

Thomas Rücker

**Optimale Materialflussteuerung in heterogenen
Produktionssystemen**

GABLER EDITION WISSENSCHAFT

Schriften zum Produktionsmanagement

Herausgegeben von Professor Dr. Herfried Schneider und
Professor Dr. Reinhard Haupt

Die Reihe präsentiert Forschungsergebnisse aus dem Bereich des Produktionsmanagements.

Mit einem weitgefassten Verständnis von Produktion als Prozess der Erstellung von Sachgütern und Dienstleistungen, einschließlich der notwendigen Vorbereitungsprozesse, sollen die Beiträge die integrativen Aspekte des Produktionsmanagements hervorheben und sowohl theoriegeprägte wie praxisbezogene Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte einbeziehen.

Thomas Rücker

Optimale Materialfluss- steuerung in heterogenen Produktionssystemen

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Herfried Schneider

Deutscher Universitäts-Verlag

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.

Dissertation TU Ilmenau, 2006

1. Auflage September 2006

Alle Rechte vorbehalten

© Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Lektorat: Brigitte Siegel / Stefanie Loyal

Der Deutsche Universitäts-Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.duv.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Regine Zimmer, Dipl.-Designerin, Frankfurt/Main
Druck und Buchbinder: Rosch-Buch, Scheßlitz
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN-10 3-8350-0536-7

ISBN-13 978-3-8350-0536-5

Geleitwort

Dynamische Umweltbedingungen, das große Tempo technologischer Erneuerungen und die steigenden Erwartungen auf internationalen Märkten hinsichtlich des Qualitäts-, Zeit- und Preiswettbewerbs stellen höchste Anforderungen an die Flexibilität produzierender Unternehmen. Davon sind alle Planungs- und Entscheidungsebenen einer Unternehmung betroffen, insbesondere jedoch die Gestaltung sinnvoller Organisationsformen für die Produktionsbereiche und adäquater Planungs- und Steuerungskonzepte.

Wenngleich in der Praxis für die Mehrheit der Unternehmen eine Reihe von Grundsätzen der Produktionsplanung unstrittig ist - so wird z. B. bei zentralisierter Programm-, Mengen- und Durchlaufplanung die Feinterminierung und Auftragssteuerung zumeist dezentral vorgenommen - ergeben sich im Detail Schwierigkeiten bei der Harmonisierung der Informations- und Materialströme durch die einzelnen, unterschiedlich organisierten und damit nach unterschiedlichen Verfahren gesteuerten Produktionssegmente. Daraus resultieren häufig unbeabsichtigte Diskontinuitäten des Materialflusses mit überhöhten Beständen, Qualitätsverlusten, zeitlichen Mehraufwänden und Terminverzögerungen, mithin eine unplanmäßige Kostenverursachung.

In jüngerer Zeit richteten sich deshalb vor allem theoriegeleitete Bemühungen darauf, diesem Mangel durch *Metakonzepte - hybride Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung für heterogene Produktionssysteme* und *generalisierte Konzepte zur Materialflusssteuerung* - abzuwehren. Zu den bekanntesten dieser Ende der 80er und in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelten Verfahren zählt das *Production Authorization Card (PAC)-Konzept* nach Buzacott und Shanthikumar. Im Rahmen seiner Forschungsarbeiten führte Herr Dr. Rücker die konzeptionellen Überlegungen dieses PAC-Systems, sowohl als Basis für eigene theoretische Weiterentwicklungen als auch auf dem Wege zu einer praktischen Anwendung, weiter.

Mit logischer Konsequenz wurden die Untersuchungen von der mathematischen Formulierung über umfangreiche Simulationsexperimente bis zur Definition von zielsystemkonformen Parametrisierungsregeln für das PAC-System durchgeführt. Für eine Anwendung der Ergebnisse der vorgelegten Arbeit ist von Bedeutung, dass nicht zwingend auf eine EDV-gestützte Implementierung des PAC-Systems orientiert wird, die zwar als „add-on“ kommerzieller PPS-Systeme wünschbar, für kleinere Unternehmen jedoch kaum handhabbar wäre. Vielmehr legt der Verfasser Gewicht auf eine mögliche Anwendung der von ihm entwickelten Modelle zur konzeptionellen Dimensionierung der Parameter im Rahmen konventioneller Steuerungspolitiken.

Das PAC-Konzept wurde von Herrn Dr. Rücker im Rahmen seiner Untersuchungen als das derzeit leistungsfähigste generalisierte Steuerungskonzept erkannt und seinen weiteren Arbeiten zugrunde gelegt. Dafür sprechen zwei Eigenschaften dieses Konzeptes, die entsprechend herausgearbeitet wurden:

1. PAC überwindet das Problem der unterschiedlichen Informationsschnittstellen, das bei paralleler Anwendung verschiedener konventioneller Steuerungsverfahren in einem heterogenen Produktionssystem eine (logisch) durchgängige Materialflusssteuerung erschwert.

2. PAC ermöglicht eine kontinuierliche Variation der Steuerungsparameter gänzlich unabhängig von den bekannten Steuerungspolitiken und somit (zumindest theoretisch) deren optimale Einstellung unter Berücksichtigung der Spezifik des jeweiligen Produktionssystems.

Herr Dr. Rücker definiert adäquate Messgrößen, mittels derer die Wirkung der jeweiligen Parameterkonfiguration ermittelt werden kann. Um zu einer Beurteilung der Optimalität von Parametereinstellungen im Sinne der Wirtschaftlichkeit des Systemverhaltens zu gelangen, führt er eine monetäre Bewertung mittels der entscheidungsrelevanten Kostenkategorien ein. Einer umfassenden Bewertung stehen allerdings zwei Probleme entgegen, die der Verfasser ingenieurlöst: einerseits die Erfassung der *Fehlmengenkosten*, zum anderen die Abbildung des *Wertzuwachses* in einem mehrstufigen Produktionssystem. Die Fehlmengenkosten führt der Verfasser für den unterstellten Fall der Wartebereitschaft des Kunden auf den bewerteten Lieferrückstand im Endproduktlager zurück. Die Schwierigkeit der analytischen Erfassung des Wertzuwachses in einem mehrstufigen Produktionssystem umgeht der Verfasser elegant mit der Bewertung des sog. Staffelpostandes als Surrogat für die auf den einzelnen Wertschöpfungsstufen downstream zunehmenden Lagerhaltungskosten.

Während die entwickelten mathematische Modelle zwar hilfreich sind, um den Raum einzuschränken, in dem nach der optimalen Parameterkombination zu suchen ist, sind der formal-analytische Modellierung dennoch Grenzen bei der Ermittlung dieser optimalen Parametereinstellung in komplexeren Systemen gesetzt. Deshalb führte Herr Dr. Rücker die Untersuchungen in Form simulationsgestützter Analysen weiter, um die Wirkung der Parametereinstellung für mehrstufige Mehrproduktsysteme zu ermitteln.

Als ein wesentliches Ergebnis der simulationsgestützten Analyse wurden von Herrn Dr. Rücker heuristische Regeln zur situativen Einstellung der PAC-Parameter unter jeweils spezifischen Belastungssituationen mehrstufiger Produktionssysteme entwickelt, die im Anwendungsfall einem Expertensystem zugrunde gelegt werden können.

Der Verfasser entwickelt eine Heuristik zur effizienten Suche der optimalen Parameterkombination, die als Weiterentwicklung einer *Hillclimbing-Suche* charakterisiert werden kann. Anhand realer Daten wird zum einen der Nachweis der Validität der Heuristik erbracht, indem z. B. eine signifikante Verringerung der Bestandskosten gegenüber der ineffizienten Ausgangssituation erreicht wird, zum anderen wird die Funktionsfähigkeit der Heuristik im Hinblick auf den deutlich verringerten Simulationsaufwand demonstriert.

Herr Dr. Rücker hat mit seinen Forschungsarbeiten einen fundierten theoretischen Beitrag zur Weiterentwicklung des Konzeptes der hybriden Produktionsplanung und -steuerung für heterogene Produktionssysteme geleistet und wichtige Hinweise für eine praktische Umsetzung des PAC-Konzeptes geliefert. Der vorgelegten Schrift wünsche ich deshalb eine weite Verbreitung und eine intensive wissenschaftliche Diskussion.

Vorwort

Die gegenwärtigen Turbulenzen des Unternehmensumfeldes (erhöhter Wettbewerb auf den Zulieferer- und Abnehmermärkten, technologische Entwicklung) haben drastische Auswirkungen auf die Gestaltung und Organisation der Fertigung. So lässt sich seit einiger Zeit als Folge der genannten Entwicklungen ein Trend zur Dezentralisierung und Segmentierung der Fertigung sowie ein verstärkter Einsatz der flexiblen Automation beobachten, welcher die Differenzierung des Produktionssystems in mehrere organisatorisch und technologisch klar voneinander abgrenzbare Subsysteme zur Folge hat.

Die verstärkte Etablierung derartiger Strukturen, die im Folgenden als heterogene Produktionssysteme bezeichnet werden, blieb nicht ohne Auswirkungen auf die Produktionsplanung und -steuerung. In der Praxis greift die Mehrheit der Unternehmen nun mehr auf eine zentralisierte Programm-, Mengen- und Durchlaufplanung sowie auf eine dezentrale Feinterminierung und Auftragssteuerung zurück. Bei dieser Vorgehensweise ergeben sich im Detail Schwierigkeiten bei der Harmonisierung der Informationsströme über die einzelnen, unterschiedlich organisierten und damit nach unterschiedlichen Verfahren gesteuerten Produktionssegmente, welche Diskontinuitäten des Materialflusses zur Folge haben. Die Diskontinuitäten resultieren wiederum in überhöhten Beständen, Qualitätsverlusten, zeitlichen Mehraufwänden, Terminverzögerungen und somit letztendlich in einer unplanmäßigen Kostenverursachung.

Einen möglichen Lösungsansatz bietet das Production Authorization Card (PAC)-Konzept von *John Buzacott* und *George Shanthikumar*, ein generalisiertes Konzept zur Steuerung der Materialflüsse, bei dem Informationsflüsse durch Tags (Karten, Marken) abgebildet werden. Dieses Konzept ist in der Lage, unterschiedliche konventionelle Verfahren anhand von wenigen Parametern darzustellen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, Regeln zur zielsystemkonformen Einstellung und Optimierung der PAC-Parameter zu ermitteln und auf Basis dieser ein heuristisches Verfahren zur Parameteroptimierung zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit ist im Januar 2006 von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der TU Ilmenau als Dissertation angenommen worden. Sie entstand am Lehrstuhl für Produktionswirtschaft/Industriebetriebslehre unter der fachlichen Anleitung von Univ.-Prof. Dr. habil. Herfried Schneider. Ihm gilt an dieser Stelle mein besonderer Dank. Er war mir während der gesamten Bearbeitungszeit ein wertvoller Ansprechpartner. Seine fachliche und persönliche Unterstützung trugen entscheidend zum Gelingen der Arbeit bei.

Mein Dank gebührt darüber hinaus Herrn Prof. Dr. John Buzacott von der Schulich School of Business der York University, Toronto für die fachliche Betreuung der Arbeit sowie die Übernahme des Koreferats.

Zur Durchführung der Simulationsexperimente wurde auf das Simulationstool MLDesigner der Firma Mission Level Design Inc. zurückgegriffen. Herrn Prof. Salzwedel danke ich dafür, dass mir dieses Tool sowie die zur Bedienung notwendige Unterstützung zuteil geworden ist.

In besonderem Maße möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Christian Ehlers, Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Raffael Englert, Herrn Dipl.-Wirt.-Inf. Marko Falk sowie Herrn Dipl.-Wirt.-Inf. Toni Wozilka für die ständige Weiterentwicklung der Simulationsbibliothek sowie bei Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Hans-Marian Alt, Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Björn Machalett, Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Steffen Schulz sowie Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Wabbel für die Durchführung, Auswertung und Aufbereitung von unzähligen Simulationsexperimenten bedanken. Ohne die Unterstützung meiner ehemaligen Diplomanden wäre das Dissertationsvorhaben in dem vorliegenden Umfang nicht zu realisieren gewesen. Frau Dipl.-Kffr. Yvonne Nechilla danke ich für die Anfertigung der Tabellen sowie die Gestaltung des Layouts. Für die letzte Durchsicht des Manuskripts danke ich Frau Stefanie Loyal beim Deutschen Universitäts-Verlag. Alle verbleibenden Fehler gehen zu meinen Lasten.

Ohne Rückhalt im privatem Umfeld hätte ich diese Schrift nicht fertig stellen können. Daher möchte ich mich bei meinem Freund Dr. Holm Fischäder bedanken, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Darüber hinaus danke ich meiner Verlobten Sabine für das Verständnis und die Bereitschaft, immer wieder hinter der Arbeit zurückzustehen und meinen Eltern für alles, was sie mir auf meinen Lebensweg mitgegeben haben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Thomas Rucker

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Symbolverzeichnis	XXI
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	2
2 Ein hybrides und hierarchisches PPS-Konzept zur operativen Produktionsplanung und -steuerung heterogener Produktionsstrukturen	7
2.1 Aufgaben und Ziele der Produktionsplanung und -steuerung	7
2.2 Strukturelle Gestaltungsaspekte der operativen Produktionsplanung und -steuerung	9
2.2.1 Organisatorische Einbettung	9
2.2.2 Integrationsgrad der Entscheidungen	9
2.2.3 Festlegung des Entkopplungspunktes	11
2.3 Aufbau des hybriden und hierarchischen PPS-Konzepts für heterogene Produktionssysteme	13
2.3.1 Taktische Produktionsplanung	15
2.3.2 Zentrale Produktionsprogramm- und Ressourcenplanung	15
2.3.3 Dezentrale Materialflusststeuerung und Produktionsdurchführungsplanung	16
2.4 Konzepte zur dezentralen Materialflusststeuerung	16
2.4.1 Materialflusststeuerung bei kundenauftragsanonymer Produktion	17
2.4.1.1 Base stock	17
2.4.1.2 Kanban	19
2.4.1.3 Conwip	21
2.4.1.4 Integral Control/Echelon Kanban Control	23
2.4.1.5 Local Control	24
2.4.1.6 MRP (Material Requirement Planning)	25
2.4.2 Materialflusststeuerung bei kundenauftragsbezogener Produktion	28
2.4.2.1 Make to order	28
2.4.2.2 Polca	29
2.4.3 Kombination mehrerer Konzepte zur Materialflusststeuerung	31
2.4.4 Generalisierte Verfahren zur Materialflusststeuerung	32
2.4.4.1 Generalized Kanban Control (GKC)-Konzept	32

2.4.4.2	Production Authorization Card (PAC)-Konzept	34
2.4.4.3	Extended Kanban Control (EKC)-Konzept	37
2.5	Zusammenfassung	38
3	Zielsystem und mögliche Erweiterungen des PAC-Konzepts	43
3.1	Lager- und zellbezogene Messgrößen	43
3.2	Bewertung der Optimalität von PAC-gesteuerten Produktionssystemen	47
3.3	Praxisorientierte Erweiterungen des Grundkonzepts	53
3.3.1	Cancellation Tags	53
3.3.2	Periodisierung der Auftragsankünfte	54
3.3.3	Produktion von mehreren Produkten auf einer Produktionsstufe	55
3.3.4	Zellen der logischen und physischen Montage	57
4	Mathematische Beschreibung von PAC-gesteuerten Produktionssystemen	59
4.1	Einstufiges Produktionssystem mit einem Produkt	59
4.2	Mehrstufiges Produktionssystem mit linearer Produktstruktur und einem Endprodukt	62
4.3	Mehrstufiges Produktionssystem mit linearer Produktstruktur und mehreren Endprodukten	66
4.4	Mehrstufiges Produktionssystem mit konvergierenden Produktstrukturen	70
4.5	Kritische Wertung der mathematischen Modellierung	70
5	Simulationsgestützte Analyse der Wirkung der PAC-Parameter	73
5.1	Methodik und Vorgehensweise	73
5.2	Analyse der Auswirkungen einer Variation der PAC-Parameter in mehrstufigen Einproduktssystemen	80
5.2.1	Betrachtete Produktionssysteme	80
5.2.2	Wirkung der Parameter $k_i^{(j)}$ mit $0 \leq j \leq s$	81
5.2.3	Wirkung der Parameter $z_i^{(j)}$ mit $0 \leq j \leq s$	88
5.2.4	Wirkung der Parameter $\tau_i^{(j)}$ mit $0 \leq j \leq s$	95
5.2.5	Wirkung der Parameter $r_i^{(j)}$ mit $0 \leq j \leq s$	110
5.2.6	Wirkung einer Periodisierung der Auftragsankünfte durch $PL^{(0)} > 0$	129
5.3	Analyse der Auswirkungen einer Variation der PAC-Parameter in mehrstufigen Mehrproduktssystemen	135
5.3.1	Betrachtete Simulationsmodelle	136
5.3.2	Auswirkungen einer symmetrischen und simultanen Parametererhöhung in einem mehrstufigen Mehrproduktssystem mit symmetrischen Zwischenankunfts- und Bedienzeiten	138
5.3.3	Optimale Einstellung der Parameter $k_i^{(j)}$ innerhalb der Produktionsstufe j	140
5.3.4	Optimale Einstellung der Parameter $z_i^{(j)}$ innerhalb der Produktionsstufe j	149
5.3.5	Optimale Einstellung der Parameter $\tau_i^{(j)}$ innerhalb der Produktionsstufe j	156
5.3.6	Optimale Einstellung der Parameter $r_i^{(j)}$ innerhalb der Produktionsstufe j	163

5.3.6.1	Einstufiges Produktionssystem mit einer Zelle und symmetrischen Zwischenankunfts- und Bedienzeiten (Szenario 1)	164
5.3.6.2	Einstufiges Produktionssystem mit einer Zelle, asymmetrischen Zwischenankunftszeiten und symmetrischen Bedienzeiten (Szenario 2)	170
5.3.6.3	Einstufiges Produktionssystem mit einer Zelle, symmetrischen Zwischenankunftszeiten und asymmetrischen Bedienzeiten (Szenario 3)	175
5.3.7	Zusammenfassung	177
5.4	Vergleich von verschiedenen Steuerungspolitiken	178
5.4.1	Darstellung von konventionellen Steuerungspolitiken unter Zugrundelegung des PAC-Konzepts	178
5.4.1.1	Auftragsfertigung (Make to order-System)	179
5.4.1.2	MRP	179
5.4.1.3	Base stock	179
5.4.1.4	Kanban	180
5.4.1.5	Local Control	180
5.4.1.6	Integral Control	180
5.4.1.7	Conwip	181
5.4.2	Ermittlung einer optimalen Steuerungspolitik	181
5.4.2.1	Vorgehensweise	181
5.4.2.2	Mehrstufiges Produktionssystem mit einem Endprodukt und linearer Produktstruktur	183
5.4.2.3	Mehrstufige Produktionssysteme mit mehreren Endprodukten und allgemeiner Produktstruktur	190
5.4.2.4	Mengenpuffer versus Zeitpuffer	197
5.4.3	Zusammenfassung	203
6	Optimierung der PAC-Parameter in mehrstufigen Mehrproduktsystemen	207
6.1	Klassifikation des Optimierungsproblems	207
6.2	Eine Heuristik zur Optimierung der Parameter $k_i^{(j)}$, $z_i^{(j)}$, $\tau_i^{(j)}$ sowie $r_i^{(j)}$	208
6.3	Anwendung der Heuristik zur Optimierung unterschiedlicher Steuerungspolitiken für einfache Produktionssysteme	216
6.3.1	Optimierung der Parameter $k^{(j)}$, $z^{(j)}$ und $\tau^{(j)}$ eines mehrstufigen Einproduktsystems für unterschiedliche Steuerungspolitiken	220
6.3.2	Optimierung der Parametervektoren $\vec{k}^{(j)}$, $\vec{z}^{(j)}$ und $\vec{\tau}^{(j)}$ eines mehrstufigen Mehrproduktsystems mit allgemeiner Produktstruktur für unterschiedliche Steuerungspolitiken	221
6.3.3	Optimierung der Parameter $k^{(j)}$, $z^{(j)}$, $\tau^{(j)}$ sowie $r^{(j)}$ eines mehrstufigen Einproduktsystems	224
6.3.4	Nachoptimierung der Parameter	226
6.4	Anwendung der Heuristik zur Ermittlung einer optimalen PAC-basierten Steuerungspolitik für ein reales Produktionssystem	227

6.4.1	Das Produktionssystem	228
6.4.2	Aufbau und Annahmen des Modells	229
6.4.3	Optimierung des Modells	230
6.5	Zusammenfassung	232
7	Resümee und Ausblick	234
	Literatur	239
	Anhang	250
A	Das Simulationstool MLDesigner®	251
B	Die Simulationsbibliothek zur Modellierung eines PAC-gesteuerten Produktionssystems	254
C	Die Auswirkungen von asymmetrischen Bedienzeiten auf die optimale Einstellung der Parameter	257
C.1	Parameter $k_i^{(j)}$	257
C.2	Parameter $z_i^{(j)}$	258
C.3	Parameter $\tau_i^{(j)}$	259
D	Die Auswirkungen von unterschiedlichen variablen Stückkosten auf die optimale Einstellung der Parameter	261
D.1	Parameter $k_i^{(j)}$	262
D.2	Parameter $z_i^{(j)}$	263
D.3	Parameter $\tau_i^{(j)}$	264
E	Die Auswirkungen einer Wertschöpfung auf die optimale Einstellung der Parameter	266
E.1	Parameter $k_i^{(j)}$	266
E.2	Parameter $z_i^{(j)}$	269
E.3	Parameter $\tau_i^{(j)}$	269
F	Vergleich von verschiedenen Steuerungspolitiken	275
G	Beispiele für den Einsatz des Optimierungsalgorithmus	281

Abbildungsverzeichnis

1-1	Struktur und Aufbau der Arbeit	3
2-1	Typen der Programmbildung	12
2-2	Das hybride und hierarchische PPS-Konzept	14
2-3	Material- und Informationsflüsse bei einem Base stock-System	18
2-4	Material- und Informationsflüsse bei einem Kanban-System	20
2-5	Material- und Informationsflüsse bei einem Conwip-System	22
2-6	Material- und Informationsflüsse bei einem Echelon Kanban-System	24
2-7	Material- und Informationsflüsse beim MRP	26
2-8	Material- und Informationsflüsse bei einem Make to order-System	28
2-9	Material- und Informationsflüsse beim Polca-Konzept	30
2-10	Material- und Informationsflüsse beim GKC-Konzept	33
2-11	Material- und Informationsflüsse beim PAC-Konzept	34
2-12	Material- und Informationsflüsse beim EKC-Konzept	37
3-1	Messgrößen in einem mehrstufigen PAC-gesteuerten Produktionssystem mit einem Produkt und linearer Produktstruktur	43
3-2	Bestimmung des zeitlich gewichteten Mittelwerts einer zeitpunktbezogenen Messgröße	46
3-3	Lieferrückstand-Staffelbestand-Diagramm	51
3-4	Reaktionen von $B^{(0)}$ und $\tilde{E}^{(s)}$ auf die Erhöhung eines Parameters	53
3-5	Übermittlung von Order Tags mit und ohne Periodisierung	54
3-6	Mehrproduktsysteme mit stufen- und produktspezifischen Process Tags	56
4-1	Ereignisse und Warteschlangen in einem mehrstufigen Einproduktsystem	59
4-2	Mehrstufiges Einproduktsystem	62
4-3	Mehrstufiges Mehrproduktsystem mit linearer Produktstruktur	66
4-4	Ereignisse und Warteschlangen in einem mehrstufigen Mehrproduktsystem	67
4-5	Ereignisse und Warteschlangen bei konvergierenden Produktstrukturen	71
5-1	Vorgehensweise	73
5-2	Produktionssystem mit allgemeiner Produktstruktur	77
5-3	Lieferrückstand-Staffelbestand-Diagramm	79
5-4	System 5C1P	80
5-5	System 1C1P	81
5-6	Auswirkungen einer Variation von $k^{(0)}$	82
5-7	Auswirkungen einer Erhöhung von $k^{(2)}$	84
5-8	Auswirkungen einer Erhöhung von $k^{(0)}$ und $k^{(2)}$ auf $\tilde{E}_{norm}^{(4)}$	87
5-9	Auswirkungen einer Erhöhung von $z^{(0)}$	89
5-10	Auswirkungen einer Erhöhung von $z^{(2)}$	91
5-11	Auswirkungen einer Erhöhung von $z^{(0)}$ und $z^{(2)}$ auf $\tilde{E}_{norm}^{(4)}$	94
5-12	Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(0)}$	96
5-13	Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(0)}$ auf das System 1C1P	98
5-14	Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(2)}$ bei unbeschränkter Einlastung	100
5-15	Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(2)}$ bei beschränkter Einlastung	102

5-16	Ereignisse und Materialbestände im System 1C1P bei $\tau^{(1)} = 5$	104
5-17	Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(2)}$ auf $\tilde{E}_{norm}^{(4)}$	109
5-18	Auswirkungen einer Bearbeitungslosgröße auf die Fertigungsdurchlaufzeit	112
5-19	Auswirkungen von $r^{(2)}$ bei unbeschränkter Einlastung ohne Rüstzeiten	114
5-20	Auswirkungen der Erhöhung einer Losgröße $r^{(j)}$ auf die Bestände der Stufe j	115
5-21	Auswirkungen von $r^{(2)}$ bei unbeschränkter Einlastung mit Rüstzeiten	116
5-22	Auswirkungen von $r^{(2)}$ bei beschränkter Einlastung ohne Rüstzeiten	117
5-23	Auswirkungen von $r^{(2)}$ bei beschränkter Einlastung mit Rüstzeiten	119
5-24	Auswirkungen von unterschiedlichen Rüstzeiten bei unbeschränkter Einlastung	121
5-25	Auswirkungen von unterschiedlichen Rüstzeiten bei beschränkter Einlastung	122
5-26	Auswirkungen einer Erhöhung von $r^{(2)}$ auf $\tilde{E}_{norm}^{(4)}$ bei unbeschränkter Einlastung	126
5-27	Auswirkungen einer Erhöhung von $r^{(2)}$ auf $\tilde{E}_{norm}^{(4)}$ bei beschränkter Einlastung	127
5-28	$B^{(0)}$ - $\tilde{E}_{norm}^{(4)}$ -Verläufe einer $r^{(2)}$ -Erhöhung für $SU^{(2)} = 0,3$	129
5-29	Bestandsentwicklung für $PL^{(0)} = 0$	130
5-30	Bestandsentwicklung für $PL^{(0)} = 2$	130
5-31	Auswirkungen einer Erhöhung von $PL^{(0)} \rightarrow \infty$	132
5-32	Prognosezeitpunkte und Prognosezeiträume bei $\tau^{(0)} > 0$	133
5-33	System 5C3P	136
5-34	Einstufige Produktionssysteme mit mehreren Produkten	136
5-35	System 2C2P	137
5-36	$\hat{B}^{(0)}$ und $\hat{E}^{(4)}$ der Experimente 1 bis 10	141
5-37	$\hat{B}^{(0)}$ - $\hat{E}^{(4)}$ -Diagramm der Experimente 1 bis 10	142
5-38	Entwicklung des Systems 1C2P für $\hat{k}^{(0)} = konst.$ (Szenario 1)	144
5-39	Entwicklung des Systems 2C2P für $\hat{k}^{(0)} = konst.$ (Szenario 2)	146
5-40	Entwicklung des Systems 2C2P für $\hat{k}^{(1)} = konst.$ (Szenario 3)	147
5-41	Entwicklung des Systems 1C2P für $\hat{z}^{(0)} = konst.$ (Szenario 1)	151
5-42	Entwicklung des Systems 2C2P für $\hat{z}^{(0)} = konst.$ (Szenario 2)	153
5-43	Entwicklung des Systems 2C2P für $\hat{z}^{(1)} = konst.$ (Szenario 3)	154
5-44	Entwicklung des Systems 1C2P für $\hat{M}^{(OT)} = konst.$ (Szenario 1)	158
5-45	Entwicklung des Systems 2C2P für $\hat{M}^{(OT)} = konst.$ (Szenario 2)	159
5-46	Entwicklung des Systems 2C2P für $\hat{M}^{(0)} = konst.$ (Szenario 3)	161
5-47	Entwicklung des Systems 1C2P für Szenario 1	169
5-48	Entwicklung des Systems 1C2P für Szenario 2	170
5-49	System 3C1P	182
5-50	Parameterverteilung bei freier Parameterwahl und Zeitpuffer	187
5-51	Parameterverteilung bei freier Parameterwahl und Mengenspuffer	187
5-52	Parameterverteilung bei Base stock	188
5-53	Parameterverteilung bei Kanban	188
5-54	Parameterverteilung bei Local Control	189
5-55	Parameterverteilung bei Conwip	189
5-56	Parameterverteilung bei Integral Control	190
5-57	Parameterverteilung bei MRP	190

5-58	Parameterverteilung bei freier Parameterwahl, Zeitpuffer auf der Endstufe und produktspezifischen PTs	193
5-59	Parameterverteilung bei freier Parameterwahl, Mengenspuffer und produktspezifischen PTs	193
5-60	Parameterverteilung bei freier Parameterwahl, Zeitpuffer und stufenspezifischen PTs	194
5-61	Parameterverteilung bei freier Parameterwahl, Mengenspuffer und stufenspezifischen PTs	194
5-62	Parameterverteilung bei Base stock	195
5-63	Parameterverteilung bei Kanban	195
5-64	Parameterverteilung der Local Control-ähnlichen Steuerungspolitiken mit produktspezifischen PTs	196
5-65	Parameterverteilung bei Local Control mit stufenspezifischen PTs	196
5-66	Parameterverteilung bei MRP	196
5-67	Prognose- und Verrechnungszeitpunkte	199
5-68	$B^{(0)}-E^{(0)}$ -Diagramm für Szenario 1	201
5-69	$B^{(0)}-E^{(0)}$ -Diagramm für Szenario 2	201
5-70	$B^{(0)}-E^{(0)}$ -Diagramm für Szenario 1 und Szenario 2 im Vergleich	202
5-71	$B^{(0)}-E^{(0)}$ -Diagramm für Szenario 3	203
6-1	Auswirkungen einer Erhöhung eines Parametervektors um den Schrittweitenvektor	208
6-2	Annäherung eines Optimierungspfades an die konvexe Hülle	209
6-3	Programmablaufplan der Heuristik	212
6-4	Ermittlung der Effizienz	214
6-5	Bestimmung des Abstandes $\Delta \tilde{E}_{m, ch}^{(s)}$ eines Punktes \vec{P}_m von der konvexen Hülle	217
6-6	Kenngrößen zur Beurteilung der Lösungsqualität der Heuristik	218
6-7	System 2C1P	224
6-8	Aufbau des realen Systems	228
6-9	Vergleich des Betriebspunktes mit dem Optimierungspfad	232
A-1	Hierarchische Gliederung des Simulationstools MLDesigner®	252
B-1	Modell eines zweistufigen Produktionssystems im Simulationstool MLDesigner®	256
C-1	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 1	258
C-2	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 2	259
C-3	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 3	260
D-1	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 1	262
D-2	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 2	263
D-3	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 3	265
E-1	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 2 aus Tab. 5-19	267
E-2	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 3 aus Tab. 5-19	268
E-3	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 2 aus Tab. 5-21	270
E-4	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 3 aus Tab. 5-21	271
E-5	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 2 aus Tab. 5-23	273
E-6	Entwicklung der Systemkenngrößen bei Szenario 3 aus Tab. 5-23	274

F-1	Optima des Systems 3C1P bei $\zeta = 0\%$	275
F-2	Optima des Systems 3C1P bei $\zeta = 50\%$	276
F-3	Optima des Systems 3C1P bei $\zeta = 400\%$	277
F-4	konvexe Hüllen der betrachteten Steuerungspolitiken bei $\zeta = 0\%$	278
F-5	konvexe Hüllen der betrachteten Steuerungspolitiken bei $\zeta = 50\%$	279
F-6	konvexe Hüllen der betrachteten Steuerungspolitiken bei $\zeta = 400\%$	280
G-1	Optimierung des Systems 3C1P mit freier Parameterwahl und Mengepuffer bei $\zeta = 400\%$	281
G-2	Optimierung des Systems 3C1P mit freier Parameterwahl und Zeitpuffer bei $\zeta = 400\%$	281
G-3	Optimierung des Systems 2C2P mit freier Parameterwahl, produktspezifischen PTs und Mengepuffer bei $\zeta = 400\%$	282
G-4	Optimierung des Systems 2C2P mit freier Parameterwahl, produktspezifischen PTs und Zeitpuffer bei $\zeta = 400\%$	282
G-5	Optimierung des Systems 2C1P mit Losbildung in Zelle 0, freier Parameterwahl und $\zeta = 400\%$	283
G-6	Nachoptimierung des Systems 3C1P mit freier Parameterwahl und Zeitpuffer für $\zeta = 400\%$	283

Tabellenverzeichnis

2-1	Charakteristische Merkmale einer Materialflussteuerung	39
2-2	Merkmalsausprägungen der betrachteten Steuerungsverfahren	39
2-3	Darstellbare Merkmale und Steuerungsverfahren	40
5-1	Parametereinstellungen des Systems 5C1P	81
5-2	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $k^{(0)}$	83
5-3	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $k^{(j)}$	85
5-4	Parametereinstellungen des Systems 5C1P	88
5-5	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $z^{(0)}$	90
5-6	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $z^{(j)}$	92
5-7	Parametereinstellungen des Systems 5C1P	95
5-8	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(0)}$	97
5-9	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(j)}$ bei unbeschränkter Einlastung	101
5-10	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $\tau^{(j)}$ bei beschränkter Einlastung	106
5-11	Parametereinstellungen des Systems 5C1P	113
5-12	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $r^{(j)}$ bei unbeschränkter Einlastung	118
5-13	Verallgemeinerte Auswirkungen einer Erhöhung von $r^{(j)}$ bei beschränkter Einlastung	120
5-14	$B^{(0)}$ - und $E^{(4)}$ -optimale Losgrößen	124
5-15	Beispiel zur Berechnung der Fertigstellungszeitpunkte	134
5-16	Berechnung des Lieferrückstandes $B^{(0)}$	135
5-17	Parametereinstellungen des Systems 5C3P	139
5-18	Äquivalente Parameter und Messgrößen	140
5-19	Parametereinstellungen und Zwischenankunftszeiten der Szenarien 1 bis 3	143
5-20	Abweichungen der Kombinationen gemäß Gleichung (5.50)	148
5-21	Parametereinstellungen und Zwischenankunftszeiten der Szenarien 1 bis 3	150
5-22	Abweichungen der Kombinationen gemäß Gleichung (5.55)	155
5-23	Parametereinstellungen und Zwischenankunftszeiten der Szenarien 1 bis 3	157
5-24	Abweichungen der Kombinationen gemäß Gleichung (5.61)	162
5-25	Parametereinstellungen der Szenarien 1 bis 3	163
5-26	Simulationsergebnisse der Szenarien 1 bis 3	165
5-27	Berechnung der mittleren Durchlaufzeiten für die Szenarien 1 und 2	168
5-28	Losgrößen gemäß Regel 48 für die Experimente 4 bis 7	172
5-29	Simulationsergebnisse der Szenarien 4 bis 5	173
5-30	Simulationsergebnisse der Szenarien 6 bis 7	174
5-31	Simulationsergebnisse der Szenarien 8 und 9	176
5-32	Parametereinstellungen des Systems 3C1P	184
5-33	Parametereinstellungen des Systems 2C2P	192
5-34	Wertebereich MAPE und Interpretation	198

5-35	Entsprechung σ^2 und MAPE	199
5-36	Werte für die Varianz der Prognosestörung	200
6-1	Konfiguration der Heuristik zur Optimierung unterschiedlicher Steuerungs- politiken	210
6-2	Startwerte und Schrittweiten bei der Optimierung des Systems 3C1P	220
6-3	Ergebnisse der Heuristik für verschiedene Gewichtungen	221
6-4	Startwerte und Schrittweiten bei der Optimierung des Systems 2C2P	222
6-5	Ergebnisse der Heuristik für verschiedene Gewichtungen	223
6-6	Startwerte und Schrittweiten bei der Optimierung des Systems 2C1P	224
6-7	Ergebnisse der Heuristik für verschiedene Gewichtungen	225
6-8	Modifikationsstrategien bei einer Nachoptimierung	226
6-9	Ergebnisse der Nachoptimierung für $\zeta = 400\%$	227
6-10	Modellierungsdaten	230
6-11	Startwerte und Schrittweiten bei der Optimierung des realen Systems	231
6-12	Einsparungen des Ressourcenbedarfes für $\zeta = 400\%$	233
C-1	Einstellungen des Systems 1C2P für unterschiedliche Bedienzeiten	257
D-1	Einstellungen des Systems 1C2P bei unterschiedlichen variablen Stückkosten	261

Abkürzungsverzeichnis

1C1P	Produktionssystem mit einer Zelle und einem Endprodukt
1C2P	Produktionssystem mit einer Zelle und zwei Endprodukten
1C3P	Produktionssystem mit einer Zelle und drei Endprodukten
1C4P	Produktionssystem mit einer Zelle und vier Endprodukten
2C1P	Produktionssystem mit zwei sequentiell angeordneten Zellen und einem Endprodukt
2C2P	Produktionssystem mit zwei sequentiell angeordneten Zellen und zwei Endprodukten
3C1P	Produktionssystem mit drei sequentiell angeordneten Zellen und einem Endprodukt
5C1P	Produktionssystem mit fünf sequentiell angeordneten Zellen und einem Endprodukt
5C3P	Produktionssystem mit fünf sequentiell angeordneten Zellen und drei Endprodukten
ATO	Assemble to Order
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
Conwip	Constant Work in Process
D	Bedarfsinformation
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EKC	Extended Kanban Control
ETO	Engineer to Order
FCFS	First Come First Served
FTO	Finish to Order
GKC	Generalized Kanban Control
IC	Integrated Circuit (integriertes mikroelektronisches Bauteil)
K	Kanban-, Conwip-, Echelon Kanban-, GKC-, PAC- und EKC-Karten
$K_{j-2,j-1}$	Polca-Karte, die zur Freigabe des Produktes j aus dem Lager j an die Zelle $j - 1$ berechtigt
KgV	kleinstes gemeinsames Vielfaches
KOZ	kürzeste Operationszeit
LOZ	längste Operationszeit
MAD	Mean Average Deviation
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
Mgmt.	Management
MRP	Material Requirement Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
MSE	Mean Square Error
MT	Material Tag
MTO	Make to Order
MTS	Make to Stock
NS	Nachsimulation
OEM	Original Equipment Manufacturer

OT	Order Tag
P	Produkt
PAC	Production Authorization Card
Polca	Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Administration
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
Prod.	Produktion
PS	Produktionssegment
PT	Process Tag
RT	Requisition Tag
Rx	Vorprodukt (Rohmaterial) des Produktes x
SW	Startwert
ZE	Zeiteinheiten

Symbolverzeichnis

Wenn eine der genannten Größen keinen Zeitbezug aufweist, dann handelt es sich um den Mittelwert einer bestimmten Betrachtungsperiode.

$\vec{0}$	Nullvektor, Koordinatenursprung
$\alpha_k^{(j)}$	Multiplikator des Schrittweitenvektors $\Delta \vec{k}^{(j)}$
$\alpha_z^{(j)}$	Multiplikator des Schrittweitenvektors $\Delta \vec{z}^{(j)}$
$\alpha_r^{(j)}$	Multiplikator des Schrittweitenvektors $\Delta \vec{r}^{(j)}$
$A^{(j)}$	mittlere Zwischenankunftszeit des in der Zelle j hergestellten Produktes j
$A_i^{(j)}$	mittlere Zwischenankunftszeit des in der Zelle j hergestellten Produktes i
$A(0, t)$	Anzahl der von einem Kunden im Zeitraum $(0, t)$ empfangenen Order Tags des Produktes j
$A^{(j)}(0, t)$	Anzahl der vom Lager j an die Zelle j übermittelten PA Cards des Produktes j im Zeitraum $(0, t)$
$\widehat{A}^{(j)}(0, t)$	Anzahl der vom Lager j an die Zelle j übermittelten PA Cards im Zeitraum $(0, t)$
α	durch eine Parametererhöhung im $B^{(0)}$ - $\widetilde{E}^{(s)}$ -Diagramm bzw. $\widehat{B}^{(0)}$ - $\widetilde{E}^{(s)}$ -Diagramm realisierter Winkel (Effizienz)
$\vec{\alpha}_m$	Effizienzvektor nach dem m -ten Optimierungsschritt
$\alpha_{m,i}$	i -tes Element des Effizienzvektors $\vec{\alpha}_m$
$b_r^{(j)}$	Multiplikator des Schrittweitenvektors $\Delta \vec{r}^{(j)}$
$B_{B,min}^{(0)}$	kundenseitiger Lieferrückstand einer lieferrückstandsminimalen Parameterkombinationen
$B_{rec}^{(0)}$	kundenseitiger Lieferrückstand bei einer gemäß Regel eingestellten Parameterkombination
$\Delta B^{(j)}$	Veränderung des Lieferrückstandes im Lager j durch eine Parameteränderung ΔPar_i
$\Delta B_{\%}^{(0)}$	prozentuale Abweichung des Lieferrückstandes $B^{(0)}$ der betrachteten Parameterkombination vom Lieferrückstand $B^{(0)}$ der $B^{(0)}$ -minimalen Parameterkombination
$B^{(j)}(t)$	Anzahl der Requisition Tags des Produktes j im Lager j , die auf den nächsten eintreffenden Material Tag warten (Lieferrückstand, Backlog)
$B_i^{(j)}(t)$	Anzahl der Requisition Tags des Produktes i im Lager j , die auf den nächsten eintreffenden Material Tag warten
$\widehat{B}^{(j)}(t)$	Anzahl aller Requisition Tags auf der Produktionsstufe j , die auf im Lager eintreffende Material Tags warten (aggregierter Lieferrückstand)
$\widehat{B}_m^{(0)}$	Lieferrückstand nach dem m -ten Optimierungsschritt
$\widehat{B}_{m,i}^{(0)}$	Lieferrückstand bei probeweiser Erhöhung des i -ten Parameters im m -ten Optimierungsschritt
$\Delta \widehat{B}_{m,i}^{(0)}$	Änderung des Lieferrückstandes bei probeweiser Erhöhung des i -ten Parameters im m -ten Optimierungsschritt

$BI^{(j)}(t)$	Anzahl der Material Tags des Produktes j , die sich zum Zeitpunkt t in der Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j aufhalten und darauf warten, an die nachfolgende Zelle übergeben zu werden (Auftragsgrößenbestand, Batch Inventory)
$BI_i^{(j)}(t)$	Anzahl der Material Tags des Produktes i , die sich zum Zeitpunkt t in der Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j aufhalten und darauf warten, an die nachfolgende Zelle übergeben zu werden
$\widehat{BI}^{(j)}(t)$	Anzahl aller Material Tags, die sich zum Zeitpunkt t in der Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j aufhalten und darauf warten, an die nachfolgende Zelle übergeben zu werden (aggregierter Auftragsgrößenbestand)
$BLT_i^{(j)}$	mittlere Verweilzeit eines Material Tag des Produktes i in der Losbildungsinstanz der Zelle j
β_i	Ergänzungswinkel von α_i zu π
$\beta_{m,i}$	Ergänzungswinkel von $\alpha_{m,i}$ zu π
$c^{(j)}$	Anzahl der parallel arbeitenden Bedienstellen in der Zelle j
$c_{i,j}$	Produktionskoeffizient, der ausdrückt, wie oft ein Produkt i in ein Produkt j eingeht
$ck^{(j)}$	Anzahl der stufenspezifischen Process Tags in der Produktionsstufe j
$\overline{ck}^{(j)}$	mittlere Anzahl der stufenspezifischen Process Tags in der Zelle j
$C^{(j)}(0, t)$	Anzahl der von der Zelle j an das Lager j übermittelten Material Tags des Produktes j im Zeitraum $(0, t)$
$C_i^{(j)}(0, t)$	Anzahl der von der Zelle j an das Lager j übermittelten Material Tags des Produktes i im Zeitraum $(0, t)$
$\widehat{C}^{(j)}(0, t)$	Anzahl aller von der Zelle j an das Lager j übermittelten Material Tags im Zeitraum $(0, t)$
χ_i	Ergänzungswinkel von α_i zu $2 \cdot \pi$
$\chi_{m,i}$	Ergänzungswinkel von $\alpha_{m,i}$ zu $2 \cdot \pi$
χ_{sperr}	Sperrwinkel
$\chi_{sperr,min}$	vorgegebener (initialer) Mindestsperrwinkel
$\chi_{sperr,m}$	Sperrwinkel für den m -ten Optimierungsschritt
$D(0, t)$	Anzahl der vom Lager 0 an die Kunden übermittelten Material Tags des Produktes j im Zeitraum $(0, t)$
$D_i(0, t)$	Anzahl der vom Lager 0 an die Kunden übermittelten Material Tags des Produktes i im Zeitraum $(0, t)$
$\widehat{D}(0, t)$	Anzahl aller vom Lager 0 an die Kunden übermittelten Material Tags im Zeitraum $(0, t)$
$Dev_{ch,m}$	prozentuale Abweichung des m -ten Punktes auf dem Optimierungspfad von der konvexen Hülle bzw. einem anderen Optimierungspfad
\overline{Dev}_{ch}	mittlere prozentuale Abweichung aller Punkte auf einem Optimierungspfad von der konvexen Hülle bzw. von einem anderen Optimierungspfad

$\overline{Dev}_{ch}^{<2\%}$	mittlere prozentuale Abweichung aller Punkte auf einem Optimierungspfad, nachdem der Abstand erstmals weniger als 2% betragen hat
$\overline{Dev}_{ch}^{>2\%}$	mittlere prozentuale Abweichung aller Punkte auf einem Optimierungspfad, bevor der Abstand erstmals weniger als 2% betragen hat
$e^{(j)}$	Soll-Staffelbestand (Echelon target stock) einer Produktionsstufe j
$e^{(m,n)}$	Summe aller durch einen Mengenpuffer induzierten Sollbestände in den Produktionsstufen m bis n
$\tilde{e}^{(s)}$	Summe aller durch Mengenpuffer induzierten Sollbestände im gesamten System
$\Delta e^{(s)}$	Erhöhung der durch Mengenpuffer induzierten Sollbestände bei Variation eines Parameters
$E^{(j)}(t)$	(Ist-)Staffelbestand (Echelon stock) des Produktes j zum Zeitpunkt t
$\widehat{E}^{(j)}$	systemweiter (Ist-)Staffelbestand aller auf Stufe j gefertigten Produkte in un- oder weiterverarbeiteter Form
$E^{(m,n)}(t)$	Bestand des Produktes n in un- und weiterverarbeiteter Form, der sich zum Zeitpunkt t im Teilsystem befindet, das die Produktionsstufen n bis m umfasst (partieller Staffelbestand)
$E^{(s)}(t)$	Bestand des Produktes s , der sich zum Zeitpunkt t im gesamten Produktionssystem in un- und weiterverarbeiteter Form befindet (Staffelbestand)
$E_{\beta, min}^{(s)}$	Staffelbestand bei einer Lieferrückstandsminimalen Parameterkombination
$E_{rec}^{(s)}$	Staffelbestand bei einer gemäß Regel eingestellten Parameterkombination
$\Delta E^{(s)}$	Erhöhung des Staffelbestandes $E^{(s)}$ durch eine Erhöhung eines PAC-Parameters
$\Delta E_{\%}^{(s)}$	prozentuale Abweichung des Staffelbestandes $E^{(s)}$ der betrachteten Parameterkombination vom Staffelbestand $E^{(s)}$ der $B^{(0)}$ -minimalen Parameterkombination
$\widetilde{E}^{(s)}$	mit der relativen Wertschöpfung der einzelnen Produktionsstufen gewichteter Staffelbestand des Produktes s in un- und weiterverarbeiteter Form
$\Delta \widetilde{E}^{(s)}$	Veränderung des gewichteten Staffelbestandes bei einer Parameteränderung ΔPar_i
$\widetilde{\widetilde{E}}_m^{(s)}$	gewichteter Staffelbestand nach dem m -ten Optimierungsschritt
$\widetilde{\widetilde{E}}_{m,i}^{(s)}$	gewichteter Staffelbestand bei probeweiser Erhöhung des i -ten Parameters im m -ten Optimierungsschritt
$\Delta \widetilde{\widetilde{E}}_{m,i}^{(s)}$	Änderung des gewichteten Staffelbestandes bei Erhöhung des i -ten Parameters im m -ten Optimierungsschritt
$\widetilde{\widetilde{E}}_{norm}^{(s)}(t)$	gewichteter normierter Staffelbestand des Produktes s in un- und weiterverarbeiteter Form
$\eta(\Delta Par_i)$	Effizienz einer Erhöhung des Parameters Par_i
$G^{(j)}(t)$	Anzahl der Order Tags des Produktes j , welche zum Zeitpunkt t im Lager j auf die Ankunft des nächsten Process Tag warten, um eine PA Card zu erzeugen
$G_i^{(j)}(t)$	Anzahl der Order Tags des Produktes i , welche zum Zeitpunkt t im Lager j auf die Ankunft des nächsten Process Tag warten, um eine PA Card zu erzeugen
$\widehat{G}^{(j)}(t)$	Summe aller auf der Produktionsstufe j zum Zeitpunkt t auf Process Tags wartenden Order Tags

$G^{(m,n)}(t)$	Summe der wartenden Order Tags des Produktes n , die sich zum Zeitpunkt t im Teilsystem befindet, das die Produktionsstufen n bis m umfasst
$\Delta G^{(0,s)}$	Erhöhung des gesamten Informationsbestandes $G^{(0,s)}$ durch eine Erhöhung eines PAC-Parameters
i	Index der auf einer Produktionsstufe j gefertigten Produkte, $i \in P^{(j)}$
$i_{m,max}$	Index des Parameters, dessen Erhöhung im m -ten Optimierungsschritt die größte Effizienz $\alpha_{m,i}$ erzielt
j	Index der Produktionsstufen, $0 \leq j \leq s$
$k^{(j)}$	Anzahl der Process Tags der Stufe j (Einlastungsobergrenze)
$\bar{k}^{(j)}$	mittlere Einlastungsobergrenze des in der Zelle j gefertigten Produktes j
$k_i^{(j)}$	Einlastungsobergrenze des Produktes i in der Zelle j (Anzahl der produktspezifischen Process Tags)
$\widehat{k}^{(j)}$	aggregierte Einlastungsobergrenze der Zelle j (Anzahl aller produktspezifischen Process Tags auf der Produktionsstufe j)
$\bar{\bar{k}}^{(j)}$	mittlere aggregierte Einlastungsobergrenze aller in der Zelle j gefertigten Produkte i
$\vec{k}^{(j)}$	Vektor der Einlastungsobergrenzen aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\vec{k}_0^{(j)}$	Arbeitspunktvektor der Einlastungsobergrenzen aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\Delta \vec{k}^{(j)}$	Schrittweitenvektor zur Erhöhung des Parametervektors $\vec{k}^{(j)}$
$k_{0,i}^{(j)}$	i -tes auf das Produkt i bezogenes Element des Arbeitspunktvektors $\vec{k}_0^{(j)}$
$\Delta k_i^{(j)}$	auf das Produkt i bezogenes Element des Schrittweitenvektors $\Delta \vec{k}^{(j)}$
$k_{stab}^{(j)}$	das kleinstmögliche $k^{(j)}$, für welches ein System stabil bleibt
$k_*^{(j)}$	das kleinstmögliche $k^{(j)}$, ab dem eine weitere Erhöhung zu keiner weiteren Senkung von $B^{(j)}$ führt
$k_L^{(j)}$	innerhalb einer Betrachtungsperiode anfallende Lagerhaltungskosten für eine Einheit des auf der Produktionsstufe j gefertigten Produktes j
$k_V^{(j)}$	variable Stückkosten des auf der Produktionsstufe j gefertigten Produktes j
K_L	gesamte innerhalb einer Betrachtungsperiode anfallende Lagerkosten
$K^{(j)}(t)$	Anzahl der zum Zeitpunkt t auf die Verschmelzung mit einem Order Tag wartenden Process Tags des Produktes j
$K_i^{(j)}(t)$	Anzahl der zum Zeitpunkt t auf die Verschmelzung mit einem Order Tag wartenden Process Tags des Produktes i im Lager j
$KI_i^{(j)}(t)$	Anzahl der zum Zeitpunkt t in der Zelle der logischen Montage j wartenden Material Tags des Produktes i (Kitting Inventory)
$I^{(j)}$	Plandurchlaufzeit des Produktes j durch die Stufe j
$L^{(j)}$	durchschnittliche Wartezeit auf das in Zelle j hergestellte Produkt j

$L_i^{(j)}$	durchschnittliche Wartezeit auf das in Zelle j hergestellte Produkt i
$LT^{(j)}$	mittlere Durchlaufzeit durch die Zelle j
$LT_i^{(j)}$	mittlere Durchlaufzeit des Produktes i durch die Zelle j
$\lambda^{(j)}$	Ankunftsrate des in der Zelle j hergestellten Produktes j
$\lambda_i^{(j)}$	mittlere Ankunftsrate des Produktes i in der Produktionsstufe j
m	Index der Optimierungsschritte
$m_{2\%}$	Index der Kombination, bei der die Abweichung $Dev_{ch,m}$ eines Optimierungspfades kleiner als 2% wird
$m_{Dev, ch}$	Anstieg der Regressionsgeraden der prozentualen Abweichung einer Optimierungs- von einer Vergleichssimulation $\hat{=}$ mittlere prozentuale Abnahme des Abstandes des Optimierungspfades zur Vergleichssimulation
m_{max}	maximale Anzahl zulässiger Optimierungsschritte
$M^{(j)}(t)$	Anzahl der PA Cards des Produktes j im Zellenmanagement der Zelle j zum Zeitpunkt t , für die schon Order Tags an das upstream gelegene Lager, aber noch keine Requisition Tags übermittelt wurden (durch einen Zeitpuffer induzierter Sollbestand auf der Produktionsstufe $j + 1$)
$M_i^{(j)}(t)$	Anzahl der PA Cards des Produktes i im Zellenmanagement der Zelle j zum Zeitpunkt t , für die schon Order Tags an das upstream gelegene Lager, aber noch keine Requisition Tags übermittelt wurden
$\hat{M}^{(j)}(t)$	Anzahl aller PA Cards im Zellenmanagement der Zelle j zum Zeitpunkt t , für die schon Order Tags an das upstream gelegene Lager, aber noch keine Requisition Tags übermittelt wurden (gesamter durch einen Zeitpuffer induzierter Sollbestand auf der Produktionsstufe $j + 1$)
$\overline{M}^{(j)}$	mittlerer durch einen Zeitpuffer induzierter Sollbestand aller in der Zelle j gefertigten Produkte
$M^{(OT)}(t)$	Anzahl der PA Cards des Produktes 0 zum Zeitpunkt t , für die durch die Kunden schon Order Tags an Lager 0, aber noch keine Requisition Tags übermittelt wurden (durch einen Zeitpuffer induzierter Sollbestand auf der Produktionsstufe 0)
$\Delta M^{(OT)}$	Veränderung des durch einen Zeitpuffer induzierten Solllagerbestandes des Produktes 0 bei Änderung eines Parameters
$M_i^{(OT)}(t)$	Anzahl der PA Cards des in der Zelle 0 gefertigten Produktes i zum Zeitpunkt t , für die durch die Kunden schon Order Tags an Lager 0, aber noch keine Requisition Tags übermittelt wurden
$\hat{M}^{(OT)}(t)$	Anzahl aller PA Cards zum Zeitpunkt t , für die durch die Kunden schon Order Tags an das Lager 0, aber noch keine Requisition Tags übermittelt wurden (gesamter durch einen Zeitpuffer induzierter Sollbestand auf der Produktionsstufe 0)
$\overline{M}^{(OT)}$	mittlerer durch einen Zeitpuffer induzierter Sollbestand aller in der Zelle 0 gefertigten Produkte
$MQDLT^{(j)}$	mittlere quadratische Abweichung der Durchlaufzeiten durch eine Zelle j
$\mu_i^{(j)}$	mittlere Bedienrate des Produktes i in der Zelle j

$n^{(j)}$	Anzahl aller auf der Stufe j gefertigten Produkte $\hat{=}$ Anzahl der Elemente des korrespondierenden Parametervektors
n_O	Anzahl der zu optimierenden Parametervektoren
N	Menge der natürlichen Zahlen
N_0	Menge der natürlichen Zahlen inklusive Null
$N^{(j)}$	Menge der Produkte, in die das Produkt j direkt eingeht
O	Menge der zu variierenden bzw. zu optimierenden Parameter bzw. Parametervektoren
\vec{P}	Parametervektor bzw. Parametertupel
\vec{P}_0	initialer Parametervektor für die Optimierung (Startwertkombination)
\vec{P}_m	Parametervektor nach dem m -ten Optimierungsschritt
$\vec{P}_{m,i}$	Parametervektor nach der probeweisen Erhöhung des i -ten Parameters im m -ten Optimierungsschritt
$P^{(j)}$	Menge aller auf der Produktionsstufe j in der Zelle j hergestellten Produkte
Par_i	Parameter an der i -ten Position des Parametervektors \vec{P}
$PL^{(0)}$	Zeitraum zwischen zwei Auftragsankünften für das Produkt 0 in Produktionsstufe 0 (Länge der Planungsperiode)
$PS(i)$	Nummer der Produktionsstufe, auf der das Produkt i gefertigt wird
$r^{(j)}$	Losgröße des in der Zelle j hergestellten Produktes j
$r_i^{(j)}$	Losgröße des in der Zelle j hergestellten Produktes i
$r_{E,min}^{(j)}$	Losgröße $r^{(j)}$, die den Staffelpbestand $E^{(s)}$ im System minimiert
$r_{eff,i}^{(j)}$	durchschnittliche Bearbeitungslosgröße eines Produktes i in einer Zelle j
$\vec{r}^{(j)}$	Losgrößenvektor aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\vec{r}_0^{(j)}$	Arbeitspunktvektor der Losgrößen aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\Delta\vec{r}^{(j)}$	Schrittweitenvektor zur Erhöhung des Parametervektors $\vec{r}^{(j)}$
$r_{0,i}^{(j)}$	i -tes auf das Produkt i bezogenes Element des Arbeitspunktvektors $\vec{r}_0^{(j)}$
$\Delta r_i^{(j)}$	auf das Produkt i bezogenes Element des Schrittweitenvektors $\Delta\vec{r}^{(j)}$
$r_{opt}^{(j)}$	Losgröße $r^{(j)}$, die den Lieferrückstand $B^{(0)}$ im Endproduktlager minimiert
$r_{stab,i}^{(j)}$	die kleinstmögliche Losgröße $r^{(j)}$, bei der ein System stabil bleibt
$r_{stab,u}^{(j)}$	die größtmögliche Losgröße $r^{(j)}$, bei der ein System stabil bleibt
R	Bereich der reellen Zahlen größer oder gleich Null
$R^{(j)}(t)$	Anzahl der an die Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j freigegebenen Material Tags des Produktes j im Zeitraum $(0, t)$
$R_i^{(j)}(0, t)$	Anzahl der an die Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j freigegebenen Material Tags des Produktes i im Zeitraum $(0, t)$
$R_B^{(j)}(0, t)$	Anzahl der von der Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j übermittelten Material Tags des Produktes j im Zeitraum $(0, t)$

$R_{B,i}^{(j)}(0, t)$	Anzahl der von der Losbildungsinstanz zwischen Lager $j + 1$ und Zelle j übermittelten Material Tags des Produktes i im Zeitraum $(0, t)$
$\rho^{(j)}$	bearbeitungsbedingte Auslastung
s	Index der lieferantenseitigen Produktionsstufe
$s_{Dev, ch}$	Standardabweichung der prozentualen Abweichung des Staffelbestandes einer Optimierungssimulation von der konvexen Hülle einer Vergleichssimulation
$S^{(j)}$	mittlere Bedienzeit des in der Zelle j hergestellten Produktes j
$S_i^{(j)}$	mittlere Bedienzeit des in der Zelle j hergestellten Produktes i
$SL^{(j)}$	Servicegrad des in der Zelle j gefertigten Produktes j
$SU^{(j)}$	Rüstzeit, die beim Rüsten einer Zelle j auf das Produkt j auftritt
$SU_i^{(j)}$	Rüstzeit, die beim Rüsten einer Zelle j auf das Produkt i auftritt
t_b	Bearbeitungszeit eines Loses
t_e	Ende der Betrachtungsperiode
$t_{OT,m}$	Ankunftszeitpunkt der Order Tags in der m -ten Planungsperiode bei Periodisierung bzw. Ankunftszeitpunkt des m -ten Order Tags
$t_{RT,m}$	Ankunftszeitpunkt des m -ten Requisition Tags
t_s	Beginn der Betrachtungsperiode
$\tau^{(j)}$	Vorlaufzeitverschiebung in Zelle j , Summe der Plandurchlaufzeiten des upstream gelegenen Teilsystems $\tau^{(j)} = \sum_{i=j}^s l^{(i)}$
$\bar{\tau}^{(j)}$	mittlerer Vorlaufzeitverschiebung des in der Zelle j gefertigten Produktes j
$\tau_i^{(j)}$	Zeitverzögerung zwischen der Generierung eines Order Tag und der Generierung des korrespondierenden Requisition Tag für das im Lager j bevorratete Produkt i (Zeitpuffer)
$\vec{\tau}^{(j)}$	Vektor mit den Zeitpuffern aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\vec{\tau}_0^{(j)}$	Arbeitspunktvektor mit den Zeitpuffern aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\Delta \vec{\tau}^{(j)}$	Schrittweitenvektor zur Erhöhung des Parametervektors $\vec{\tau}^{(j)}$
$\tau_{0,i}^{(j)}$	i -tes auf das Produkt i bezogenes Element des Arbeitspunktvektors $\vec{\tau}_0^{(j)}$
$\Delta \tau_i^{(j)}$	auf das Produkt i bezogene Element des Schrittweitenvektors $\Delta \vec{\tau}^{(j)}$
$\tau_*^{(j)}$	das kleinstmögliche $\tau^{(j)}$, ab dem $B^{(j)}$ den Wert 0 annimmt
$\tau_{stab}^{(j)}$	das größtmögliche $\tau^{(j)}$, für welches ein System stabil bleibt
$U^{(j)}$	mittlere Kapazitätsauslastung der Zelle j
$W^{(j)}(t)$	Bestand sich zum Zeitpunkt t in Bearbeitung befindlicher oder zur Bearbeitung freigegebenen Aufträge in Zelle j (Werkstattbestand)
$W_i^{(j)}(t)$	Anzahl der Material Tags des Produktes i , die sich zum Zeitpunkt t in der Zelle j befinden und die entweder auf eine Weiterbearbeitung warten oder im Moment bearbeitet werden
$\widehat{W}^{(j)}(t)$	Anzahl aller Material Tags, die sich zum Zeitpunkt t in der Zelle j befinden und die entweder auf eine Weiterbearbeitung warten oder im Moment bearbeitet werden

x_0	Ausprägung eines Parameters Par_i , z. B. Minimum oder Maximum, welche den Bezugspunkt bei der Ermittlung des normierten gewichteten Staffelnbestandes $\tilde{E}_{norm}^{(s)}$ darstellt
$z^{(j)}$	durch einen Mengepuffer induzierter Sollagerbestand des Produktes j im Lager j
$\bar{z}^{(j)}$	mittlerer Sollagerbestand des in der Zelle j gefertigten Produktes j
$z_i^{(j)}$	durch einen Mengepuffer induzierter Sollbestand des Produktes i im Lager j
$\bar{z}^{(j)}$	gesamter durch einen Mengepuffer induzierter Sollbestand in der Produktionsstufe j
$\bar{\bar{z}}^{(j)}$	mittlerer aggregierter Sollagerbestand aller in der Zelle j gefertigten Produkte j
$\bar{z}^{(j)}$	Vektor mit den Mengepuffern aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\bar{z}_0^{(j)}$	Arbeitspunktvektor mit den Mengepuffern aller in der Zelle j produzierten Produkte $i \in P^{(j)}$
$\Delta \bar{z}^{(j)}$	Schrittweitenvektor zur Erhöhung des Parametervektors $\bar{z}^{(j)}$
$z_{0,i}^{(j)}$	i -tes auf das Produkt i bezogenes Element des Arbeitspunktvektors $\bar{z}_0^{(j)}$
$\Delta z_i^{(j)}$	auf das Produkt i bezogenes Element des Schrittweitenvektors $\Delta \bar{z}^{(j)}$
$z_*^{(j)}$	das kleinstmögliche $z^{(j)}$, ab dem $B^{(j)}$ den Wert 0 annimmt
$Z^{(j)}(t)$	Anzahl der zum Zeitpunkt t im Lager j bevorrateten Material Tags des Produktes j (Lagerbestand, Store Inventory)
$Z_i^{(j)}(t)$	Anzahl der zum Zeitpunkt t im Lager j bevorrateten Material Tags des Produktes i
$\bar{Z}^{(j)}(t)$	Anzahl aller zum Zeitpunkt t auf der Produktionsstufe j bevorrateten Material Tags
$\zeta^{(j)}$	relative Wertschöpfung der Produktionsstufe j