht werden. Der Festlegung der Planungsparameter D^O , $D^{F,O}$, ΔAF und ΔAO muss dabei besondere Beachtung geschenkt werden. Bis hierhin nicht gelöst ist die Problematik von Informationsänderungen, welche die Aufträge von AREA-F betreffen und die Problematik des hohen Störungsrisikos innerhalb der Montage. Beides kann unmittelbar zur Unzulässigkeit des Ressourcenbelegungsplans führen und damit eine außerplanmäßige Neuplanung beider Planungsbereiche verursachen, wodurch die Planungsnervosität verstärkt würde. Demnach kann das entwickelte Konzept zur robusten Ressourcenbelegungsplanung nur die spezifizierten Ziele erreichen, wenn es mit einer entsprechenden Planungsmethode kombiniert wird. Aufgabe dieser Planungsmethode ist es, die Informationsdynamik bezüglich der Aufträge von AREA-F und die Störungen in der Montage bei der Planung zu berücksichtigen. Weiterhin wird zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplan ein Lösungsverfahren benötigt, welches das durch die Planungsmethode definierte Entscheidungsproblem löst.

¹⁸⁸ Zur Problematik einer automatisierten Anpassung des Ressourcenangebots, bspw. auf Basis von Kompensationsmodellen, sei auf den entsprechenden Absatz in Abschnitt 3.2.1.2.2 verwiesen.

3.2 Analyse und Entwicklung von Methoden zur robusten Ressourcenbelegungsplanung

Das entwickelte Konzept der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche allein reicht nicht aus, um die vorliegende Unsicherheit bei der Planung vollständig zu berücksichtigen bzw. zu neutralisieren. Die verbleibende Informationsdynamik (bzgl. AREA-F) und die Störungen müssen durch eine geeignete Methode zur robusten Ressourcenbelegungsplanung zielführend adressiert werden. Diese Methode muss einerseits eine ausreichende Robustheit und andererseits die absolute Termintreue und möglichst späte Starttermine gewährleisten, wobei im Allgemeinen eine Abwägung zwischen (Planungs-)Robustheit und den produktionswirtschaftlichen Zielen stattfinden muss.¹⁸⁹ Das Planungsproblem der Problemstellung (Hybrid-Flow-Shop mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen) ist durch das neue Planungskonzept nur insofern betroffen, als dass die frühesten Starttermine $esd_{j,a}$ der Operationen der Aufträge von AREA-F durch die neuen, beim Bereichsübergang fixierten frühesten Starttermine $esd_{j,a}^{FLX}$ ersetzt werden. Auch die Art der (Neu-)Planung – nur AREA-O oder AREA-F und AREA-O – beeinflusst das grundsätzliche Planungsproblem nicht. Von besonderer Bedeutung für die Analyse und Entwicklung einer adäquaten Planungsmethode sind die Komplexität der Problemstellung und die Größe der zu lösenden Problemistanz.¹⁹⁰ Da bereits das HFS-Problem mit zwei Stufen (Stationen) und unterbrechbaren Operationen streng NP-schwer ist, ist auch das vorliegende HFS-Problem mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen als NP-schwer einzustufen.¹⁹¹ Die Größe der Problemistanz ergibt sich aus der Anzahl der planungsrelevanten Aufträge und der Anzahl der Montagestationen bzw. der Operationen je Auftrag. Bei 60 Aufträgen und zehn Stationen wären dann beispielsweise 600 Operationen einzuplanen.

In den letzten Jahren hat sich die Literatur bezüglich der Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Planung vervielfacht, wobei unterschiedliche Methoden entwickelt worden sind.

¹⁸⁹ Vgl. van de Vonder et al. (2006) und Lambrechts et al. (2008).

¹⁹⁰ Die Komplexität in Verbindung mit der Größe der Problemistanz ist hier insofern von Bedeutung, dass verschiedene Methoden die Komplexität des Problems (teilweise extrem) erhöhen, und damit dessen Lösbarkeit erschweren bzw. bestimmte Methoden auf Lösungsverfahren basieren, die nur kleinere als die vorliegende Problemistanzen lösen können.

¹⁹¹ Vgl. Hoogeveen et al. (1996) und Domschke et al. (1997): S. 395.

Übersichten zu derartigen Methoden sind unter anderem bei Davenport und Beck¹⁹², Leus¹⁹³, Schwartz und Voß¹⁹⁴, Herroelen und Leus¹⁹⁵ sowie Aytug et al.¹⁹⁶ zu finden. In diesen Übersichten kristallisieren sich zwei grundlegende Vorgehensweisen für den Umgang mit Unsicherheit heraus: *reaktive* bzw. *proaktive Methoden*.¹⁹⁷ Neben diesen grundsätzlichen Methoden existieren weitere, wie zum Beispiel „Fuzzy programming“, „Contingent scheduling“, *Sensitivitätsanalysen* sowie *simulations- und wissensbasierte Systeme*, die häufig auch in Kombination mit oben genannten Methoden Anwendung finden.

Die nachfolgende Analyse untersucht die verschiedenen Methoden auf ihre Anwendbarkeit auf die gegebene Problemstellung und betrachtet zusätzlich die Aspekte transparente Anwendbarkeit, Nachvollziehbarkeit sowie informationstechnische Umsetzbarkeit.

3.2.1 Analyse reaktiver und proaktiver Methoden

Die Analyse der reaktiven und proaktiven Methoden konzentriert sich zum einen auf die Berücksichtigung der Informationsdynamik der Daten von Aufträgen aus AREA-F, die wesentlich geringer ausgeprägt ist als die der Aufträge von AREA-O und nicht durch die rollierende Planung aufgefangen werden kann, und zum anderen auf den Umgang mit Störungen während der Montagedurchführung. Wie in Abschnitt 2.4.1 erläutert, äußert sich beides entweder in einem zusätzlichen und/oder in einem verzögerten Ressourcenbedarf.

3.2.1.1 Reaktive Methoden

Die **reaktiven Methoden**¹⁹⁸ zeichnen sich dadurch aus, dass Entscheidungen dynamisch oder „on-line“ während der Produktionsdurchführung bei Eintritt bestimmter Ereignisse (bspw. der Fertigstellung eines Auftrags oder einer Operation) oder Störungen getroffen werden. Innerhalb der reaktiven Methoden kann grundsätzlich zwischen Methoden unterschieden

¹⁹² Vgl. Davenport und Beck. (2000).

¹⁹³ Vgl. Leus (2003): S. 21 ff.

¹⁹⁴ Vgl. Schwartz und Voß (2004): S. 430.

¹⁹⁵ Vgl. Herroelen und Leus (2004a) bzw. Herroelen und Leus (2005).

¹⁹⁶ Vgl. Aytug et al. (2005).

¹⁹⁷ Die uneinheitliche Verwendung dieser und anderer Begriffe, welche dieselben Inhalte bezeichnen, macht es mitunter schwierig, die Methoden den einzelnen Vorgehensweisen zuzuordnen. Grundlage dieser Arbeit und der Einordnung der Methoden bildet die hier vorgenommene Charakterisierung.

¹⁹⁸ Auch als „reactive scheduling“ oder „(full) dynamic scheduling“ bezeichnet.

werden, welche zu keinem Zeitpunkt einen („vollständigen“) Plan bestimmen¹⁹⁹ und solchen, die a priori einen *Basisplan*²⁰⁰ berechnen, der bei Eintritt bestimmter Ereignisse entweder angepasst oder vollständig Neuberechnet wird.²⁰¹

Erstere Methoden orientieren sich unter anderem am „Prinzip der kleinstmöglichen Entscheidungsbindung“,²⁰² wobei Entscheidungen zumeist auf (relativ einfachen) Einlastregeln (engl. „dispatching rules“ oder „scheduling policies“) beruhen. Durch diese dynamischen Entscheidungen ist es möglich, unmittelbar auf neue Informationen und Störungen zu reagieren. Wie bereits in Abschnitt 3.1.1.3 erläutert wurde, ist die a priori Bestimmung eines Ressourcenbelegungsplans eine Grundvoraussetzung für das Erreichen der spezifizierten Ziele. Aus diesem Grund werden Methoden dieser Art im Fortgang der Arbeit nicht eingehender analysiert.²⁰³

Letztere reaktive Methoden mit Basisplan sehen dabei zumeist drei Phasen vor. In der ersten Phase – vor Beginn der Durchführung – wird ein Basisplan berechnet, in der zweiten Phase – während der Durchführung – wird fortlaufend überprüft, ob der tatsächliche Produktionsfortschritt mit dem geplanten übereinstimmt und in einer dritten Phase gegebenenfalls der Basisplan abgeändert.²⁰⁴ Im Allgemeinen wird bei der Berechnung des Basisplans auf eine Berücksichtigung von Informationsdynamik und Störungen verzichtet, da diese durch entsprechende Neuplanungen berücksichtigt werden sollen. Vieira et al.²⁰⁵ stellen ein „Rescheduling framework“ vor, welches unterschiedliche Problemstellungen nach Art und Menge der einzuplanenden Aufträge („rescheduling environment“), nach Zeitpunkt und Auslöser der Planung („rescheduling strategies“ bzw. „rescheduling policies“) und nach der Art und Weise der Plananpassung bzw. Neuplanung („rescheduling methods“) klassifiziert.

¹⁹⁹ Hierdurch wird die, bereits in Abschnitt 3.1.1.3 angedeutete, enge Verwandtschaft zu den Konzepten der Flexibilitätsplanung deutlich.

²⁰⁰ In der englischsprachigen Literatur als „pre-schedule“ oder „baseline schedule“ bezeichnet.

²⁰¹ Diese Methoden werden entsprechend als „predictive-reactive scheduling“ oder „rescheduling“ bezeichnet.

²⁰² Vgl. Davenport und Beck. (2000): S. 29 bzw. Herroelen und Leus (2004a): S. 1602.

²⁰³ Für weiterführende Informationen sei auf die genannten Übersichten verwiesen.

²⁰⁴ Hier wird ein wesentlicher Unterschied zwischen reaktiven Methoden mit Basisplan und der rollierenden Planung deutlich. Die rollierende Planung (mit festem Planabstand) bestimmt Pläne grundsätzlich vor der Durchführung, wobei davon ausgegangen wird, dass der fixierte Teil der Entscheidungen unverändert durchgeführt wird. Die reaktiven Methoden mit Basisplan sehen eine Plananpassung während der Durchführung vor. Bei rollierender Planung mit flexiblen Planabständen entfällt diese Unterscheidung. Man unterscheidet diesbezüglich auch zwischen „replanning“ und „rescheduling“ – Calhoun et al. (2002).

²⁰⁵ Vgl. Vieira et al. (2003).

Ihre Arbeit stellt zudem eine umfassende Übersicht von reaktiven Methoden dar.²⁰⁶ Von besonderem Interesse für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung sind Zeitpunkt und Auslöser einer Neuplanung sowie die Art und Weise der Reaktion auf veränderte bzw. neue Informationen und Störungen. Zeitpunkt bzw. Auslöser können entweder *periodisch*, *ereignisgesteuert* oder *periodisch und ereignisgesteuert* (hybrid) definiert werden.²⁰⁷ Da die erforderliche Planungsmethode auf die Bewältigung von Störungen und kurzfristigen Informationsänderungen (Aufträge bzw. Operationen aus AREA-F) abzielt, kommt in diesem Zusammenhang jedoch nur eine ereignisgesteuerte Neuplanung in Frage. Die Anpassung des Basisplans an eine solche veränderte Umweltsituation kann grundsätzlich gemäß zweier Prinzipien erfolgen: *vollständige Neuplanung*²⁰⁸ oder *partielle Neuplanung*²⁰⁹.

Im Falle der vollständigen Neuplanung werden alle Operationen (Aufträge) neu geplant, wodurch der gesamte Plan an die neue Umweltsituation angepasst werden kann. Vorteile dieser Art der Neuplanung gegenüber der partiellen sind, dass dasselbe Planungsverfahren wie zur Berechnung des Basisplans eingesetzt werden kann, dass eine vollständige Neuplanung im Allgemeinen in besseren Plänen bezüglich der angestrebten Ziele resultiert, und dass sämtliche Interdependenzen bei der Planung berücksichtigt werden. Als größter Nachteil einer vollständigen Neuplanung ist die sehr hohe Planungsnervosität zu nennen, da hier nicht nur die „gestörten“ Operationen betroffen wären, sondern der gesamte Ressourcenbelegungsplan. Die fixierten Operationsstarttermine sorgen zwar für Stabilität in Bezug auf die davon abhängige Materialplanung, eine ständige Änderung des Plans würde jedoch die Arbeitsvorbereitung und die Durchführung der Montage unmittelbar beeinträchtigen. Diese Probleme treten vor allem dann auf, wenn die Neuplanung bei jeder auftretenden Störung (ereignisgesteuert) durchgeführt wird. Auf Grund der geringen Planungsrobustheit und da die geforderte Planungsmethode insbesondere Störungen und kurzfristige Informationsänderungen zielgerichtet „verarbeiten“ soll, erscheint eine reaktive Methode mit Basisplan und vollständiger Neuplanung als Methode für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen als wenig geeignet.

²⁰⁶ Weitere Übersichten sind beispielsweise bei Sabuncuoglu und Bayiz (2000) und Aytug et al. (2005) zu finden.

²⁰⁷ Vergleiche hierzu wiederum Abschnitt 3.1.1.2 zur rollierenden Planung.

²⁰⁸ Engl. „(full) rescheduling“, „complete regeneration“ oder „global rescheduling“.

²⁰⁹ Engl. „schedule repair“, „partial rescheduling“ oder „local rescheduling“.

Im Gegensatz zur vollständigen wird bei der partiellen Neuplanung nur ein bestimmter Teil der Operationen (Aufträge) bei der Neuplanung berücksichtigt. Die verschiedenen Methoden unterscheiden sich hierbei zum einen in der Auswahl der neu zu planenden Operationen bzw. Aufträge, zum anderen in den Zielen, welche bei der Neuplanung verfolgt werden.²¹⁰

- Das „right shift rescheduling“ verschiebt alle nicht fertiggestellten Operationen so lange nach rechts (in einem Gantt-Diagramm), bis eine zulässige Lösung entsteht. Da diese Vorgehensweise unmittelbar zu einer Verlängerung der Durchlaufzeiten und zur Überschreitung der Fertigstellungstermine führen würde, kann sie bei der vorliegenden Problemstellung nicht angewendet werden.
- Beim „affected operations rescheduling“ wird versucht, die Menge der neu zu planenden Operationen auf ein Minimum zu beschränken, um so die Planungsnerosivität möglichst gering zu halten. Die Bestimmung dieser minimalen Menge der direkt oder indirekt betroffenen Operationen wird zumeist iterativ durchgeführt, wobei diese Menge so lange erweitert wird, bis eine zulässige Lösung gefunden ist. Die Planungsrobustheit wird durch eine Berücksichtigung der Änderungen in der Zielfunktion, durch eine Bewertung der Differenzen zwischen „altem“ und „neuem“ Plan, erreicht.
- Das „match-up scheduling“ versucht eine Art Übergangsplan zu bestimmen, der vom Zeitpunkt der Störung bis zum „match-up point“²¹¹ einen zulässigen Plan darstellt und im ursprünglichen Basisplan mündet. Um die Planungsnerosivität so gering wie möglich zu halten, wird der „match-up point“ dabei iterativ verschoben.

Auf Grund der ereignisgesteuerten Neuplanung existiert das Problem der hohen Planungsnerosivität, auch bei Anwendung der beiden letzteren Methoden, unverändert. Dadurch, dass jegliche Störung und Informationsänderung zu einer Neuplanung führt, würden schon kleinste Störungen und minimale Änderungen zu neuen Ressourcenbelegungsplänen führen und eine ausreichende Planungsrobustheit wäre nicht zu erreichen.

²¹⁰ Zu diesen Methoden sei auf Vieira et al. (2003) und Aytug et al. (2005) sowie die dort angegebene Literatur verwiesen.

²¹¹ Ein Zeitpunkt, zu dem der ursprüngliche Basisplan wieder zulässig und demzufolge ausführbar ist.

Diese Überlegungen führen unmittelbar zu der Schlussfolgerung, dass die in dieser Arbeit analysierten reaktiven Methoden nicht unmittelbar als Planungsmethoden innerhalb des *Konzepts der rollierenden, auftragsorientierten Planungsbereiche* eingesetzt werden können.²¹² Es bleibt jedoch festzuhalten, dass grundlegende Prinzipien dieser Methoden bereits durch die rollierende Planung und die Definition von Planungsbereichen in das Konzept zur robusten Ressourcenbelegungsplanung eingeflossen sind.²¹³

3.2.1.2 Proaktive Methoden

Im Gegensatz zu den reaktiven Methoden zielen die **proaktiven Methoden**²¹⁴ darauf ab, Unsicherheit antizipativ durch die Bestimmung eines vorausschauenden Plans (engl. „predictive schedule“) zu berücksichtigen. Zur Bestimmung eines solchen vorausschauenden Plans existieren in der Literatur vielfältige Methoden, die sich grundsätzlich nach der Art und Weise, wie Informationsdynamik und Störungen berücksichtigt werden, unterscheiden: *einwertig* bzw. *indirekt* oder *mehrwertig* bzw. *direkt*. Bei ersteren Methoden wird die Unsicherheit aus dem Modell verbannt, indem unsichere Informationen durch deterministische ersetzt werden. Bei letzteren Methoden werden für unsichere Informationen (unter Berücksichtigung deren Abhängigkeiten) mehrere mögliche Ausprägungen berücksichtigt. Zur Lösung dieser stochastischen Modelle werden Methoden der *stochastischen* und *robusten Optimierung* herangezogen.²¹⁵

3.2.1.2.1 Einwertige bzw. indirekte Berücksichtigung der Unsicherheit

Methoden, die eine einwertige bzw. indirekte Berücksichtigung der Unsicherheit vorsehen, ersetzen die unsicheren Planungsinformationen mit *deterministischen Ersatzwerten* und eliminieren so die Unsicherheit aus dem Planungsmodell. Informationsdynamik und Störungen werden bei diesen Methoden außerhalb des Modells auf indirekte Weise

²¹² Neben den hier aufgeführten Methoden existieren noch einige weitere, die jedoch zumeist das Problem aufweisen, zu keinem Zeitpunkt einen vollständigen Plan oder mehrere alternative Pläne zu berechnen – vgl. Wu et al. (1999) sowie Davenport und Beck. (2000): S. 28 ff.

²¹³ Die alleinige Planung von AREA-O beispielsweise entspricht in etwa dem Prinzip, nur diejenigen Aufträge und Operationen neu zu planen, die von Änderungen betroffen sind.

²¹⁴ Auch als „proactive scheduling“ oder „robust scheduling“ bezeichnet.

²¹⁵ Vgl. Scholl (2001): S. 119.

entweder durch *geeignete Ersatzwerte (Ersatzwertmodelle)*, durch eine *Bewertung der Robustheit in der Zielfunktion* oder durch *Sensitivitätsanalysen* berücksichtigt.²¹⁶

Bei Methoden mit Ersatzwertmodellen existieren unterschiedliche Vorgehensweisen zur Bestimmung der Ersatzwerte:²¹⁷

- In einem *deterministischen Erwartungswertmodell* werden die unsicheren Informationen durch ihren Erwartungswert ersetzt. Oftmals wird anstelle des Erwartungswertes auch ein für am wahrscheinlichsten gehaltener oder anderweitig prognostizierter Wert verwendet. Durch die Verwendung „mittlerer“ Werte wird mit Hilfe diese Methoden lediglich ein „mittleres“ Szenario betrachtet, wodurch kein ausreichendes Maß an Zulässigkeits-, Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit zu erwarten ist. Auch die Bestimmung der Ersatzwerte ist im Falle der Ressourcenbelegungsplanung bei Spezialmaschinen als problematisch einzustufen, da auf Grund der hohen Komplexität, der stetigen Weiterentwicklung und der Kundenspezifität Vergangenheitswerte nur bedingt aussagekräftig sind.
- *Deterministische Korrekturmodelle* nehmen Sicherheitskorrekturen an den unsicheren Informationen vor. Je nach Art der Information werden Sicherheitszuschläge – wenn größere Werte ungünstig sind – oder Sicherheitsabschläge – wenn kleinere Werte ungünstig sind – herangezogen, um so die Auswirkungen von Informationsdynamik und Störungen zu neutralisieren oder zu vermindern. Die Festlegung der Zu- oder Abschläge erfolgt zumeist prozentual in Abhängigkeit vom unsicheren Wert und beeinflusst signifikant sowohl die Zulässigkeits- und Planungsrobustheit als auch die Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit. Eine ungünstige (zu hohe) Wahl der Zu- bzw. Abschläge erhöht zwar die Zulässigkeits- und Planungsrobustheit, führt aber gleichzeitig zu einer geringeren Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit. Zu gegenteiligen Resultaten würden zu geringe Zu- bzw. Abschläge führen. Der Wahl geeigneter Korrekturfaktoren kommt damit eine zentrale Bedeutung zu. Diese ist zudem als schwierig zu bewerten. Zur

²¹⁶ Die von Scholl vorgeschlagene Risikoanalyse wird hier nicht betrachtet, da die Anzahl der zu berücksichtigenden möglichen Handlungsalternativen zu groß ist, um entsprechende Risikoprofile erstellen zu können – vgl. Scholl (2001): S. 193.

²¹⁷ Vgl. Scholl (2001): S. 187.

Bewertung unterschiedlicher Korrekturfaktoren können jedoch beispielsweise Sensitivitätsanalysen herangezogen werden. Ein wesentlicher Vorteil – vor allem in Bezug auf die vorliegende Problemstellung – dieser Methoden, ist die Nachvollziehbarkeit und Transparenz dieser Vorgehensweise, die auf der expliziten Festlegung der Korrekturfaktoren und deren Auswirkungen auf die Robustheitskriterien beruht.

- *Deterministische Worst Case-Modelle* ersetzen jeden unsicheren Parameter durch den ungünstigsten anzunehmenden Wert. Hierdurch ergeben sich maximale Sicherheitszuschläge bzw. -abschläge, die einer maximalen Risikoscheu des Entscheidungsträgers Rechnung tragen. Auch hier ergibt sich wiederum das Problem der Bestimmung der, hier maximalen, Korrekturfaktoren. Zudem kann durch die extremen Korrekturfaktoren zwar eine totale Zulässigkeitsrobustheit erreicht werden, diese wird jedoch in der Regel durch eine sehr ungünstige Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit erkauft.

Die Analyse dieser Gruppe von Methoden, die Unsicherheit durch geeignete Ersatzwerte bei der Planung berücksichtigen, hat gezeigt, dass für das vorliegende Anforderungsprofil Methoden, die auf deterministischen Korrekturmodellen basieren als am erfolgversprechendsten erscheinen. Methoden, die durch Sicherheitszuschläge bzw. -abschläge Informationsänderungen und Störungen antizipieren, können den in der Literatur auch als Redundanzstrategien²¹⁸ bzw. in der englischsprachigen als „redundancy-based techniques“²¹⁹ bezeichneten Methoden gleichgesetzt werden. Diese Methoden sehen eine Reservierung bzw. Bereitstellung von zusätzlichen Ressourcen (engl. „resource redundancy“) und/oder zusätzlicher Zeit (engl. „time redundancy“) vor, um diese dann gegebenenfalls (bspw. bei Eintritt einer Störung) zu nutzen. Auch das Vorhalten von Sicherheitsbeständen kann als Redundanzstrategie angesehen werden.²²⁰

²¹⁸ Vgl. Schneeweiß (1988) und Schneeweiß (1992): S. 124 ff.

²¹⁹ Vgl. Davenport und Beck. (2000), Leus (2003) und Herroelen und Leus (2004a).

²²⁰ Eine detaillierte Betrachtung der auf Redundanzstrategien basierenden Methoden (bspw. Methoden basierend auf „fault tolerance“, „temporal protection“, „critical chain scheduling and buffer management“ oder „(additional/planned) idle time“) würde an dieser Stelle zu weit führen, stattdessen sei auf die genannten Übersichten und die dort betrachteten Arbeiten verwiesen bzw. werden gegebenenfalls einzelne Arbeiten direkt genannt.

Die zweite Gruppe von Methoden, welche die Unsicherheit indirekt bei der Planung berücksichtigt, bezieht bei der Optimierung ein *Robustheitsmaß als zusätzliches Ziel* mit ein und optimiert dieses simultan zu den ursprünglichen (produktionswirtschaftlichen) Zielen. In Folge dieser Erweiterung der Zielfunktion entsteht ein *multikriterielles Optimierungsmodell*.²²¹ Davenport et al.²²² sowie Al-Fawzan und Haouri²²³ ziehen zur Bewertung der Robustheit „slacks“ heran.²²⁴ Als problematisch anzumerken ist, dass bei ersterer Methode beide Zielarten vermischt werden und bei letzterer Methode alle „slacks“ gleich bewertet werden. Eine gezielte Beeinflussung der Robustheit bzw. der „slacks“ ist somit nicht möglich. Eine ähnliche Vorgehensweise beschreibt Jensen²²⁵, der Robustheit über eine möglichst große Nachbarschaft von ähnlich guten Lösungen definiert. Wullink et al.²²⁶ definieren zwei Robustheitsmaße: „activity plan robustness“, welches ähnlich wie „slacks“ die Möglichkeiten zur Verschiebung von Aktivitäten (Operationen) bewertet und „resource plan robustness“, welches die freie Kapazität aller Ressourcen im betrachteten Zeitraum bewertet. Eine Anwendung dieser Methoden zur Berechnung eines Ressourcenbelegungsplans ist zwar möglich, erscheint aber auf Grund der Intransparenz und der hohen Anforderungen an die Lösungsverfahren (für multikriterielles Optimierungsprobleme) als nicht ratsam. Zudem muss das entsprechende Lösungsverfahren eine Vielzahl an Lösungen errechnen, um letztendlich einen robusten Plan zu finden. Die Methode von Wullink et al. könnte zwar zielführend angewendet werden, zum einen sieht sie jedoch die automatische Einplanung von Zusatzkapazitäten vor, zum anderen ist fraglich, ob deren Branch-and-Price-Verfahren zulässige Lösungen in akzeptabler Rechenzeit berechnen kann.

Auf *Sensitivitätsanalysen* basierende Methoden bewerten das Ergebnis der Optimierung eines deterministischen Ersatzwertmodells.²²⁷ Da die Bewertung nach der Optimierung

²²¹ Im Gegensatz zu Methoden mit mehrwertiger bzw. direkter Berücksichtigung der Unsicherheit werden hier keine Wahrscheinlichkeitsverteilungen angenommen (vgl. Abschnitt 3.2.1.2.2).

²²² Vgl. Davenport et al. (2001).

²²³ Vgl. Al-Fawzan und Haouri (2005).

²²⁴ Als „slack“ wird in diesem Zusammenhang die Zeitspanne bezeichnet, die den Zeitraum angibt, innerhalb derer eine Operation später starten kann ohne nachfolgende Operationen zu beeinflussen.

Einen ähnlichen Ansatz haben Leon et al. bereits 1994 vorgestellt, die zusätzlich Erwartungswerte betrachten – vgl. Leon et al. (1994). Im Forschungsbereich der Projektplanung verfolgen Deblaere et al. einen ähnlichen Ansatz – vgl. Deblaere et al. (2006).

²²⁵ Vgl. Jensen (2001).

²²⁶ Vgl. Wullink et al. (2004b).

²²⁷ Zu Grundlagen der Sensitivitätsanalyse vergleiche Dinkelbach (1969) und Gal (1979): S. 297. Für weiterführende Literatur vergleiche Scholl (2001): S. 189 ff und Hall und Posner (2004).

erfolgt, spricht man auch von einer *postoptimalen Analyse* und bei gleichzeitiger Veränderung mehrerer Parameter von *parametrischer Sensitivitätsanalyse* oder *parametrischer Optimierung*.²²⁸ Allgemeines Ziel ist es, zu analysieren, wie sich die berechnete Lösung bei Variation bestimmter Parameter verhält. Diese, auch als „what if“-Analyse bezeichnete, Vorgehensweise versucht dabei, verschiedene grundsätzliche Fragen zu beantworten:²²⁹

- In welchem Umfang dürfen sich Parameter ändern, ohne dass dadurch die Güte der Lösung beeinflusst wird?
- Wie ändert sich der Zielfunktionswert, wenn sich ein bestimmter Parameter ändert?
- Wie ändert sich die Lösung, wenn sich ein bestimmter Parameter ändert?
- Welche Effekte treten auf, wenn sich mehrere Parameter gleichzeitig ändern?

Der Einsatz von Sensitivitätsanalysen als Methode zur Entscheidung bei Unsicherheit ist allgemein umstritten. Wallace²³⁰ kommt zu dem Schluss, dass diese gänzlich ungeeignet ist und auch Scholl kennt Sensitivitätsanalysen in ihrer üblichen Form „allenfalls als Hilfsmethode zur Beurteilung der Notwendigkeit der expliziten Berücksichtigung der Stochastik von Parametern im Modell“ an.²³¹ Sensitivitätsanalysen allein eignen sich auch deshalb nicht als Methode zur Ressourcenbelegungsplanung, da die meisten der planungsrelevanten Informationen von Unsicherheit betroffen sind.

Die Analyse der verschiedenen Methoden, die eine einwertige bzw. indirekte Berücksichtigung der Unsicherheit vorsehen, hat gezeigt, dass allein Methoden, die auf deterministischen Korrekturmodellen basieren, dem Anforderungsprofil der Ressourcenbelegungsplanung im Kontext des entwickelten Planungskonzeptes und der damit einhergehenden Anforderung einer ausgeprägten Planungsrobustheit gerecht werden. Als problematisch hinsichtlich dieser Methoden ist die Bestimmung der Korrekturfaktoren (Sicherheitszuschläge bzw. -abschläge) zu nennen. Hervorzuheben sind

²²⁸ Vgl. Scholl (2001) und Gal (1979): S. 297.

²²⁹ Vgl. Hall und Posner (2004).

²³⁰ Vgl. Wallace (2000).

²³¹ Siehe Scholl (2001): S. 192.

die Transparenz und die Nachvollziehbarkeit der Auswirkungen unterschiedlicher Korrekturfaktoren auf die Zulässigkeits-, Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit. Ein genereller Vorteil besteht darin, dass deterministische Ersatzwertmodelle mit Verfahren zur Lösung von deterministischen Planungsmodellen gelöst werden können, und somit der Aufwand zur Modellierung und Lösung gering gehalten werden kann. Ein wichtiger negativer Aspekt der Planung mit deterministischen Korrekturmodellen ist, dass die Vorhaltung der Sicherheitszuschläge bzw. -abschläge auch dann Kosten verursacht, wenn diese nicht benötigt werden. In diesem Zusammenhang spielt auch die Ausprägung der Störungen eine wichtige Rolle. Sporadische und einmalige Störungen können im Allgemeinen durch Korrekturmodelle nur mit Hilfe von sehr weitgreifenden und damit kostenintensiven Maßnahmen kompensiert werden. Aus diesem Grund muss hier eine genaue Abwägung zwischen der durch die Korrekturfaktoren erreichbaren Zulässigkeits- und Planungsrobustheit und der Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit erfolgen.

3.2.1.2.2 Mehrwertige bzw. direkte Berücksichtigung der Unsicherheit

Die Berücksichtigung von Unsicherheit erfolgt bei diesen Methoden durch das Einbeziehen mehrerer möglicher Werte und deren Abhängigkeiten in Form von Szenarien mit zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder in Form von Verteilungsannahmen (Verteilungsfunktionen) von wenigen unsicheren Parametern.²³² Grundsätzlich ist dabei von *stochastischen Optimierungsmodellen* auszugehen.²³³ Diese Modelle basieren zumeist auf *Ersatzmodellen* mit entsprechenden *Ersatzzielfunktionen* und *Ersatzrestriktionen*. Erstgenannte Form der Berücksichtigung wird im Forschungsbereich der *robusten Optimierung*, letztgenannte Form im Bereich der *stochastische Optimierung* angewandt. Diese unterscheiden sich weiterhin in der Ersatzzielfunktion, welche der Bestimmung einer Kompromisslösung bei konfliktären Zielen dient und entsprechend der Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers ausgewählt werden muss. Die stochastische Optimierung geht in der

²³² Vgl. Scholl (2001): S. 120 und S. 196.

²³³ Zu stochastischen Modellen und weiterführender Literatur siehe Scholl (2001): S. 70 ff. Auf eine ausführliche Darstellung der Grundlagen stochastischer Modelle bzw. deren vielfältigen unterschiedlichen Varianten wird an dieser Stelle verzichtet, stattdessen werden im Folgenden grundlegende Modelle analysiert und die für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung relevanten Aspekte diskutiert. Übersichten zur robusten Optimierung sind unter anderem bei Bertsimas und Thiele (2006), Nikulin (2006) und Beyer und Sendhoff (2007) zu finden.

Regel vom Erwartungswertkriterium aus und betrachtet keinerlei Aspekte der Robustheit.²³⁴ Im Gegensatz dazu werden im Bereich der robusten Optimierung unterschiedlichste Kriterien herangezogen.²³⁵

Bezüglich der Zulässigkeit von Lösungen ergibt sich häufig das Problem, dass die Menge der für alle Szenarien zulässigen Lösungen sehr klein oder leer ist. Dies kann dazu führen, dass eine Lösung, die zwar hinsichtlich der Zielfunktion in fast allen Szenarien sehr gut abschneidet, auf Grund der Unzulässigkeit bei einem Szenario als nicht akzeptabel angesehen wird. Demzufolge erscheint es nicht sinnvoll, dass eine Lösung für jedes mögliche Szenario zulässig sein muss. Da zum Zeitpunkt der Planung jedoch keineswegs feststeht, ob eine Lösung zulässig oder unzulässig sein wird, ist die Festlegung von Ersatzrestriktionen notwendig, um einen geeigneten stochastischen Lösungsbereich zu bestimmen. Hierbei kann zwischen *Kompensationsmodellen*, *Chance-Constrained-Modellen* und *Chance-Constrained-Kompensationsmodellen* unterschieden werden.²³⁶

- *Kompensationsmodelle* basieren auf der Annahme, dass die Verletzung von Nebenbedingungen, die durch Eintreten einer bestimmten Umweltsituation hervorgerufen werden, durch bestimmte Maßnahmen ausgeglichen (kompensiert) werden können. Diese Kompensationsmaßnahmen werden jedoch nicht a priori durch die Planung festgelegt, sondern erst bei Eintritt einer bestimmten Umweltsituation. Jedoch werden bei der Planung die Kompensationsmaßnahmen insofern berücksichtigt, dass ihre erfolgsmindernde Wirkung für jedes Szenario antizipiert und so bei der Planung berücksichtigt wird. Es werden also die Auswirkungen auf die Ziele der Planung explizit berücksichtigt. Das daraus resultierende Kompensationsmodell besteht aus zwei Stufen oder Komponenten.²³⁷ Die erste Komponente (Strukturkomponente) legt die Entscheidungen eines unveränderlichen Grundplans fest, die zweite Komponente (Kontrollkomponente) repräsentiert Entscheidungen, die erst nach Eintritt einer bestimmten Umweltsituation (Szenarios) festgelegt werden müssen.

²³⁴ Vergleiche bspw. Daniels und Kouvelis (1995) und Kouvelis et al. (2000).

²³⁵ Vergleiche hierzu die Diskussion unterschiedlicher Zielfunktionen in Scholl (2001): S. 210.

²³⁶ Vgl. Mulvey et al. (1995) und Scholl (2001): S. 73 ff.

²³⁷ Ähnlich wie bei der flexiblen Planung werden hier bedingte Eventualpläne ermittelt (vgl. Abschnitt 3.1.1.3).

Hinsichtlich des Ausmaßes und der Vollständigkeit von Kompensationsmaßnahmen wird zwischen verschiedenen Ausprägungen unterschieden. Im Falle einer *festen Kompensation* ist deren notwendiges Ausmaß zum Ausgleich bestimmter Restriktionsverletzung bekannt und unveränderlich. Anderenfalls unterliegt auch die Kompensation der Unsicherheit. Eine *vollständige Kompensation* liegt vor, wenn für alle Szenarien die Zulässigkeit eines Plans durch Kompensationsmaßnahmen unabhängig von der Restriktionsverletzung gewährleistet werden kann. Im Gegensatz dazu liegt eine einfache Kompensation vor, wenn jede Restriktionsverletzung nur durch genau eine zugehörige Kompensationsmaßnahme ausgeglichen werden kann und diese proportional zueinander sind.

Kompensationsmodelle erzeugen im Allgemeinen Pläne, die zulässigkeits-, ergebnis- und optimalitätsrobust sind.²³⁸ Die Schwierigkeit ihrer Anwendung besteht jedoch zum einen darin, festzulegen, welche Variablen (Parameter) szenarioabhängig bzw. -unabhängig sein sollen und wie die erfolgsmindernden Wirkungen der Anpassungsmaßnahmen zu bewerten sind. Zum anderen darin, ob entsprechende Kompensationsmaßnahmen überhaupt, und wenn, mit welchen Einschränkungen, zur Verfügung stehen.

Im Fall der Ressourcenbelegungsplanung könnte eine Kompensation der zusätzlichen oder verzögerten Ressourcenbedarfe durch die Festlegung von Überstunden und Zusatzschichten erfolgen. Diese Festlegung ist jedoch an bestimmte Bedingungen gebunden, deren Abbildung durch ein Entscheidungsmodell den ohnehin hohen Aufwand zur Modellierung und den gesamten Planungsaufwand erhöhen würde. So müssten zum einen eine große Anzahl an Parametern und Bedingungen gepflegt werden (bspw. maximal zusätzliche Stunden pro Schicht/Woche/Monat oder die Tage, an denen zusätzliche Schichten überhaupt möglich sind und in welchem Umfang); zum anderen würde die ohnehin schon hohe Komplexität des Planungsproblems noch weiter erhöht und die Planung damit zeit- und ressourcenaufwändiger.

²³⁸ Vgl. Scholl (2001): S. 204.

- *Chance-Constrained-Modelle* versuchen im Gegensatz zu den Kompensationsmodellen nicht, die Zulässigkeit eines Plans durch Anpassungsmaßnahmen wiederherzustellen, sie akzeptieren mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit α deren Unzulässigkeit. Man spricht auch von Modellen mit *wahrscheinlichkeitsrelaxierten Restriktionen*. Mit diesen Modellen wird ein fester Plan bestimmt, der auch nach Eintreten bestimmter Umweltsituationen nicht angepasst wird, eine zweite Stufe (Komponente) wird also nicht explizit beachtet. Durch diese Vorgehensweise werden auch Lösungen als akzeptabel erkannt, die zwar für einige wenige Szenarien unzulässig sind, jedoch über alle Szenarien hinweg gute Zielfunktionswerte besitzen. Insbesondere dann, wenn die unzulässigen Szenarien mit einer geringen Wahrscheinlichkeit eintreten, kann so die sich bietende Chance auf gute Ergebnisse trotz gewisser Verletzungen der Restriktionen wahrgenommen werden.

Die Wahrscheinlichkeit der Einhaltung der Restriktionen kann entweder *simultan* für alle Restriktionen oder *separiert* für jede Restriktion einzeln definiert werden. Simultane Chance-Constrained-Modelle fordern, dass mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit sämtliche Restriktionen gleichzeitig erfüllt werden. Eine Lösung muss demnach für eine bestimmte Teilmenge der Szenarien, deren gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit nicht kleiner als α sein darf, zulässig sein. Bei separierten Chance-Constrained-Modellen wird für jede Restriktion eine spezifische *Erfüllungswahrscheinlichkeit* definiert. Hierdurch wird zwar die Wahl geeigneter Werte vereinfacht, jedoch sinkt mit zunehmender Anzahl an Restriktionen die Wahrscheinlichkeit, dass diese erfüllt werden und somit die Wahrscheinlichkeit von deren Zulässigkeit.

Als problematisch in Bezug auf die Anwendung dieser Modelle zur Berechnung robuster Pläne sieht Scholl, dass diese Modelle jeweils die Szenarien unberücksichtigt lassen, die ungünstige Parameterwerte aufweisen und so die Unzulässigkeit verursachen.²³⁹ Besonders im Falle einer ausgeprägten Risikoscheu des Entscheidungsträgers erscheint dass außer Acht lassen derjenigen Szenarien, welche

²³⁹ Vgl. Scholl (2001): S. 198 f.

das größte Risiko beinhalten als nicht akzeptabel. Zu beachten ist, dass nicht nur die Zulässigkeitsrobustheit selbst eingeschränkt ist, sondern auch deren Zielwirkungen auf die Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit nicht beachtet bzw. bewertet werden. Chance-Constrained-Modelle sind demnach zur Bestimmung von robusten Ressourcenbelegungsplänen kaum geeignet.

- Eine weitere Möglichkeit zur Festlegung von Ersatzrestriktionen besteht in der Kombination aus Kompensations- und (simultanen) Chance-Constrained-Modellen zu *Chance-Constrained-Kompensationsmodellen*. Diese berücksichtigen einerseits Kompensationsmaßnahmen zur Wiederherstellung der Zulässigkeit bei Eintritt einer ungünstigen Umweltsituation und erlauben andererseits mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit die Verletzung einzelner Nebenbedingungen. Als schwierig zeigt sich hier die Bestimmung einer konkreten Ausgestaltung des Modells. Es muss festgelegt werden, welche zur Bestimmung einer stabilen Grundlösung mit kleineren Anpassungsmaßnahmen herangezogen werden und welche Elemente den flexiblen Anteil der Lösung bilden.

Bezüglich der Robustheit gelten die jeweils oben getroffenen Aussagen. Die Bestimmung eines Chance-Constrained-Kompensationsmodells zur robusten Ressourcenbelegungsplanung verursacht einen sehr hohen Aufwand bei der Modellierung und Lösung, wobei nicht gewährleistet werden kann, ob sich der hohe Aufwand durch entsprechende Resultate rechtfertigt. Aus diesem Grund werden Chance-Constrained-Kompensationsmodelle als ungeeignet erachtet.

Neben den hier genannten, auf die jeweilige Modellart bezogenen positiven und negativen Aspekten, existieren allgemeine Aspekte, die bei der Planung mit Kompensations- und Chance-Constrained-Modellen bzw. stochastischen Modellen berücksichtigt werden müssen.

Grundsätzlich basieren diese Modelle auf der Ersetzung der unsicheren Modellparameter durch mehrwertige Informationen.²⁴⁰ Im günstigsten Fall liegen für die Parameter Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor oder können abgeschätzt werden („*Entscheidung unter Risiko*“), oder es sind lediglich die Wertebereiche der unsicheren Parameter bekannt, ohne

²⁴⁰ Vgl. Scholl (2001): S. 71.

dass Informationen über deren Eintrittswahrscheinlichkeiten vorliegen („*Entscheidung unter Ungewissheit*“). Zur Modellierung der unsicheren Parameter sehen Scholl und andere Autoren²⁴¹ den szenariobasierten Ansatz der robusten Optimierung dem Ansatz mit konkreten Verteilungsfunktionen der stochastischen Optimierung überlegen, da hier nicht zwangsläufig Eintrittswahrscheinlichkeiten und deren Verteilungen bestimmt werden müssen. Trotzdem sollten auch hier die zur Verfügung stehenden Wahrscheinlichkeitsinformationen bei der Planung berücksichtigt werden, wenn sie eine ausreichende Zuverlässigkeit besitzen.

Eine der zentralen Schwierigkeiten, neben der Auswahl eines geeigneten Modells und der aufwändigen Modellierung, ist die Aufstellung aller relevanten Szenarien – all der potentiellen Umweltentwicklungen, die zukünftig auftreten können. Die Aufstellung von Szenarien gestaltet sich insbesondere in Bezug auf das vorliegende Planungsproblem der Ressourcenbelegungsplanung als schwierig. Auf Grund der vielfältigen Ursachen der Informationsdynamik und Störungen sind bis auf die Fertigstellungstermine der Aufträge alle anderen planungsrelevanten Informationen für jedes Szenario jeweils zu definieren. Damit ergibt sich eine große Anzahl an zu betrachtenden Szenarien. Für die Aufstellung der Szenarien existiert zwar mit der *Szenariotechnik* ein wichtiges Hilfsmittel, welches vorwiegend im Bereich der strategischen Planung eingesetzt wird, das aber für die vorliegende Problemstellung nur bedingt geeignet ist. Ein weiteres Problem, beispielsweise für die Festlegung des Wertebereichs der Arbeitspakete, ist die Tatsache, dass eine Orientierung an Werten der Vergangenheit kaum möglich ist, da Aufträge zum einen kundenindividuell sind und sich zum anderen die einzelnen Arbeitsvorgänge auf Grund der technologischen Weiterentwicklung fortwährend ändern. Eine Bestimmung von Szenarien auf Basis von *Intervallprognosen*²⁴² ist damit nicht oder nur mit unzureichender Verlässlichkeit möglich. Die Aufstellung der Szenarien stellt damit einen kaum zu bewältigenden Aufwand für die Ressourcenbelegungsplanung dar.

Einen weiteren kritischen Faktor zum praktischen Einsatz stellt die Auswahl einer geeigneten, die Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers widerspiegelnde, Ersatzziel-

²⁴¹ Für eine ausführlichere Diskussion vergleiche Kouvelis und Yu (1997): S. 13 und Scholl (2001): S. 206.

²⁴² Bei einer Intervallprognose werden Szenarien aus dem Konfidenzintervall der (Punkt-)Prognose und dem Prognosefehler abgeleitet – vgl. Gebhard (2009): S. 75.

funktion dar. Zudem sind die Zusammenhänge zwischen Ersatzzielfunktion, Ersatzmodell und Szenarien allgemein als sehr komplex einzustufen, und damit für die meisten Entscheidungsträger kaum nachvollziehbar, wodurch die Akzeptanz der Planung und damit die Durchführung beeinträchtigt werden.

3.2.2 Entwicklung einer proaktiven Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer

Die vorangegangene Analyse hat gezeigt, dass zwar grundsätzlich viele verschiedene Methoden zur robusten Planung existieren, aber nur wenige den spezifischen Anforderungen der Problemstellung gerecht werden. Insbesondere der Forderung nach Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Planungsmethode sowie deren einfache Anwend- und Umsetzbarkeit wird von den meisten dieser Methoden, besonders derjenigen mit einer mehrwertigen bzw. direkten Berücksichtigung der Unsicherheit, nicht Rechnung getragen. Da die reaktiven Methoden keine ausreichende Planungsrobustheit gewährleisten können, wird als Methode zur robusten Ressourcenbelegungsplanung im Kontext des Konzepts der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche eine **proaktive Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit** herangezogen. Wie in Abschnitt 2.4.1 erläutert wurde, äußern sich Informationsdynamik und Störungen entweder in zusätzlichem oder verzögertem Kapazitätsbedarf. Auf Grund dieser Überlegungen wird im Folgenden eine auf Redundanzstrategien basierende Methode entwickelt. Das resultierende deterministische Korrekturmodell sieht dabei Sicherheitszuschläge auf die Ressourcennachfrage, die Arbeitspakete der Operationen, in Form von **operationsbezogenen Kapazitätspuffern** $cb_{j,s}$ (engl. „capacity buffer“) vor. Durch diese Kapazitätspuffer sollen sowohl zusätzliche als auch verzögerte Kapazitätsbedarfe antizipiert und neutralisiert werden, indem die Kapazitätspuffer äquivalent den Arbeitspaketen bei der Berechnung des Ressourcenbelegungsplans berücksichtigt werden und entsprechende **Montageressourcen reservieren**. Hierdurch werden also Zusatz- oder Reservekapazitäten bereit gehalten. Diese Korrektur des Arbeitspakets einer Operation ist an die grundlegenden Prinzipien der Methoden basierend auf „temporal protection“²⁴³ und „fault tolerance“²⁴⁴ angelehnt. Erstere Methode reserviert

²⁴³ Vgl. Chiang und Fox (1990) und Gao (1996). Einen ähnlichen Ansatz sehen auch Lambrechts et al. (2008) vor.

²⁴⁴ Vgl. Ghosh (1996).

für jede Aktivität zusätzliche Zeit, letztere verteilt gleichmäßig „backup time“ (zur wiederholten Ausführung von Operationen) über den gesamten Planungshorizont. Da die Problemstellung der Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen keine Bearbeitungszeiten, sondern Arbeitspakete betrachtet, werden diese Arbeitspakete durch einen Sicherheitsaufschlag „geschützt“.

Eine andere Möglichkeit, Montageressourcen zur Bewältigung von Informationsdynamik und Störungen bereitzuhalten, wäre es, bei der Bestimmung des Plans einen Sicherheitsabschlag auf das zur Verfügung stehende Ressourcenangebot vorzunehmen.²⁴⁵ Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass so besonders kritische Aufträge bzw. Operationen nicht explizit geschützt werden können. Dieser Nachteil liegt im Falle von operationsbezogenen Kapazitätspuffern nicht vor. Je nach Auftrag, beispielsweise nach Wichtigkeit des Kunden, der Höhe potentieller Lieferverzugskosten oder bei neuen Technologien und Montageprozessen, kann das Risiko einer verspäteten Fertigstellung durch eine auftrags- bzw. operationsbezogene Festlegung der Kapazitätspuffer gesteuert werden.

In diesem Zusammenhang sind als weitere Vorteile der operationsbezogenen Kapazitätspuffer „Transparenz“ und „Nachvollziehbarkeit“ zu nennen. Häufig werden in der Praxis versteckte Zuschläge auf Bearbeitungszeiten vorgenommen, um so ein gewisses Flexibilitätspotential für die Durchführung bereitzustellen. Diese versteckte Reservierung von Ressourcen kann nicht gesteuert oder überwacht werden. Durch die explizite Definition von Kapazitätspuffern können diese Zuschläge wegfallen und so die notwendige Transparenz geschaffen werden. Die Nachvollziehbarkeit der Methode liegt in dem direkten Zusammenhang zwischen der Größe der Puffer und dem Ziel der Maximierung der Starttermine begründet. Da die Fertigstellungstermine fixiert sind, führen größere Kapazitätspuffer in fast allen Fällen zu früheren Startterminen, verschlechtern also den Zielerreichungsgrad.

Ein weiterer Vorteil der einwertigen Berücksichtigung der Unsicherheit gegenüber einer mehrwertigen Berücksichtigung ist, dass hieraus ein **deterministisches** Entscheidungsmodell

²⁴⁵ Vgl. Lambrechts et al. (2008).

resultiert und sich deterministische Modelle grundsätzlich effizienter lösen lassen als stochastische. Somit kann der Planungsaufwand reduziert werden.

Eine weitere Anforderung an die Planungsmethode ist die Gewährleistung einer ausreichenden Planungsrobustheit. Ziel des entwickelten Konzeptes ist es, neue Informationen möglichst durch Neuplanungen von AREA-O in die Planung mit einzubeziehen, wobei für AREA-O eine hohe Planungsfrequenz und die damit verbundene hohe Planungsintensität unproblematisch sind. Betreffen neue Informationen jedoch Aufträge aus AREA-F, führt dies zur Neuplanung beider Planungsbereiche. Da die Planungsrobustheit jedoch besonders für AREA-F von großer Wichtigkeit ist, sollte dessen Neuplanung möglichst selten oder gar nicht durchgeführt werden müssen. Informationsänderungen betreffen im Bereich von AREA-F vor allem die Arbeitspakete, in Ausnahmefällen die frühesten Starttermine.²⁴⁶ Um Neuplanungen zu reduzieren oder gänzlich unnötig werden zu lassen, werden die Kapazitätspuffer herangezogen. Dabei werden die Änderungen des Arbeitspakets bis zu einem gewissen Grad mit dem Kapazitätspuffer verrechnet. Im Fall einer Reduzierung des Arbeitspakets wird die entsprechende Anzahl an Stunden auf den Kapazitätspuffer aufgeschlagen. Eine Neuplanung von AREA-F ist damit nicht notwendig, das veränderte Verhältnis zwischen Arbeitspaket und Kapazitätspuffer muss jedoch zu Analyse Zwecken festgehalten werden. Bei einer Erhöhung des Arbeitspakets einer Operation um eine bestimmte Anzahl an Stunden könnte dieses grundsätzlich entsprechend der Stunden des Kapazitätspuffers der Operation kompensiert werden und erst bei Überschreitung des Kapazitätspuffers eine Neuplanung notwendig werden. In diesem Fall wäre jedoch keinerlei Spielraum mehr gegeben, und kleinste weitere Änderungen oder Störungen würden Neuplanungen nach sich ziehen. Aus diesem Grund wird für die Verrechnung des zusätzlichen Kapazitätsbedarfs ein Grenzwert (engl. „threshold“) th_i^{ch} eingeführt, so dass der Kapazitätspuffer nur bis zu einem bestimmten Wert verringert werden kann. Grundsätzlich ist die Verrechnung nur für Aufträge, die dem AREA-F

²⁴⁶Zur Problematik der Änderung von Fertigstellungsterminen siehe Abschnitt 2.4.1 sowie Fußnote 105. Veränderungen des Kapazitätsangebots stellen ebenso einen Ausnahmefall dar, der, falls es sich um eine Kapazitätsreduzierung handelt, unmittelbar zur Neuplanung beider Planungsbereiche führt. Andernfalls kann diese Änderung auch durch eine Neuplanung von AREA-O berücksichtigt werden. Änderungen der frühesten Starttermine sind nur dann planungsrelevant, wenn diese später als die beim Bereichsübergang fixierten Starttermine liegen.

zugeordnet sind, zulässig. Da die Unsicherheit über das tatsächliche Arbeitspaket mit zunehmender zeitlicher Entfernung zum Planungszeitpunkt ansteigt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Arbeitspakete der ersten Operationen ändern, geringer, als dass sich die der späteren Operationen ändern. Demzufolge müssen die Kapazitätspuffer der späteren Operationen entsprechend größer als die der früheren dimensioniert werden.

3.2.2.1 Festlegung der Kapazitätspuffer

Die zentrale Schwierigkeit dieser Planungsmethode stellt die konkrete zielführende **Festlegung (Dimensionierung) der Kapazitätspuffer**, der Korrekturfaktoren, dar.²⁴⁷ Ziel ist es einerseits, die Puffer so zu dimensionieren, dass möglichst wenige Neuplanungen von AREA-F notwendig sind, Störungen und Informationsänderungen also möglichst vollständig kompensiert werden, und so die geforderte Planungs- sowie Zulässigkeitsrobustheit erreicht wird. In besonderem Maße gilt es hier, den Fertigstellungstermin vor Überschreitungen zu schützen. Andererseits ist das Ziel der möglichst späten Starttermine bei großen Kapazitätspuffern nur bedingt zu erreichen, wodurch Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit negativ beeinflusst werden. Das Ziel der Bestandsreduzierung bzw. der Reduzierung der Kapitalbindungskosten würde dann nicht erreicht werden. Als zusätzlich erfolgsmindernd sind die Kosten für die Bereitstellung der Reservekapazitäten, die auch anfallen, wenn diese nicht benötigt werden, zu berücksichtigen. Im Falle der Montage von Spezialmaschinen besteht diese Reservekapazität aus Mitarbeitern der Montagestationen. Da bei der Montage von Spezialmaschinen der Anteil der Herstellkosten (im Wesentlichen die Lohnkosten der Montagemitarbeiter) im Verhältnis zu den Kapitalbindungs- und Verzugskosten jedoch relativ gering ausfällt, sind diese Kosten für die Bereitstellung der Reservekapazitäten bei der Produktion von Spezialmaschinen weniger problematisch als in anderen Branchen und Unternehmen. Dessen ungeachtet resultieren überdimensionierte Kapazitätspuffer (Puffer, die nicht benötigt werden) in einer geringen Auslastung, welche zwar ein untergeordnetes Ziel der Ressourcenbelegungsplanung darstellt, jedoch für die Akzeptanz der Planung und Zufriedenheit der Mitarbeiter von großer Bedeutung ist.²⁴⁸ Die Bestimmung der Kapazitäts-

²⁴⁷ Vgl. Graves (2006): S. 27 ff. und Scholl (2001): S. 188.

²⁴⁸ Insbesondere im Falle von Akkordlohn oder ähnlichen Entgeltkonzepten wird eine fortwährende Unterauslastung von Mitarbeiterseite nicht akzeptiert.

puffer hängt demnach von vielen Faktoren ab und beeinflusst das Ergebnis der Planung und auch die Planakzeptanz unmittelbar.

In der Literatur existieren wenige Ansätze, die sich mit der Berechnung von Sicherheitszuschlägen bzw. -abschlägen auseinandersetzen. Bisherige Arbeiten betrachten nach Kenntnis des Autors jedoch nur Unsicherheit bezüglich der Ressourcenverfügbarkeit, andere Ursachen werden außer Acht gelassen.²⁴⁹ Eine alleinige Betrachtung von Ressourcenausfallwahrscheinlichkeiten oder ähnlichen Problemen reicht dagegen hier nicht aus, da bei der gegebenen Problemstellung vielfältige Ursachen von Informationsdynamik und Störungen bei der Bestimmung der Kapazitätspuffer zu berücksichtigen sind. Speziell müssen hier Änderungen der Arbeitspakete, Schwankungen des Ressourcenangebots und Verzögerungen bei der Montagedurchführung, also Störungen, antizipiert werden. Bezüglich Ersterem lassen sich durch statistische Datenanalysen von Vergangenheitswerten Schätzungen ableiten, wie ausgeprägt die Änderungen eines Auftrags innerhalb seiner Verweildauer in AREA-F sind. Diese Änderungen lassen sich je Operation bestimmen und können somit unmittelbar zur Bestimmung der Kapazitätspuffer herangezogen werden. Änderungen bzw. Schwankungen des Ressourcenangebots können zwar ebenso wie Störungen statistisch ausgewertet und analysiert, jedoch einzelnen Operation nicht unmittelbar zugeordnet werden. Zudem sind Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Störungsursachen nur sehr schwer zu erfassen und zu berücksichtigen: Einerseits können Verzögerungen auf Grund von Nacharbeit dazu führen, dass Verzögerungen durch fehlendes Material aufgehoben werden. Andererseits kann fehlendes Material dazu führen, dass Nacharbeit nicht sofort durchgeführt werden kann und sich so die Auswirkungen gegenseitig verstärken. Eine Dimensionierung der Kapazitätspuffer einzig basierend auf Vergangenheitswerten erscheint auch wegen der speziellen Eigenschaften von Spezialmaschinen (Kundenindividualität und aktuellster Stand der Technik) als sehr problematisch.

Da eine fundierte und zielführende Bestimmung der Kapazitätspuffer vor der Berechnung eines Ressourcenbelegungsplans nicht möglich ist, wird stattdessen eine *postoptimale Analyse* zur Bewertung der Robustheit des berechneten Ressourcenbelegungsplans

²⁴⁹ Vgl. Ghosh (1996), Gao (1996) und Lambrechts et al. (2008).

herangezogen. Ziel ist es, den Entscheidungsträger bei der Dimensionierung der Kapazitätspuffer zu unterstützen. Hierzu wird diesem die Möglichkeit gegeben, mehrere Planungsszenarien mit unterschiedlichen Pufferkonfigurationen zu berechnen und anhand von Kennzahlen (KPI) zu bewerten, um diese dann miteinander vergleichen zu können – **statistikbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer**. Jedes Planungsszenario PSC_x basiert jeweils auf den vollständigen und aktuellsten planungsrelevanten Informationen bezüglich des Ressourcenangebots und -bedarfs sowie einem auf dieser Datenbasis berechneten Ressourcenbelegungsplan AP_x . Variiert werden können grundsätzlich alle Planungsinformationen und -parameter. Dadurch lassen sich nicht nur die Zusammenhänge zwischen Puffergrößen und Startterminen, sondern auch Maßnahmen wie Überstunden, Zusatzschichten und Terminverschiebungen analysieren. Eine Beurteilung der Robustheit kann jedoch erst nach der Durchführung der Montage anhand von Kennzahlen aus dem realen Produktionssystem vornehmen (*Ex-Post-Evaluation*). Nachteil dieser Ex-Post-Evaluation ist, dass ungenügende Pufferkonfigurationen erst sehr spät bekannt werden und damit auch nur verzögert reagiert werden kann. Aus diesem Grund wird zur weiteren Entscheidungsunterstützung eine Beurteilung der Robustheit durch eine Simulationsanalyse herangezogen – **simulationsbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer**. In Anlehnung an die klassische Sensitivitätsanalyse lassen sich durch diese Evaluation vor der Durchführung der Montage (*Ex-Ante-Evaluation*) verschiedene Fragen bezüglich der Robustheit eines Ressourcenbelegungsplans beantworten (vgl. Abschnitt 3.2.1.2.1).

- Wie robust ist eine Lösung gegenüber bestimmten Umweltentwicklungen?
- Welche Pufferkonfiguration ist „optimal“ bezüglich des Trade-Offs zwischen Zulässigkeits- und Planungsrobustheit und Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit?

Die endgültige Beurteilung der Robustheit eines Planungsszenarios und die Auswahl des zu realisierenden Ressourcenbelegungsplans werden dem Entscheidungsträger überlassen, der anhand von Kennzahlen aus den Simulationsstudien mit verschiedenen Planungsszenarien und seiner persönlichen Risikoeinstellung über den „optimalen“ Plan entscheidet.

In der Literatur existieren zur Montageplanung einige Planungsmethoden und -ansätze, die auf Simulation basieren.²⁵⁰ Im Kontext der robusten Planung bzw. robusten Optimierung wird Simulation bisher jedoch nur zur Evaluation von Planungskonzepten und -methoden eingesetzt.²⁵¹ Hybride Simulationsansätze²⁵², die analytische Modelle und Simulationsmodelle kombinieren, weisen zwar teilweise eine analoge Vorgehensweise zu der in dieser Arbeit vorgeschlagenen auf, eine Integration von Simulation als Bestandteil einer robusten Planungsmethode ist nach Kenntnis des Autors bisher jedoch nicht vorgenommen worden. Abbildung 15 stellt beide Vorgehensweisen zur Bestimmung der Kapazitätspuffer zusammenfassend dar.

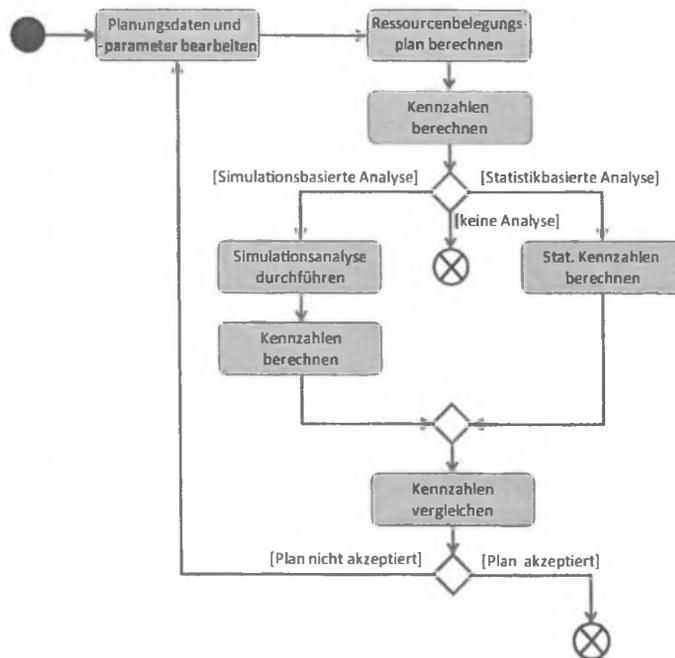


Abbildung 15: Abstrahierter Regelkreis zur Bestimmung der Kapazitätspuffer

²⁵⁰ Vgl. Evers (2002), Steude und Werners (2003) und Steinhauer (2008).

²⁵¹ Vgl. beispielsweise Tempelmeier (2003), Schwartz und Voß (2004), Deblaere et al. (2006) und Neuhaus (2008).

²⁵² Vgl. Byrne und Bakir (1999), Li et al. (2000), Spieckermann et al. (2000), Byrne und Hossain (2005) und Venkateswaran und Son (2005). Grundsätzlich existieren unterschiedliche Ausprägungen von Hybriden Ansätzen – vgl. Shanthikumar und Sargent (1983) und Fowler et al. (2006).

Vor der Berechnung des Ressourcenbelegungsplans können sowohl die Planungsdaten als auch die Planungsparameter bearbeitet werden. Der Berechnung des Plans folgt dessen Bewertung durch die Berechnung von Kennzahlen. Der Entscheidungsträger kann entscheiden, ob er eine statistik- oder simulationsbasierte (oder keine) Analyse durchführen möchte. Bei einer statistikbasierten Analyse werden Kennzahlen basierend auf historischen Daten errechnet, bei der simulationsbasierte Analyse wird eine Simulationsanalyse durchgeführt und basierend auf dieser Simulation Kennzahlen berechnet. Auf Basis aller berechneten Kennzahlen obliegt es dem Entscheidungsträger, den berechneten Plan zu akzeptieren oder die Berechnung des Ressourcenbelegungsplans mit veränderten Planungsdaten und/oder Planungsparametern (insbesondere mit einer neuen Pufferkonfiguration) zu wiederholen. Dieser Vorgang kann iterativ solange wiederholt werden, bis ein akzeptabler, zulässiger Plan vorliegt. Die auf Basis der Simulation der Montagelinie oder historischen Daten ermittelten Kennzahlen bilden somit die Grundlage für die Bestimmung der Kapazitätspuffer durch den Entscheidungsträger. Gleichzeitig kann dieser Informationen, die nicht als Daten vorliegen (bspw. dass neue Technologien eingesetzt werden oder eine sehr spezielle Maschinenkonfiguration vorliegt) bei der Planung berücksichtigen und die Kapazitätspuffer einzelner Aufträge bzw. Operationen entsprechend anpassen und so beispielsweise auch Aufträge wichtiger Kunden schützen.

Bevor nachfolgend im Detail auf die simulationsbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer eingegangen wird, werden zunächst die relevanten Kennzahlen für eine statistikbasierte Festlegung definiert. Diese Kennzahlen sind, in angepasster Form, auch Ergebnis der Simulationsanalyse bei einer simulationsbasierten Festlegung der Kapazitätspuffer.

3.2.2.2 Statistikbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer

Die im Folgenden erläuterten Kennzahlen sollen einerseits die Robustheit des Ressourcenbelegungsplans bewerten, andererseits eine fundierte Beurteilung der festgelegten Kapazitätspuffer unterstützen. Grundsätzlich ist hier zwischen Kennzahlen zur Bewertung des Ressourcenbelegungsplans und Kennzahlen zur Bewertung der

Montagedurchführung zu unterscheiden. In beiden Fällen kann zwischen auftragsorientierten und ressourcenorientierten Kennzahlen unterschieden werden.²⁵³

Bewertung des Ressourcenbelegungsplans – auftragsorientierte Kennzahlen

Zentrales Optimierungsziel der Ressourcenbelegungsplanung ist die Minimierung der Durchlaufzeit durch eine Maximierung der Starttermine bei einer unbedingten Einhaltung der Fertigstellungstermine (vgl. Abschnitt 2.3.2). Das Ziel der Minimierung der Durchlaufzeit wird zunächst standardmäßig auf Basis der Differenz zwischen der Durchlaufzeit eines Auftrags basierend auf Plandurchlaufzeiten (f_j^{PLAN}) und der Durchlaufzeit (f_j^{AP}) eines Auftrags nach Berechnung des Ressourcenbelegungsplans AP bewertet.²⁵⁴

$$diffFLT_j^{ST}(AP) = f_j^{AP} - f_j^{PLAN} \quad (3.1)$$

Zur Bewertung des gesamten Plans wird die durchschnittliche Verbesserung der Durchlaufzeit aller eingeplanten Aufträge J herangezogen.

$$aveDiffFLT^{ST}(AP) = \frac{\sum_{j=1}^J diffFLT_j^{ST}(AP)}{J} \quad (3.2)$$

Die Qualität des berechneten Ressourcenbelegungsplans bezüglich der Durchlaufzeit lässt sich nicht nur hinsichtlich der ursprünglich geplanten Durchlaufzeit, sondern auch bezüglich einer optimalen Durchlaufzeit bewerten. Die optimale, d.h. minimale, Durchlaufzeit berechnet sich aus dem einzuplanenden Ressourcenbedarf $wp_{j,s}^{cb}$ und der maximalen Intensität i_s^{MAX} .²⁵⁵

$$diffFLT_j^{OPT}(AP) = f_j^{AP} - f_j^{MIN} \quad (3.3)$$

²⁵³ Vgl. Evers (2002). Zu Kennzahlen und Notationen vergleiche auch Curry und Feldman (2009): S. 47 ff.

²⁵⁴ Die im Folgenden angeführten Formeln stellen keine vollständigen mathematischen Formeln dar, sondern dienen der Veranschaulichung der Berechnung der Kennzahlen.

²⁵⁵ Zu beachten ist, dass bei der Berechnung der minimalen Durchlaufzeit vollständig vom tatsächlichen Ressourcenangebot abstrahiert wird (auch Wochenenden und Feiertage werden nicht berücksichtigt) und dieser Wert damit „sehr“ optimal ausfällt.

Wiederum wird der Durchschnittswert herangezogen.

$$\text{aveDiffFLT}^{OPT}(AP) = \frac{\sum_{j=1}^J \text{diffFLT}_i^{OPT}(AP)}{J} \quad (3.4)$$

Diese Gruppe von auftragsorientierten Kennzahlen lässt sich nicht nur für die gesamten Aufträge, sondern auch für die einzelnen Operationen bzw. Montagestationen bestimmen. Hierdurch können Engpässe und Optimierungspotentiale identifiziert werden.

$$\text{diffFLT}_{j,s}^{ST}(AP) = f_{j,s}^{PLAN} - f_{j,s}^{AP} \quad (3.5)$$

$$\text{aveDiffFLT}_s^{ST}(AP) = \frac{\sum_{j=1}^J \text{diffFLT}_{j,s}^{ST}(AP)}{J} \quad (3.6)$$

$$\text{diffFLT}_{j,s}^{OPT}(AP) = f_{j,s}^{AP} - f_{j,s}^{MIN} \quad (3.7)$$

$$\text{aveDiffFLT}_s^{OPT}(AP) = \frac{\sum_{j=1}^J \text{diffFLT}_{j,s}^{OPT}(AP)}{J} \quad (3.8)$$

Eine weitere auftragsbezogene Kennzahl misst verfrühte Fertigstellungen (engl. „earliness“) von Aufträgen, die sich negativ auf die Kapitalbindungskosten auswirken, und daher auch zur Beurteilung eines Plans von Interesse sind.

$$\text{EAR}_j(AP) = \max\{0, dl_j - c_{j,s}^{AP}\} \quad (3.9)$$

Auch hier wird der Durchschnittswert betrachtet.

$$\text{aveEAR}(AP) = \frac{\sum_{j=1}^J \text{EAR}_j(AP)}{J} \quad (3.10)$$

Bezüglich der Zulässigkeit müssen Überschreitungen des Fertigstellungstermins (Verspätungen) und der frühesten Starttermine erfasst werden. Hierzu werden die Anzahl aller verspäteten Aufträge (*LATE*) und die Anzahl der zu frühen Starttermine (*EARL*) berechnet.

$$LATE(AP) = \sum_{j=1}^J isLate_j, \quad isLate_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn } c_{j,S}^{AP} - dl_j > 0, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$EARL(AP) = \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S isEarl_{j,s}, \quad isEarl_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn } st_{j,S}^{AP} < esd_{j,s}, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.12)$$

Da die Zulässigkeit von AREA-F grundsätzlich gewährleistet sein muss, können diese Kennzahlen auch bereichsbezogen durch eine geeignete Einschränkung der Aufträge berechnet werden. Im Falle der Unzulässigkeit müssen vom Entscheidungsträger entsprechende Maßnahmen ergriffen werden (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Bewertung des Ressourcenbelegungsplans – ressourcenorientierte Kennzahlen

Zur Beurteilung der Auslastung (engl. „utilization“) der Montageressourcen wird das kumulierte Verhältnis zwischen dem in einer Schicht zur Verfügung stehenden Ressourcenangebot $r_{s,j}$ und dem genutzten Ressourcenangebot $u_{s,j}^{AP}$ aller Schichten zwischen Planungszeitpunkt τ und $\tau + \Delta AO$ ²⁵⁶ je Montagestation betrachtet. Spätere Schichten werden aus der Berechnung ausgeschlossen, da Aufträge, welche die Ressourcen in diesen Schichten zukünftig belasten werden, noch nicht eingeplant sind und so die Kennzahl verfälscht würde.

$$aveUTIL_s(AP) = \left(\sum_{t=\tau}^{\tau+\Delta AO} \frac{u_{s,j}^{AP}}{r_{s,j}} \right) * \frac{1}{\Delta AO} * 100 \quad (3.13)$$

Die Gesamtauslastung errechnet sich aus den Auslastungen aller Montagestationen.

$$aveUTIL(AP) = \sum_s^S aveUTIL_s(AP) * \frac{1}{S} \quad (3.14)$$

Ein bezüglich der Montageressourcen unzulässiger Plan ist durch eine Überschreitung des zur Verfügung stehenden Ressourcenangebots $r_{s,j}$ gekennzeichnet. Die Anzahl der Überschreitungen wird durch die Kennzahl *OVER* erfasst.

²⁵⁶ ΔAO wird zwar grundsätzlich in Tagen definiert, kann aber in Schichten umgerechnet werden.

$$OVER(AP) = \sum_{s=1}^S \sum_{t=\tau}^{\tau+\Delta t_0} isOver_{s,t}, \quad isOver_{s,t} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } u_{s,t}^{AP} > r_{s,t}, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.15)$$

Der berechnete Ressourcenbelegungsplan und seine Kennzahlen stellen einen Soll-Plan dar. Zur Beurteilung, ob die festgelegten Kapazitätspuffer eine ausreichende Robustheit gewährleisten, müssen die entsprechenden Kennzahlen auch während der Montagedurchführung erfasst werden, damit ein entsprechender Soll/Ist-Abgleich durchgeführt werden kann.

Bewertung der Montagedurchführung – auftragsorientierte Kennzahlen

Zur Berechnung der relevanten auftragsorientierten Kennzahlen für die Montagedurchführung (*ACT*) müssen in obigen Berechnungsvorschriften die jeweiligen Werte des Ressourcenbelegungsplans (f_j^{AP} , $f_{j,s}^{AP}$, $c_{j,S}^{AP}$ und $st_{j,s}^{AP}$) durch die entsprechenden tatsächlichen Werte (f_j^{KT} , $f_{j,s}^{KT}$, $c_{j,S}^{KT}$ und $st_{j,s}^{KT}$) ersetzt werden. Wie bereits oben erläutert, besteht das Problem dieser Kennzahlen darin, dass sie erst zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Durchführung der Operationen bzw. Aufträge berechnet werden können. Weiterhin muss definiert werden, welche Aufträge bei der Berechnung der Kennzahlen herangezogen werden, um fundierte Rückschlüsse ableiten zu können.

Beim Vergleich der jeweiligen Kennzahl des Ressourcenbelegungsplans und der tatsächlichen Durchführung muss berücksichtigt werden, dass sich die – zur Berechnung der Kennzahlen benötigten – Werte des Ressourcenbelegungsplans auf Grund der rollierenden Neuplanung im Zeitverlauf ändern können. Aus diesem Grund werden zum Zeitpunkt des Montagebeginns einer Operation die Werte $c_{j,S}^{AP}$ und $st_{j,s}^{AP}$ des aktuell gültigen Ressourcenbelegungsplans als $c_{j,S}^{AP-FIX}$ und $st_{j,s}^{AP-FIX}$ fixiert. Analog hierzu werden auch die Durchlaufzeiten f_j^{AP} und $f_{j,s}^{AP}$ bei Montagebeginn der ersten bzw. der jeweiligen Operation fixiert (f_j^{AP-FIX} und $f_{j,s}^{AP-FIX}$). Diese fixierten Werte werden zum Vergleich der auftragsorientierten Kennzahlen herangezogen.

Eine Bewertung hinsichtlich der Robustheit kann hier nur eingeschränkt erfolgen, da nur ein einzelnes Szenario (die tatsächliche Montagedurchführung) betrachtet wird. Die nachfolgenden Kennzahlen bewerten damit eigentlich nicht die Robustheit, sondern führen

vielmehr einen Soll/Ist-Abgleich durch.²⁵⁷ Zur Bewertung der Ergebnis- bzw. Optimalitätsrobustheit können die Differenzen zwischen $aveDiffFLT^{ST}(AP)$ und $aveDiffFLT^{ST}(ACT)$ bzw. $aveDiffFLT^{OPT}(AP)$ und $aveDiffFLT^{OPT}(ACT)$ herangezogen werden. Die Bewertung der Zulässigkeitsrobustheit erfolgt anhand der Kennzahlen $EARL(ACT)$ und $LATE(ACT)$. Eine Beurteilung der Dimensionierung der Kapazitätspuffer kann aus der Anzahl der verspäteten Aufträge $LATE(ACT)$ abgeleitet werden. Verspätete Aufträge zeigen, dass die Kapazitätspuffer das Ziel, eine absolute Termintreue zu gewährleisten, verfehlt haben. Dies muss zwar nicht unmittelbar in einer Unterdimensionierung der Puffer begründet liegen, dieses sollte aber bei der Analyse der Ursachen in Erwägung gezogen werden.

Für die Beurteilung der Planungsrobustheit (bzgl. AREA-F) wird die durchschnittliche Anzahl an Neuplanungen (von AREA-F), die einen Auftrag während seiner Zugehörigkeit zu AREA-F betreffen, definiert (RES_j^{AREA-F} definiert die Anzahl an Neuplanungen von AREA-F bezüglich Auftrag j).

$$aveRES^{AREA-F}(ACT) = \left(\sum_{j=1}^J RES_j^{AREA-F} \right) * \frac{1}{J}, \quad \forall j \in AREA-F \quad (3.16)$$

Weiterhin wird zur Bewertung der Planungsrobustheit ein Vergleich zwischen Montagestart- bzw. Montageendzeiten von zwei aufeinander folgenden Ressourcenbelegungsplänen (AP_z, AP_{z+1}) herangezogen. Dabei können die Anzahl der Abweichungen und die durchschnittliche Abweichung der Start- bzw. Endtermine der Operationen einer Montagestation bewertet werden.²⁵⁸

$$diffST(AP_z, AP_{z+1}) = \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S isDiff_{j,s}, \quad isDiff_{j,s} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } st_{j,s}^{AP_z} \neq st_{j,s}^{AP_{z+1}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$aveST(AP_z, AP_{z+1}) = \left(\sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S |st_{j,s}^{AP_z} - st_{j,s}^{AP_{z+1}}| \right) * \frac{1}{diffST(AP_z, AP_{z+1})} \quad (3.18)$$

$$diffC(AP_z, AP_{z+1}) = \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S isDiff_{j,s}, \quad isDiff_{j,s} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } c_{j,s}^{AP_z} \neq c_{j,s}^{AP_{z+1}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.19)$$

²⁵⁷ Die Bewertung anhand der Robustheitskriterien dient hier der Veranschaulichung.

²⁵⁸ Zu diesen Kennzahlen vergleiche Schwartz und Voß (2005).

$$aveC(AP_z, AP_{z+1}) = \left(\sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S |c_{j,s}^{AP_z} - c_{j,s}^{AP_{z+1}}| \right) * \frac{l}{diffC(AP_z, AP_{z+1})} \quad (3.20)$$

Bewertet werden hier ausschließlich Änderungen innerhalb AREA-F, da die Planungsrobustheit hier von besonderer Bedeutung ist. In Bezug auf die Planungsrobustheit lässt sich damit schlussfolgern, dass, je größer diese Kennzahlen ausfallen, desto geringer die Planungsrobustheit ist. Für eine detaillierte Analyse lassen sich diese Kennzahlen auch für einzelne Montagestationen berechnen.

Für die Festlegung des Parameter th_s^{cb} , welcher die Verrechnung von zusätzlichen Kapazitätsbedarfen mit den Kapazitätspuffern steuert, kann zudem die Anzahl an unvollständigen Kompensationen je Montagestation herangezogen werden.

$$notCOMP_s(ACT) = \sum_{j=1}^J notComp_j, \quad notComp_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn} \\ wp_{j,s}^{new} - wp_{j,s}^{old} \geq cb_{j,s} * th_s^{cb}, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.21)$$

Zur besseren Abstimmung des Grenzwerts bzw. der Kapazitätspuffer wird zudem der im Durchschnitt nicht kompensierte Ressourcenbedarf je Montagestation erfasst.

$$aveNotCOMP_s(ACT) = \frac{\left(\sum_{j=1}^J \max \{ 0, wp_{j,s}^{new} - wp_{j,s}^{old} - (cb_{j,s} * th_s^{cb}) \} \right)}{notCOMP_s(ACT)} \quad (3.22)$$

Bewertung der Montagedurchführung – ressourcenorientierte Kennzahlen

Der Bewertung der tatsächlichen Auslastung durch ressourcenorientierte Kennzahlen ist für die zielführende Dimensionierung der Kapazitätspuffer von zentraler Bedeutung. In der Annahme, dass die auf auftragsorientierten Kennzahlen basierende Bewertung der Montagedurchführung eine ausreichende Robustheit ergeben hat, kann aus einer zu geringen Auslastung auf überdimensionierte und aus einer hohen Auslastung auf unterdimensionierte Kapazitätspuffer geschlossen werden. Kapazitätspuffer, die zwar Ressourcen reservieren, welche aber durch zusätzliche oder verzögerte Kapazitätsbedarfe nicht benötigt werden, führen dazu, dass die Auslastung dieser Ressourcen sinkt. Auch eine frühere Bearbeitung von anderen Aufträgen durch diese Ressourcen ist auf Grund der

geplanten Materialverfügbarkeit nur eingeschränkt möglich bzw. verschiebt die Unterauslastung nur an einen späteren Zeitpunkt. In diesem Zusammenhang zeigt eine zu niedrige Auslastung zudem, dass das Potential zur Reduzierung der Durchlaufzeit nicht vollständig ausgeschöpft wurde. Umgekehrt zeigt eine hohe Auslastung, dass die eingeplanten Kapazitätspuffer benötigt werden und ihren Zweck erfüllen. Problematisch wird ein zu hoher Auslastungsgrad dann, wenn dieser den geplanten Auslastungsgrad einer Montagestation ($aveUTIL_s(AP)$) übersteigt, da in diesem Fall die geplante Durchlaufzeit mit großer Wahrscheinlichkeit überschritten und die Einhaltung des geplanten Montageendtermins gefährdet wird. Diese Verspätung könnte sich dann auf die nachfolgenden Montagestationen und den Fertigstellungstermin auswirken. Zudem sinkt mit einer höheren Auslastung die Flexibilität und das Risiko von Störungen bei der Durchführung erhöht sich.²⁵⁹ Diese Ausführungen zeigen die Wichtigkeit der Überwachung der Ressourcenauslastung in Zusammenhang mit Pufferdimensionierung deutlich.

Die Erfassung der tatsächlichen Auslastung basiert grundsätzlich auf der Erfassung von Rückmeldezeiten aus der Montage. Jeder Mitarbeiter meldet nach Beendigung eines Arbeitsvorgangs diesen unmittelbar als fertiggestellt. Hat er zu dessen Bearbeitung mehr Zeit als geplant benötigt, dann dokumentiert er dies durch Zeitnachforderungen. Insbesondere bei Nacharbeiten müssen die zusätzlichen Bearbeitungszeiten erfasst werden. Aus der Summe der rückgemeldeten Vorgänge und den Zeitnachforderungen, die innerhalb einer Schicht t auf einer Montagestation s erfasst werden, errechnet sich die tatsächliche Ressourcenauslastung $u_{s,t}^{ACT}$, mit der sich die tatsächliche durchschnittliche Auslastung ($aveUTIL_s(ACT)$) je Montagestation berechnen lässt. Eine gezielte Einschränkung der zu betrachtenden Schichten ist nicht erforderlich, alle vergangenen Schichten können zur Berechnung herangezogen werden.

$$aveUTIL_s(ACT) = \left(\frac{\sum_{t=0}^{\tau-1} u_{s,t}^{ACT}}{r_{s,t}} \right) * \frac{I}{\tau-1} * 100 \quad (8.23)$$

Auch hier lässt sich wiederum die Gesamtauslastung errechnen.

²⁵⁹ Vgl. Eversheim (1992): S. 5.

$$aveUTIL(ACT) = \sum_{i=1}^{i=S} aveUTIL_i(ACT) * \frac{1}{S} \quad (3.24)$$

Zur Beurteilung der Dimensionierung der Kapazitätspuffer werden die Differenzen der jeweiligen durchschnittlichen Auslastungen der Montagestationen herangezogen. Je nach Vorzeichen liegt eine Über- bzw. Unterauslastung vor.

$$diffUTIL_i(AP, ACT) = aveUTIL_i(AP) - aveUTIL_i(ACT) \quad (3.25)$$

Die Beurteilung, ob diese Kennzahlen eine Neudimensionierung der Kapazitätspuffer auf einzelnen Montagestationen notwendig machen, obliegt dem Entscheidungsträger, der gemäß seiner Risikoeinstellung entscheiden kann.

Nachteil dieser vergangenheitsorientierten, statistikbasierten Festlegung der Kapazitätspuffer bleibt die Tatsache, dass nur verzögert auf eine unzureichende Zielerreichung reagiert werden kann. Die nachfolgend entwickelte Vorgehensweise einer simulationsbasierten Festlegung der Puffer begegnet diesem Nachteil durch eine antizipative Berücksichtigung möglicher Umweltentwicklungen zum Zeitpunkt der Planung.

3.2.2.3 Simulationsbasierte Festlegung der Kapazitätspuffer

Der Entscheidungsträger wird zur Festlegung des Ressourcenbelegungsplans durch Kennzahlen bei der Festlegung der Kapazitätspuffer unterstützt, diese basieren jedoch nicht aus Vergangenheitswerten, sondern auf **Simulation**, mit deren Hilfe potentielle zukünftige Umweltsituationen und deren Auswirkungen auf die Montagedurchführung antizipiert werden sollen.

Simulation wird für den Bereich der Produktion bzw. Produktionsplanung in der Richtlinie VDI 3633 definiert als „[...] das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“.²⁶⁰ Eine Simulationsstudie bezeichnet die Durchführung einer

²⁶⁰ Siehe VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1.

Simulation mit den Phasen *Vorbereitung, Durchführung und Auswertung*.²⁶¹ Die erste Phase der Vorbereitung umfasst dabei die „Analyse der Problemstellung“, die „Festlegung der Aufgaben, Ziele und des Experimentplans“, die „Ermittlung und Aufbereitung der Daten“ und die „Erstellung des Simulationsmodells“. Die zweite Phase beinhaltet die „Durchführung der Simulationsexperimente“ und die dritte Phase beinhaltet die „Analyse der Ergebnisse“ und „Entwicklung von Alternativen“. Alle Phasen und ihre Bestandteile werden grundsätzlich durch einen Prozess zu deren Verifikation und Validierung begleitet.²⁶²

In Bezug auf den Einsatz von Simulation zur Festlegung der Kapazitätspuffer ist es nicht notwendig den gesamten Prozess einer Simulationsstudie jedes Mal vollständig zu durchlaufen. Insbesondere die erste Phase muss nur bei Änderungen der Ausgangslage wiederholt werden. Die notwendigen Schritte („Durchführung der Simulationsexperimente“ und „Analyse der Ergebnisse“) werden hier unter dem Begriff **Simulationsanalyse** subsumiert. Ziel dieser Simulationsanalyse ist die Bewertung eines Ressourcenbelegungsplans hinsichtlich unterschiedlicher **Simulationsszenarien** durch Kennzahlen und die gezielte Entwicklung von alternativen Ressourcenbelegungsplänen. Jedes Simulationsszenario *SiSC* definiert die für die Simulation relevanten Parameter zur Abbildung der Informationsdynamik und der Störungen, wobei zwischen Worst-Case-, Average-Case- und Best-Case-Szenario unterschieden wird.²⁶³ Eine Simulationsanalyse basiert auf der Durchführung von **Simulationsexperimenten** mit den jeweils unterschiedlichen Planungs- und Simulationsszenarien. Jedes Simulationsexperiment wiederum besteht aus einer gewissen Anzahl an Simulationsläufen²⁶⁴, wobei zur Simulation des rollierenden Ablaufs jeweils einzelne Planungsschritte durchgeführt werden können.

²⁶¹ Vgl. Kuhn und Wenzel (2008) und Rabe et al. (2008).

²⁶² Zu Verifikation und Validierung vergleiche Rabe et al. (2008).

²⁶³ Die verschiedenen Ursachen von Unsicherheit müssen deswegen in der Simulation berücksichtigt werden, da durch die Simulation unter anderem die Planungsrobustheit von AREA-F bewertet werden soll und diese durch Neuplanungen von AREA-F beeinträchtigt wird. Durch Unsicherheit bedingte Informationsänderungen, die Neuplanungen von AREA-F nach sich ziehen, müssen demnach im Simulationsmodell abgebildet werden.

²⁶⁴ Zur Festlegung der Anzahl von Simulationsläufen können bspw. graphische Methoden oder die Konfidenzintervall-Methode eingesetzt werden – vgl. Robinson (2004).

Zur Abbildung der verschiedenen Ursachen und Auswirkungen von Informationsdynamik und Störungen im Simulationsmodell werden für jede Montagestation nachfolgend die Parameter definiert.²⁶⁵

- Die aus der Informationsdynamik resultierende Verschiebung von Materialverfügbarkeitsterminen wird durch deren Anzahl (ρ_i^{isd}) und Ausprägung (θ_i^{isd}) definiert, wobei unterschiedliche Werte für AREA-F und AREA-O definiert werden, da Anzahl und Ausprägung mit näher rückendem Montagebeginn abnehmen ($\rho_i^{isd,F}$, $\theta_i^{isd,F}$, $\rho_i^{isd,O}$, $\theta_i^{isd,O}$). Analog dazu werden zusätzliche Ressourcenbedarfe durch ρ_i^{wp} und θ_i^{wp} definiert ($\rho_i^{wp,F}$, $\theta_i^{wp,F}$, $\rho_i^{wp,O}$, $\theta_i^{wp,O}$). Diese Parameter müssen auf Planabstand $D^{F,O}$ abgestimmt werden.

Die Änderungen von Arbeitspaketen werden, gemäß obigen Erläuterungen, nach Möglichkeit verrechnet und Neuplanungen so gegebenenfalls verhindert.

Die Datengrundlage zur Bestimmung dieser Parameter bilden Vergangenheitswerte. An jedem Werktag werden sämtliche auftrags- bzw. operationsbezogenen Planungsdaten erfasst, so dass Änderungen derselben analysiert werden können.

Dispositions- und betriebsmittelbedingte Störungen werden durch gemeinsame Parameter modelliert. Da diese Störungen jeweils in einem verzögerten oder zusätzlichem Ressourcenbedarf resultieren können, werden für beide Arten von Auswirkungen jeweils die entsprechenden Parameter für Anzahl und Ausprägung (ρ_i^{delay} und θ_i^{delay} bzw. ρ_i^{add} und θ_i^{add}) definiert. Grundlage der Bestimmung dieser Parameter sind Störungsmeldungen bzw. Zeitnachforderungen der Montagemitarbeiter.

- Bei durch Fehlteile verursachten materialbedingten Störungen wird nach der Auswirkung der Störung zwischen kritischen Teilen, die den Fortgang der Montage verhindern, und Teilen, die bei späterer Montage zusätzlichen Aufwand verursachen,

²⁶⁵ Vgl. Abschnitt 2.4.1. Auf eine Abbildung der auf Nachfrage- und Arbeitsmarktunsicherheit beruhenden Auswirkungen wird auf Grund von deren Ausnahmestellung verzichtet.

Die Parameter zur Abbildung der Ursachen und Auswirkungen von Unsicherheit und Störungen bestehen jeweils aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie deren Parametern und basieren auf empirischen Analysen.

unterschieden. Für erstere werden die Parameter $\rho_s^{mat, delay}$ und $\theta_s^{mat, delay}$ definiert, die das Auftreten bzw. die Dauer der Verzögerung modellieren, für letztere die Parameter $\rho_s^{mat, add}$ und $\theta_s^{mat, add}$ (Auftreten bzw. zusätzlicher Aufwand).

Zur Bestimmung der jeweiligen Art des Fehlteils wird auf die ABC-Analyse zurückgegriffen.²⁶⁶ Dabei wird angenommen, dass A-Teile den Fortgang der Montage verhindern und B-Teile eine Verzögerung verursachen. Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass diese Werte standardmäßig in den meisten Unternehmen berechnet werden und somit keinen weiteren Aufwand verursachen. Datenbasis dieser Analysen und der Parameter bilden die Fehlteilmeldungen der Montage. Im Falle von zusätzlichem Ressourcenbedarf werden die mit der Fehlteilmeldung assoziierten Zeitznachforderungen einbezogen.

Kurzfristige Schwankungen des Ressourcenangebots (personalbedingte Störungen) werden durch deren Anzahl ρ_s' (je fünf Arbeitstage) und Ausprägung θ_s' modelliert. Als Grundlage für deren Bestimmung werden Daten der Personalabteilung herangezogen.

Im Falle des Worst-Case-Szenarios werden für jeden Parameter die schlechtesten anzunehmenden Werte herangezogen, für das Best-Case-Szenario deren minimale Ausprägung.²⁶⁷ Das Average-Case-Szenario bildet mit seinen Parametern die am wahrscheinlichsten eintretende Umweltsituation ab.²⁶⁸ Eine Festlegung oder Anpassung der Parameterwerte muss dabei nicht vor jeder Simulationsanalyse erfolgen, sondern kann in Intervallen durchgeführt werden, was den Aufwand zur Simulation reduziert.

Die Analyse der Ergebnisse basiert grundsätzlich auf den gleichen Kennzahlen wie die der statistischen Analyse der Montagedurchführung. Es werden jedoch für jedes der drei grundlegenden Simulationsszenarien (Worst-Case-, Average-Case- und Best-Case-Szenario)

²⁶⁶ Vgl. Pfohl (2004).

²⁶⁷ Prinzipiell wäre der beste Fall, wenn keinerlei Unsicherheit und Störungen auftreten würden. In diesem Fall wäre eine Simulation jedoch sinnlos, da der Ressourcenbelegungsplan wie geplant durchgeführt werden kann.

²⁶⁸ Grundsätzlich lässt sich die Anzahl von Szenarien beliebig erweitern, falls detailliertere Informationen mit bspw. unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sind. Zu beachten ist dabei, dass mit steigender Szenarioanzahl auch der Simulationsaufwand, die Simulationsdauer, steigt.

die jeweiligen Durchschnittswerte aller Simulationsläufe berechnet und zur Beurteilung herangezogen.

Die nachfolgenden Tabellen fassen jeweils die für die Dimensionierung der Kapazitätspuffer wichtigsten auftrags- und ressourcenorientierten Kennzahlen zusammen.²⁶⁹ Auch andere Parameter der Planung lassen sich auf Basis dieser Kennzahlen beurteilen und gegebenenfalls anpassen. Für eine detailliertere Analyse lassen sich weitere stationsbezogene Kennzahlen heranziehen, die aber aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Tabellen nicht aufgeführt sind.

Zur Beurteilung der Planungsrobustheit wird innerhalb der Simulationsanalyse die Veränderung der Montagestart- und Montageendtermine zwischen den Ressourcenbelegungsplänen (AP_z^{SiSC} und AP_{z+1}^{SiSC}) zweier Planungsschritte berechnet. Die Durchschnittswerte werden bezüglich aller simulierten Planungsschritte berechnet.

Kennzahl	Ressourcenbelegungsplan	Simulationsstudie	Kriterium
Ø-Differenz zur Plandurchlaufzeit	$aveDiffFLT^{ST}(AP)$		Ergebnisrobustheit
Ø-Differenz zur optimalen Durchlaufzeit	$aveDiffFLT^{OPT}(AP)$		Optimalitätsrobustheit
Ø-Verfrühung	$aveEAR(AP)$	$aveEAR(SiSC)$	Ergebnisrobustheit
Anzahl verspäteter Aufträge	$LATE(AP)$	$LATE(SiSC)$	Zulässigkeitsrobustheit
Anzahl zu früher Starttermine	$EARL(AP)$		Zulässigkeitsrobustheit
Ø-Abweichung Starttermine		$aveST(AP_z^{SiSC}, AP_{z+1}^{SiSC})$	Planungsrobustheit

²⁶⁹ Anzumerken ist, dass auch bei einer simulationsbasierten Festlegung die Kennzahlen der Montagedurchführung zur Unterstützung des Entscheidungsträgers herangezogen werden können.

Konzeption

∅-Abweichung Endtermine	$aveC(AP_z^{SiSC}, AP_{z+1}^{SiSC})$	Planungs- robustheit
∅-Anzahl an Neuplanungen eines Auftrags	$aveRES^{AREA-F}(SiSC)$	Planungs- robustheit
Anzahl nicht kompensierbarer Ressourcen- bedarfsänderungen	$notCOMP_i(SiSC)$	Planungs- robustheit
∅ nicht kompensierbarer Ressourcen- bedarfsänderungen	$aveNotCOMP_i(SiSC)$	Planungs- robustheit

Tabelle 1: Auftragsorientierte Kennzahlen

Die Werte zur Berechnung der Kennzahlen werden hierbei analog zu den Werten der Montagedurchführung erfasst (fixierte Werte).

Kennzahl	Ressourcenbelegungsplan	Simulationsstudie	Kriterium
Anzahl Übersauslastungen	$OVER(AP)$		Zulässigkeits- robustheit
∅-Auslastung je Montagestation	$aveUTIL_i(AP)$	$aveUTIL_i(SiSC)$	
∅-Gesamt- auslastung	$aveUTIL(AP)$	$aveUTIL(SiSC)$	

Tabelle 2: Ressourcenorientierte Kennzahlen

Nach Beendigung der Simulationsexperimente endet die Simulationsanalyse mit der Beurteilung der Kennzahlen („Analyse der Ergebnisse“) durch den Entscheidungsträger. Dieser kann entweder den aktuellen Plan akzeptieren und für die Durchführung freigeben,

oder er passt iterativ Planungsparameter und/oder -daten an und wiederholt die Simulationsanalyse („Entwicklung von Alternativen“).

Durch die in den vorhergehenden Abschnitten entwickelte Methode der operationsbezogenen Kapazitätspuffer können, mit Hilfe der simulationsbasierten Festlegung der Kapazitätspuffer, robuste Ressourcenbelegungspläne **zielführend** und **a priori** berechnet werden. Die Zusammenhänge zwischen Parameterfestlegung und Planungsergebnis lassen sich durch das vorgestellte Kennzahlensystem nachvollziehbar und transparent darstellen.

Kritisch anzumerken bleiben der erhöhte Aufwand zur Planung und die Kosten für die Simulation und die dafür notwendige Datenbereitstellung. Die entstehenden Kosten können jedoch durch entsprechende Kostensenkungen, falls diese wie geplant realisiert werden können, gerechtfertigt werden.

3.3 Analyse und Entwicklung von Verfahren zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans

Die entwickelte, proaktive Planungsmethode berücksichtigt Unsicherheit indirekt durch operationsbezogene Kapazitätspuffer und definiert ein deterministisches Korrekturmodell als Entscheidungsmodell des Ressourcenbelegungsplanungsproblems. Zur Lösung dieses Planungsproblems wird zunächst das entsprechende Optimierungsmodell formuliert, darauf aufbauend existierende Lösungsverfahren (Optimierungsverfahren) analysiert und abschließend ein problemspezifisches Lösungsverfahren entwickelt.

3.3.1 Formulierung des Entscheidungsmodells

Das vorliegende deterministische Korrekturmodell lässt sich formal als mathematisches Entscheidungsmodell darstellen.

Indizes

$j = 1 \dots J$

$j \in \mathbb{N}$

Aufträge

Konzeption

$s = 1 \dots S$, $s \in \mathbb{N}$ Montagestationen

$t = 1 \dots T$, $t \in \mathbb{N}$ Schichten

Daten

$esd_{j,s}$ Frühester Starttermin von Auftrag j auf Station s

dl_j Fertigstellungstermin eines Auftrags j (Schicht)

i_s^{MAX} Maximale Bearbeitungsintensität der Montagestation s

$r_{s,t}$ Ressourcenangebot der Montagestation s in der Schicht t

$wp_{j,s}^{ch}$ Arbeitspaket (inkl. Kapazitätspuffer) eines Auftrags j auf Station s

Entscheidungsvariablen

$alloc_{j,s,t}$ Zur Bearbeitung zugeordneter Anteil des Arbeitspakets eines Auftrags j auf Station s in Schicht t

Hilfsvariablen

$firstAlloc_{j,s,t}$ Binäre Hilfsvariable, die die erste Zuordnung eines Teils des Arbeitspakets eines Auftrags j auf Station s in Schicht t angibt.

$isAlloc_{j,s,t}$ Binäre Hilfsvariable, die die Zuordnung eines Teils des Arbeitspakets eines Auftrags j auf Station s in Schicht t angibt.

$lastAlloc_{j,s,t}$ Binäre Hilfsvariable, die die letzte Zuordnung eines Teils des Arbeitspakets eines Auftrags j auf Station s in Schicht t angibt.

Zielfunktion

$$\text{Max!} \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \text{firstAlloc}_{j,s,t} * t \quad (3.26)$$

Primäres Optimierungsziel ist es den jeweiligen Montagebeginn spät wie möglich zu planen. Hierzu werden die Starttermine bzw. in der Zielfunktion (3.26) entsprechend die erste Zuordnung eines Teils des Arbeitspakets auf eine Schicht maximiert.

Nebenbedingungen

$$\sum_{t=\text{dB}_j}^T \text{alloc}_{j,s,t} = 0 \quad \forall j, s \quad (3.27)$$

$$\sum_{t=1}^{\text{min}(T, \text{PUE}_j - 1)} \text{alloc}_{j,s,t} = 0 \quad \forall j, s \quad (3.28)$$

$$\sum_{t=1}^T \text{alloc}_{j,s,t} = \text{wp}_{j,s}^{\text{cb}} \quad \forall j, s \quad (3.29)$$

$$\sum_{j=1}^J \text{alloc}_{j,s,t} = r_{s,t} \quad \forall s, t \quad (3.30)$$

$$\text{alloc}_{j,s,t} \leq i_s^{\text{MAX}} \quad \forall j, s, t \quad (3.31)$$

$$\text{isAlloc}_{j,s,t} = \begin{cases} 1, & \text{wenn für } t \text{ } \text{alloc}_{j,s,t} > 0 \text{ gilt,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall j, s \quad (3.32)$$

$$\text{firstAlloc}_{j,s,t} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \forall t' < t \text{ } \text{isAlloc}_{j,s,t'} = 0 \text{ und } \text{isAlloc}_{j,s,t} = 1 \text{ gilt,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall j, s \quad (3.33)$$

$$\text{lastAlloc}_{j,s,t} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \forall t' > t \text{ } \text{isAlloc}_{j,s,t'} = 0 \text{ und } \text{isAlloc}_{j,s,t} = 1 \text{ gilt,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall j, s \quad (3.34)$$

$$lastAlloc_{j,s-1,t} < firstAlloc_{j,s,t} \quad \forall j, s > 1, t \quad (3.35)$$

$$firstAlloc_{j,s,t} < firstAlloc_{j,s+1,t} \quad \forall j, s > 1, t \quad (3.36)$$

$$isAlloc_{j,s,t}, firstAlloc_{j,s,t}, lastAlloc_{j,s,t} \in \{0, 1\} \quad \forall j, s, t \quad (3.37)$$

Nebenbedingung (3.27) repräsentiert das als Satisfizierungsziel definierte Ziel der absoluten Termintreue. (3.28) garantiert die Einhaltung des frühesten Starttermins durch alle Operationen. Die vollständige Zuordnung des Arbeitspakets (inklusive Kapazitätspuffer) zu den Montageressourcen wird durch (3.29), die Einhaltung des Ressourcenangebots und der maximalen Bearbeitungsintensität durch (3.30) bzw. (3.31) gewährleistet. Nebenbedingung (3.32) definiert die durch einen Auftrag belegten Schichten einer Montagestation, (3.33) die erste Zuordnung und (3.34) die letzte Zuordnung eines Teils des Arbeitspakets. Die Bearbeitungsreihenfolge der Operationen wird durch die Nebenbedingungen (3.35) und (3.36) garantiert, indem die letzte Zuordnung der vorhergehenden Operation vor der ersten Zuordnung der nachfolgenden bzw. die erste Zuordnung der ersten Operation vor allen anderen ersten Zuordnungen erfolgt.

3.3.2 Literaturüberblick

Da weder Planungskonzept noch Planungsmethode das grundlegende Planungsproblem beeinflussen, gilt es, ein Hybrid-Flow-Shop-Problem²⁷⁰ (HFS-Problem) mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen zu lösen. Zur Lösung von HFS-Problemen mit und ohne unterbrechbare Operationen wurden in der Literatur zahlreiche Ansätze entwickelt, wovon einige nachfolgend analysiert werden. Die Literatur zu Planungsproblemen mit variablen Bearbeitungsintensitäten bzw. die bei der Planung Arbeitspakete berücksichtigen, ist im Vergleich sehr überschaubar.

Bei der Analyse existierender Lösungsverfahren ist insbesondere die Größe der jeweils betrachteten Problemistanz von Bedeutung. Je nach Größe können unterschiedliche Lösungsverfahren für das NP-schwere HFS-Problem eingesetzt werden. Als Verfahren sind in

²⁷⁰ Zum HFS-Problem im Allgemeinen vgl. Vairaktarakis (2004) und Blazewicz et al. (2007).

der Literatur für kleine Probleminstanzen exakte Verfahren beschrieben, während für größere Instanzen heuristische Verfahren entwickelt wurden.

Ein umfangreicher und aktueller Überblick zur Literatur über HFS-Probleme in den verschiedensten Varianten wurde 2010 von Ruiz und Vázquez-Rodríguez²⁷¹ veröffentlicht. Die Autoren analysieren über 200 Veröffentlichungen, die sie nach exakten Verfahren, Heuristiken und Meta-Heuristiken differenzieren. Unter den exakten Verfahren stellen Branch-and-Bound-Verfahren die bevorzugte Technik dar. Viele der beschriebenen Arbeiten konzentrieren sich dabei auf Problemstellungen mit einer oder zwei Stufen oder einer nur sehr kleinen Anzahl an Aufträgen. Ein erstes Branch-and-Bound-Verfahren, das mehrere Stufen berücksichtigt, wurde von Brah und Hunsucker²⁷² entwickelt. Das Problem dieser Verfahren, insbesondere im Hinblick auf die Problemstellung dieser Arbeit, ist der hohe Rechen- und Speicheraufwand und damit verbunden eine lange Berechnungszeit. Obwohl durch effiziente Implementierungen und die Integration heuristischer Verfahren, bspw. zur Berechnung unterer Schranken, die Lösungsfindung beschleunigt werden kann, sind diese nach wie vor nur eingeschränkt auf reale Problemstellungen und -instanzen anwendbar.²⁷³

Zur Lösung großer Probleminstanzen werden unterschiedliche Arten von Heuristiken eingesetzt, die auf Grund ihrer einfachen Implementierbarkeit in der Praxis große Bedeutung erlangt haben. Die erste Gruppe dieser Heuristiken basiert auf einfachen Einlastregeln, die auf Basis von Prioritätsregeln eine Reihenfolge der Aufträge auf Basis bestimmter Kriterien erzeugen.²⁷⁴ Die zweite Gruppe von Verfahren basiert auf dem Prinzip „Teile und Herrsche“ und zerlegt das Planungsproblem in mehrere Teilprobleme, deren Lösungen zusammengesetzt eine Gesamtlösung ergeben. Als effektives Verfahren zur Lösung von mehrstufigen HFS-Problemen hat sich die „Shifting Bottleneck Heuristic“ erwiesen, deren Ziel es ist, die „bottleneck“-Station optimal zu belasten, um so das ganze Produktionssystem zu optimieren.²⁷⁵ Die meisten der von Ruiz und Vázquez-Rodríguez analysierten Arbeiten bzw.

²⁷¹ Vgl. Ruiz und Vázquez-Rodríguez (2010). Auch bei Quadtr und Kuhn (2007) ist ein Überblick zur Thematik zu finden.

²⁷² Vgl. Brah und Hunsucker (1991).

²⁷³ Vgl. Ruiz und Vázquez-Rodríguez (2010).

²⁷⁴ Zu deren Einsatz bei der Lösung von HFS-Problemen vergleiche bspw. Voß und Witt (2007).

²⁷⁵ Vgl. Adams et al. (1988) und Pinedo (2009): S. 89.

deren Verfahren integrieren dabei problemspezifische Aspekte in das Lösungsverfahren und entwickeln so maßgeschneiderte Heuristiken für die jeweilige Problemstellung.

Insbesondere zur Lösung von komplexen Problemen und großen Probleminstanzen haben sich in den letzten Jahren Meta-Heuristiken als Lösungsverfahren etabliert. Diese basieren auf der grundlegenden Idee, lokale Optima (zumeist durch stochastische Elemente) zu überwinden und so bessere Lösungen zu erzielen. Wichtigste Vertreter in Bezug auf HFS-Probleme sind „Simulated Annealing“, „Tabu Search“ und „Genetische Algorithmen“, aber auch „Ant Colony Optimization“, „Artificial Immune Systems“, „Neural Networks“ und andere werden herangezogen.²⁷⁶

In Zusammenhang mit einem HFS-Problem werden bisher variable Bearbeitungsintensitäten bzw. die Planung mit Arbeitspaketen anstelle von fixen Bearbeitungszeiten nicht betrachtet. Ein Ausschnitt der Veröffentlichungen zu diesem Thema wird im Folgenden dargestellt.

Leachman et al.²⁷⁷ stellen ein Modell mit diskretem zeitlichen Planungsbereich vor, in dem die Aktivitäten jeweils mehrere Ressourcen benötigen, wobei die Festlegung der Intensität für einen bestimmten Zeitpunkt einen zur Gesamtnachfrage nach jeweiliger Ressource proportionalen Ressourcenverbrauch impliziert. Leachman et al. entwickeln eine Heuristik mit dem Ziel der Projektdauerminimierung.

De Boer²⁷⁸ definiert auf der mittelfristigen Planungsebene ein „multi-project RCCP“-Problem, dessen Ziel es ist, den Ressourcenbedarf von Arbeitspaketen durch reguläre und nicht-reguläre Ressourcen zu decken (vgl. Abschnitt 2.2). Zur Lösung des „time driven RCCP“ entwickelt der Autor einen „Incremental Capacity Planning Algorithm“, der auch auf das „resource driven RCCP“ angewendet werden kann, und eine auf „Lineare Programmierung“ basierende Heuristik.

Hans²⁷⁹ greift in seiner Arbeit das von de Boer definierte Planungsproblem auf und löst mittels eines Branch-and-Price-Verfahrens Instanzen mit bis zu 50 Operationen exakt. Auf

²⁷⁶ Zur Anwendung dieser Meta-Heuristiken auf das HFS-Problem vergleiche Ruiz und Vázquez-Rodríguez (2010) und Quadts und Kuhn (2007). Grundlagen und Literatur zu Meta-Heuristiken sind u.a. bei Glover et al. 2003 zu finden.

²⁷⁷ Vgl. Leachman et al. (1990).

²⁷⁸ Vgl. de Boer (1998).

²⁷⁹ Vgl. Hans (2001).

den Ansätzen von Hans aufbauend, entwickelt Kis²⁸⁰ einen Branch-and-Cut basierten Ansatz, der anhand von Testinstanzen mit bis zu 60 Operationen evaluiert wird.

Vanhoucke und Debels²⁸¹ betrachten unter anderem in ihren Modellen fixe Arbeitspakete und unterbrechbare Aktivitäten, führen diese auf ein klassisches RCPSP zurück und lösen dieses mittels eines Branch-and-Bound-Verfahrens. Die Komplexität des resultierenden RCPSP schränkt dieses Verfahren jedoch auf kleine Probleminstanzen ein.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keine der hier betrachteten Veröffentlichungen das vorliegende Planungsproblem eines HFS mit variablen Bearbeitungsintensitäten mit den Zielen einer absoluten Termintreue und der Maximierung der Starttermine adressiert. Die bisherigen Arbeiten mit variablen Bearbeitungsintensitäten beinhalten entweder Methoden die nur auf kleine Instanzen angewendet werden können oder sind aus Komplexitätsgründen ungeeignet. Aus diesen Überlegungen lässt sich die Notwendigkeit der Entwicklung eines neuen Lösungsverfahrens unmittelbar ableiten.

3.3.3 Lösungsverfahren

Das zu entwickelnde Lösungsverfahren muss zunächst das in Abschnitt 3.3.1 formulierte Ziel der möglichst späten Starttermine fokussieren – bei gleichzeitiger Einhaltung aller Nebenbedingungen. Im Hinblick auf den praktischen Einsatz muss das Verfahren zudem in der Lage sein, unter allen Umständen einen Ressourcenbelegungsplan berechnen zu können, d.h. auch bei „schwierigen“ Planungsdaten (z.B. bei knappem Ressourcenangebot) einen Plan berechnen zu können. Hierzu muss es möglich sein, unter bestimmten Umständen bestimmte Nebenbedingungen verletzen zu dürfen, bspw. das vorhandene Ressourcenangebot zu überschreiten. In diesen Fällen ist es Aufgabe des Entscheidungsträgers, durch Anpassungsmaßnahmen die Zulässigkeit wiederherzustellen (vgl. Abschnitt 3.1.2 und Abbildung 14). Grundlage dieser Anpassungsentscheidungen bilden der berechnete unzulässige Ressourcenbelegungsplan und die entsprechenden Informationen über verletzte Nebenbedingungen. Eine weitere Anforderung an das Lösungsverfahren ist eine kurze Berechnungszeit, um in möglichst kurzer Zeit eine größere Anzahl an Planungsszenarien

²⁸⁰ Vgl. Kis (2005).

²⁸¹ Vgl. Vanhoucke und Debels (2008).

berechnen zu können und dennoch den Planungsaufwand möglichst gering zu halten.²⁸² Auf Grund der beiden letzten Anforderungen werden exakte Verfahren zur Lösung des Optimierungsproblems nicht in Erwägung gezogen. Da auch Meta-Heuristiken im Allgemeinen eine lange Berechnungszeit benötigen, wird im Folgenden eine einfache, aber effiziente Heuristik entwickelt.

Grundsätzlich sind bei der Berechnung eines Ressourcenbelegungsplans zwei Entscheidungen zu treffen: Wann soll eine Operation bearbeitet werden und mit welcher Intensität. Da die Entscheidung über die Intensität die Problemkomplexität extrem erhöht, wird diese Entscheidung vorweggenommen. Hierzu wird die Annahme getroffen, dass minimale Durchlaufzeiten (und damit späte Starttermine) immer dann erzielt werden können, wenn mit möglichst hoher Intensität an wenigen Aufträgen gearbeitet wird. Auf Grund dieser Annahme wird grundsätzlich versucht, eine Operation mit möglichst hoher Intensität einzuplanen. Zur Berechnung dieser Intensität bzw. der maximal einzuplanenden Stunden des Arbeitspakets ($alloc_{j,s,t}^{MAX}$) wird folgende Berechnungsformel, basierend auf der Anzahl der in einer Schicht zur Verfügung stehenden Mitarbeiter ($w_{s,t}^{total}$) und der maximalen Anzahl an Mitarbeitern, die gleichzeitig einen Auftrag bearbeiten können (w_s^{MAX}), herangezogen.

$$alloc_{j,s,t}^{MAX} = \frac{w_{s,t}^{total}}{\frac{w_s^{MAX}}{w_s^{total}}} \quad (3.38)$$

Zur Bestimmung der Schichten, in denen eine Operation bearbeitet werden soll, wird ein problemspezifischer Algorithmus eingesetzt, welcher ausgehend vom Fertigstellungstermin rückwärts die Arbeitspakete der Operationen mit **möglichst hoher Intensität** auf Basis einer **Einlastregel** einplant. Dieser, IBRAD („Iterative Backward Resource Allocation and Dispatching“) genannte, Algorithmus basiert grundsätzlich auf dem Prinzip „Teile und Herrsche“ und belegt sequentiell die Ressourcen der Montagestationen von der letzten zur ersten Station ($s^{active} = S, s^{active} = S-1, s^{active} = S-2, \dots, \rightarrow s^{active} = 1$), wobei s^{active} die

²⁸² Da der Planer wesentlichen Einfluss auf die Berechnung des Ressourcenbelegungsplans hat, bspw. durch die Dimensionierung der Kapazitätspuffer, ist dieser bis zur Freigabe des Plans in den Planungsprozess eingebunden.

aktuell zu planende, **aktive Montagestation** darstellt. Durch diesen Beginn der Ressourcenbelegung auf der letzten Montagestation ausgehend vom Fertigstellungstermin eines Auftrags können gleichzeitig deren Einhaltung gewährleistet und Verfrühungen minimiert werden. Zur Belegung des Kapazitätsangebots ($r_{t,i}$) der Montageressourcen in einer Schicht t der aktiven Station (s^{active}), durch einen bestimmten Teil des Ressourcenbedarfs ($wp_{j,s}^{cb}$) einer Operation wird ebenfalls sequentiell von „rechts“ nach „links“ (bezogen auf einen Zeitstrahl) vorgegangen – d.h. als erstes wird die Schicht betrachtet, die unmittelbar vor der maximalen „rechten“ Grenze des **Einlastzeitfensters** aller Operationen liegt, dann sukzessive (iterativ) die vorhergehenden Schichten. Das Einlastzeitfenster jeder Operation wird durch eine „linke“ und „rechte“ Grenze definiert.²⁸³ Die linke Grenze ($lB_{j,s}$) errechnet sich auf Basis des frühesten Starttermins ($esd_{j,s}$ bzw. $esd_{j,s}^{FIX}$), der linken Grenze der vorhergehenden Operation ($lB_{j,s-1}$) und deren minimaler (Rest-)Durchlaufzeit ($f_{j,s-1}^{MIN}$)²⁸⁴ bzw. dem aktuellen Planungszeitpunkt (τ). Die Berechnung dieser minimalen Durchlaufzeiten $f_{j,s}^{MIN}$ basiert dabei auf $alloc_{j,s,t}^{MAX}$ und $wp_{j,s}^{cb}$.

$$lB_{j,s} = \begin{cases} \max\{esd_{j,s}, esd_{j,s}^{FIX}, \tau\}, & \text{wenn } s=1 \\ \max\{lB_{j,s-1} + f_{j,s-1}^{MIN}, esd_{j,s}, esd_{j,s}^{FIX}, \tau\}, & \text{wenn } s > 1 \end{cases} \quad (3.39)$$

Die rechte Grenze ($rB_{j,s}$) entspricht entweder dem Fertigstellungstermin (dl_j), dem geplanten Starttermin der nachfolgenden Operation ($st_{j,s+1}^{AP}$) oder errechnet sich aus der rechten Grenze der nachfolgenden Operation ($rB_{j,s+1}$) und der minimalen Durchlaufzeit dieser Operation ($f_{j,s+1}^{MIN}$).

$$rB_{j,s} = \begin{cases} dl_j, & \text{wenn } s=S \\ \min\{st_{j,s+1}^{AP}, rB_{j,s+1} - f_{j,s+1}^{MIN}\}, & \text{wenn } s < S \end{cases} \quad (3.40)$$

Damit errechnet sich die erste zu betrachtende Schicht – die jeweils zu betrachtende Schicht wird als **aktive Schicht** (t^{active}) bezeichnet – aus den rechten Grenzen der aktiven Montagestation ($t^{active} = \max\{rB_{j,s} \mid s=s^{active}\}, \forall j$).

²⁸³ Eine ähnliche Vorgehensweise wird bspw. bei Voß und Witt (2007) vorgeschlagen.

²⁸⁴ Restdurchlaufzeiten werden immer dann zur Berechnung des Einlastzeitfensters herangezogen, wenn die Bearbeitung einer Station bereits begonnen wurde und nur noch das verbleibende Arbeitspaket eingeplant werden muss.

Nach der Bestimmung der aktiven Schicht müssen diejenigen Operationen bestimmt werden, die in dieser Schicht potentiell einzuplanen sind, die Menge der so genannten **aktiven Operationen** ($O_{j,s}^{active}$). Zu den aktiven Operationen gehören diejenigen, deren Einlastzeitfenster die aktive Schicht beinhaltet ($lB_{j,s} \leq t^{active} \leq rB_{j,s}$). Nach Bestimmung der aktiven Operationen werden diese gemäß der Einlastregel eingeplant.

Die Einlastregel bestimmt für jede Operation die Priorität, mit der diese Operation einzuplanen ist. Oberste Priorität haben dabei Operationen, die auf Grund ihres Einlastzeitfensters eingeplant werden müssen, um die linke Grenze nicht zu überschreiten (**Einlastverpflichtung**). Diese werden dann, auch wenn das zur Verfügung stehende Ressourcenangebot überschritten wird, mit maximaler Intensität eingeplant. Alle anderen aktiven Operationen werden gemäß einer Prioritätsregelkombination priorisiert.²⁸⁵ Hierbei wird das Verhältnis des „slacks“ und des (Rest-)Arbeitspakets einer Operation herangezogen. Der „slack“ einer Operation ($slack_{j,s}$) errechnet sich dabei aus der Differenz von t^{active} und $lB_{j,s}$: $slack_{j,s} = t^{active} - lB_{j,s}$.

$$priority_{j,s} = \frac{slack_{j,s}}{wp_{j,s}^{th} - rt_{j,s}} \quad (3.41)$$

Abbildung 16 fasst den allgemeinen Ablauf des Algorithmus zusammen.

²⁸⁵ Zur Kombination von Prioritätsregeln vgl. Pinedo (2009): S. 445 ff. Zu Prioritätsregeln vergleiche bspw. Haupt (1989), Domschke et al. (1997) und Silver et al. (1998): S. 691 ff.

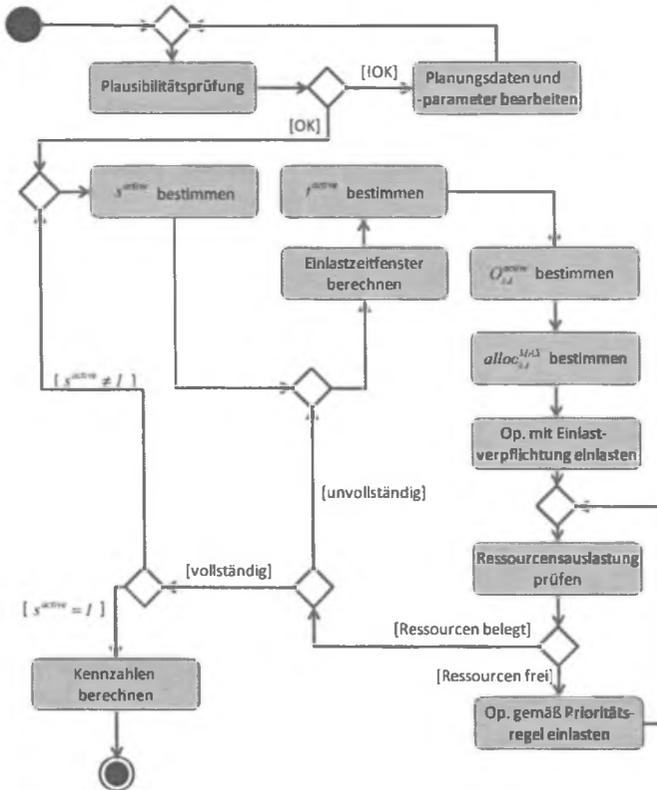


Abbildung 16: „Iterative Backward Resource Allocation and Dispatching - IBRAD“

Das Lösungsverfahren beginnt mit einer Plausibilitätsprüfung, welche die Montagezeitfenster dahingehend überprüft, ob eine Einlastung des Arbeitspakets und des Kapazitätspuffers mit den errechneten Intensitäten innerhalb der Grenzen des Einlastzeitfensters überhaupt möglich ist. Fällt diese Prüfung negativ aus, dann sind die entsprechenden Zeitfenster nicht einhaltbar und es müssen seitens des Entscheidungsträgers Maßnahmen ergriffen werden. Im Falle einer positiven Prüfung werden die letzte Montagestation zur aktiven Station und die Einlastzeitfenster aller Operationen dieser Station berechnet. Ausgehend von den Einlastzeitfenstern wird die späteste Schicht als aktive Schicht festgelegt und die Menge der aktiven Operationen bestimmt. Alle aktiven Operationen, die eine Einlastverpflichtung besitzen, werden eingeplant und anschließend die Ressourcenauslastung geprüft. Anschließend werden freie Ressourcen nacheinander durch

Operationen gemäß der durch die Einlastregel bestimmten Priorität belegt. Sind die Ressourcen der aktiven Schicht vollständig belegt, wird überprüft, ob alle Operationen vollständig eingeplant wurden. Solange das nicht der Fall ist, werden iterativ zunächst die Einlastzeitfenster neu berechnet, die nächste aktive Schicht bestimmt und deren Ressourcen belegt. Nach der vollständigen Einplanung aller Operationen einer Montagestation wird die vorhergehende Station zur aktiven Station oder, falls alle Operationen der ersten Station vollständig eingeplant wurden, der Algorithmus terminiert und die Kennzahlen berechnet.

3.4 Zusammenfassung

Der konzipierte Planungsansatz zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen umfasst ein Konzept mit rollierenden auftragsorientierten Planungsbereichen, das die Ressourcenbelegungsplanung im Sinne der robusten Planung in die Gesamtplanungsaufgabe hierarchisch integriert, eine simulationsbasierte, proaktive Methode, die Unsicherheit indirekt durch operationsbezogene Kapazitätspuffer berücksichtigt und ein Lösungsverfahren (IBRAD) zur effizienten Berechnung des Ressourcenbelegungsplans. Abbildung 17 fasst den Planungsansatz und seine Bestandteile zusammen.

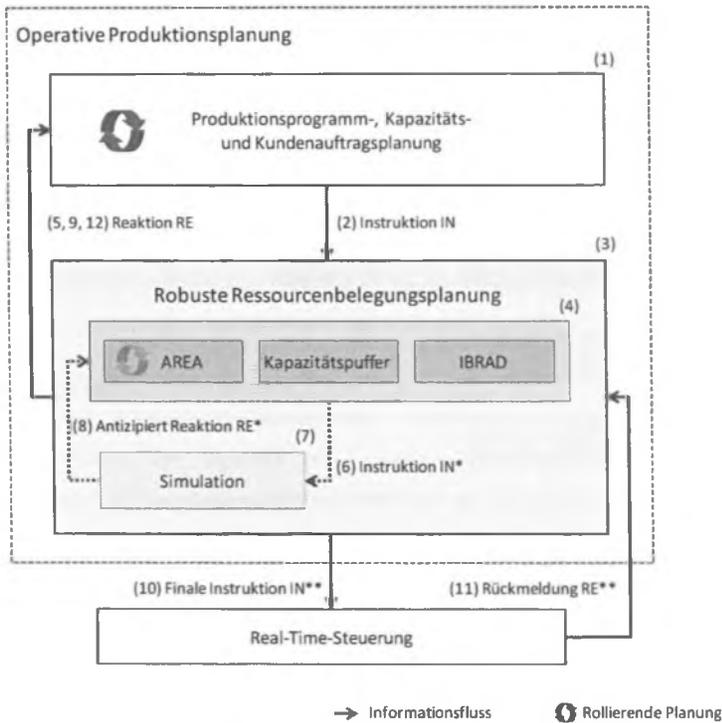


Abbildung 17: Übersicht des Planungsansatzes – Hierarchische Integration

Die operative Planung für die Montage von Spezialmaschinen erfolgt auf der mittelfristigen Ebene durch die Produktionsprogramm-, Kapazitäts- und Kundenauftragsplanung. Diese übergeordneten Planungsaufgaben (1) definieren die Planungsvorgaben, die Instruktionen *IN* (2) für die Ressourcenbelegungsplanung (3). Neue Instruktionen werden gemäß den Planungsbereichen (AREA-F und AREA-O) ereignis- bzw. zeitorientiert bei der Planung berücksichtigt. Die um Kapazitätspuffer ergänzten Arbeitspakete werden unter Berücksichtigung des Planungsbereichs durch den IBRAD-Algorithmus den Montage-ressourcen zugeordnet (4). Dieser Ressourcenbelegungsplan wird dann zunächst als Instruktion *IN** (6) an die Simulation (7) übergeben, welche als antizipierte Reaktion *RE** (8) die Ergebnisse der Simulationsanalyse für den Worst-, Average- und Best-Case zurückmeldet. Als finale Instruktion *IN*** (10) wird der Montagesteuerung (Real-Time-Steuerung) ein Ressourcenbelegungsplan zu dessen Durchführung freigegeben. Die

Rückmeldungen RE^{**} (11) aus der Montage werden in zukünftigen Planungsschritten berücksichtigt. Reaktionen RE (5, 9, 12) der Ressourcenbelegungsplanung auf die Instruktionen IN können nach der Berechnung des Plans, nach dessen Simulation oder auf Grund von Rückmeldungen der Montagesteuerung erfolgen. Von besonderem Interesse sind hier Informationen über die Über- und Unterschreitungen der Montagezeitfenster, da durch deren Anpassung seitens der Produktionsprogrammplanung die Durchlaufzeit bzw. die Kapitalbindungskosten maßgeblich beeinflusst werden können.

4 Umsetzung und Evaluation des Planungsansatzes für die robuste Ressourcenbelegungsplanung

Die Anwendung des entwickelten Planungsansatzes in der betrieblichen Praxis setzt seine informationstechnische Umsetzung, in diesem Fall als **Decision-Support-System (DSS)**, voraus. Die Software ist deswegen als Entscheidungsunterstützungssystem konzipiert, da der Entscheidungsträger wesentlichen Einfluss auf die Planung nehmen soll und demnach auch die notwendigen Informationen und Instrumente bereitgestellt werden müssen. Die entwickelte Software stellt im Sinne von „Advanced Planning“-Systemen (APS)²⁸⁶ ein Softwaremodul dar, welches die entsprechenden Planungsaufgaben der Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen durchführt (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die Integration des entwickelten Softwaremoduls „**Robust Resource Allocation Planning**“ (RoRAP) zur robusten Ressourcenbelegungsplanung in ein APS ist in Abbildung 18 dargestellt.

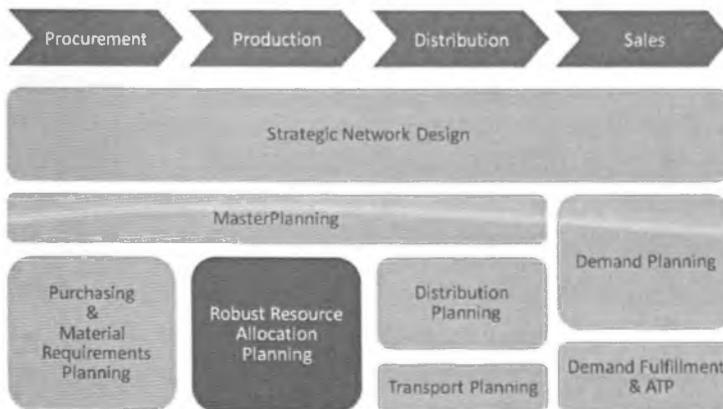


Abbildung 18: Integration des Softwaremoduls in ein APS²⁸⁷

Dieses Kapitel erläutert zunächst die informationstechnische Umsetzung und geht dabei auf die folgenden Aspekte der Implementierung ein: 3-Schicht-Architektur sowie komponentenbasierter Aufbau und Schnittstellen. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des

²⁸⁶ Vgl. Fleischmann und Meyr (2003), Stadler (2005) oder Meyr et al. (2008).

²⁸⁷ Darstellung in Anlehnung an Meyr et al. (2008): S. 109.

Simulationsmodell zur simulationsbasierten Festlegung der Kapazitätspuffer. Dieses Simulationsmodell bildet auch die Grundlage für die nachfolgende Evaluierung des Planungsansatzes anhand eines Anwendungsfalls aus der Luftfahrtindustrie.

4.1 Informationstechnische Umsetzung als Decision-Support-System

Im Allgemeinen werden DSS zur Entscheidungsunterstützung auf höheren Planungsebenen (strategische und taktische Ebene) eingesetzt, wohingegen hier ein DSS für operative Entscheidungen entwickelt wird. Grundsätzliche Aufgabe und Anforderung an diese Art von Software-System ist es,²⁸⁸

- den (gesamten) Entscheidungsprozess zu unterstützen,
- den Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen und nicht diese automatisiert zu treffen sowie
- die Fähigkeit, schnell auf neue Situationen und Bedürfnisse des Entscheidungsträgers reagieren zu können.

DSS basieren zumeist auf internen (bspw. aus dem OLTP-/ERP-System) und externen (bspw. aus Marktstudien) Datenquellen sowie analytischen Modellen und stellen unterschiedlichste Werkzeuge für die Daten- und Modellanalyse bereit. Je nach Ausrichtung des Systems wird zwischen „data-driven DSS“ und „model-driven DSS“ unterschieden.²⁸⁹ Erstere analysieren große Datenmengen und extrahieren die zur Entscheidungsunterstützung benötigten Informationen aus den Daten. Zur Analyse werden „online analytical processing – OLAP“-Systeme und „data mining“-Systeme eingesetzt. „Model-driven DSS“ basieren auf physikalischen, mathematischen oder verbalen Modellen, welche die Grundlage für Sensitivitätsanalysen („what if“-Analysen) darstellen, um unterschiedliche Datensituationen und Umweltentwicklungen analysieren zu können. Besondere Bedeutung kommt bei DSS der graphischen Benutzeroberfläche (GUI) zu, die insbesondere die Kriterien „usability“ (einfache, intuitive Bedienbarkeit) und „consistency“ (durchgängige Anordnung, Benennung

²⁸⁸ In Anlehnung an Sage (2001) und Power (2002): S. 6.

²⁸⁹ Vgl. Laudon und Laudon (2002): S. 404 ff und Power (2002). Neben den hier genannten Arten existieren weitere, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird (bspw. „knowledge-driven“ DSS).

zugeordnet, die diese unabhängig voneinander erfüllen, wobei jede Schicht nur mit der jeweils nächsten Schicht über eine Schnittstelle interagiert.

- Die oberste der Schichten, die *Präsentationsschicht* (engl. „presentation tier“), ist für die Präsentation der Daten (Output) und die Entgegennahme von Benutzereingaben (Input) und deren Weiterleitung an die Logikschicht verantwortlich. Sie stellt durch die „Visualization“-Komponente eine Schnittstelle zwischen System und Benutzer (Planer) zur Verfügung.
- Die *(Business-)Logikschicht* (engl. „logic tier“) steuert sämtliche Funktionen der Software und ist mit der Präsentationsschicht durch eine entsprechende Input-/Output-Schnittstelle gekoppelt. Die wichtigsten Bestandteile dieser Schicht sind die Komponenten „Optimization“, „Data Synchronization“, „Scenario Management“ und „Data Aggregation“ sowie die Schnittstellen zur Simulationssoftware bzw. zu den ERP- und MES-Systemen des Unternehmens. Zur Simulation ist die Standardsoftware „Tecnomatix Plant Simulation™“ angebunden, um Aufwand und Kosten für die Simulation möglichst gering zu halten.²⁹⁰
- Die *Datenhaltungsschicht* (engl. „data tier“) ist die unterste Schicht und für eine konsistente und persistente Speicherung der planungsrelevanten Daten verantwortlich. Zur Speicherung der Daten werden eine relationale Datenbank und ein entsprechendes Datenbankmanagementsystem (DBMS) eingesetzt. Hier kann beispielsweise auf MySQL®-Datenbanken zurückgegriffen werden, die sich durch eine einfache Anwendbarkeit, hohe Betriebssicherheit und gute Performance auszeichnen.²⁹¹

Grundsätzlich besteht durch die Schnittstellen zwischen den Schichten die Möglichkeit, jede der Schichten auf einem eigenen Hardware-System zu betreiben (verteiltes System), also bspw. die Datenhaltungsschicht auf einem zentralen Datenbank-Server, die Logikschicht auf Applikationsservern und die Präsentationsschicht auf dem Arbeitsplatzrechner des Planers.

²⁹⁰ Tecnomatix Plant Simulation™ ist ein Produkt aus dem Software-Portfolio für Product Lifecycle Management Software der Siemens Industry Software GmbH & Co. KG. Vorgängerversionen der Software sind SIMPLE++ bzw. eM-Plant.

²⁹¹ Für MySQL zeichnet sich seit Januar 2010 die Oracle Corporation verantwortlich, die MySQL sowohl proprietär als auch frei zugänglich („Open-Source“) unter der „General Public License“ vertreibt.

Da heutige Arbeitsplatzrechner häufig ungenutzte Rechenkapazität aufweisen, wird die Logikschicht immer häufiger auf diese verlagert, wodurch jedoch neue Anforderungen bzgl. Datenpersistenz und -integrität an die Datenhaltungsschicht entstehen. Da die Anzahl der „planenden“ Benutzer hier jedoch beschränkt ist, kann dieser Ansatz ohne Weiteres gewählt werden.

4.1.1.2 Komponenten und Schnittstellen

Die Komponente „**Data Aggregation**“ ist für den Import der Daten aus dem ERP-System und deren Aggregation verantwortlich (vgl. Abschnitt 2.3.1.4). Es werden zum einen die den Ressourcenbedarf bestimmenden Auftragsdaten und die zu Operationen aggregierten Arbeitsvorgangsdaten, zum anderen die das Ressourcenangebot definierenden Mitarbeiterdaten eingelesen und konsolidiert. Alle notwendigen Daten („Basic data“), bis auf die Rückmeldezeiten, werden über eine Schnittstelle vom „Enterprise Resource Planning“-System (ERP-System) täglich bereitgestellt. Die aggregierten Daten von Ressourcenbedarf und -angebot definieren zusammen ein Planungsszenario (*PSC*). In dem in Abbildung 20 dargestellten Ausschnitt aus dem (vereinfachten) UML-Klassendiagramm²⁹² von RoRAP stellen die in dunklem grau hinterlegten Klassen die wesentlichen Klassen und Attribute eines Planungsszenarios dar.²⁹³ Kern des Klassenmodells bildet die Klasse **PlanningScenario** mit der alle planungsrelevanten Objekte eines bestimmten Tags (*dataERP*) assoziiert sind.²⁹⁴ Anzumerken ist, dass für jeden Tag, zu dem ERP-Daten existieren, beliebig viele Planungsszenarien erstellt werden können, zum Beispiel mit unterschiedlichen Ressourcenangeboten oder Kapazitätspuffern. Assoziiert sind jeweils die Ressourcennachfrage (**Job, Operation**) und das Ressourcenangebot (**Station, CapacitySupply, Shift**). Die Klasse **ResourceAllocation** beinhaltet die Zuordnung von Operationen zu Schichten und den

²⁹² Ein Klassendiagramm ist ein Strukturdiagramm der UML zur grafischen Darstellung (Modellierung) von Klassen und Objekten. Auf eine vollständige detaillierte Beschreibung der Klassen und Attribute wird an dieser Stelle verzichtet, ggf. wird auf einzelne Besonderheiten eingegangen.

²⁹³ Neben den Datenattributen sind auch einige Planungsparameter dargestellt. Mit einem Unterstrich beginnende Attribute sind redundant, d.h. ihre Werte können aus anderen berechnet werden, sind hier jedoch zur Verdeutlichung dargestellt.

²⁹⁴ Zur Berechnung der Kennzahlen ist zudem die dargestellte Assoziation zum vorhergehenden, freigegebenen Ressourcenbelegungsplan notwendig.

eingelasteten Teil des Arbeitspakets (*allocatedHoursAP*) und definiert somit den Ressourcenbelegungsplan.

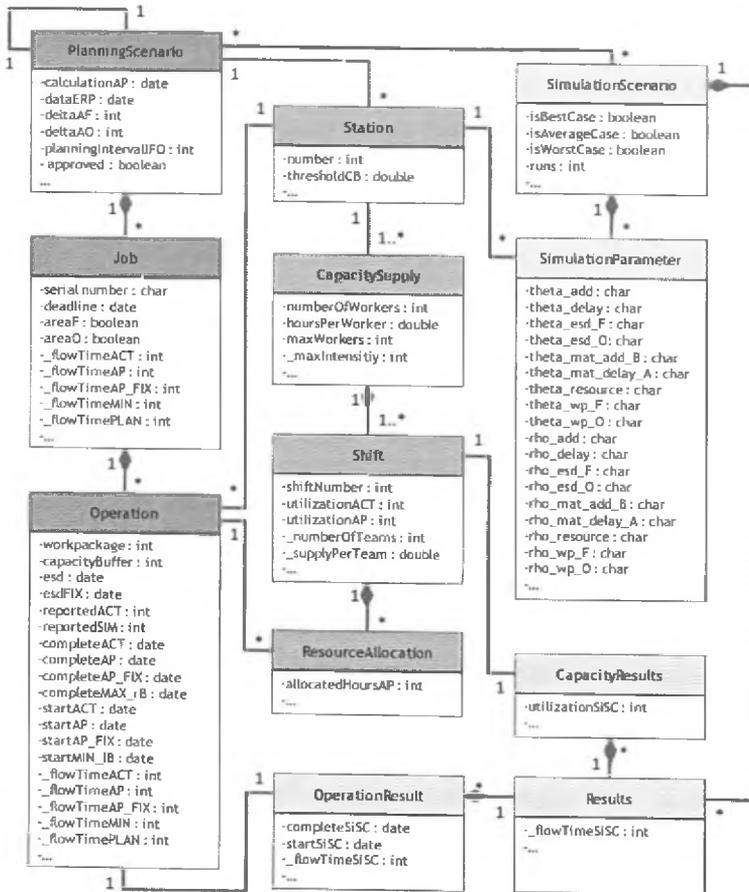


Abbildung 20: RoRAP – Klassenmodell (Ausschnitt)

Die Rückmeldungen bezüglich einzelner Arbeitsvorgänge werden über „eine Schnittstelle“ zum „Manufacturing Execution“-System (MES) erfasst, um so den Arbeitsfortschritt in Echtzeit erfassen zu können.

Die Komponente „**Data Synchronization**“ ist für den automatischen Abgleich des aktuell freigegebenen Szenarios mit dem neuesten Planungsszenario und den aktuellsten Rückmeldungen verantwortlich und informiert den Planer gegebenenfalls über planungsrelevante Änderungen, worauf dieser eine entsprechende Neuplanung durchführt (vgl. Abschnitt 3.1.2). Auch die Zuordnung von Aufträgen zu AREA-O und der Bereichsübergang von AREA-O nach AREA-F ist Bestandteil dieses Prozesses (vgl. Abbildung 14).

Die persistente Speicherung der Daten erfolgt durch eine objektrelationale Abbildung (engl. „object-relational mapping – ORM“) der Objekte in eine relationale Datenbank. Hierzu kann, zur Umsetzung der Schnittstelle, die Open-Source-Software Hibernate® als Persistenz- und ORM-Framework eingesetzt werden.²⁹⁵

Die Komponente „**Scenario Management**“ ist für die Umsetzung des Planungskonzeptes (vgl. Abschnitt 3.1.2) und der Planungsmethode verantwortlich (vgl. Abschnitt 3.2.2). Ihr obliegt die Verwaltung der Planungsszenarien, sie beinhaltet und koordiniert alle Funktionen (bspw. die Freigabe des aktuell gültigen Plans für die Montagedurchführung – „*Approve AP*“) zur Verwaltung von Planungsszenarien und Manipulation von Szenariodaten sowie insbesondere für die Durchführung der Simulationsanalyse eines Szenarios. Die Komponente stellt also die Werkzeuge zur simulationsbasierten Festlegung der Kapazitätspuffer und anderer Planungsparameter zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.2.2.3). Einen Ausschnitt der wichtigsten Funktionalitäten stellt Abbildung 21 durch ein Anwendungsfalldiagramm dar. Die dort dargestellten Funktionen zum Erstellen eines Szenarios („*Duplicate scenario*“) und Bearbeiten der Szenarioparameter („*Edit scenario parameters*“) sowie der entsprechenden Planungsdaten („*Edit job*“, „*Edit operation*“, „*Edit resources*“) stellen zusammen mit der Möglichkeit, ein Szenario mit bestimmten Parametern zu simulieren („*Edit simulation parameter*“, „*Simulate scenario*“), das Grundgerüst des Systems zur Entscheidungsunterstützung – zur Durchführung von „what if“-Analysen – dar. Hierzu muss auch die Möglichkeit gegeben sein, entsprechende Ressourcenbelegungspläne zu berechnen („*Reschedule AREA-O*“, „*Reschedule AREA-F & O*“). Außerdem können fiktive Aufträge, auf

²⁹⁵ Hibernate wurde ursprünglich für Java basierte Software entwickelt, ist mittlerweile jedoch auch für .NET basierte Software verfügbar. Hibernate wird führend von der Firma JBoss, die zum Red Hat Konzern gehört, entwickelt.

der Basis von Templates, zum Planungsszenario hinzugefügt werden („Add job“), etwa um die maximale Montagekapazität zu bestimmen.

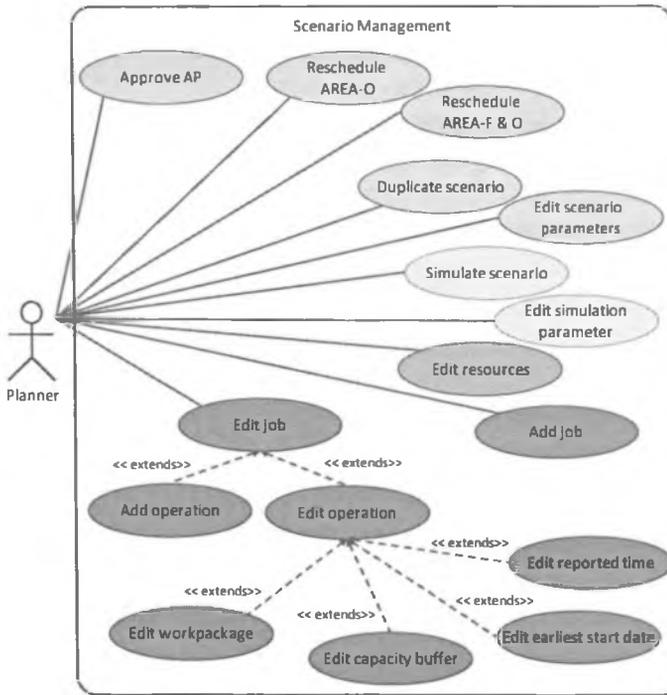


Abbildung 21: Funktionalitäten der Komponente „Scenario Management“ (Ausschnitt)

Die Schnittstelle zur Simulationssoftware versorgt diese mit den notwendigen Daten eines Planungsszenarios und der Simulationsszenarien, den Simulationsparametern für den Worst-, Average- und Best-Case (*SimulationScenario*, *SimulationParameter*). Die Simulationssoftware erhält hierzu direkten Zugriff auf die Datenbank und speichert auch die Ergebnisse der Simulationsanalysen (*Results*, *CapacityResults*, *OperationResults*) und die Kennzahlen direkt in die Datenbank (vgl. Abbildung 20). Die steuernden Parameter für die Simulation werden direkt an die Software übergeben.

Die Komponente „*Optimization*“ ist für die Berechnung des Ressourcenbelegungsplans durch das in Abschnitt 3.3.3 entwickelte Lösungsverfahren zuständig. Bei der Umsetzung ist insbesondere auf eine effiziente Implementierung und die Möglichkeit zur einfachen

Erweiterung durch andere Lösungsverfahren zu achten. Bezüglich Letzterem bietet sich eine Implementierung nach dem Software-Entwurfsmuster „Abstrakte Fabrik“ zur Abstraktion des Objekterzeugungsprozesses an.²⁹⁶

Die Input/Output-Schnittstelle entkoppelt die Präsentations- von der Logikschicht und ermöglicht so deren getrennte (Weiter-)Entwicklung und den Einsatz von dezidierten Applikationsservern, die bspw. explizit für mathematische Berechnungen ausgelegt sind.

Die entscheidende Komponente für eine erfolgreiche Umsetzung des Planungsansatzes als DSS ist die Komponente „**Visualization**“, welche die graphische Benutzeroberfläche beinhaltet und damit die Schnittstelle zum Benutzer (Planer) darstellt. Zur Darstellung kann zwischen der Gesamtansicht des Ressourcenbelegungsplans, der Ansicht für eine Montagestation und der Darstellung eines einzelnen Auftrags gewählt werden.²⁹⁷

In jeder der Ansichten lassen sich zudem Detailinformationen zum Planungsszenario, den einzelnen Aufträgen und ausgewählten Operation oder verschiedene Kennzahlen des Ressourcenbelegungsplans einblenden.

In der **Gesamtansicht** (vgl. Abbildung 22 – oben links) wird durch ein auftragsbezogenes Gantt-Diagramm die Zuordnung der Operationen zu Schichten dargestellt. Unterschieden wird bei der Darstellung eines Auftrags zwischen Schichten, in denen das Arbeitspaket eingeplant ist, Schichten, in denen Kapazitätspuffer eingeplant sind, und Schichten, in denen nicht an einer Operation gearbeitet wird, obwohl die Operation nicht fertiggestellt ist. Aktuelle Rückmeldezeiten werden durch einen Arbeitsfortschrittsbalken dargestellt und unterschiedliche Zoom-Stufen ermöglichen in jeder Ansicht den dargestellten Ausschnitt hinsichtlich des Detaillierungsgrads der Zeitleiste zu variieren.

Die **Auftragsansicht** (vgl. Abbildung 22 – Mitte) präsentiert die Daten eines Auftrags und seiner Operationen sowohl graphisch als auch tabellarisch.

²⁹⁶ Zu Entwurfsmuster (engl. „design pattern“) vergleiche Gamma et al. (2009) – das Standardwerk der „Gang of Four“ zu Software-Entwurfsmustern.

²⁹⁷ Die Abbildungen stellen keine Screenshots der Software dar, sondern entstammen der Design-Phase der Benutzeroberfläche.

In der **Stationssicht** (vgl. Abbildung 22 – unten rechts) werden nur die Operationen einer Montagestation dargestellt. Zusätzlich lassen sich Informationen über das Ressourcenangebot und dessen Auslastung einblenden.

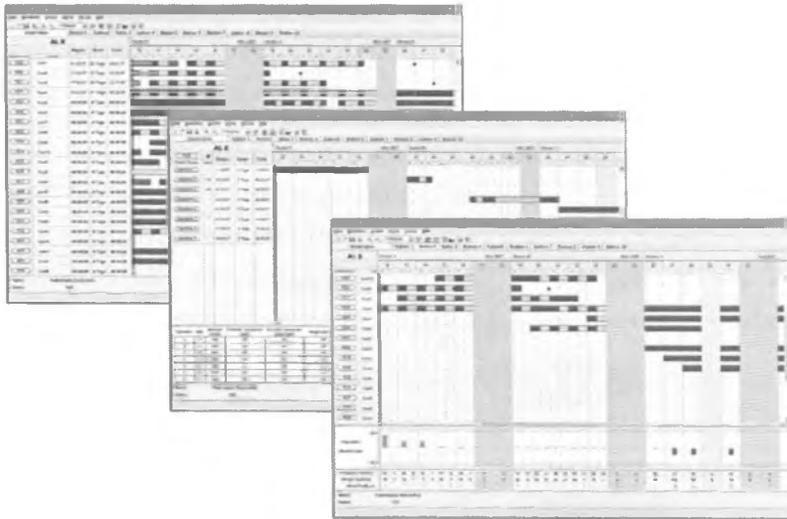


Abbildung 22: RoRAP – Benutzeroberfläche

Neben der Darstellung der Ressourcenbelegung müssen zur Durchführung der „what if“-Analysen effiziente Möglichkeiten zur Daten- und Parameteränderung, insbesondere zur Anpassung der Kapazitätspuffer, bereitgestellt werden. Hierzu sind so genannte „batch presetting“-Dialoge verfügbar, welche die simultane Änderung mehrerer Datensätze ermöglichen (vgl. Abbildung 23).

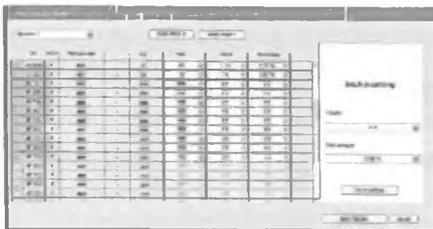


Abbildung 23: RoRAP – „batch presetting“-Dialog

Aufträge bzw. Operationen können einzeln oder über ihren Planungsbereich (AREA-F oder AREA-O) ausgewählt und deren Werte jeweils durch eine Änderungsvorgabe in Stunden, Werktagen, Tagen oder Prozent (je nach zu änderndem Attribut) manipuliert werden. Die neuen Werte können innerhalb dieser Dialoge auch individuell geändert werden.

4.1.2 Simulationsmodell

Das zur Durchführung der Simulationsanalyse und zur Evaluation des Planungsansatzes entwickelte Simulationsmodell ist grundsätzlich in eine den Simulationsablauf steuernde Komponente (Netzwerk),²⁹⁸ den „*ModelController*“²⁹⁹ und eine die Montage abbildende Komponente, das „*MainModel*“, unterteilt. Im Folgenden werden die wesentlichen Elemente beider Netzwerke beschrieben.

4.1.2.1 Steuerungsnetzwerk – „*ModelController*“

Die Komponente *ModelController* (vgl. Abbildung 24) ist in verschiedene Bereiche aufgeteilt. Im oberen Bereich sind alle Methoden, Tabellen und Schnittstellen für den Daten-Import und deren Aufbereitung angeordnet. Im mittleren Bereich wird links die Durchführung der Simulationsexperimente gesteuert, mittig ist unter anderem das Lösungsverfahren (IBRAD)³⁰⁰ für die Evaluation des Planungsansatzes und rechts davon Hilfsmethoden implementiert. Im unteren Bereich wird die Auswertung der gesamten Simulationsanalyse vorgenommen.

²⁹⁸ Tecnomatix Plant Simulation™ ist grundsätzlich objektorientiert aufgebaut und erlaubt so die Strukturierung und Hierarchisierung des Simulationsmodells und seiner Bestandteile (Objekte) sowie deren Wiederverwendung. Das Objekt „Netzwerk“ stellt eine Art Container für andere Objekte dar und kann jeweils ein Simulationsmodell umfassen. Netzwerke können als Objekte in anderen Netzwerken verwendet werden und so ein hierarchisches Modell erstellt werden. Die Software stellt verschiedene Standard-Objekte in Klassenbibliotheken zur Verfügung, bspw. „Methoden“, mit denen modellspezifische Funktionen mittels der Sprache „SimTalk“ programmiert werden können – vgl. Tecnomatix (2000). Die beiden Hauptkomponenten des Simulationsmodells, der „*ModelController*“ und das „*MainModel*“, sind jeweils als eigenes Netzwerk implementiert.

²⁹⁹ Kursive Bezeichnungen beziehen sich in diesem Abschnitt auf Objekte des Simulationsmodells.

³⁰⁰ Die Implementierung des Lösungsverfahrens innerhalb der Simulationssoftware dient lediglich der Evaluation des Planungsansatzes, grundsätzlich ist das Lösungsverfahren innerhalb des Softwaremoduls RoRAP umgesetzt.

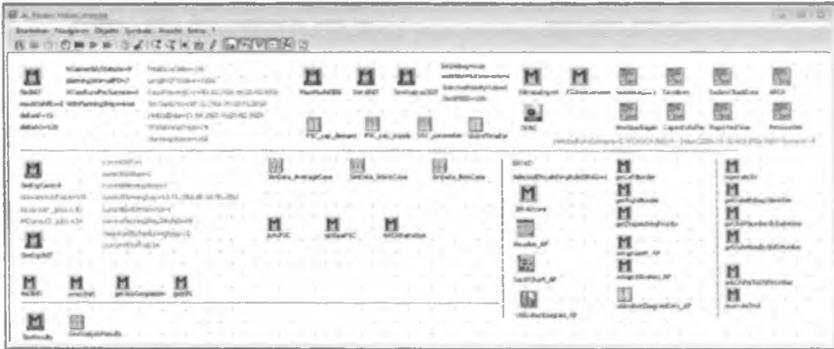


Abbildung 24: „ModellController“

Die Methode *SimINIT* initialisiert nach Übergabe der Simulationsparameter (bspw. zu simulierendes Planungsszenario) zunächst die Basis- und Hilfsvariablen und generiert das **MainModel** (*MainModelGEN*). Nach dem Import (*DataINIT*) der Planungs- und Simulations-szenariodaten (entweder über die Datei- oder Datenbankschnittstelle) wird die Simulationsanalyse initialisiert (*SimAnalysisINIT*). Hierzu werden ausgehend von den importierten Daten (*PSC_cap_demand*, *PSC_cap_supply*, *SiSC_parameter*) für jedes der drei Simulationsszenarien die Daten für die Experimente gesetzt (*SimData_AverageCase*, *SimData_WorstCase*, *SimData_BestCase*). In diesen Tabellen werden jeweils die Daten und Ergebnisse aller Simulationsläufe und Planungsschritte erfasst. Weiterhin sind in diesem Bereich die Funktionen zur Aktualisierung des Planungsszenarios vor Durchführung eines Planungsschritts zu finden (*syncPSC*, *updatePSC*) sowie die Methode, welche den Bereichsübergang durchführt (*AREATransition*). Die Methoden *SimExpINIT* und *SimExpControl* initialisieren und starten die Simulationsexperimente.

Zur Evaluation des Planungsansatzes sind zudem das Lösungsverfahren (*IBRADcore*) zur Berechnung des Ressourcenlegungsplans und verschiedene Hilfsmethoden (bspw. für die Berechnung der Einlastzeitfenster) implementiert. Zur Visualisierung des Ressourcenbelegungsplans (*Visualize_AP*) kann dieser mittels eines Gantt-Diagramms (*GanttChart_AP*) dargestellt (vgl. Abbildung 25) und die Ressourcenauslastung mittels einfacher Auslastungsdiagramme (*UtilizationDiagramm_AP*) analysiert werden.

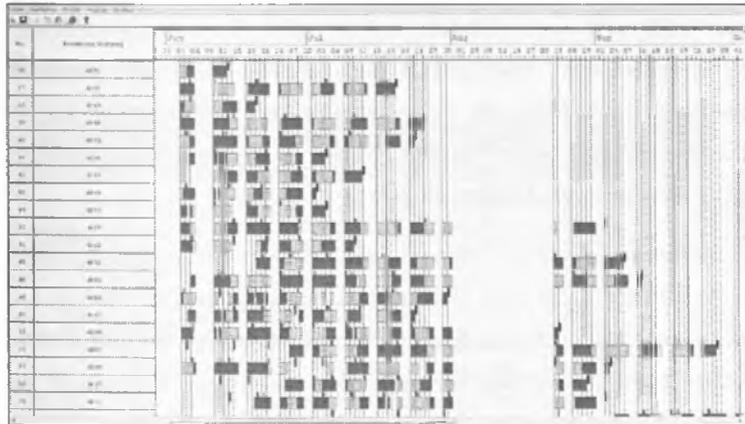


Abbildung 25: Auftragsorientiertes Gantt-Diagramm des Ressourcenbelegungsplans

4.1.2.2 Simulationsnetzwerk – „MainModel“

Die zweite Komponente **MainModel**, das eigentliche Simulationsmodell, wird je nach Anzahl der Montagestation flexibel als Netzwerk generiert (vgl. Abbildung 26). Hierzu werden aus der Klassenbibliothek zwei speziell entwickelte Objekte (Netzwerke) **AssemblyStation** und **AssemblyArea** jeweils in das übergeordnete Netzwerk (**MainModel** bzw. **AssemblyStation**) als Subnetzwerke eingesetzt und so eine hierarchische Struktur geschaffen.

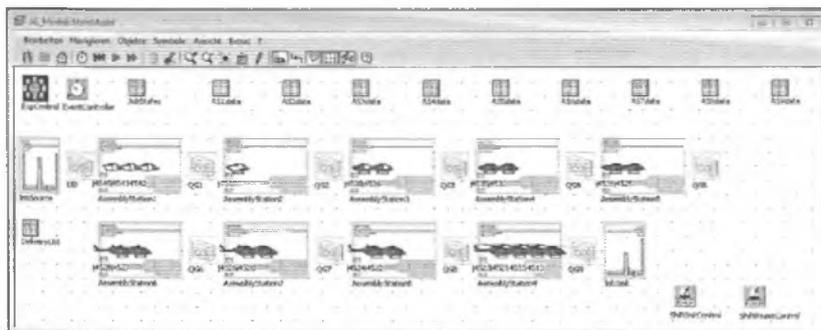


Abbildung 26: Simulationsmodell – „MainModel“ (Hauptnetzwerk)

Das Hauptnetzwerk beinhaltet die einzelnen Montagestationen, welche über Elemente zur Datenerfassung miteinander verbunden sind, Tabellen, welche die Daten bezüglich des

Ressourcenangebots beinhalten und zwei Bausteine, welche die Aufträge (Spezialmaschinen) in das Simulationsmodell ein- bzw. ausschleusen. Die Steuerung der einzelnen Simulationsexperimente ist Aufgabe des Experimentverwalters³⁰¹ (*ExpControl*), der in Kombination mit dem Ereignisverwalter³⁰² (*EventController*) die einzelnen Simulationsläufe durchführt und die Planungsschritte koordiniert.

Jede der Montagestationen in diesem Netzwerk ist als Subnetzwerk (***AssemblyStation***) modelliert (vgl. Abbildung 27). Auf jeder Montagestation entscheidet in der Realität der Stationsverantwortliche, welcher Auftrag bzw. welche Arbeitsvorgänge in einer Schicht bearbeitet werden. Diese Entscheidung wird im Modell durch den *PrioritySorter_AS* getroffen, der nach definierten Regeln die Aufträge den Montagebereichen (***AssemblyArea***) zuordnet. Da jede Montagestation danach bewertet wird, ob sie die jeweiligen Montageendtermine der Operationen – so, wie sie im Ressourcenbelegungsplan berechnet wurden – einhält, wird dem Entscheidungsträger hier unterstellt, dass er diejenigen Aufträge bzw. Operationen zuerst zuordnet, die den frühesten Operationsfertigstellungstermin besitzen. Diese Annahme wird auch für die Simulation getroffen und durch den *PrioritySorter_AS* abgebildet. Nach Bestimmung der Priorität werden entsprechend den Störungsparametern die verzögerten Ressourcenbedarfe auf Grund von A-Fehlteilen und dispositions- und betriebsmittelbedingten Störungen bzw. deren Auswirkungen bestimmt.³⁰³ Aufträge, deren Operationen durchgeführt werden können, werden dem *readyJobBuffer* übergeben, alle anderen dem *bypassJobBuffer*. Für die bearbeitbaren Operationen werden die entsprechenden B-Teile generiert, gemäß den Vorgaben mit der entsprechenden Qualität initialisiert und für die Montagebereiche bereitgestellt. Nach Beendigung einer Schicht werden die Operationen auf Fertigstellung hin überprüft (*checkCompletion*) und entweder an die nächste Station weitergeleitet oder für die Bearbeitung in der nächsten

³⁰¹ Der Experimentverwalter ist ein spezieller Baustein aus der Tools-Bibliothek von Tecnomatix Plant Simulation® zur Durchführung mehrerer Simulationsexperimente. Zudem stellt er die Möglichkeit zur Verfügung, die Simulation verteilt, also auf mehreren Systemen gleichzeitig, durchzuführen, um so die Gesamtdauer zur Durchführung der Simulationsexperimente zu verkürzen – vgl. Tecnomatix (2008).

³⁰² Tecnomatix Plant Simulation® basiert auf dem diskret-ereignisgesteuerten Simulationsansatz, bei dem einzelne Ereignisse schrittweise simuliert werden. Im Gegensatz dazu stehen kontinuierliche oder diskret-zeitgesteuerte Ansätze – vgl. Robinson (2004).

³⁰³ Zu den einzelnen Parametern für Störungen und Datenänderungen vgl. 3.2.2.3.

Schicht bereitgestellt. *WorkerPool* und *ForemanBroker* bilden die durch die Mitarbeiter einer Montagestation bereitgestellte Montagekapazität ab.

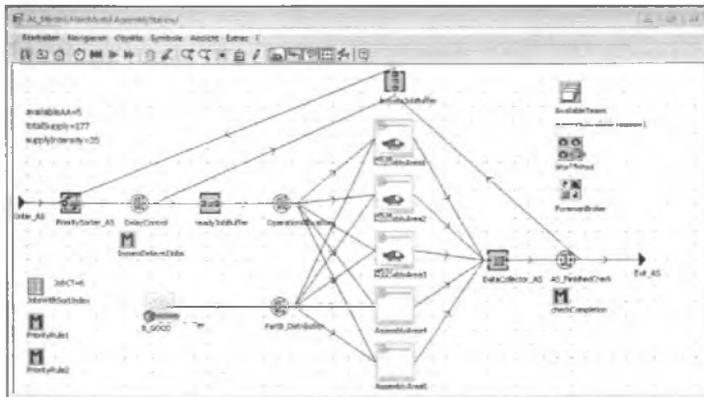


Abbildung 27: Simulationsmodell – „AssemblyStation“ (Subnetzwerk)

Jedes Subnetzwerk einer Montagestation beinhaltet wiederum Subnetzwerke für jeden verfügbaren Montagebereich (*AssemblyArea*), innerhalb dessen eine Maschine bearbeitet werden kann (vgl. Abbildung 28). Nach Eintritt eines Auftrags zu Beginn einer Schicht wird der Montageplatz (*AssemblyPlace*) entsprechend den Operationsdaten (z.B. Anteil des Arbeitspakets, welches in dieser Schicht abgearbeitet werden soll) eingerichtet (*setupAssemblyPlace*). Vor Beginn der Bearbeitung werden die benötigten B-Teile hinsichtlich ihrer Qualität überprüft (*QualityCheck_PartB*) und gegebenenfalls entsprechender zusätzlicher Kapazitätsbedarf erfasst. Während der Durchführung der Montage auf dem Montageplatz durch die vom *ForemanBroker* der Station dem entsprechenden Arbeitsplatz (*Workplace*) des Montagebereichs zugewiesenen Mitarbeiter können sowohl personalbedingt, als auch dispositions- und betriebsmittelbedingt Störungen auftreten, die sich in zusätzlichem Kapazitätsbedarf niederschlagen und von der Methode *getAssemblyData* erfasst werden.

Umsetzung und Evaluation

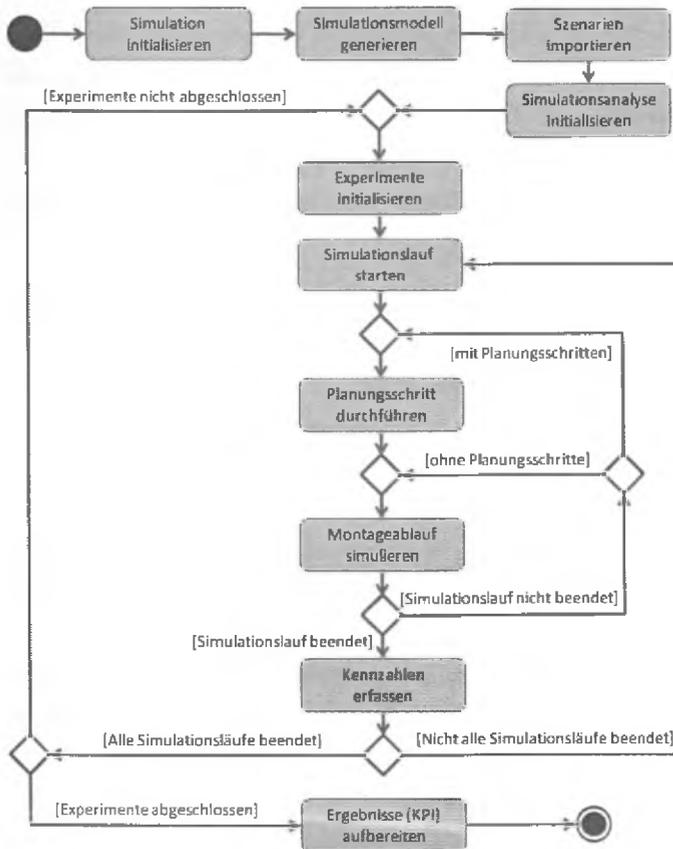


Abbildung 29: Allgemeiner Ablauf der Simulationsanalyse

Grundsätzlich kann die Analyse mit und ohne Berücksichtigung von Planungsschritten erfolgen. In ersterem Fall werden die auf Unsicherheit beruhenden Informationsänderungen berücksichtigt, in letzterem Falle nicht, sondern lediglich der „reine“ Montageablauf simuliert.

4.2 Evaluation des Planungsansatzes

Die Evaluation des entwickelten Planungsansatzes zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen erfolgt anhand einer realen

Montagelinie aus der Luftfahrtindustrie. Diese Montagelinie liefert die Datengrundlage³⁰⁴ für die nachfolgende Evaluierung des Planungskonzeptes bezüglich seiner Parameter, der Planungsmethode bezüglich der Kriterien Planungs-, Zulässigkeits- und Ergebnis-/Optimalitätsrobustheit bei unterschiedlich konfigurierten Kapazitätspuffern und des Lösungsverfahrens hinsichtlich der Lösungsqualität des berechneten Ressourcenbelegungsplans.

4.2.1 Anwendungsfall

Das betrachtete Unternehmen der Luftfahrtindustrie produziert kundenspezifisch ein technologisches Spitzenprodukt und ist in nahezu allen Segmenten des Marktes Weltmarktführer bezüglich der Anzahl an abgesetzten Maschinen. Das Unternehmen produziert unterschiedliche Produkttypen auf verschiedenen Montagelinien, wobei in der hier betrachteten Linie im Durchschnitt 82 Maschinen pro Jahr montiert werden. Diese Maschinen unterscheiden sich je nach Einsatz- und Aufgabengebiet in der Ausstattung bezüglich Flugkontroll-, Kommunikations-, Navigations-, Radar- und Missionssystemen.³⁰⁵ Bedingt durch die unterschiedlichen Konfigurationen variiert die Wertigkeit des Produkts zwischen drei und sechs Millionen Euro. Insbesondere die Missionssysteme, die vollständig in die Maschine integriert sind, sind für die hohe Produktkomplexität verantwortlich, die sich auch in der Anzahl der Teile (je nach Konfiguration in etwa zwischen 60.000 und 100.000 Teilen) ausdrückt. Zu berücksichtigen sind bei der Planung insbesondere die Leiteile, welche teilweise Vorlaufzeiten von bis zu zwei Jahren besitzen. Grundsätzlich stehen dem Kunden bei der Konfiguration des Produktes alle Möglichkeiten offen, so dass häufig auch Neukonstruktionen Teil eines Kundenauftrags sind. Neben den unterschiedlichen Kundenkonfigurationen trägt auch die technologische Weiterentwicklung zur Variantenvielfalt bei, so dass auch bei gleichen Kundenkonfigurationen unterschiedliche Produktvarianten entstehen. Die Variabilität des Produkts drückt sich besonders in den unterschiedlichen Arbeitspaketen der Operationen aus. Abbildung 30 stellt diese Variabilität der Arbeitspakete je Station (Operation) anhand von 140 zufällig ausgewählten Datensätzen

³⁰⁴ Sämtliche Daten des Unternehmens sind verfremdet und angepasst, so dass keine Rückschlüsse auf die tatsächlichen Werte gezogen werden können, die Ergebnisse jedoch nicht verfälscht werden.

³⁰⁵ Missionssysteme umfassen mehrere verschiedene Komponenten, welche für bestimmte Aufgaben in Kombination benötigt werden, bspw. für Rettungseinsätze.

in einem Box-Whisker-Plot dar. Besonders groß ist die Variabilität auf den ersten drei Montagestationen, auf denen die Grundausrüstung der Maschine je nach Kundenkonfiguration vorgenommen wird.

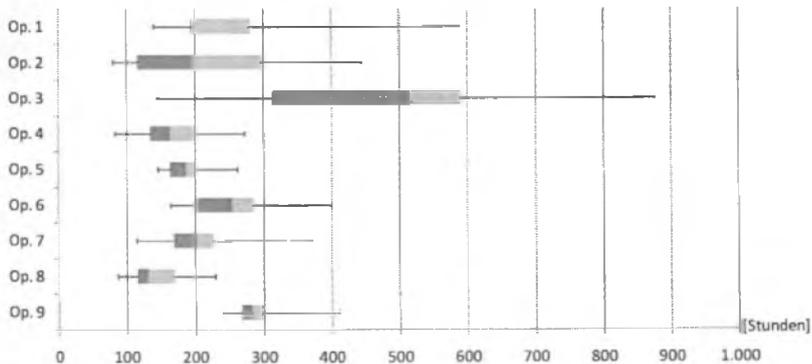


Abbildung 30: Variabilität der Arbeitspakete (Box-Whisker-Plot)

Der Montageprozess der betrachteten Endmontageeinheit ist dabei in neun Abschnitte (Operationen) untergliedert, die auf neun in einer Reihe angeordneten Montagestationen durchgeführt werden.

- Station 1: Montage der Basiseinheit und mechanische Ausstattung
- Station 2: Avionische Ausstattung
- Station 3: Elektronische Systeme
- Station 4: Systemintegration
- Station 5: Systemtests
- Station 6: Triebwerksmontage und Mechanische Endmontage
- Station 7: Elektronische Endmontage
- Station 8: Avionische Endmontage
- Station 9: Komplettierung, System-Feinabstimmung und abschließende Tests

Für jede dieser Tätigkeiten stehen auf den Montagestationen speziell aus- und fortgebildete Fachkräfte zur Verfügung. Speziell in der Luftfahrtindustrie ist die Produktqualität von großer Bedeutung und in Folge dessen auch die Qualifikation der Mitarbeiter, die durch ihre ausführenden Tätigkeiten maßgeblich für die Produktqualität verantwortlich sind.

Die verschiedenen Kundenkonfigurationen werden bereits in der übergeordneten Planungsebene berücksichtigt und spiegeln sich in unterschiedlichen Plandurchlaufzeiten der Aufträge wider. Die Plandurchlaufzeit der Aufträge variiert dabei zwischen 75 und 171 Tagen und beträgt im Durchschnitt 104,79 Tage. Diese Variabilität der Plandurchlaufzeiten liegt zum einen in den unterschiedlichen Kundenkonfigurationen und zum anderen in den Werksferien des Unternehmens begründet.

Die minimale, von der Arbeitsvorbereitung benötigte, Vorlaufzeit beträgt im Anwendungsfall zehn Werktage ($\Delta FOR = 10$). Hieraus werden die Planungsparameter Planabstand $D^{FO} = 5$ und für $\Delta AF = 15$ abgeleitet.³⁰⁶

4.2.2 Ergebnisse

Grundlage der Evaluation bilden die Auftragsdaten von 140 Aufträgen und das während des Montagezeitraums dieser Aufträge zur Verfügung stehende Ressourcenangebot. Weiterhin stehen die notwendigen Informationen zur Bestimmung der Informationsänderungs- und Störungsparameter für die drei Simulationsszenarien zur Verfügung. Untersuchungen zur Festlegung der Planreichweite durch den Parameter ΔAO haben eine totale Informationsrobustheit bei $\Delta AO = 120$ ergeben.

Von diesem Wert ausgehend erfolgt die Evaluation des Planungsansatzes anhand eines zufällig ausgewählten Ausgangsplanungsszenarios, welches den ersten Planungsschritt definiert. Ausgehend von diesem Planungszeitpunkt werden dann mit Hilfe des Simulationsmodells die nächsten 24 Planungsschritte simuliert und ausgewertet.³⁰⁷ Dabei haben Auswertungen ergeben, dass zehn Simulationsläufe zur Generierung valider

³⁰⁶ Zur Festlegung der Planungsparameter vergleiche Abschnitt 3.1.2.

³⁰⁷ Bei einem Planabstand von fünf Tagen entsprechen 24 Planungsschritte einem Zeitraum von 120 Tagen, wodurch die Simulationsanalyse alle Aufträge des Ausgangsplanungsszenarios bis zu deren Montagebeginn umfasst.

Ergebnisse ausreichen.³⁰⁸ Untersucht werden sechs unterschiedliche Pufferkonfigurationen, die in Tabelle 3 aufgelistet sind. Die aufsteigenden Puffer sollen der ansteigenden Unsicherheit bei größerer zeitlicher Entfernung vom Planungszeitpunkt Rechnung tragen.

Pufferkonfiguration	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4	ST-5	ST-6	ST-7	ST-8	ST-9
PK-0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
PK-5	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
PK-AUF-1	5 %	5 %	6 %	6 %	7 %	7 %	8 %	8 %	10 %
PK-10	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %
PK-AUF-2	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %	14 %	15 %
PK-15	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %

Tabelle 3: Pufferkonfigurationen

Simuliert werden jeweils die drei Szenarien Average-Case-, Worst-Case- und Best-Case-Szenario (AC, WC und BC), wobei der Parameter th_i^{cb} auf 75 % festgelegt wird.

Zur Beurteilung des Planungsansatzes werden die verschiedenen Pufferkonfigurationen anhand der Kennzahlen zur Beurteilung der Ergebnis- bzw. Optimalitätsrobustheit (vgl. Tabelle 4 bzw. Tabelle 5) sowie der Planungsrobustheit (vgl. Tabelle 6 bzw. Tabelle 7) gegenübergestellt.³⁰⁹ Die Anzahl der Überauslastungen (weniger als 0,32 %) bzw. der zu frühen Starttermine (0,44 %) sind so gering, dass deren detaillierte Darstellung uninteressant wäre. Zudem ist deren Einfluss auf die Zulässigkeitsrobustheit vernachlässigbar. Die Pufferkonfiguration PK-0 soll Aufschluss darüber geben, wie sich die, durch das Lösungsverfahren errechneten, späteren Starttermine auf die Termintreue auswirken, falls keine Kapazitätspuffer eingesetzt werden.

In der nachfolgenden Tabelle beziehen sich die Kennzahlen dabei grundsätzlich auf die 24 Planungsschritte, die je Simulationslauf durchgeführt werden.

³⁰⁸ Auf eine „Warm-up“-Periode kann hier gänzlich verzichtet werden, da der aktuelle Zustand der Montage in die Simulation eingelesen wird – vgl. Robinson (2004).

³⁰⁹ Einige der hier dargestellten Kennzahlen unterscheiden sich von denen in Abschnitt 3.2.2.2 hinsichtlich ihres Aggregationsgrads oder wurden für die Evaluation des Planungsansatzes zusätzlich erfasst.

Robuste Ressourcenbelegungsplanung

	PK-0			PK-5			PK-AUF-1		
	AC	WC	BC	AC	WC	BC	AC	WC	BC
<i>LATE(SiSC)</i>	4,38	10,23	1,13	1,13	3,13	0,50	0,75	1,38	0,63
<i>LATE(AP)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$ave\beta_j^{AP}$	80,56	80,48	80,37	85,81	86,06	85,87	87,31	87,54	87,28
$ave\beta_j^{MIN}$	37,93	37,93	37,93	39,83	39,83	39,83	40,3	40,3	40,3
<i>aveDiffFLTST</i>	-24,23	-24,31	-24,42	-18,98	-18,73	-18,92	-17,48	-17,25	-17,51
<i>aveDiffFLT^{OPT}</i>	42,63	42,55	42,44	45,98	46,23	46,04	47,01	47,24	46,98
<i>aveEAR(SiSC)</i>	5,12	4,44	5,29	5,12	4,58	5,45	5,03	4,67	5,52
<i>aveEAR(AP)</i>	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66

Tabelle 4: Kennzahlen – Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit (Teil 1)

	PK-10			PK-AUF-2			PK-15		
	AC	WC	BC	AC	WC	BC	AC	WC	BC
<i>LATE(SiSC)</i>	1,00	3,00	0,50	0,20	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>LATE(AP)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$ave\beta_j^{AP}$	89,65	90,08	89,64	90,94	91,42	90,87	94,03	94,47	94,26
$ave\beta_j^{MIN}$	41,25	41,25	41,25	41,62	41,62	41,62	42,65	42,65	42,65
<i>aveDiffFLTST</i>	-15,14	-14,71	-15,15	-13,85	-13,37	-13,92	-10,76	-10,32	-10,53
<i>aveDiffFLT^{OPT}</i>	48,40	48,83	48,39	49,32	49,80	49,25	51,38	51,82	51,61
<i>aveEAR(SiSC)</i>	5,08	4,51	5,47	5,38	4,72	5,47	5,22	4,75	5,37
<i>aveEAR(AP)</i>	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66

Tabelle 5: Kennzahlen – Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit (Teil 2)

Die Ergebnis- bzw. Optimalitätsrobustheit zeigt sich in den, bezogen auf die jeweilige Kennzahl, geringen Unterschieden zwischen den drei Szenarien. Die Zulässigkeitsrobustheit

ist zwar bezüglich des Ressourcenangebots und der Montagezeitfenster bei allen Pufferkonfigurationen gegeben, jedoch auf Grund der zu spät fertiggestellten Aufträge nur bei den Pufferkonfigurationen PK-15 als total bzw. bei PK-AUF-2 als relativ anzusehen. Die Kennzahlen zeigen, dass die Pufferkonfiguration PK-15 zwar die absolute Termintreue erreicht, jedoch auf Grund der hohen Festlegung der Kapazitätspuffer auch nur eine Reduzierung der Durchlaufzeit (im Vergleich zur Plandurchlaufzeit) von durchschnittlich 10,54 Tagen bzw. 10,06 % erreicht.³¹⁰ Pufferkonfiguration PK-AUF-2 erzielt bei vergleichbarer Termintreue jedoch eine Reduzierung der Durchlaufzeit um 13,71 Tage bzw. 13,09 %. Die höchste Reduzierung der Durchlaufzeit wird von der Konfiguration PK-0 erreicht (24,32 Tage bzw. 23,21 %), welche aber auch die mit Abstand schlechteste Termintreue aufweist. Eine Reduzierung der Durchlaufzeit ohne die Berücksichtigung der vorliegenden Informationsdynamik und Störungen durch Kapazitätspuffer ist demnach nicht zielführend.

Weiteres Entscheidungskriterium ist die Bewertung der Planungsrobustheit, welche in den Tabellen 6 und 7 zusammengefasst ist.

	PK-0			PK-5			PK-AUF-1		
	AC	WC	BC	AC	WC	BC	AC	WC	BC
Ø-Anzahl Neupl. (AREA-F)	23	23	23	6,50	16,75	0,00	1,88	8,38	0
<i>aveRES</i> ^{AREA-F}	9,2	9,26	9,23	3,80	7,32	0,00	1,47	4,63	0
<i>diffST</i> (AP_z, AP_{z+1})	150,5	189,38	121,82	32,61	88,21	0,00	8,66	41,11	0
<i>aveST</i> (AP_z, AP_{z+1})	27,06	29,31	24,43	19,88	25,50	0,00	18,27	24,07	0
<i>diffC</i> (AP_z, AP_{z+1})	103,84	138,38	79,1	23,35	59,55	0,00	6,58	28,05	0
<i>aveC</i> (AP_z, AP_{z+1})	28,54	30,77	25,95	23,01	28,19	0,00	23,34	31,50	0

³¹⁰ Betrachtet werden hier die Durchschnittswerte aller drei Simulationsszenarien.

Robuste Ressourcenbelegungsplanung

$notCOMP_s$	52,08	81,18	26,42	3,08	7,68	0,00	1,63	3,58	0
$aveNotCOMP_s$	32,09	35,07	0	73,46	46,42	0,00	135,42	68,61	0
Erfolgreiche Kompensationen	0	0	0	49,61	76,89	26,08	50,61	79,65	25,78

Tabelle 6: Kennzahlen – Planungsrobustheit (Teil 1)

	PK-10			PK-AUF-2			PK-15		
	AC	WC	BC	AC	WC	BC	AC	WC	BC
\emptyset -Anzahl Neupl. (AREA-F)	0,75	4,50	0,00	0,38	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$aveRES^{AREA-F}$	0,62	2,83	0,00	0,34	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00
$diffST$ (AP_z, AP_{z+1})	4,14	28,67	0,00	2,89	5,09	0,00	0,00	0,00	0,00
$aveST$ (AP_z, AP_{z+1})	4,28	18,00	0,00	1,28	6,18	0,00	0,00	0,00	0,00
$diffC$ (AP_z, AP_{z+1})	3,10	20,68	0,00	2,27	4,13	0,00	0,00	0,00	0,00
$aveC$ (AP_z, AP_{z+1})	6,34	20,33	0,00	1,97	8,58	0,00	0,00	0,00	0,00
$notCOMP_s$	1,13	7,19	0,00	0,50	1,08	0,00	0,00	0,00	0,00
$aveNotCOMP_s$	45,85	126,39	0,00	16,44	43,25	0,00	0,00	0,00	0,00
Erfolgreiche Kompensationen	50,99	79,24	24,85	50,90	80,26	25,51	51,64	80,47	24,83

Tabelle 7: Kennzahlen – Planungsrobustheit (Teil 2)

Bei diesen Kennzahlen zeigt sich, dass bei einer Planung ohne Kapazitätspuffer die Informationsdynamik dazu führt, dass bei jedem Planungsschritt beide Planungsbereiche neu geplant werden müssen. Die Änderungen der Start- und Endtermine, die durch diese Neuplanungen verursacht werden, sind signifikant und resultieren in einer großen

Planungsnerosität. Die notwendige Planungsstabilität kann nur durch die Kompensation der Änderungen durch die Kapazitätspuffer erreicht werden. Nur die Pufferkonfiguration PK-15 besitzt hierbei ein ausreichendes Volumen, um sämtliche Informationsänderungen in den Szenarien „Average-Case“, „Best-Case“ und „Worst-Case“ zu kompensieren. Wobei auch die Konfiguration PK-AUF-2 im Vergleich zu den anderen Pufferkonfigurationen eine hohe Planungsrobustheit aufweist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die endgültige Entscheidung über die Wahl einer geeigneten Pufferkonfiguration dem Entscheidungsträger übertragen werden muss, da nur dieser gemäß seiner Risikoeinstellung entscheiden kann. Die Konfiguration PK-AUF-2 besitzt zwar eine geringere Planungsrobustheit und auch ein gewisses Risiko für verspätete Aufträge, erzielt jedoch auch eine um 3,03 % kürzere Durchlaufzeit und damit eine höhere Reduzierung der Kapitalbindungskosten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der entwickelte Planungsansatz zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei einer geeigneten Konfiguration der Kapazitätspuffer (PK-15) sowie der Planungsparameter ΔIO (120 Tage) und th_s^{cb} (75 %) in der Lage ist, das Ziel der „absoluten Termintreue“ und eine Reduzierung der Durchlaufzeit um 10,06 % zu erreichen. Zudem können die notwendigen Anforderungen bezüglich der Robustheit, insbesondere eine hohe Planungsrobustheit und -stabilität, erreicht werden.

5 Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines **Planungsansatzes zur robusten Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen**. Ziel der Planung ist die Maximierung der **Kundenzufriedenheit** durch eine hundertprozentige Termineinhaltung der Fertigstellungstermine und die Minimierung der **Kapitalbindungskosten** durch möglichst kurze Durchlaufzeiten. Um diese Ziele zu erreichen, müssen bei der Ressourcenbelegungsplanung die bei der Montage von Spezialmaschinen vorliegende **Unsicherheit**, sowohl die **Informationsdynamik** als auch das erhöhte **Störungsrisiko**, berücksichtigt werden. Hierzu werden ein problemspezifisches **Planungskonzept**, eine robuste **Planungsmethode** und ein effizientes **Lösungsverfahren** entwickelt. Die informationstechnische Umsetzung des Planungsansatzes als **Decision-Support-System** stellt dem Entscheidungsträger die Informationen und Werkzeuge zur Verfügung, die er benötigt, um situationspezifisch Pläne erstellen zu können. Die Evaluation des Planungsansatzes zeigt, dass dieser die gestellten Anforderungen und Ziele erreicht.

In Folge der veränderten Wettbewerbssituation für produzierende Unternehmen hat im deutschen Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau eine Individualisierung und Segmentierung des Leistungsangebots stattgefunden. Die Unternehmen produzieren demnach hochkomplexe technologische Spitzenprodukte nach individueller Kundenspezifikation – so genannte Spezialmaschinen. Die Kundenspezifität wird hierbei vermehrt durch eine kundenindividuelle Montage von Komponenten und Teilen erreicht, welche global, bei unternehmensinternen und -externen Zulieferern, beschafft werden.³¹¹ Größeneffekte sind hierbei vornehmlich bei der Fertigung der Komponenten und Teile, und nicht bei der Montage, zu erzielen. Auf Grund der heterogenen Struktur der Aufträge bzw. Arbeitspakete wird die Montage zumeist in Form einer Reihenmontage durchgeführt, wobei alle Aufträge die Montagestationen sequentiell in identischer Reihenfolge durchlaufen. Die speziellen Eigenschaften des Produkts und die Gegebenheiten des Produktionssystems

³¹¹ Anzumerken sei an dieser Stelle, dass der deutsche Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau trotz einer globalen Beschaffungsstrategie (engl. „global sourcing“) keinesfalls Teil der „Basarökonomie“ ist, da hier der überwiegende Teil der Wertschöpfung während der Montage des Endprodukts erzielt wird.

definieren zusammen mit den übergeordneten bzw. vorgelagerten Planungsaufgaben das Anforderungsprofil für die operative Planung der Montagedurchführung.

Aktuelle Planungsansätze sehen zur operativen Produktionsplanung grundsätzlich mehrere Planungsebenen mit unterschiedlichen Planreichweiten und Detaillierungsgraden vor. In dieser Arbeit wird eine Integration der Planungsaufgaben der Termin-, Kapazitäts- und Feinplanung zur Ressourcenbelegungsplanung vorgenommen, die damit als Querschnittsfunktion eine zentrale Rolle innerhalb der Gesamtplanungsaufgabe eines Spezialmaschinenherstellers übernimmt. Vorteil dieser Integration sind ein geringerer Planungs- und Koordinationsaufwand. Mit dieser Integration ist eine Festlegung der konkreten Planungsinhalte und -vorgaben sowie der Planungsparameter „Planreichweite“ und „Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad“ verbunden. Grundsätzliche Planungsaufgabe, und damit Planungsinhalt, ist die Festlegung, zu welchem Zeitpunkt ein Montageauftrag durch eine bestimmte Montageressource bearbeitet wird. Die Montageaufträge definieren dabei zum einen den Ressourcenbedarf und zum anderen terminliche Restriktionen (früheste Starttermine und Fertigstellungstermine) und stellen zusammen mit dem vorgegebenen Ressourcenangebot die Planungsvorgaben dar. Die Planreichweite definiert sich durch die längste der – durch die Produktionsprogrammplanung festgelegten – Durchlaufzeiten der planungsrelevanten Aufträge, da nur so die Interdependenzen, welche zwischen den Aufträgen bzw. deren Operationen bestehen, bei der Planung vollständig berücksichtigt werden können. Da diese Durchlaufzeit eines Auftrags mehrere Monate betragen kann, wird zur Reduktion der Planungskomplexität eine Aggregation von Ressourcenbedarf und -angebot vorgenommen: Einzelne Arbeitsvorgänge werden je Montagestation zu Operationen mit Arbeitspaketen zusammengefasst, das Kapazitätsangebot der Mitarbeiter je Montagestation wird je Schicht aufsummiert und somit ein zeitvariables Ressourcenangebot je Schicht definiert. Mit dieser Aggregation wird gleichzeitig der Detaillierungsgrad der Planung festgelegt. Das Planungsproblem der Ressourcenbelegungsplanung kann somit als ein **Hybrid-Flow-Shop-Problem mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen** definiert werden.

Im Zuge der Globalisierung und dem Wandel der Marktbeziehungen haben sich auch die Zielsetzungen der Unternehmen verändert. Neben einer Produktion mit minimalen Kosten

hat sich die Befriedigung der zunehmend heterogenen Kundenbedürfnisse zur zentralen Zielsetzung der Unternehmen entwickelt. Für die Ressourcenbelegungsplanung folgt daraus das primäre Ziel, den Fertigstellungstermin (und damit den Kundenauslieferungstermin) unbedingt einzuhalten, also eine **absolute Termintreue** zu gewährleisten, um so die Kundenzufriedenheit zu maximieren und zugleich die Kosten durch verspätete Lieferung zu minimieren. Das größte Potential zur Kostensenkung bei der Montage von Spezialmaschinen liegt in der Reduzierung der Kapitalbindungskosten durch eine Minimierung der (WIP-) Bestände. Dieses Ziel kann vornehmlich durch eine Reduzierung der Montagedurchlaufzeiten erreicht werden. Da jedoch der Fertigstellungstermin vorgegeben ist, würde eine frühere Fertigstellung durch eine verkürzte Durchlaufzeit bei gleichem Montagebeginn zu einer Erhöhung des Bestands an Fertigerzeugnissen führen. Aus diesem Grund werden zur Reduzierung der Bestände möglichst späte Starttermine, also eine **Maximierung der Montagestarttermine**, als zweites zentrales Ziel der Ressourcenbelegungsplanung angestrebt.

Konsequenz dieser möglichst späten Starttermine ist eine Verstärkung des grundsätzlich bei jeder Art von Planung vorliegenden Problems der **Unsicherheit**. Jede durch **Informationsdynamik** und **Störungen** verursachte Verzögerung während der Montagedurchführung kann sich auf das primäre Ziel der Planung unmittelbar negativ auswirken. Aus diesem Grund gilt es, sowohl die Unsicherheit über die planungsrelevanten Informationen als auch Störungen bei der Ressourcenbelegungsplanung zu berücksichtigen, da in einem realistischen Produktionsumfeld nicht davon auszugehen ist, dass sämtliche Ursachen eliminiert werden können. Folge hiervon ist die Erweiterung der Ziele um das Ziel der **Robustheit**, also die Berechnung von robusten Ressourcenbelegungsplänen, welche die aus Informationsdynamik und Störungen resultierenden zusätzlichen und/oder verzögerten Kapazitätsbedarfe berücksichtigen. Konzepte und Methoden, die auf die Berechnung von robusten Plänen ausgerichtet sind, werden unter dem Begriff robuste Planung subsumiert, wobei die Robustheit grundsätzlich kein alleinstehendes Merkmal ist, sondern in enger Beziehung zu den Eigenschaften „Optimalität“, „Elastizität“, „Stabilität“, „Flexibilität“ und „Nervosität“ steht. Zur Beurteilung der Robustheit eines Plans lassen sich allgemein sechs Kriterien heranziehen: Informations-, Bewertungs-, Optimalitäts-, Ergebnis-, Zulässigkeits- und Planungsrobustheit. Für die Beurteilung von Ressourcenbelegungsplänen sind die drei

letzteren von vorrangiger Bedeutung. Grundsätzlich gilt es dabei zwischen den Zielen „Termintreue“, „späte Starttermine“ und „Robustheit“ abzuwägen, da beispielsweise „Robustheit“ und „späte Starttermine“ in Konflikt miteinander stehen.

Zur Bestimmung eines solchen robusten Ressourcenbelegungsplans wird ein Planungsansatz entwickelt, der

- ein **Konzept der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche**,
- eine **proaktive Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer** und
- ein **problemspezifisches Lösungsverfahren** (den „Backward Resource Allocation and Dispatching Algorithm“) zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans vorsieht.

Das Konzept umfasst zum einen die hierarchische Integration der Ressourcenbelegungsplanung in den Kontext der Gesamtplanungsaufgabe eines Spezialmaschinenherstellers und zum anderen den problemspezifischen Ablauf zur Durchführung der Planung. Auf Grundlage des Prinzips der rollierenden Planung werden zwei **Planungsbereiche** (AREA-F und AREA-O) definiert, die sich hinsichtlich der Planabstände und der zugeordneten Aufträge unterscheiden. Anzumerken ist hierbei, dass nicht nur einzelne Teile der Aufträge (Operationen) zugeordnet werden, sondern jeweils der gesamte Auftrag, da so die Interdependenzen zwischen den Operationen eines Auftrags erfasst werden können. AREA-F umfasst alle bereits begonnenen bzw. diejenigen Aufträge, deren Montagebeginn in naher Zukunft (ausgehend vom Planungszeitpunkt) liegt, und wird grundsätzlich nur in Ausnahmesituationen neu geplant. AREA-O umfasst alle Aufträge, deren Montagebeginn innerhalb eines bestimmten Zeithorizonts liegt, und wird im Gegensatz zu AREA-F periodisch mit einem festen Planabstand neu geplant, um so Informationsänderungen und neue Aufträge in den Ressourcenbelegungsplan zu integrieren. Bei der Neuordnung von Aufträgen zu AREA-F (**Bereichsübergang**) werden die aktuellen (späteren) Starttermine der Operationen fixiert und damit neue Materialabruffertermine festgelegt, die an interne und externe Zulieferer weitergegeben werden und so die für die Kapitalbindungskosten verantwortlichen Bestände (Lager- und Fertigungsbestand) reduziert werden können.

Die Methode zur Bestimmung eines robusten Ressourcenbelegungsplans sieht zur Berücksichtigung der Unsicherheit Sicherheitszuschläge auf das jeweilige Arbeitspaket der Operationen in Form von **Kapazitätspuffern** vor. Diese Kapazitätspuffer reservieren für jede Operation Montageressourcen, um so zusätzliche und verzögerte Kapazitätsbedarfe erfüllen zu können. Diese Redundanzstrategie führt zur Formulierung des Entscheidungsproblems als deterministisches Korrekturmodell (Ersatzwertmodell), einer anerkannten Methode zur indirekten Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Planung. Problem dieser proaktiven Methode ist die zielführende Festlegung der Kapazitätspuffer, so dass einerseits zwar Informationsänderungen und Störungen kompensiert werden können, andererseits diese nicht unnötigerweise eingeplant werden, da sonst Potentiale zur Bestandsreduzierung ungenutzt blieben. Dem Entscheidungsträger werden zur fundierten Festlegung der Kapazitätspuffer zum einen auf Vergangenheitswerten basierende Kennzahlen zur Verfügung gestellt, zum anderen die Möglichkeit gegeben, verschiedene **Pufferkonfigurationen** mittels einer **Simulationsanalyse** zu untersuchen. Durch diese Ex-Ante-Evaluation eines Ressourcenbelegungsplans lässt sich dieser, vor dessen Ausführung, bezüglich seiner Robustheit analysieren und die Kapazitätspuffer können gegebenenfalls angepasst werden.

Das Lösungsverfahren zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans basiert grundsätzlich auf dem Prinzip „Teile und Herrsche“. Der problemspezifisch entwickelte **„Iterative Backward Resource Allocation and Dispatching“**-Algorithmus belegt die Montageressourcen sequentiell von der letzten zur ersten Station. Die Belegung der Ressourcen einer Montagestation erfolgt ebenfalls rückwärts, also beginnend in der letzten planungsrelevanten Schicht, und lastet die Operationen gemäß ihrem Einlastzeitfenster entweder anhand einer Einlastverpflichtung oder dem Verhältnis von „slack“ und (Rest-)Arbeitspaket inklusive Kapazitätspuffer ein. Grundsätzlich wird dabei immer versucht, die Operationen mit möglichst hoher Intensität zu bearbeiten. Vorteil dieses relativ einfachen Verfahrens sind seine Nachvollziehbarkeit und seine Effizienz, die es erlaubt, auch große Probleminstanzen in kurzer Zeit zu lösen.³¹²

³¹² Bspw. können 1450 Operationen (145 Aufträgen mit je zehn Operationen) auf einem System mit einer Intel® Core™ 2 CPU (1.86GHz) und 3 GB RAM innerhalb von acht Sekunden zugeordnet werden.

Die informationstechnische Umsetzung des Planungsansatzes basiert auf den Prinzipien von Decision-Support-Systemen, da der Entscheidungsträger (Planer) durch die Festlegung der Kapazitätspuffer entscheidenden Einfluss auf die Planung hat. Zur Integration der Ressourcenbelegungsplanung in die Gesamtplanungsaufgabe des Unternehmens ist die Software als APS-Modul „**Robust Resource Allocation Planning**“ (RoRAP) konzipiert. Die 3-Schichten-Architektur, der komponentenorientierte Ansatz und die Schnittstellen ermöglichen durch die daraus resultierende einfache Anpassbarkeit einen flexiblen Einsatz des Software-Moduls. Auch die Simulation kann auf Grund der generischen Erstellung des Simulationsmodells auf unterschiedliche Montagelinien angewendet werden.

Die Evaluation des Planungsansatzes anhand der Daten eines Unternehmens aus der Luftfahrtindustrie hat gezeigt, dass dieser die geforderten Ziele und Anforderungen bei einer geeigneten Festlegung der Kapazitätspuffer erfüllt. Bei einem Sicherheitszuschlag von 15 % (Pufferkonfiguration PK-15) auf jedes Arbeitspaket kann eine Reduzierung der Durchlaufzeit um 10,54 Tage bzw. 10,06 %, bei gleichzeitig absoluter Termintreue erreicht werden. Nach Little's Gesetz³¹³ lässt sich aus der mittleren Durchlaufzeit und dem mittleren Durchsatz der durchschnittliche Bestand in der Montage abschätzen.³¹⁴ Bei einem internen Kalkulationszinssatz von 12,00 % führt dieser durchschnittliche Bestand unter Annahme eines Durchschnittspreises von vier Millionen Euro zu einer Reduzierung der jährlichen Kapitalbindungskosten dieser Montagelinie um ca. 1,14 Millionen Euro.³¹⁵ Die Abhängigkeit dieses Ergebnisses von der gewählten Pufferkonfiguration zeigt sich deutlich, wenn man diese Kostenreduzierung der Reduzierung bei Pufferkonfiguration PK-AUF-2 gegenüberstellt, die eine Einsparung von ca. 1,48 von Millionen Euro erreicht, bei fast absoluter Termintreue und annähernd gleicher Planungsrobustheit. Die endgültige Entscheidung über die Pufferkonfiguration liegt dabei beim Entscheidungsträger, der je nach Risikoeinstellung die höhere Termintreue oder die höhere Einsparung wählen kann.

³¹³ Zu Little's Gesetz vergleiche bspw. Arnold und Furmans (2009).

³¹⁴ Durchschnittlicher Bestand = mittlere Durchlaufzeit * mittlerer Durchsatz = 0,2871 Jahre * 82 Stück/Jahr = 23,54 Stück (Maschinen).

³¹⁵ Die hier vorgenommene Abschätzung der Kapitalbindungskosten dient vornehmlich der Verdeutlichung des Ziels der Verkürzung der Durchlaufzeit bzw. den Zusammenhang mit der Zielsetzung der Reduzierung der Kosten. Für eine genaue Berechnung wären detailliertere Informationen (bspw. eine Wertzuwachskurve) notwendig.

Diese konservativ abgeschätzte Reduzierung der Kapitalbindungskosten rechtfertigt auch ohne Zweifel die oftmals kritisierten hohen Aufwände und Kosten von Simulationsstudien.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich der in dieser Arbeit entwickelte Planungsansatz für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung bei der Reihenmontage von Spezialmaschinen eignet, jedoch sollen verschiedene Möglichkeiten und Potentiale zu dessen Weiterentwicklung nicht unerwähnt bleiben. Prinzipiell denkbar wäre eine Festlegung der Kapazitätspuffer durch eine übergeordnete (Meta-)Heuristik, welche auf Grundlage der Ergebnisse der Simulationsanalyse automatisierte Pufferanpassungen vornimmt. Problem hierbei sind die Interpretation der Ergebnisse und die Integration von Informationen, die nicht in Form von Daten vorliegen (bspw. besonders unsichere und störanfällige Aufträge auf Grund von Neukonstruktionen und technologischen Weiterentwicklungen). Weiterhin könnte die Übertragbarkeit des Planungsansatzes auf andere Produktionssysteme (bspw. bei einer Anordnung der Stationen nach dem Verrichtungsprinzip – Werkstattfertigung) untersucht werden, wobei zu beachten ist, dass sich gegebenenfalls auch das Planungsproblem ändert (bspw. bei Werkstattfertigung in ein Job-Shop-Problem), welches unter Umständen eine wesentlich höhere Komplexität aufweist und ein entsprechendes Lösungsverfahren erfordert. Ein weiterer Ansatzpunkt besteht in der Entwicklung eines Lösungsverfahrens, welches zu einer höheren Lösungsqualität führt. Zu beachten ist hierbei eine notwendigerweise kurze Rechenzeit, da iterativ Ressourcenbelegungspläne mit unterschiedlichen Kapazitätspuffern berechnet werden müssen.

VI. Literaturverzeichnis

- Adam, D. (1997): *Planung und Entscheidung. Modelle – Ziele – Methoden. Mit Fallstudien und Lösungen*. Wiesbaden: Gabler Verlag (Gabler-Lehrbuch).
- Adams, J.; Balas, E. und Zawack, D. (1988): *The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling*. In: *Management Science*, 34, 3, S. 391-401.
- Al-Fawzan, M. A. und Haouari, M. (2005): *A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling*. In: *International Journal of Production Economics*, 96, 2, S. 175-187.
- Arnold, D. und Furmans, K. (2009): *Materialfluss in Logistiksystemen. Mit 202 Abbildungen und 19 Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Axsäter, S. (1978): *Aggregation of Product Data*. In: *Operations Research Verfahren*, 35, S. 29-48.
- Axsäter, S. (1981): *Aggregation of Product Data for Hierarchical Production Planning*. In: *Operations Research*, 29, 4, S. 744-756.
- Aytug, H.; Lawley, M. A.; McKay, K. N.; Mohan, S. und Uzsoy, R. M. (2005): *Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions*. In: *European Journal of Operational Research*, 161, 1, S. 86-110.
- Bamberg, G. und Coenenberg, A. G. (2002): *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. München: Verlag Franz Vahlen (WiSo-Kurzlehrbücher: Reihe Betriebswirtschaft).
- Berry, P. M. (1993): *Uncertainty in scheduling: probability, problem reduction, abstractions and the user*. In: *IEE Colloquium on Advanced Software Technologies for Scheduling*, 7, S. 1-4.
- Bertsimas, D. und Thiele, A. (2006): *Robust and Data-Driven Optimization: Modern Decision-Making Under Uncertainty*. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology (MIT), URL: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2006/05/1391.pdf, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Beyer, H.-G. und Sendhoff, B. (2007): *Robust optimization – A comprehensive survey*. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196, 33-34, S. 3190-3218.

- Bitran, G. R.; Haas, E. A. und Hax, A. C. (1981): *Hierarchical Production Planning: A Single Stage System*. In: Operations Research, 29, 4, S. 717-743.
- Bitran, G. R. und Hax, A. C. (1982): *Hierarchical Production Planning: A Two-Stage System*. In: Operations Research, 30, 2, S. 232-251.
- Blazewicz, J.; Ecker, K. H.; Pesch, E.; Schmidt, G. und Weglarz, J. (2001): *Scheduling Computer and Manufacturing Processes. With 113 Figures and 20 Tables*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Blazewicz, J.; Ecker, K. H.; Pesch, E.; Schmidt, G. und Weglarz, J. (2007): *Handbook on Scheduling. From Theory to Applications. With 144 figures and 28 Tables*. Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag (International Handbook on Information Systems).
- Boer, R. de (1998): *Resource-constrained multi-project management: A hierarchical decision support system*. Dissertation. Enschede: Febodruk B.V.
- Brah, S. A. und Hunsucker, J. L. (1991): *Branch and bound algorithm for the flow shop with multiple processors*. In: European Journal of Operational Research, 51, 1, S. 88-99.
- Brecher, C. (2008): *Mut zur Produktion in Deutschland: Integrativ die Chancen nutzen. Innovationsbranche Maschinenbau – Gewinner der Globalisierung*. Dortmund, Veranstaltung vom 30.10.2008, Veranstalter: VDMA.
- Brucker, P. (2007): *Scheduling Algorithms. With 77 Figures and 32 Tables*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brucker, P.; Drexel, A.; Möhring, R.; Neumann, K. und Pesch, E. (1999): *Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods*. In: European Journal of Operational Research, 112, 1, S. 3-41.
- Byrne, M. D. und Bakir, M. A. (1999): *Production planning using hybrid simulation – analytical approach*. In: International Journal of Production Economics, 59, 1-3, S. 305-311.
- Byrne, M. D. und Hossain, M. M. (2005): *Production planning: An improved hybrid approach*. In: International Journal of Production Economics, 93-94, S. 225-226.
- Calhoun, K. M.; Deckro, R. F.; Moore, J. T.; Chrissis, J. W. und Hove, J. C. van (2002): *Planning and re-planning in project and production scheduling*. In: Omega, 30, 3, S. 155-170.

- Carravilla, M. A. und Sousa, J. P. de (1995): *Hierarchical production planning in a Make-To-Order company: A case study*. In: European Journal of Operational Research, 86, 1, S. 42-56.
- Chiang, W.-Y. und Fox, M. S. (1990): *Protection against uncertainty in a deterministic schedule*. In: Goslar, M. D. (Hg.): Proceedings of the Fourth International Conference. Expert Systems in Production and Operations Management. May 14-16, 1990, Hilton Head Island, South Carolina, S. 184-197.
- Christopher, M. (2005): *Logistics and Supply Chain Management. Creating Value-Adding Networks*. Harlow, London u.a.: Prentice Hall Financial Times.
- Church, L. K. und Uzsoy, R. M. (1992): *Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops*. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 5, 3, S. 153-163.
- Corsten, H. und Gössinger, R. (1998): *Produktionsplanung und -steuerung auf der Grundlage der opportunistischen Koordinierung*. In: Zeitschrift für Planung, 9, 4, S. 433-450.
- Curry, G. L. und Feldman, R. M. (2009): *Manufacturing Systems Modeling and Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Daniels, R. L. und Kouvelis, P. (1995): *Robust Scheduling to Hedge against Processing Time Uncertainty in Single-Stage Production*. In: Management Science, 41, 2, S. 363-376.
- Davenport, A. J. und Beck., C. J. (2000): *A Survey of Techniques for Scheduling with Uncertainty. Unpublished manuscript*. Enterprise Integration Laboratory, University of Toronto, URL: <http://tidel.mie.utoronto.ca/pubs/uncertainty-survey.ps.zip>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Davenport, A. J.; Gefflot, C. und Beck., C. J. (2001): *Slack-based Techniques for Robust Schedules*. In: Proceedings of the 6th European Conference on Planning (ECP-01), 12.-14. September 2001, Toledo, Spain, S. 7-18.
- Deblaere, F.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W. und Vonder, S. van de (2006): *Proactive resource allocation heuristics for robust project scheduling*. Department of Decision Sciences and Informations Management (KBI), Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven Working Paper, KBI 0608), URL: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=870228, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Dinkelbach, W. (1969): *Sensitivitätsanalysen und parametrische Programmierung*. Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag (Ökonometrie und Unternehmensforschung, 12).

- Domschke, W.; Scholl, A. und Voß, S. (1997): *Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Drexel, A.; Eversheim, W.; Grempe, R. und Esser, H. (1994a): *CIM im Werkzeugmaschinenbau – Der PRISMA-Montageleitstand*. In: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 46, 3, S. 279-295.
- Drexel, A.; Fleischmann, B.; Günther, H.-O.; Stadtler, H. und Tempelmeier, H. (1994b): *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme*. In: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 46, 12, S. 1022-1045.
- Drexel, A. und Kolisch, R. (2000): *Produktionsplanung bei Kundenauftragsfertigung*. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 70, 4, S. 433-452.
- Evers, K. (2002): *Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage*. Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau, URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh01/345691490.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Eversheim, W. (1992): *Störungsmanagement in der Montage: Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienfertigung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Feser, P.; Günther, H. O. und Schneeweiss, C. (1985): *Coordination of production schedules and distribution (A case study)*. In: Engineering Costs and Production Economics, 9, 1-3, S. 185-192.
- Finkler, M. (2006): *Advanced Planning and Scheduling – die stille ERP-Revolution*. In: PPS Management, 11, 3, S. 23-25.
- Fischer, D.; Fransoo, J. C. und Moscoso, P. G. (2008): *Human Planners, Planning Structures and the Planning Bullwhip*. URL: <http://ssrn.com/abstract=1499310>, letzte Aktualisierung: 02.12.2009, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Fleischmann, B. und Meyr, H. (2003): *Planning Hierarchy, Modeling and Advanced Planning Systems*. In: Kok, A. G. de; Graves, S. C. (Hg.): Supply Chain Management. Design, Coordination and Operation. Amsterdam: Elsevier (Handbooks in Operations Research and Management Science, 11), S. 457-523.
- Fleischmann, B. und Meyr, H. (2004): *Customer Orientation in Advanced Planning Systems*. In: Dyckhoff, H.; Lackes Richard; Reese, J. (Hg.): Supply Chain Management and Reverse Logistics. With 115 Figures and 34 Tables. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 297-321.

- Fleischmann, B.; Meyr, H. und Wagner, M. (2008): *Advanced Planning*. In: Stadler, H.; Kilger, C. (Hg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. With 173 Figures and 56 Tables*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 81-115.
- Flemming, V.; Majohr, M. F.; Rose, O.; Völker, M. und Kleinkow, E. (2006): *Simulationsbasierte Untersuchung alternativer Gruppenarbeitskonzepte in der Flugzeugmontage*. In: Wenzel, S. (Hg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2006, ASIM Tagungsband zur 12. Fachtagung, Kassel, 26. - 27. September 2006*. Erlangen: SCS Publishing House (ASIM-Mitteilung, 104), S. 193-203.
- Fowler, J. W.; Mönch, L. und Rose, O. (2006): *Scheduling and Simulation*. In: Herrmann, J. W. (Hg.): *Handbook of Production Scheduling*. New York: Springer Science+Business Media (International Series in Operations Research & Management Science, 89), S. 109-133.
- Fox, B. R. und Kempf, K. G. (1986): *Complexity, uncertainty and opportunistic scheduling*. In: Roach, J. (Hg.): *The Engineering of Knowledge-Based Systems. The Second Conference on Artificial Intelligence Applications*. Fontainebleau Hilton, Miami Beach, Florida, December 11-13, 1985. Washington, DC: IEEE Computer Society, S. 487-492.
- Fox, B. R. (1987): *The Implementation of Opportunistic Scheduling*. In: Hertzberger, L. O.; Groen, F. C. A. (Hg.): *Intelligent Autonomous Systems. An International Conference held in Amserdam, The Netherlands, 8 - 11 December, 1986*. Amsterdam, New York u.a.: North-Holland, S. 231-240.
- Franck, B.; Neumann, K. und Schwindt, C. (1997): *A capacity-oriented hierarchical approach to single-item and small-batch production planning using project-scheduling methods*. In: *OR Spectrum*, 19, 2, S. 77-85.
- Gal, T. (1979): *Postoptimal Analyses, Parametric Programming, and Related Topics*. New York, St. Louis u.a.: McGraw-Hill International.
- Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R. und Vlissides, J. (2009): *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Boston, San Francisco u.a.: Addison-Wesley (Addison-Wesley professional computing series).
- Gao, H. (1996): *Building Robust Schedules using Temporal Protection – An Empirical Study of Constraint Based Scheduling Under Machine Failure Uncertainty*. Enterprise

- Integration Laboratory, University of Toronto (Technical Report, TR-EIL-95-2), URL: <http://www.eil.utoronto.ca/scheduling/papers/gao-masc95.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Gebhard, M. (2009): *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit: Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Heinrich Kuhn*. Wiesbaden: Gabler Verlag (Gabler Edition Wissenschaft).
- Geselle, M. (1997): *Hierarchische Produktionsplanung bei Werkstattproduktion*. Glienicke: Galda und Wilch.
- Gfrerer, H. und Zäpfel, G. (1995): *Hierarchical model for production planning in the case of uncertain demand*. In: *European Journal of Operational Research*, 86, 1, S. 142-161.
- Ghosh, S. (1996): *Guaranteeing Fault Tolerance Through Scheduling in Real-Time Systems*. Dissertation. Pittsburgh, University of Pittsburgh, Faculty of Arts and Sciences, URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.45.2189&rep=rep1&type=pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Glover, F. W.; Kochenberger, G. A. (Hg.) (2003): *Handbook of Metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Graves, S. C. (2006): *Uncertainty and Production Planning*. Working Paper, URL: <http://web.mit.edu/sgraves/www/papers/Uncertainty%20and%20Production%20Planning%20Dec%202008.pdf>, letzte Aktualisierung: Dezember 2008, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Greve, J. (1970): *Störungen im Industriebetrieb: Eine klassifizierende Untersuchung der Störungen und Analyse des Störverhaltens betrieblicher Systeme unter Anwendung kybernetischer Betrachtungsweise*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- Günther, H.-O. (1986): *The Design of an Hierarchical Model for Production Planning and Scheduling*. In: Axsäter, S.; Schneeweiß, C. A.; Silver, E. A. (Hg.): *Multi-Stage Production Planning and Inventory Control*. Berlin, New York: Springer-Verlag (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 266), S. 227-260.
- Günther, H.-O. und Tempelmeier, H. (2007): *Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).

- Gupta, S. K. und Rosenhead, J. (1968): *Robustness in Sequential Investment Decisions*. In: *Management Science*, 15, 2, S. B18-B29.
- Gutenberg, E. (1983): *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Erster Band: Die Produktion*. Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft).
- Hall, N. und Posner, M. E. (2004): *Sensitivity Analysis for Scheduling Problems*. In: *Journal of Scheduling*, 7, 1, S. 49-83.
- Hans, E. W. (2001): *Resource Loading by Branch-and-Price Techniques*. Dissertation, Enschede, University of Twente, Beta Research School for Operations Management and Logistics, URL: <http://doc.utwente.nl/36552/1/t000001c.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Hans, E. W.; Herroelen, W.; Leus, R. und Wullink, G. (2007): *A hierarchical approach to multi-project planning under uncertainty*. In: *Omega*, 35, 5, S. 563-577.
- Haupt, R. (1989): *A survey of priority rule-based scheduling*. In: *OR Spectrum*, 11, 1, S. 3-16.
- Hax, A. C. und Meal, H. C. (1973): *Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling*. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Sloan working papers, 656-73), URL: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/1868/SWP-0656-14561389.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Herroelen, W. und Leus, R. (2004a): *Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures*. In: *International Journal of Production Research*, 42, 8, S. 1599-1620.
- Herroelen, W. und Leus, R. (2004b): *The construction of stable project baseline schedules*. In: *European Journal of Operational Research*, 156, 3, S. 550-565.
- Herroelen, W. und Leus, R. (2005): *Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials*. In: *European Journal of Operational Research*, 165, 2, S. 289-306.
- Hoekstra, S. und Romme, J. (1992): *Integral Logistic Structures. Developing Customer-oriented Goods Flow*. London, New York: McGraw-Hill.
- Hoogeveen, J. A.; Lenstra, J. K. und Veltman, B. (1996): *Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard*. In: *European Journal of Operational Research*, 89, 1, S. 172-175.

- Inderfurth, K. (1982): *Starre und flexible Investitionsplanung: Eine Untersuchung starrer und flexibler Planungsverfahren bei sequentieller Investitionsprogrammplanung bei Unsicherheit*. Wiesbaden: Gabler Verlag (Beiträge zur betriebswirtschaftlichen Forschung, 54).
- Inderfurth, K. (1998): *Beschaffungskonzepte*. In: Isermann, H. (Hg.): *Logistik. Gestaltung von Logistiksystemen*. Landsberg am Lech: Moderne Industrie, S. 197-211.
- Inderfurth, K. und Jensen, T. (1997): *Planungsnervosität im Rahmen der Produktionsplanung*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 67, 2, S. 817-843.
- Jacob, H. (1974a): *Unsicherheit und Flexibilität – Zur Theorie der Planung bei Unsicherheit: Dritter Teil*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 44, 7/8, S. 505-526.
- Jacob, H. (1974b): *Unsicherheit und Flexibilität – Zur Theorie der Planung bei Unsicherheit: Erster Teil*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 44, 5, S. 299-326.
- Jacob, H. (1974c): *Unsicherheit und Flexibilität – Zur Theorie der Planung bei Unsicherheit: Zweiter Teil*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 44, 6, S. 403-448.
- Jensen, M. T. (2001): *Robust and Flexible Scheduling with Evolutionary Computation*. Dissertation, University of Aarhus, BRICS, Department of Computer Science, URL: <http://www.brics.dk/DS/01/10/BRICS-DS-01-10.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Kis, T. (2005): *A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities*. In: *Mathematical Programming*, 103, 3, S. 515-539.
- Kistner, K.-P. und Steven, M. (1990): *Produktionsplanung. Mit 71 Abbildungen und 33 Tabellen*. Heidelberg: Physica-Verlag (Physica-Lehrbuch).
- Klein, R. und Scholl, A. (2004): *Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. München: Verlag Franz Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Kleindienst, E. (2004): *Aggregation und Allokation in der hierarchischen Produktionsplanung. Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Christoph Schneeweiß*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Gabler Edition Wissenschaft: Produktion und Logistik).
- Kok, T. G. de und Inderfurth, K. (1997): *Nervousness in inventory management: Comparison of basic control rules*. In: *European Journal of Operational Research*, 103, 1, S. 55-82.

- Kolisch, R. (2001): *Make-to-Order Assembly Management. With 49 Figures and 44 Tables.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kolisnyk, O. (2006): *Maschinenbelegungsplanung bei alternativen Arbeitsplänen: Lösungsverfahren für die Belegungsplanung bei flexibler Werkstattfertigung.* Regensburg: Roderer-Verlag (Theorie und Forschung: Wirtschaftswissenschaften, 856/65).
- Kouvelis, P.; Daniels, R. L. und Vairaktarakis, G. (2000): *Robust scheduling of a two-machine flow shop with uncertain processing times.* In: IIE Transactions, 32, 5, S. 421-432.
- Kouvelis, P. und Yu, G. (1997): *Robust Discrete Optimization and Its Applications.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers (Nonconvex Optimization and Its Applications, 14).
- Kuhn, A. und Wenzel, S. (2008): *Simulation logistischer Systeme.* In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hg.): *Handbuch Logistik.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 73-94.
- Kurbel, K. (2005): *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management.* München: Oldenbourg Verlag.
- Lambrechts, O.; Demeulemeester, E. und Herroelen, W. (2008): *Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities.* In: *Journal of Scheduling*, 11, 2, S. 121-136.
- Landeghem, H. van und Vanmaele, H. (2002): *Robust planning: a new paradigm for demand chain planning.* In: *Journal of Operations Management*, 20, 6, S. 769-783.
- Laudon, K. C. und Laudon, J. P. (2002): *Management Information Systems. Managing the Digital Firm.* New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- Laux, H. (2005): *Entscheidungstheorie. Mit 95 Abbildungen.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Leachman, R. C.; Dincerler, A. und Kim, S. (1990): *Resource-constrained scheduling of projects with variable-intensity activities.* In: IIE Transactions, 22, 1, S. 31-40.
- Lehmann, F. (1992): *Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage: Ein Beitrag zur EDV-gestützten Montagesteuerung.* Aachen: Shaker Verlag.
- Leon, V. J.; Wu, S. D. und Storer, R. H. (1994): *Robustness measures and robust scheduling for job shops.* In: IIE Transactions, 26, 5, S. 32-43.

- Leus, R. (2003): *The generation of stable project plans: Complexity and exact algorithms*. Dissertation. Leuven, Belgien, Katholieke Universiteit Leuven, Department of applied economics, URL: <http://www.econ.kuleuven.be/public/ndbac96/phd%20Roel%20Leus.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Li, H.; Li, Z.; Li, L. X. und Hu, B. (2000): *A production rescheduling expert simulation system*. In: European Journal of Operational Research, 124, 2, S. 283-293.
- Lödging, H. (2008): *Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Mit einem Geleitwort von Hans-Peter Wiendahl*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag .
- MacCarthy, B. L. und Wilson John R. (2001): *Human Performance in Planning and Scheduling*. London, New York: Taylor & Francis .
- McKay, K. N. und Wiers, V. C. (2004): *Practical Production Control: A Survival Guide for Planners and Schedulers*. Boca Raton, Florida: J. Ross.
- Meal, H. C. (1984): *Putting production decisions where they belong*. In: Harvard Business Review, 62, 2, S. 102-111.
- Mehta, S. V. und Uzsoy, R. M. (1998): *Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns*. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, 14, 3, S. 365-378.
- Melzer-Ridinger, R. (2008): *Materialwirtschaft und Einkauf. Beschaffungsmanagement*. München: Oldenbourg-Verlag.
- Meyr, H. (2003): *Die Bedeutung von Entkopplungspunkten für die operative Planung von Supply Chains*. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 73, 9, S. 941-962.
- Meyr, H.; Wagner, M. und Rohde, J. (2008): *Structure of Advanced Planning Systems*. In: Stadler, H.; Kilger, C. (Hg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. With 173 Figures and 56 Tables*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 109-115.
- Mula, J.; Poler, R.; Garcia-Sabater, J. P. und Lario, F. C. (2006): *Models for production planning under uncertainty: A review*. In: International Journal of Production Economics, 103, 1, S. 271-285.
- Mulvey, J.; Vanderbei, R. und Zenios, S. (1995): *Robust Optimization of Large-Scale Systems*. In: Operations Research, 43, 2, S. 264-281.

- Neuhaus, U. (2008): *Reaktive Planung in der chemischen Industrie. Verfahren zur operativen Plananpassung für Mehrzweckanlagen. Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Hans-Otto Günther*. Wiesbaden: Gabler Verlag (Gabler Edition Wissenschaft: Produktion und Logistik).
- Neumann, K. und Schwindt, C. (1998): *A Capacitated Hierarchical Approach to Make-to-Order Production*. In: *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 32, 4, S. 397-413.
- Neumann, K.; Schwindt, C. und Zimmermann, J. (2002): *Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources: Temporal and Resource-Constrained Project Scheduling with Regular and Nonregular Objective Functions*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 508).
- Neureuther, B. D.; Polak, G. G. und Sanders, N. R. (2004): *A hierarchical production plan for a make-to-order steel fabrication plant*. In: *Production Planning and Control*, 15, 3, S. 324-335.
- Nikulin, Y. (2006): *Robustness in Combinatorial Optimization and Scheduling Theory: An Extended Annotated Bibliography*. Working Paper, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, 606), URL: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2004/11/995.pdf, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Oestereich, B. und Bremer, S. (2009): *Analyse und Design mit UML 2.3: Objektorientierte Softwareentwicklung*. München: Oldenbourg Verlag.
- Patig, S. und Thorbauer, S. (2002): *Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion: Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten*. In: *Wirtschaftsinformatik*, 44, 4, S. 355-366.
- Pfohl, H.-C. (2004): *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pinedo, M. L. (2008): *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. New York: Springer Science+Business Media.
- Pinedo, M. L. (2009): *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Dordrecht, Heidelberg u.a.: Springer Science+Business Media.
- Power, D. J. (2002): *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. Westport: Quorum Books.

- Quadt, D. und Kuhn, H. (2007): *A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures*. In: European Journal of Operational Research, 178, 3, S. 686-698.
- Rabe, M.; Spieckermann, S. und Wenzel, S. (2008): *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- REFA (1978): *Methodenlehre der Planung und Steuerung: Teil 3: Steuerung*. München: Carl Hanser-Verlag.
- Reuter, B. und Rohde, J. (2008): *Coordination and Integration*. In: Stadler, H.; Kilger, C. (Hg.): Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. With 173 Figures and 56 Tables. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 247-261.
- Rhode, J.; Meyr, H. und Wagner, M. (2000): *Die Supply Chain Planning Matrix*. In: PPS Management, 5, 1, S. 10-15.
- Robinson, S. (2004): *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester, Hoboken: John Wiley & Sons.
- Rommelfanger, H. (1994): *Fuzzy-Decision-Support-Systeme. Entscheiden bei Unschärfe*. Berlin: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Ruiz, R. und Vázquez-Rodríguez, J. A. (2010): *The hybrid flow shop scheduling problem*. In: European Journal of Operational Research, 205, 1, S. 1-18.
- Russell, R. A. und Urban, T. L. (1993): *Horizon extension for rolling production schedules: Length and accuracy requirements*. In: International Journal of Production Economics, 29, 1, S. 111-122.
- Sabuncuoglu, I. und Baylç, M. (2000): *Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment*. In: European Journal of Operational Research, 126, 3, S. 567-586.
- Sage, A. P. (2001): *Decision Support Systems*. In: Salvendy, G. (Hg.): Handbook of Industrial Engineering. Technology and Operations Management. New York, Chichester u.a.: John Wiley & Sons, S. 110-154.
- Schlüchtermann, J. (1996): *Planung in zeitlich offenen Entscheidungsfeldern*. Wiesbaden: Gabler Verlag (Neue Betriebswirtschaftliche Forschung, 184).
- Schmidt, T.; Rose, O.; Völker, M.; Carl, S.; Noack, D.; Angelidis, E. und Papert, F. (2009): *Heuristik zur Steuerung komplexer Montagesysteme mit flexibler*

- Ressourcenzuteilung und -leistung und begrenzter Ressourcenkapazität.*
Schlussbericht des aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto-von-Guericke“ e.V. im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. geförderten Vorhaben (AiF-Nr. 15522 BR). Fakultät Maschinenwesen und Fakultät Informatik, Technische Universität Dresden, URL: http://logistics.de/downloads/42/9d/i_file_46043/15522_Montagesteuerung_Schlussbericht.pdf, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Schneeweiß, C. (1988): *Zur Bewältigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung.* In: Lücke, W. (Hg.): Betriebswirtschaftliche Steuerungs- und Kontrollprobleme. Wissenschaftliche Tagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V. an der Universität Göttingen 1987. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 285-302.
- Schneeweiß, C. (1991): *Planung 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Mit 97 Abbildungen.* Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Schneeweiß, C. (1992): *Planung 2: Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Schneeweiß, C. (2002): *Einführung in die Produktionswirtschaft. Mit 114 Abbildungen und 9 Tabellen.* Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Schneeweiß, C. (2003): *Distributed decision making — a unified approach.* In: European Journal of Operational Research, 150, 2, S. 237-252.
- Schneeweiß, C. und Kühn, M. (1990): *Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe, Flexibilität, Elastizität und Robustheit.* In: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 43, 5, S. 378-395.
- Schneider, H. M.; Buzacott, J. A. und Rücker, T. (2005): *Operative Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen.* München: Oldenbourg Verlag (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).
- Scholl, A. (2001): *Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen – Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen. Mit 21 Abbildungen und 105 Tabellen.* Heidelberg: Physica-Verlag .

- Scholl, A.; Klein, R. und Häselbarth, L. (2004): *Planung im Spannungsfeld zwischen Informationsdynamik und zeitlichen Interdependenzen*. In: WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 33, 3, S. 153-160.
- Schuh, G. (2007): *Effizient, schnell und erfolgreich: Strategien im Maschinen- und Anlagenbau*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag (Betriebswirtschaft).
- Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.; Welter, T. und Hille, P. (2008): *Dezentrale Montagesteuerung im variantenreichen Maschinen- und Anlagenbau*. In: wt Werkstattstechnik online, 98, 5, S. 391-396.
- Schwartz, F. und Voß, S. (2004): *Störungsmanagement in der Produktion: Simulationsstudien für ein hybrides Fließfertigungssystem*. In: Zeitschrift für Planung und Unternehmenssteuerung, 15, S. 427-447.
- Schwartz, F. und Voß, S. (2005): *Management of disruptions in production systems using simulation*. In: Pacific Journal of Optimization, 1, 3, S. 579-597.
- Schwindt, C. (2005): *Resource Allocation in Project Management. With 13 Figures and 12 Tables*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (GOR Publications).
- Selcuk, B.; Adan, I.; Kok, T. G. de und Fransoo, J. C. (2009): *An explicit analysis of the lead time syndrome: stability condition and performance evaluation*. In: International Journal of Production Research, 47, 9, S. 2507-2529.
- Selcuk, B.; Fransoo, J. C. und Kok, A. G. de (2006): *The effect of updating lead times on the performance of hierarchical planning systems*. In: International Journal of Production Economics, 104, 2, S. 427-440.
- Shanthikumar, J. G. und Sargent, R. G. (1983): *A Unifying View of Hybrid Simulation/Analytic Models and Modelling*. In: Operations Research, 31, 6, S. 1030-1052.
- Silver, E. A.; Pyke, D. F. und Peterson, R. (1998): *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Heinzel, H. und Voß, S. (2000): *Simulation-based Optimization in the Automotive Industry – A Case Study on Body Shop Design*. In: Simulation, 75, 5, S. 276-286.
- Stadtler, H. (2005): *Supply chain management and advanced planning – basics, overview and challenges*. In: European Journal of Operational Research, 163, 3, S. 575-588.

- Stadtler, H. (2008): *Supply Chain Management – An Overview*. In: Stadtler, H.; Kilger, C. (Hg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. With 173 Figures and 56 Tables*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 9-36.
- Steinhauer, D. (2008): *Planung komplexer Montageabläufe mit Hilfe der constraint-basierten Simulation*. In: Rabe, M. (Hg.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. 13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (ASIM-Mitteilung, 118), S. 81-89.
- Steude, V. und Werners, B. (2003): *PPS-Systeme auf Basis von Simulation. Mit einem Geleitwort von Brigitte Werners*. Lohmar, Köln: Josef EUL Verlag.
- Steven, M. (1994): *Hierarchische Produktionsplanung. Mit 48 Abbildungen*. Heidelberg: Physica-Verlag (Physica-Lehrbuch).
- Switalski, M. (1998): *Hierarchische Produktionsplanung und Aggregation*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 58, 3, S. 381-396.
- Tecnomatix (2000): *eM-Plant: Objects Manual (Version 6.0)*. Tecnomatix Technologies GmbH & Co. KG.
- Tecnomatix (2008): *Tecnomatix Plant Simulation Hilfe*. Siemens Product Lifecycle Management Software II (DE) GmbH.
- Tempelmeier, H. (2003): *Practical considerations in the optimization of flow production systems*. In: *International Journal of Production Research*, 41, 1, S. 149-170.
- Tereso, A. P.; Araújo, M. M. T. und Elmaghraby, S. E. (2004): *Adaptive resource allocation in multimodal activity networks*. In: *International Journal of Production Economics*, 92, 1, S. 1-10.
- Troßmann, E. (1992): *Prinzipien der rollenden Planung*. In: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 21, 3, S. 123-130.
- Tuma, A. (1999): *Betriebswirtschaftliche Aspekte der Produktionssteuerung. Ein entscheidungsorientierter Ansatz zur Koordinierung flexibler Produktionsnetzwerke*. Habilitationsschrift. Universität Bremen, Fachbereich Wirtschaftswissenschaft.
- Vairaktarakis, G. (2004): *Flexible Hybrid Flowshops*. In: Leung, J. Y.-T. (Hg.): *Handbook of Scheduling. Algorithms, Models, and Performance Analysis*. Boca Raton, London

- u.a.: Chapman & Hall/CRC (Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series), S. 5-1 - 5-33.
- Vanhoucke, M. und Debels, D. (2008): *The impact of various activity assumptions on the lead time and resource utilization of resource-constrained projects*. In: Computers & Industrial Engineering, 54, 1, S. 140-154.
- VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*.
- Venkateswaran, J. und Son, Y.-J. (2005): *Hybrid system dynamic–discrete event simulation-based architecture for hierarchical production planning*. In: International Journal of Production Research, 43, 20, S. 4397-4429.
- Vieira, G. E.; Herrmann, J. W. und Lin, E. (2003): *Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies and methods*. In: Journal of Scheduling, 6, 1, S. 39-62.
- Vieweg, H.-G.; Dreher, C.; Hofmann, H.; Kinkel, S.; Lay, G. und Schmoch, U. (2002): *Der Maschinenbau im Zeitalter der Globalisierung und "New Economy"*. München: Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung (Ifo-Beiträge zur Wirtschaftsforschung, 9).
- Vollmann, T. E.; Berry, W. L.; Whybark, D. C. und Jacobs, F. R. (2005): *Manufacturing Planning and Control Systems for Supply Chain Management*. New York, Chicago u.a.: McGraw-Hill.
- Vonder, S. van de; Demeulemeester, E.; Herroelen, W. und Leus, R. (2006): *The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling*. In: International Journal of Production Research, 44, 2, S. 215-236.
- Voß, S. und Witt, A. (2007): *Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application: Scheduling in batch-processing industries and supply chains*. In: International Journal of Production Economics, 105, 2, S. 445-458.
- Wallace, S. W. (2000): *Decision Making Under Uncertainty: Is Sensitivity Analysis of Any Use?* In: Operations Research, 48, 1, S. 20-25.
- Wiendahl, H.-P. (2008): *Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 262 Abbildungen und 2 Tabellen*. München, Wien: Hanser-Verlag.

- Wu, S. D.; Byeon, E.-S. und Storer, R. H. (1999): *A Graph-Theoretic Decomposition of the Job Shop Scheduling Problem to Achieve Scheduling Robustness*. In: *Operations Research*, 47, 1, S. 1-12.
- Wullink, G. (2005): *Resource Loading Under Uncertainty*. Dissertation. Enschede, University of Twente, URL: http://doc.utwente.nl/50300/1/thesis_Wullink.pdf, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Wullink, G.; Gademann, A.; Hans, E. W. und Harten, A. van (2004a): *Scenario-based approach for flexible resource loading under uncertainty*. In: *International Journal of Production Research*, 42, 24, S. 5079-5098.
- Wullink, G.; Hans, E. W. und Harten, A. van (2004b): *Robust Resource Loading for Engineer-To-Order manufacturing*. Internal Report. Management and Logistics Beta Research School for Operations, University of Twente, URL: <http://doc.utwente.nl/70237/1/Wullink04robust.pdf>, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Zäpfel, G. (1982): *Produktionswirtschaft: Operatives Produktions-Management*. Berlin, New York: De Gruyter (De-Gruyter-Lehrbuch).
- Zelewski, S. (1999): *Flexibilitätsorientierte Koordinierung von Produktionsprozessen*. Arbeitsbericht Nr. 2. Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement, Universität Essen, URL: http://www.pim.wiwi.uni-due.de/uploads/tx_itochair3/publications/Arbeitsbericht_nr_2_Flexible-PPS.pdf, letzter Abruf: 26.08.2010.
- Ziegenbein, A.; Nienhaus, J.; Verbeck, A. und Alard, R. (2003): *Robust Planning – Coping with Uncertainty in Production Networks*. In: Brown, B. (Hg.): *Proceedings of the 9th International Conference in Manufacturing Excellence (ICME 2003)*. Carlton Crest Hotel, Melbourne, Australia, October 13 - 15, 2003.
- Zimmermann, H.-J. (2000): *An application-oriented view of modeling uncertainty*. In: *European Journal of Operational Research*, 122, 2, S. 190-198.



Lebenslauf

SCHULBILDUNG

1985 - 1990	Grundschule Ottobeuren
1990 - 1996	Rupert-Neß-Gymnasium Ottobeuren
1996 - 1999	Bernhard-Strigel-Gymnasium Memmingen

Abschluss: Allgemeine Hochschulreife (2,4)

ERSATZDIENST

10/1999 - 8/2000	Kreiskrankenhaus Ottobeuren; Pflegedienst
------------------	---

STUDIUM

10/2000 - 9/2006	Studium der Angewandten Informatik an der Universität Augsburg
------------------	--

Abschluss: Diplom-Informatiker (1,74)

BERUF

10/2006 - heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Production & Supply Chain Management der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Augsburg
-----------------	--

Die operative Produktionsplanung zur Durchführung der Reihenmontage von Spezialmaschinen stellt sehr spezifische Anforderungen an die Planung. Insbesondere die hohe Unsicherheit über die planungsrelevanten Informationen muss dabei berücksichtigt werden, da nur dann die Auswirkungen von Informationsdynamik und Störungen zielführend antizipiert und die Ziele „absolute Termintreue“ und „Minimierung der Kosten“ erreicht werden können.

Dieses Buch stellt einen praxisnahen, robusten Planungsansatz vor und evaluiert diesen anhand eines Praxisbeispiels aus der Luftfahrtindustrie. Dabei werden insbesondere die Integration der Ressourcenbelegungsplanung in die Gesamtplanungsaufgabe des Unternehmens, eine robuste Planungsmethode zur Berücksichtigung der Unsicherheit und ein Lösungsverfahren zur Lösung des resultierenden Hybrid-Flow-Shop-Problems vorgestellt.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-2746-4