

# **Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten**

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte  
Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Florian Kienzle  
geboren am 18. August 1981 in Pforzheim  
eingereicht am 06. Januar 2011

Gutachter: Prof. Dr.- Ing. Egon Müller  
Prof. Dr.- Ing. Bernd Scholz-Reiter

Chemnitz, den 15. Dezember 2011

# **Bibliographische Angaben und Referat**

Kienzle, Florian

## **Thema**

Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Chemnitz, 06. Januar 2011

104 Seiten, 56 Abbildungen, 19 Tabellen, 367 Literaturzitate

## **Referat**

An die Musterfertigung von Systemlieferanten stellt sich die besondere Anforderung, Prototypen verschiedener Erzeugnisse, in vielfältigen Kundenvarianten, in jeweils unterschiedlichen Produktreifegraden, parallel zu fertigen. Daraus resultiert eine spezifische Variabilitätsausprägung der Produktionsplanungsparameter, die zu einer hohen Komplexität und Turbulenz in der Ablaufsteuerung einer Musterfertigung führt. Infolgedessen gilt der Planparametervariabilitätsfall Musterfertigung, sowohl in der Theorie als auch in der betrieblichen Praxis, als ein bislang ungelöstes Steuerungsproblem, welches ein hohes Verbesserungspotenzial aufweist.

Die vorliegende Arbeit analysiert und beleuchtet diesen Problemfall im Rahmen einer vergleichenden Fallstudienuntersuchung. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Konzept zur Steuerung einer Musterfertigung bei Systemlieferanten entwickelt und in seinem Anwendungszusammenhang evaluiert.

## **Schlagworte**

Fertigungssteuerung, Fertigungssteuerungsverfahren, Kanban, Musterfertigung, Werkstattfertigung, Prototyp, Fallstudie, Variabilität, Simulation, Systemlieferant

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH im Musterbau des Werkes Stuttgart-Feuerbach in Zusammenarbeit mit der Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Chemnitz. Bei allen Beteiligten, die zu ihrem Gelingen beigetragen haben, möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Egon Müller, Leiter des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme und Inhaber der Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb der TU Chemnitz für die exzellente Betreuung meines Promotionsprojekts. Professor Müller war zu jeder Zeit ansprechbar und hat durch seine wohlwollende Förderung und fachliche Anleitung das Fundament dieser Arbeit gelegt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter, geschäftsführender Institutsleiter des Bremer Instituts für Produktion und Logistik und Leiter des Forschungsbereichs Intelligente Produktions- und Logistiksysteme sowie Leiter des Fachgebiets Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme der Universität Bremen, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die eingehende Durchsicht der Dissertation.

Bei der Robert Bosch GmbH möchte ich mich für die umfangreiche Förderung meines Promotionsprojekts bedanken. Die hervorragende Betreuung seitens der Herren Prof. Dr.-Ing. Claas-Christian Wuttke, Dr.-Ing. Wolfram von Hülsen und Dr.-Ing. Wolfgang Kraft haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Des Weiteren danke ich meinen ehemaligen Kollegen im Musterbau des Werkes Stuttgart-Feuerbach, meinen studentischen Mitarbeitern, meinen Mitdoktoranden des Bosch Promotionsprogramms und des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme sowie den Mitarbeitern der Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb für ihre Unterstützung und die zahlreichen wertvollen Anregungen und Ratschläge. Insbesondere den Herren Prof. Dr. rer. soc. oec. Rainer Wunderlich, Dr.-Ing. Ralph Riedel und Dr.-Ing. Alexander Nachtwey möchte ich für ihre Hilfsbereitschaft und ihr Interesse danken, mit denen sie mich über meine komplette Promotionszeit hinweg begleitet haben.

Schließlich danke ich auch meiner Frau Julia, meinen Eltern, meinen Schwiegereltern, meiner Familie und meinen Freunden für ihre unermüdliche, liebevolle Anteilnahme und Unterstützung. Ihr Rückhalt ist die Grundlage meines Werdegangs.

Bietigheim-Bissingen, im Januar 2011

---

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>I</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>III</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>V</b>
<b>ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS</b>	<b>VI</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1 AUSGANGSSITUATION UND PROBLEMSTELLUNG .....	1
1.2 ZIELSETZUNG .....	2
1.3 FORSCHUNGSKONZEPTION UND AUFBAU DER ARBEIT .....	3
<b>2 STAND DES WISSENS</b>	<b>7</b>
2.1 GRUNDLAGEN DER FERTIGUNGSSTEUERUNG .....	7
2.1.1 EINORDNUNG IN DIE PRODUKTIONSPLANUNG UND -STEUERUNG .....	8
2.1.2 AUFGABEN, ZIELE UND WIRKUNGSGEFÜGE DER FERTIGUNGSSTEUERUNG .....	10
2.1.3 STEUERUNGSRELEVANTE EINFLUSSPARAMETER .....	16
2.1.4 KONFIGURATION DER FERTIGUNGSSTEUERUNG .....	19
2.1.5 STEUERUNGSANSÄTZE UND -VERFAHREN .....	20
2.1.5.1 KLASSIFIKATIONSANSÄTZE .....	22
2.1.5.2 FUNKTIONSWEISEN .....	23
2.1.6 ZWISCHENFAZIT .....	35
2.2 MUSTERFERTIGUNG BEI SYSTEMLIEFERANTEN .....	36
2.2.1 SYSTEMLIEFERANTEN DER AUTOMOBILINDUSTRIE .....	37
2.2.2 MUSTERFERTIGUNG IM PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS .....	37
2.2.3 SYSTEMISCHE STEUERUNGSPRÄMISSEN DER MUSTERFERTIGUNG .....	40
2.2.4 ZWISCHENFAZIT .....	42
<b>3 FERTIGUNGSSTEUERUNG IN DER MUSTERFERTIGUNG VON SYSTEMLIEFERANTEN</b>	<b>43</b>
3.1 PLANPARAMETERVARIABILITÄTSFALL MUSTERFERTIGUNG .....	43
3.1.1 AUSPRÄGUNGEN DER PLANPARAMETERVARIATION .....	45
3.1.1.1 MATERIALFLUSSANALYSE .....	45
3.1.1.2 ARBEITSINHALTSANALYSE .....	53
3.1.2 AUSPRÄGUNGEN DER PLANPARAMETERFLUKTUATION .....	57
3.1.2.1 BEDARFSVERLAUFSANALYSE .....	58
3.1.2.2 STÖRFaktorANALYSE .....	60
3.1.3 ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG .....	62
3.2 ABGELEITETE ANFORDERUNGEN AN EIN STEUERUNGSKONZEPT .....	62
3.3 EIGNUNG BEKANNTER STEUERUNGSVERFAHREN .....	63
3.4 KONKRETISIERUNG DES HANDLUNGSBEDARFS .....	67

<b>4</b>	<b>MUSTERFERTIGUNGSSTEUERUNG MIT DEM PUSH-KANBAN-KONZEPT</b>	<b>68</b>
4.1	KONZEPTANSATZ .....	68
4.2	KONZEPTELEMENTE .....	69
4.3	KONZEPTAUSGESTALTUNG .....	71
4.3.1	ELEMENT „ROBUSTE EINPLANUNG“ .....	71
4.3.2	ELEMENT „DEZENTRALE BESTANDSREGELUNG“ .....	73
4.3.3	ELEMENT „TERMINORIENTIERTE REIHENFOLGEPRIORISIERUNG“ .....	74
4.3.4	ELEMENT „ENGPASSORIENTIERTE KAPAZITÄTSREGELUNG“ .....	75
4.3.5	ELEMENT „VORWÄRTSVERKNÜPFTE KANBANREGELKREISE“ .....	76
4.4	KONZEPTABLAUF .....	77
4.5	KONZEPTMERKMALE UND -EINORDNUNG .....	79
4.6	KONZEPTAUSLEGUNG .....	80
4.6.1	KOMPONENTE „MENSCH“ .....	80
4.6.2	KOMPONENTE „TECHNIK“ .....	82
4.6.3	KOMPONENTE „ORGANISATION“ .....	86
4.6.4	AUSLEGUNGSRAHMENSTRUKTUR .....	87
<b>5</b>	<b>KONZEPT-EVALUATION IM ANWENDUNGSZUSAMMENHANG</b>	<b>88</b>
5.1	SIMULATIONSGESTÜTZTE KONZEPTBEWERTUNG .....	88
5.1.1	SIMULATIONSMODELL .....	89
5.1.2	ERGEBNISINTERPRETATION .....	90
5.2	FALLSTUDIENBASIERTE KONZEPTBEWERTUNG .....	97
5.2.1	KONZEPTAUSGESTALTUNG .....	98
5.2.2	ERGEBNISINTERPRETATION .....	99
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>101</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>105</b>
	<b>ANLAGEN</b>	<b>125</b>
A1	MATERIALFLUSSKNOTENSCHWERPUNKTE IM ZEITVERLAUF .....	126
A2	ARBEITSINHALTSSCHWERPUNKTE IM ZEITVERLAUF .....	132

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 1:	Zielsetzung und Beiträge der Arbeit .....	2
Abbildung 2:	Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik.....	3
Abbildung 3:	Forschungsprozess und Aufbau der Arbeit .....	6
Abbildung 4:	Einordnung der Fertigungssteuerung in die PPS [i.A.a. Schuh & Gierth/2006a] .....	9
Abbildung 5:	Durchlaufzeitanteile [i.A.a. Lödding/2008b] .....	12
Abbildung 6:	Definition der Terminabweichung [i.A.a. Lödding/2008b] .....	12
Abbildung 7:	Dilemma der Ablaufplanung [i.A.a. Nyhuis/2008] .....	13
Abbildung 8:	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm [i.A.a. Wiendahl/2008b] .....	14
Abbildung 9:	Produktionskennlinien ausgewählter logistischer Kenngrößen [i.A.a. Lödding/2008b]	14
Abbildung 10:	Erweitertes Modell der Fertigungssteuerung [i.A.a. Lödding/2008a, b].....	15
Abbildung 11:	Planparametervariabilitätstreiber des Auftrags- und Erzeugnisspektrums.....	18
Abbildung 12:	Steuerungsobjekte in einem Produktionssystem.....	21
Abbildung 13:	Modell der Fertigungsregelung .....	23
Abbildung 14:	Zentrale Leistungsregelung .....	24
Abbildung 15:	Zentrale Bestandsregelung mit einer zentralen Bestandsuntergrenze (Fall 1.1.1) .....	26
Abbildung 16:	Zentrale Bestandsregelung mit einer zentralen Bestandsobergrenze (Fall 1.2.2) .....	26
Abbildung 17:	Zentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsuntergrenzen (Fall 2.1.1) .....	27
Abbildung 18:	Zentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsobergrenzen (Fall 2.2.2) .....	28
Abbildung 19:	Dezentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsuntergrenzen (Fall 3.1.1) .....	29
Abbildung 20:	Dezentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsobergrenzen (Fall 3.2.2) .....	30
Abbildung 21:	Auftragseinlastungsverfahren im Kontext ihrer Planparametervariabilitätseignung .....	31
Abbildung 22:	Planungsunschärfe der Musterfertigung.....	36
Abbildung 23:	Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie [i.A.a. VDA/2004b] .....	38
Abbildung 24:	Musterfertigung im Produktentstehungsprozess [i.A.a. Müller et al./2009c] .....	39
Abbildung 25:	Planparametervariabilitätsfall „Musterfertigung“ .....	41
Abbildung 26:	Schematisches Auftragsnetz einer Musterfertigung bei Systemlieferanten .....	42
Abbildung 27:	Angewandte Analysemethoden zur Messung der Planparametervariabilität .....	44
Abbildung 28:	Exemplarische Auftrags-Maschinen-Matrix .....	48
Abbildung 29:	Clusteranalysen-Struktogramme der 3 Fallstudien .....	49
Abbildung 30:	Ausschnitt einer häufigkeitsgewichteten Adjazenzmatrix im Anwendungsfall .....	51
Abbildung 31:	Materialflussmatrizen (Materialflussknotenschwerpunkte) im Zeitverlauf .....	52

---

Abbildung 32: Materialflussmatrizen (Arbeitsinhaltsschwerpunkte) im Zeitverlauf.....	56
Abbildung 33: Bedarfsverläufe auf Prozessgruppenebene .....	59
Abbildung 34: Abgeleitete Anforderungen an ein Fertigungssteuerungskonzept .....	63
Abbildung 35: Problem der Zeitdistanz zentraler Einlastungsansätze .....	64
Abbildung 36: Ausgestaltungsvariante DBF-Steuerung .....	66
Abbildung 37: Ausgestaltungsvariante POLCA- und BGD-Steuerung.....	66
Abbildung 38: Verfahrensdefizit im Kontext des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung .....	67
Abbildung 39: Das Push-Kanban-Konzept .....	70
Abbildung 40: Effekt der „Dezentralen Bestandsregelung“ im Push-Kanban-Konzept .....	73
Abbildung 41: Push-Kanban-Konzeptablauf.....	77
Abbildung 42: Push-Kanban im Kontext der grundsätzlichen Planparametervariabilitätsfälle .....	79
Abbildung 43: Methodik zur Ermittlung der arbeitssystembezogenen Bestandspuffer .....	85
Abbildung 44: Rahmenstruktur zur Auslegung des Push-Kanban-Konzepts .....	87
Abbildung 45: Angewandte Evaluationsmethoden zur Bewertung des Push-Kanban-Konzepts.....	88
Abbildung 46: Push-Kanban-Softwaremodell: Fertigungsbereichsmodellebene .....	90
Abbildung 47: Simulationsergebnistableau: Fall 1.....	91
Abbildung 48: Simulationsergebnistableau: Fall 2.....	92
Abbildung 49: Simulationsergebnistableau: Fall 3.....	93
Abbildung 50: Einfluss der Terminierung auf die mittlere Auftragsdurchlaufzeit .....	94
Abbildung 51: Simulative Verbesserung der logistischen Zielerreichung durch Push-Kanban.....	96
Abbildung 52: Fallbeispiel: Werkstattlayout und Zeitkanban .....	98
Abbildung 53: Entwicklung der logistischen Zielerreichung im Fallbeispiel.....	99
Abbildung 54: Entwicklung des Standardisierungsgrads und der Transparenz im Fallbeispiel .....	100
Abbildung 55: Ergebnisblöcke der Arbeit.....	101
Abbildung 56: Zusammenfassung der Effekte des Push-Kanban-Konzepts.....	102

## TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 1:	Messmöglichkeiten der Güte einer Fallstudienuntersuchung.....	5
Tabelle 2:	Steuerungsrelevante Merkmale des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur ...	17
Tabelle 3:	Unterscheidungsmerkmale des Pull- und Push-Prinzips.....	22
Tabelle 4:	Verfahren zur bestandsorientierten Auftragseinlastung .....	25
Tabelle 5:	Ausgewählte Verfahren zur Reihenfolgebildung .....	32
Tabelle 6:	Verfahrensübersicht.....	34
Tabelle 7:	Fallstudien Datensätze .....	44
Tabelle 8:	Kooperationsgrade der drei Fallstudien im Vergleich.....	45
Tabelle 9:	Prozentuale Veränderung der Materialflussknotenschwerpunkte im Zeitverlauf .....	53
Tabelle 10:	Verteilungsmerkmale der Vorgangsvorgabezeiten auf Arbeitssystemebene.....	55
Tabelle 11:	Prozentuale Veränderung der Arbeitsinhaltsschwerpunkte im Zeitverlauf.....	57
Tabelle 12:	Mittlere, monatliche Bedarfsschwankung auf verschiedenen Aggregationsniveaus....	60
Tabelle 13:	Mittlere Änderungsquote pro Fertigungsauftrag .....	61
Tabelle 14:	Mittleres Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeit pro Fertigungsauftrag .....	61
Tabelle 15:	Kanbansignale im Überblick .....	82
Tabelle 16:	Rollen im Push-Kanban-Konzept.....	86
Tabelle 17:	Systemlastdaten .....	88
Tabelle 18:	Klassifikation von Verfahren zur bestandsorientierten Auftragseinlastung .....	103
Tabelle 19:	Bestehende Ausgestaltungsansätze zur bestandsorientierten Auftragseinlastung ...	104

## ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

---

### Allgemeine Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ALP	Auftragsfreigabe mit Linearer Programmierung
AS	Arbeitssystem
BBV	Bestellbestandsverfahren
BDE	Betriebsdatenerfassung
BGD	Bestandsgeregelte Durchflusssteuerung
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
COBACABANA	Control of Balance by Card-based Navigation
CONWIP	Constant Work in Process
DBF	Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDD	Earliest Due Date
FIFO	First in First out
FSZ	Fortschrittszahlen
GPOLCA	Generic POLCA
LMKS	Leistungsmaximierende Kapazitätssteuerung
LSK	Least Slack
MES	Manufacturing Execution System
MRP	Material Resource Planning
ODD	Earliest Operation Due Date
POLCA	Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorisation
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio-Frequency Identification
SAPCO	Segmentierte adaptive Fertigungssteuerung
SOP	Start of Production
SPT	Shortest Processing Time
TFS	Taktorientierte Fertigungssteuerung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WLC	Workload Control
XWINQ	Extended Work in Next Queue

## Allgemeine Merkmale und Dimensionsangaben

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha, \beta$	Koeffizienten
BKT	Betriebskalendertag
$i, j, p, q$	Allgemeine Laufvariablen
$m$	Mittelwert einer Kenngröße
MAX	Maximalwert
Min.	Minuten
MIN	Minimalwert
Stck.	Stück
Std.	Stunden
$V_i$	Freie Variable

## Formelzeichen

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung [Einheit]</b>
$a$	Eigenschaft sowohl bei Objekt <sub>i</sub> als auch bei Objekt <sub>j</sub> ; vorhanden
AB	Abgangsmenge [Vorgabestunden]
AVG	Arbeitsvorgang
$b$	Eigenschaft bei Objekt <sub>i</sub> ; nicht vorhanden; bei Objekt <sub>j</sub> ; vorhanden
$b_i$	Regressionsparameter
$B_m$	Mittlerer Bestand [Vorgabestunden]
$c$	Eigenschaft bei Objekt <sub>i</sub> ; vorhanden; bei Objekt <sub>j</sub> ; nicht vorhanden
$d_{ij}$	Distanz zwischen den Objekten $i$ und $j$
$d_{pi}$	Distanz des $p$ -ten Clusters zu Cluster $i$
$d_{qi}$	Distanz des $q$ -ten Clusters zu Cluster $i$
$d_{qi}^{neu}$	Neue Distanz nach der Fusion einer Gruppe $q$ mit einer Gruppe $p$
FB	Bestandsfläche [Vorgabestunden*BKT]
K	Kooperationsgrad
$K_{80}$	Konzentrationsmaß aller Materialflussschwerpunkte [%]
$L_m$	Mittlere Leistung [Vorgabestunden/BKT]
M	Anzahl aller Maschinen
MFK	Anzahl aller Materialflussknotenpunkte
$mfk_{80}$	Anzahl der Materialflussknotenpunkte, welche die meisten Materialflusskontakte aufweisen und kumuliert 80% aller Materialflusskontakte ausmachen

---

$m_i$	Anzahl der Maschinen mit einer Materialflussbeziehung zu Maschine $i$
$N$	Vorgangszahl
$n$	Anzahl aller Merkmalsausprägungen einer Beobachtungsreihe
$P$	Untersuchungszeitraum [BKT]
$R_m$	Mittlere Reichweite [BKT]
$S_{ij}$	Ähnlichkeit zwischen den Objekten $i$ und $j$
$\sigma$	Standardabweichung
$V$	Verfügbarkeit [Std./BKT]
TAA	Terminabweichung Abgang [Std.]
$TAA_m / \emptyset$ -TAA	Mittlere Terminabweichung [Std.]
$TAA_s / \sigma$ -TAA	Standardabweichung der Terminabweichung [Std.]
TAB	Bearbeitungsbeginn Auftrag [BKT]
TAE	Auftragsendtermin [BKT]
TAF	Auftragsfreigabetermin [BKT]
TAR	Terminabweichung relativ [Std.]
TAZ	Terminabweichung Zugang [Std.]
TBE	Vorgangsendtermin ( $n$ -ter) [BKT]
TRA	Rüstanfang [BKT]
$v$	Variationskoeffizient
$X_i$	Kovariable
$x_i$	Merkmalsausprägung einer Beobachtungsreihe
$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel
$Y$	Schätzung der abhängigen Variablen
ZAU	Vorgangsvorgabezeit [Std.]
$ZAU_m$	Mittlere Vorgangsvorgabezeit [Std.]
$ZAU_s$	Standardabweichung der Vorgangsvorgabezeit [Std.]
$ZAU_v$	Variationskoeffizient der Vorgangsvorgabezeit
ZDA	Auftragsdurchlaufzeit [Std.]
$ZDA_m / \emptyset$ -ZDA	Mittlere Auftragsdurchlaufzeit [Std.]
$ZDA_s / \sigma$ -ZDA	Standardabweichung der Auftragsdurchlaufzeit [Std.]
ZDF	Vorgangsdurchführungszeit [Std.]
ZDL	Vorgangsdurchlaufzeit [Std.]
ZFA	Auftragsdurchführungszeit [Std.]
ZUE	Vorgangsübergangszeit [Std.]

# 1 EINLEITUNG

---

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die globale Automobilindustrie befindet sich in einer Phase des Wandels. Megatrends, wie die Veränderung des Energiemix sowie die zunehmende Segmentierung der globalen Automobilmärkte, führen zu einer tief greifenden technologischen Neuausrichtung der gesamten Branche. Dadurch kommt es sowohl zu einer horizontalen als auch zu einer vertikalen Konsolidierung der automobilen Wertschöpfungs pyramid e. In deren Folge wird auf Zulieferebene ein Großteil der Wertschöpfung durch wenige große Zulieferer gebündelt, die als sogenannte Systemlieferanten ganze Funktionsbereiche der Automobilherstellung bedienen (Becker 2007, Fuß 2008, Dannenberg et al. 2009, Herberg et al. 2009, Wallentowitz et al. 2009, Winterhoff et al. 2009).

Solche Systemlieferanten sind im Zuge der beschriebenen Entwicklung mit einer wachsenden Produkt- und Kundendiversifizierung konfrontiert. Auf diese reagieren sie mit dem Einsatz von Produktplattformstrategien. Infolgedessen fokussiert sich die Produktentwicklung von Systemlieferanten immer mehr auf einzelne umfangreiche Systemplattformen, deren Produktentstehungsprozess dadurch zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor wird (Kurek 2004, Hüttenrauch & Baum 2008).

Allerdings zeichnet sich dieser Produktentstehungsprozess durch eine wesentliche Besonderheit aus. Angesichts der Vielzahl unterschiedlicher Kunden einer Systemplattform muss die Produktentstehung mit einer Vielfalt an verschiedenen Kundenbedürfnissen synchronisiert werden. Dadurch entsteht ein beträchtlicher technologischer Abstimmungsaufwand, der zu einem hohen Prototypenbedarf und damit zu einer besonderen Problemstellung in der betrieblichen Funktionseinheit Musterfertigung von Systemlieferanten führt (Risse 2003, Baumann 2008).

So stellt sich an eine Musterfertigung bei Systemlieferanten die Anforderung, Prototypen verschiedener Erzeugnisse, in vielfältigen Kundenvarianten, in jeweils unterschiedlichen Produktreifegraden, parallel zu fertigen. Die damit einhergehende Variabilitätsausprägung der zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen führt zu einer hohen Komplexität und Turbulenz im Produktionsablauf einer Musterfertigung. Durch diese verkompliziert sich die Ausgestaltung der Musterfertigungssteuerung erheblich, sodass sie in der betrieblichen Praxis als ein systemischer Steuerungsproblemfall gilt, dem ein hohes Verbesserungspotenzial zugeschrieben wird (Kienzle 2008, Müller et al. 2009c).

Trotz dieses bekannten Optimierungspotenzials existieren bislang keine geeigneten Lösungsalternativen zur Steuerung einer Musterfertigung (Müller et al. 2009c). Zwar wird die hohe zeitliche Relevanz der Musterfertigung für den Produktentstehungsprozess von vielen Autoren immer wieder in unterschiedlichen Zusammenhängen betont (Eversheim 1996, Kuhn 2002, Braess & Seiffert 2005, Stirzel & Hüntelmann 2006, Westkämper 2006), jedoch wurden die zugrunde liegenden Wirkungszusammenhänge des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung bis dato noch nicht näher untersucht. Demzufolge bietet die Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten ein vielversprechendes Untersuchungs- und Verbesserungspotenzial mit einer hohen Relevanz für die betriebliche Praxis (Kienzle 2008, Müller et al. 2009c).

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Untersuchung der zugrunde liegenden Wirkungszusammenhänge des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen Anforderungen an die Ausgestaltung der Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten abgeleitet werden. Aufbauend auf den festgestellten Anforderungen wird eine Lösungsalternative in Form eines ganzheitlichen Fertigungssteuerungskonzepts für eine Musterfertigung bei Systemlieferanten entwickelt und in seinem Anwendungszusammenhang evaluiert.

Die folgende Abbildung fasst diese wesentlichen Forschungsziele der vorliegenden Arbeit zusammen.

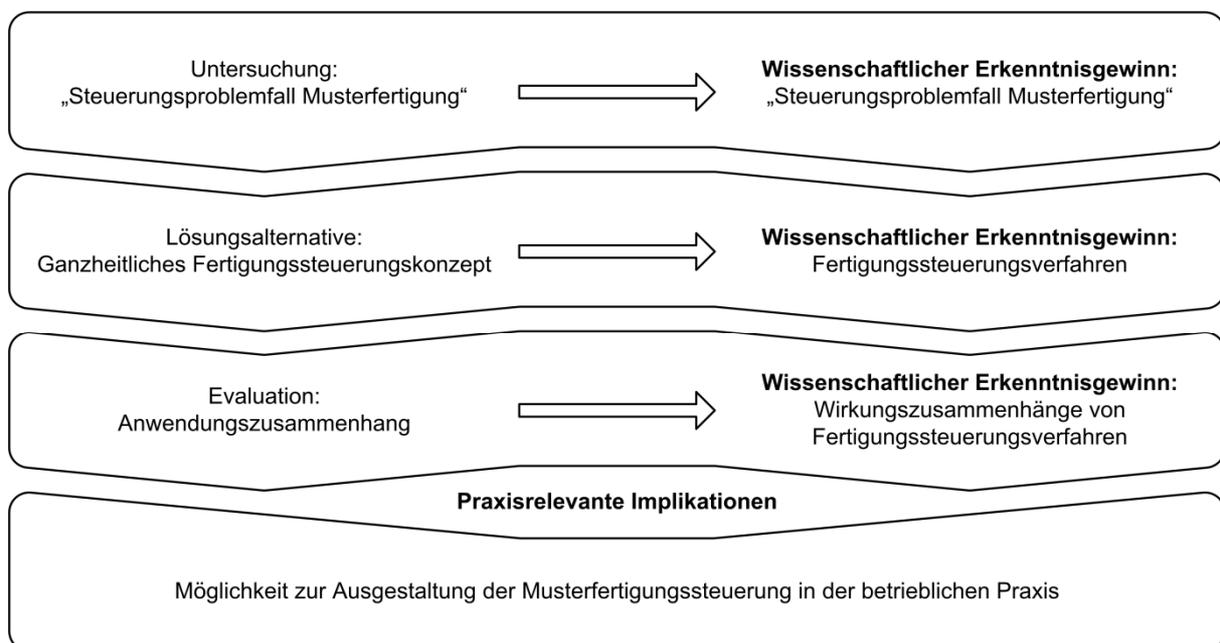


Abbildung 1: Zielsetzung und Beiträge der Arbeit

Mit der Realisierung der in Abbildung 1 dargestellten Forschungsziele leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Erweiterung des wissenschaftlichen Erkenntnisstands bezüglich des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung und den daraus resultierenden Anforderungen an die Musterfertigungssteuerung. Darüber hinaus wird durch die Entwicklung eines neuartigen Fertigungssteuerungskonzepts der Erkenntnisstand in Bezug auf Fertigungssteuerungsverfahren der Produktionslogistik erweitert. Außerdem werden durch die Evaluation des Konzepts im Anwendungszusammenhang zum einen die Wirkungszusammenhänge des Konzepts wissenschaftlich eingeordnet und zum anderen konkrete Hinweise zur praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens gegeben. Damit leistet die vorliegende Arbeit, neben einem Beitrag zur Erweiterung des wissenschaftlichen Erkenntnisstands im Forschungsfeld der Produktionswissenschaft, auch einen Beitrag zur Lösung einer konkreten Problemstellung der betrieblichen Praxis.

### 1.3 Forschungskonzeption und Aufbau der Arbeit

#### *Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik*

Aufgrund der Zielsetzung, einen theoretischen und einen praktischen Beitrag zu leisten, kann die vorliegende Arbeit in den Bereich der sogenannten angewandten Forschung eingeordnet werden (Albers 2007). Angewandte Forschung beziehungsweise Realwissenschaft hat zum Ziel, Menschen konstruktiv bei der Gestaltung und Auswahl von Handlungsalternativen zu unterstützen und dadurch praxisrelevantes Wissen zu generieren. Im Gegensatz zu den Formalwissenschaften, welche ausschließlich die Konstruktion abstrakter Zeichensysteme zum Ziel haben, beziehen sich angewandte Wissenschaften auf die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte (Ulrich & Hill 1976).

Im Falle der vorliegenden Arbeit handelt es sich dabei um die konkrete Gestaltung eines soziotechnischen Systems. Aus diesem Grund ist das Forschungsvorhaben nach der Definition von CHMIELEWICZ grundsätzlich in den Teilbereich der Handlungswissenschaften einzuordnen. Dabei befindet es sich in dem in Abbildung 2 (i.A.a. Chmielewicz 1970, Ulrich & Hill 1976) dargestellten Klassifizierungsschema zwischen den Natur- und den Sozialwissenschaften.

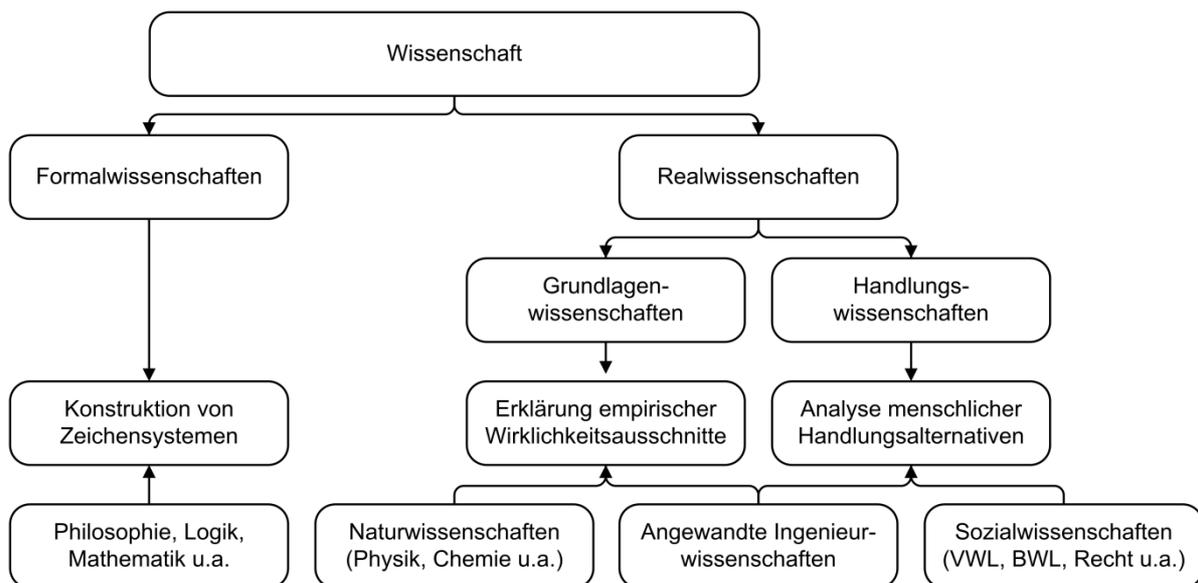


Abbildung 2: *Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik*

#### **Wissenschaftstheoretisches Selbstverständnis der Arbeit**

Die in dieser Forschungsarbeit gewonnenen Erkenntnisse sind grundsätzlich im Verständnis der von KARL POPPER mitbegründeten wissenschaftstheoretischen Denkrichtung des Kritischen Rationalismus zu interpretieren. Dieser postuliert, dass Erkenntnisfortschritt ein iterativer Prozess ist, der einer Erhöhung des Wahrheitswerts beziehungsweise der Wahrheitsnähe dient. Folglich ist Forschung eine schrittweise Annäherung an die Wirklichkeit. Dabei kann eine Aussage oder Theorie niemals als wahr bezeichnet werden, da es sich stets um hypothetisches Wissen beziehungsweise vermutendes Wissen handelt. Es ist jedoch sinnvoll, eine Theorie als wahr zu akzeptieren, solange sie kritikoffen vertreten wird und gegen ihre Haltbarkeit bislang noch keine neuen Argumente gefunden wurden.

Den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess beschreibt POPPER als eine nie endende iterative Falsifikation von Theorien respektive Hypothesen, die durch folgende Merkmale gekennzeichnet sind:

- Hypothesen sind Erklärungsversuche für Probleme der Wirklichkeit.
- Hypothesen sind Reduktionen der Wirklichkeit.
- Ausgangspunkte für Hypothesen können sowohl Probleme der Wirklichkeit, bestehende Hypothesen oder auch verworfene Hypothesen sein.
- Hypothesen müssen falsifizierbar sein.
- Die Erklärungskraft von Hypothesen steigt mit der Zahl ihrer potenziellen Falsifikatoren.

Das Ziel des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses besteht nach POPPER primär darin, von Problemen ausgehend Hypothesen zu bilden, um durch deren Falsifikation zu neuen Hypothesen zu gelangen. Dabei existiert kein vorgeschriebener „wahrer“ Erkenntnisweg, da es sich bei allem Wissen stets um eine Annäherung an die Wirklichkeit in Form einer Hypothese handelt (Popper 1994).

Dementsprechend stellen auch alle in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse Hypothesen dar, deren Ausgangspunkt ein konkretes Problem der Praxis, nämlich das festgestellte systemische Steuerungsproblem der Musterfertigung bei Systemlieferanten bildet. Der dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprozess stellt eine von vielen Möglichkeiten dar, um zu Erkenntnissen bezüglich der Problemstellung zu gelangen. Auch die gefundenen Forschungsergebnisse besitzen keinen Anspruch auf absolute Wahrheit, sondern sind als erweiterte Annäherung an die Wirklichkeit zu verstehen. Diese Annäherung gilt es weiterhin zu falsifizieren, zu ergänzen und zu verbessern.

### ***Forschungsmethodik der Arbeit***

Als Forschungsmethodik dienen der vorliegenden Arbeit Fallstudien aus der betrieblichen Praxis. Die Forschungsmethodik Fallstudie besitzt den Vorteil, durch ihre begrenzte Anzahl an Fällen auch komplizierte Zusammenhänge erfassen und im Kontext interpretieren zu können (Lamnek 2005, Yin 2008). Sie eignet sich dadurch insbesondere zur Untersuchung neuer komplexer Forschungsthemen und -fragen (Albers 2007, Yin 2008). Infolgedessen ist sie zu einer der wichtigsten Forschungsmethoden in der Produktionswissenschaft geworden, da in einem soziotechnischen Produktionssystem (Böge 2009) eine Vielzahl komplexer Fragestellungen auftreten (Voss et al. 2002).

Die Wahl der Datenerhebungsmethoden ist bei einer Fallstudie prinzipiell offen (Albers 2007). Neben qualitativen Methoden wie der Interviewtechnik lassen Fallstudien auch einen komparativen statistischen Vergleich von Eigenschaften mehrerer Untersuchungsobjekte zu (Meyer & Kittel-Wegner 2002, Voss et al. 2002, Lamnek 2005, Yin 2008). Gütekriterien der Fallstudienenergebnisse sind dabei die Konstruktvalidität, die interne Validität, die Reliabilität sowie die Objektivität. Eine Auswahl verschiedener Möglichkeiten zur Messung dieser Gütekriterien zeigt die folgende Übersicht (i.A.a. Albers 2007).

Gütekriterium einer Fallstudienuntersuchung	Messmöglichkeit
Konstruktvalidität	Methodentriangulation Literaturabgleich
Interne Validität	Sich gegenseitig stützende Befunde Argumentative Validierung (Argumentationskette)
Reliabilität	Exakte Dokumentation und Durchführung
Objektivität	Standardisierung der Datenerhebung und -auswertung

Tabelle 1: Messmöglichkeiten der Güte einer Fallstudienuntersuchung

Für eine ausreichende Generalisierbarkeit der Ergebnisse einer vergleichenden Fallstudienuntersuchung sollten mindestens drei Fallbeispiele miteinander verglichen werden (Voss et al. 2002). Ansonsten sind keine weiteren Verallgemeinerungskriterien, wie zum Beispiel die Errechnung der Stichprobenrepräsentativität notwendig (Lamnek 2005, Yin 2008).

Den hier aufgeführten Anforderungen an eine Fallstudienuntersuchung wird die vorliegende Arbeit gerecht. Es werden sowohl bei der Untersuchung der zugrunde liegenden Wirkungszusammenhänge des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung als auch bei der Evaluation der entwickelten Lösungsalternative im Anwendungszusammenhang drei Fallstudien miteinander qualitativ und quantitativ verglichen. Dabei kommt eine umfassende Triangulation bewährter Methoden aus der Produktionswissenschaft als Untersuchungskonzeption zum Einsatz. Die argumentative Validierung der gefundenen Ergebnisse erfolgt im Abgleich mit dem aktuellen Stand des Wissens.

Allerdings ist zu beachten, dass Fallstudien im Allgemeinen wie auch in der vorliegenden Arbeit nie den Anspruch auf quantitative Hypothesen-Verifikation besitzen. Sie erlauben im Gegensatz zu quantitativen Methoden keinen statistischen Induktionsschluss auf eine Grundgesamtheit (Albers 2007). Vielmehr bezieht sich die Generalisierbarkeit der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse im Sinne der Leitidee des Kritischen Rationalismus, dass man nicht mehr wissen kann als man weiß (Popper 1994), allein auf die theoretische Proposition, dass der Steuerungsproblemfall Musterfertigung bei Systemlieferanten in seinem festgestellten Wirkungszusammenhang existiert.

### **Forschungsprozess der Arbeit**

Aufgrund des Forschungsziels der vorliegenden Arbeit, Menschen konstruktiv bei der Gestaltung und Auswahl von Handlungsalternativen zu unterstützen und dadurch praxisrelevantes Wissen zu generieren, orientiert sich die Arbeit in ihrer Durchführung an ULRICHs „Strategie der angewandten Forschung“ (Ulrich 1984). Dieser im Folgenden dargestellte Prozess ermöglicht eine einfache, standardisierte Herangehensweise an eine praxisrelevante Forschungsfrage. Dabei verbleibt genügend Ausgestaltungsfreiraum für ein individuelles Forschungsvorhaben. Die sechs Stufen des Prozesses und ihre Ausgestaltung im Fall der vorliegenden Arbeit sind im Folgenden dargestellt.

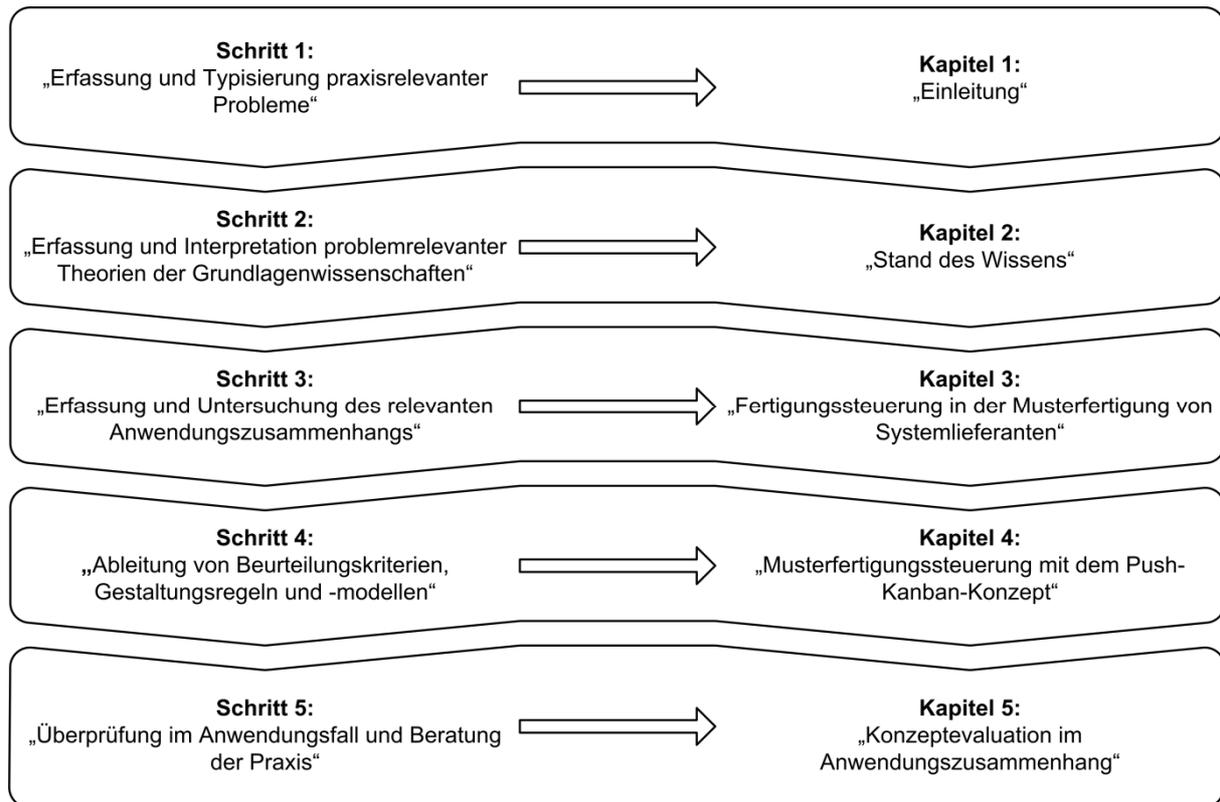


Abbildung 3: Forschungsprozess und Aufbau der Arbeit

Der Prozess und somit auch der Aufbau der Arbeit beginnen mit der „Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme“. Dazu sind im ersten Kapitel die Problemstellung und die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Darauf aufbauend werden im zweiten Prozessschritt die „problemrelevanten Theorien der Grundlagenwissenschaften“ erfasst und interpretiert. Zu diesem Zweck ist im zweiten Kapitel der Arbeit der relevante Erkenntnisstand zu den Themen „Fertigungssteuerung“ und „Musterfertigung bei Systemlieferanten“ hinsichtlich der Problemstellung der Arbeit dargestellt.

Der dritte Prozessschritt des Forschungsprozesses sieht die „Erfassung und Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs“ vor. Dementsprechend werden im dritten Kapitel der Arbeit die Ergebnisse einer fallstudienbasierten Untersuchung der systemischen Steuerungsprämissen einer Musterfertigung erläutert. An diesen wird der Anforderungserfüllungsgrad bestehender Ansätze gespiegelt und daraus der Handlungsbedarf für eine Lösungsalternative abgeleitet.

Diese Lösungsalternative wird im Rahmen des vierten Prozessschrittes der Arbeit, der „Ableitung von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und -modellen“ entwickelt. Dazu stellt die Arbeit im vierten Kapitel ein neuartiges Fertigungssteuerungskonzept für eine Musterfertigung bei Systemlieferanten vor.

Dem fünften Prozessschritt, der „Überprüfung im Anwendungsfall und Beratung der Praxis“, wird im fünften Kapitel mit der beschriebenen Konzeptevaluation im Anwendungszusammenhang entsprochen.

Den Abschluss der Arbeit bilden schließlich die Zusammenfassung und der Ausblick in Kapitel Sechs.

## 2 STAND DES WISSENS

---

Im folgenden Kapitel wird, analog zu dem vorangegangenen beschriebenen zweiten Prozessschritt des Forschungsprozesses der Arbeit, der für die Problemstellung relevante Stand des Wissens dargestellt und interpretiert. Dabei ist im ersten Teil des Kapitels das Forschungsfeld Fertigungssteuerung mit seinen bis dato bekannten Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodellen dargestellt. Darauf aufbauend wird im zweiten Teil des Kapitels die Betriebstypologie Musterfertigung im Kontext ihrer spezifischen Organisation im Produktentstehungsprozess von Systemlieferanten diskutiert. Die daraus resultierenden Steuerungsprämissen einer Musterfertigung sind am Ende des Kapitels zusammengefasst.

### 2.1 Grundlagen der Fertigungssteuerung

Das betriebliche Aufgabengebiet der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist so alt wie die Industrialisierung selbst. Schon in den Aufzeichnungen englischer Textilfabrikanten des frühen 18. Jahrhunderts finden sich erste methodische Überlegungen zur wirtschaftlichen Planung und Steuerung einer Produktion. So wird beispielsweise in dem 1832 erschienenen Werk *On the Economy of Machinery and Manufacturers* von Charles Babbage ein Verfahren zur gleichmäßigen Auslastungsverteilung unter unterschiedlichen Lastszenarien einer Produktion erwähnt (Königsberg & McKay 2010). Jedoch lassen sich in diesen frühen Aufzeichnungen noch keine Hinweise auf eine systematische organisatorische Ausgestaltung der Planungs- und Steuerungsfunktion zur damaligen Zeit finden. Erst in den Anfang des 20. Jahrhunderts publizierte Betriebsuntersuchungen von Henry L. Gantt und Frederick W. Taylor wird eine organisatorische Trennung und systematische Ausgestaltung der Funktion Arbeitsvorbereitung beschrieben. Somit kann der Beginn des 20. Jahrhunderts als Startpunkt einer funktional organisierten und systematisch ausgestalteten Produktionsplanung und -steuerung in der betrieblichen Praxis gelten (McKay 2003, Herrmann 2006).

Als wissenschaftliche Disziplin wird die Produktionsplanung und -steuerung seit Anfang der 1960er-Jahre wahrgenommen. Den Anfang markieren Untersuchungen zur Übertragbarkeit von mathematischen Modellen der Operations Research auf den Aufgabenbereich der Produktionsplanung und -steuerung (McKay 2003, Herrmann 2006, Klaus 2009). Auf diese folgt im weiteren Zeitverlauf eine Vielzahl von Forschungsarbeiten, durch welche die Planungs- und Steuerungsforschung ein breites interdisziplinäres Fundament erhält. Mittlerweile bestehen sowohl in abgegrenzten Spezialdisziplinen, wie zum Beispiel der Operations Research oder der Informationstechnologie, als auch in interdisziplinären Forschungsfeldern, wie zum Beispiel der Produktionslogistik und der Fabrikplanung, spezifische Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle zur wirtschaftlichen Planung und Steuerung einer Produktion (Eversheim & Brankamp 2006, Klaus 2009).

Dabei hat sich jedoch die Grundherausforderung der Produktionsplanung und -steuerung seit dem Beginn der Industrialisierung nicht grundlegend verändert. Noch immer stellt sich sowohl in der Forschung als auch in der betrieblichen Praxis die grundsätzliche Frage, wie der Ablauf einer Produktion im wirtschaftlichen Optimum zwischen Zeit und Kosten zu planen und zu steuern ist (Lödding 2008b).

### 2.1.1 Einordnung in die Produktionsplanung und -steuerung

Der funktionsübergreifende Aufgabenbereich der Produktionsplanung und -steuerung umfasst alle Tätigkeiten, die zur räumlichen, zeitlichen und mengenmäßigen Organisation der Material- und Informationsflüsse einer Produktion notwendig sind. Unter Produktionsplanung ist dabei die gedankliche Vorwegnahme des Produktionsablaufs durch die systematische Festlegung von Planparametern zu verstehen. In Ergänzung dazu hat die Produktionssteuerung (synonym: Fertigungssteuerung) die systematische Anpassung und Umsetzung der zuvor durch die Produktionsplanung gesetzten Planparameter zur Aufgabe (Geitner 1995, Hahn 1996, Wiendahl 1997, Schenk & Wirth 2004, Schneider et al. 2005, Schuh & Gierth 2006b, Westkämper 2006, Gienke & Kämpf 2007, Grote & Feldhusen 2007, Arnold et al. 2008, Lödding 2008b, Dangelmaier 2009).

An diesen beiden Definitionen wird sowohl das grundsätzliche Problem der Planungsunschärfe als auch die daraus resultierende Notwendigkeit der Nachsteuerung in der Produktionsplanung und -steuerung deutlich. So führt die individuell unterschiedlich ausgeprägte Dynamik von Produktionssystemen zu permanenten Veränderungen in den ursprünglichen Voraussetzungen eines Planungsszenarios. Infolgedessen verfügt jeder gesetzte Planparameterwert über eine individuell begrenzte Haltbarkeitsdauer (Schuff 1984, Strack 1986, Freitag 2005, Dickmann 2007, Dyckhoff & Spengler 2007, Arnold et al. 2008, Scholz-Reiter et al. 2008, Gierth 2009). Diese wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren bestimmt. Neben Unwägbarkeiten seitens der Beschaffungs- und Absatzmärkte, seitens der am Prozess beteiligten Menschen sowie seitens der Zuverlässigkeit der unterstützenden Tools und Methoden sind auch die instabilen und konkurrierenden Zielsetzungen in der Produktionsplanung und -steuerung für die Haltbarkeitsdauer eines Planungsszenarios bestimmend (Wiendahl 2002, Wiendahl et al. 2005, Gebhard 2009). Folglich liegt jeder Produktionsablaufplanung eine individuell ausgeprägte Planungsunschärfe zugrunde, die eine permanente Produktionssteuerung zur Durchsetzung der Planparameter notwendig macht. Mit der Produktionsplanung ist also auch immer eine nachfolgende Produktionssteuerung verbunden, genauso wie die Produktionssteuerung eine vorangehende Produktionsplanung voraussetzt (Strack 1986, Arnold et al. 2008, Lödding 2008b, Wiendahl 2008a, Dangelmaier 2009, Gebhard 2009).

Aus diesem Grund hat sich in der Produktionsplanung und -steuerung eine rollierende Anpassungsplanung auf unterschiedlich aggregierten Zeitniveaus etabliert. Die Festlegung des Primärbedarfs an herzustellenden Erzeugnissen erfolgt dabei in der Regel auf übergeordneter taktischer Ebene in langfristigen Planungszyklen. Dagegen erfolgt die Ableitung der Sekundärbedarfe an Teilen, Halbzeugen und Werkstoffen nach Mengen und Terminen auf operativer Ebene in kurzfristigen Planungszyklen. Die Fertigungssteuerung setzt schließlich die vorangehende Planung im aktuellen Produktionsgeschehen um (Letmathe 2002, Schenk & Wirth 2004, Schneider et al. 2005, Czichos & Hennecke 2008, Dangelmaier 2009, Gebhard 2009). Infolgedessen nimmt die Planungsgranularität und der damit verbundene Planungsaufwand erst mit wachsender Aktualität der Planung zu, wodurch der Änderungsaufwand innerhalb der Produktionsplanung und -steuerung minimiert wird (Arnold et al. 2008, Brackel 2009).

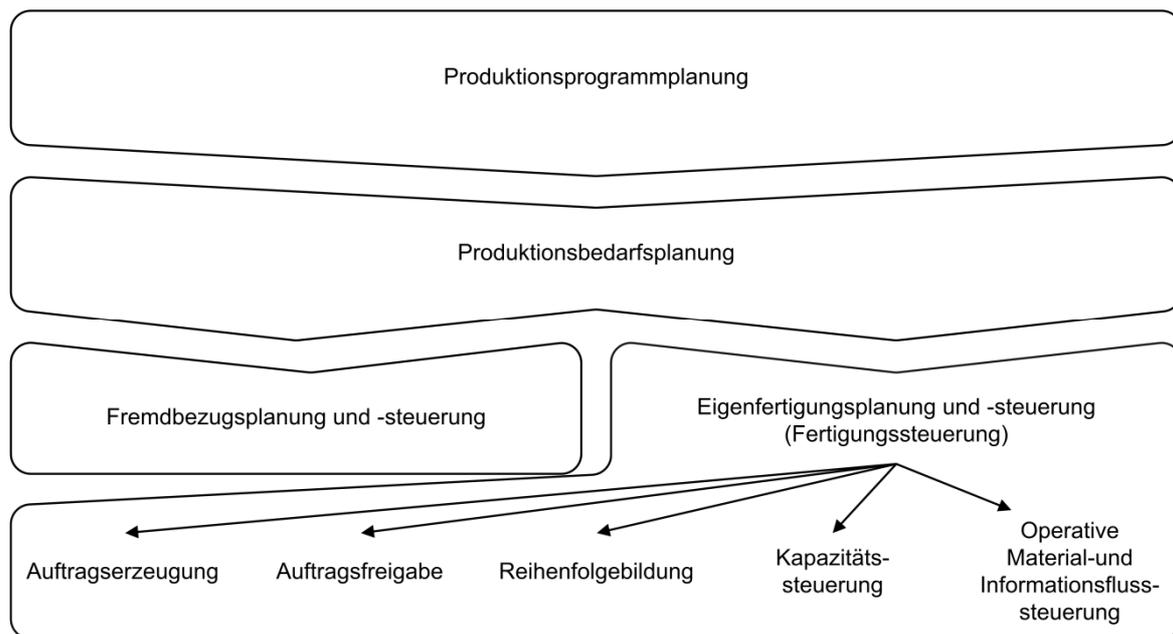


Abbildung 4: Einordnung der Fertigungssteuerung in die PPS [i.A.a. Schuh & Gierth/2006a]

Wie in Abbildung 4 (i.A.a. Schuh & Gierth 2006a) dargestellt, bildet die *Produktionsprogrammplanung* den Ausgangspunkt der Produktionsplanung und -steuerung. Sie legt entweder auftragsbezogen oder prognosegestützt die Mengen und Termine der Primärbedarfe eines Fertigungsbereichs für einen bestimmten Zeitraum fest. Je nach Wiederholhäufigkeit der Erzeugnisse pendelt sie zwischen einer langfristigen prognoseorientierten Produktionsprogrammplanung und einer kurzfristigen bedarfsorientierten Auftragseinplanung (Schuh & Roesgen 2006).

Aus den Vorgaben der Produktionsprogrammplanung leiten sich die Sekundärbedarfe im Rahmen der *Produktionsbedarfsplanung* ab. Dabei werden konkrete Mengen und Termine für die Sekundärbedarfe analog zu den Vorgaben der Produktionsprogrammplanung ermittelt. Zudem werden die Sekundärbedarfe dem Fremdbezug oder der Eigenfertigung zugeordnet (Schuh & Roesgen 2006).

Die Einplanung des Eigenfertigungsbedarfs nach Kapazitäten und Terminen in den aktuellen Produktionsablauf erfolgt im Rahmen der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* respektive *Fertigungssteuerung*. Diese verknüpft die Prozessvorgabezeiten der Arbeitsplanung und die Mengen- und Terminwünsche der vorangehenden Bedarfsplanung mit der kapazitiven Verfügbarkeit der Betriebsmittel. Daraus leitet sie konkrete Planungsvorgaben hinsichtlich der zeitlichen Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsinhalte ab. Neben dieser terminierenden Funktion ist die Fertigungssteuerung auch für die Umsetzung, Überwachung und Sicherung der festgelegten Planparameter verantwortlich. Die dabei auftretenden, unvermeidbaren Anpassungen der Planparameter an das aktuelle Produktionsgeschehen erfolgen in Abstimmung mit der vorliegenden logistischen Zielsetzung einer Fertigung. Mit der wirtschaftlichen Durchsetzung der in der Produktionsplanung festgelegten Planparameter im aktuellen Produktionsablauf ist die Fertigungssteuerung somit integraler Bestandteil der Produktionsplanung und -steuerung und trägt wesentlich zur logistischen Zielerreichung einer Produktion bei (Hackstein 1989, Wiendahl 1997, Schuh & Roesgen 2006, Arnold et al. 2008, Lödding 2008b, Wiendahl 2008b).

## 2.1.2 Aufgaben, Ziele und Wirkungsgefüge der Fertigungssteuerung

### ***Aufgaben der Fertigungssteuerung***

Aus der Grundaufgabe, der Durchsetzung des Produktionsprogramms, ergeben sich, wie in Abbildung 4 dargestellt, fünf Teilaufgaben für die Fertigungssteuerung. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Den Start der Fertigungssteuerung markiert die *Auftragserzeugung*. Synonym werden für sie auch häufig die Begrifflichkeiten *Termin- und Kapazitätsplanung*, *Produktionsplanung* oder *Feinterminierung* verwendet. Ziel der Auftragserzeugung ist es, die groben Vorgaben der vorangegangenen Planungsphasen mit der aktuell vorliegenden Kapazitätsauslastungssituation abzugleichen, um über den Fertigungsdurchlauf hinaus haltbare Planparameterwerte in Form von Eckterminen festzulegen. Hierfür kann eine Vielzahl von Optimierungsmodellen zum Einsatz kommen. Der Aufwand für die Auftragserzeugung schwankt zwischen einer komplexen Prozessfolgenderminierung im Fall einer geringen Wiederholhäufigkeit der Erzeugnisse und einer einfachen, standardisierten Bedarfsauslösung im Fall einer hohen Wiederholhäufigkeit der Erzeugnisse. In beiden Ausprägungen ist das Resultat ein Fertigungsauftrag mit Arbeitsinhaltsfolgen und Terminen (Dyckhoff & Spengler 2007, Lödding 2008b, a, Wiendahl 2008b).

Ein durch die Auftragserzeugung erstellter Fertigungsauftrag wird im Rahmen der *Auftragsfreigabe* zur Fertigung freigegeben. Die Auftragsfreigabe legt somit den Zeitpunkt fest, ab dem ein Auftrag zur Bearbeitung freigegeben ist. Der zugrunde liegende Freigabemechanismus regelt dabei entweder die Freigabe für einen gesamten Fertigungsbereich oder für ein einzelnes Arbeitssystem. Zur Ausgestaltung der Auftragsfreigabe kann auf eine Reihe von Heuristiken und Optimierungsmodellen zurückgegriffen werden, welche die Freigabe anhand unterschiedlicher Kriterien, wie zum Beispiel dem Bestand, der Leistung oder dem Rückstand regeln (Arnold et al. 2008, Lödding 2008b, Wiendahl 2008b).

Die Steuerungsaufgabe der *Reihenfolgebildung* resultiert aus dem Problem der Warteschlangen, welche die freigegebenen oder nichtfreigegebenen Aufträge vor der Gesamtfertigung oder vor einzelnen Fertigungsprozessen bilden. Diese führen in der Regel zu einer Verschlechterung der logistischen Zielerreichung, die durch eine systematische Reihenfolgenfestlegung minimiert werden kann. Zudem kann auch die Auswahl redundanter Bearbeitungsressourcen für einen einzelnen Arbeitsschritt durch eine geeignete Reihenfolgeregelung substituiert werden (Lödding 2008b, Wiendahl 2008b). Auch zur Ausgestaltung dieser Aufgabe stehen verschiedene Heuristiken und mathematische Optimierungsmodelle zur Verfügung (Teich 1998, Köbernik 1999, Fischer 2007).

Im Gegensatz zur Reihenfolgebildung hat die Teilaufgabe der *Kapazitätssteuerung* nicht die direkte Anpassung der Planparameter an den aktuellen Produktionsablauf zum Ziel. Vielmehr wird durch sie das zugrunde liegende Kapazitätsangebot einer Fertigung an die aktuelle Planungssituation angepasst. Die Kapazitätssteuerung regelt zu diesem Zweck das Kapazitätsangebot im Abgleich mit dem Kapazitätsbedarf im laufenden Betrieb. Die zu ihrer Ausgestaltung vorliegenden systematischen Ansätze werden von der vorhandenen Kapazitätsflexibilität einer Fertigung bestimmt (Arnold et al. 2008, Lödding 2008b, Wiendahl 2008b).

Im Kontext der Ausrichtung der Fertigungsstruktur auf ein gegebenes Planungsszenario ist auch die Aufgabe der *operativen Material- und Informationssteuerung* zu sehen. Sie ist für die zieloptimale Steuerung und Überwachung der Material- und Informationsflüsse zwischen den Bearbeitungsprozessen und der zentralen Steuerungsinstanz verantwortlich. Das Material- und Informationsflusssystem einer Fertigung stellt quasi die Infrastruktur dar, welche durch die operative Material- und Informationssteuerung zu betreiben ist (Köhler 1959, Schomburg 1980, Schuff 1984, Wildemann 1984, REFA 1985, Hackstein 1989, Mertins et al. 1992, Weber 1993, Jostock & Bley 1994, Schulte 1995, Röhm 1997, Vollmann et al. 1997, Haller 1999, McFarlane & Bussmann 2000, Eversheim 2002, Letmathe 2002, Teunis 2003, VDI 2004, Fischer 2005, Geraghty & Heavey 2005, Lieske 2005, Fernandes & do Carmo-Silva 2006, Wilke 2006, Pawellek 2007, Wannenwetsch 2007, Czichos & Hennecke 2008, Bornhäuser 2009, Martin 2009). Manche Autoren sprechen in diesem Zusammenhang auch von einer „Operativen Werkstattsteuerung“ (Mertins et al. 1992, Spur & Stöferle 1994, Schönsleben 2002, Weller 2002).

### **Ziele der Fertigungssteuerung**

Mit der Ausgestaltung der hier generisch beschriebenen Aufgaben nimmt die Fertigungssteuerung unmittelbaren Einfluss auf die logistischen Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Bestand und Auslastung einer Fertigung. Prinzipiell handelt es sich dabei um Zielgrößen mit einer jeweils nach innen und nach außen gerichteten Perspektive. Die nach innen gerichtete Perspektive beschreibt die Zielgröße in ihrer Bedeutung für die eigentliche Fertigung. Dagegen beschreibt die nach außen gerichtete Perspektive die Zielgröße hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kunden eines Unternehmens (Lödding 2008b). Die vier Zielgrößen sind im Folgenden in diesen beiden Perspektiven beschrieben

Die Dauer eines Kundenauftrags wird in der nach außen gerichteten Perspektive durch die *Lieferzeit* bestimmt. Diese wird als die Zeitdauer zwischen dem Auftragsingang und der Auslieferung eines Auftrags definiert. Empirische Untersuchungen zeigen, dass die Kundenbereitschaft, einen höheren Preis zu akzeptieren, direkt proportional mit der Verkürzung der Lieferzeit steigt. Die Lieferzeit ist somit ein strategischer Erfolgsfaktor für Unternehmen. Sie setzt sich aus den Bestandteilen Beschaffungszeit, Fertigungsdurchlaufzeit, Montagedurchlaufzeit und Versandzeit zusammen (Lödding 2008b).

Durch diese hohe Bedeutung der Lieferzeit ist auch der hohe Einfluss der *Auftragsdurchlaufzeit (ZDA)* als Kennzahl in der nach innen gerichteten Perspektive zu erklären, da diese direkt die mittlere Lieferzeit eines Unternehmens beeinflusst. Dabei entspricht die Auftragsdurchlaufzeit der Zeitdauer zwischen dem Einstoßzeitpunkt eines Fertigungsauftrags und dem Bearbeitungsende des letzten Arbeitsvorgangs. Wie in Abbildung 5 (i.A.a. Lödding 2008b) dargestellt, kann die Durchlaufzeit sowohl für die gesamte Prozesskette eines Auftrags (ZDA) als auch für einen einzelnen Arbeitsvorgang (ZDL) gemessen werden (VDI 2004, Arnold et al. 2008, Wiendahl 2008b).

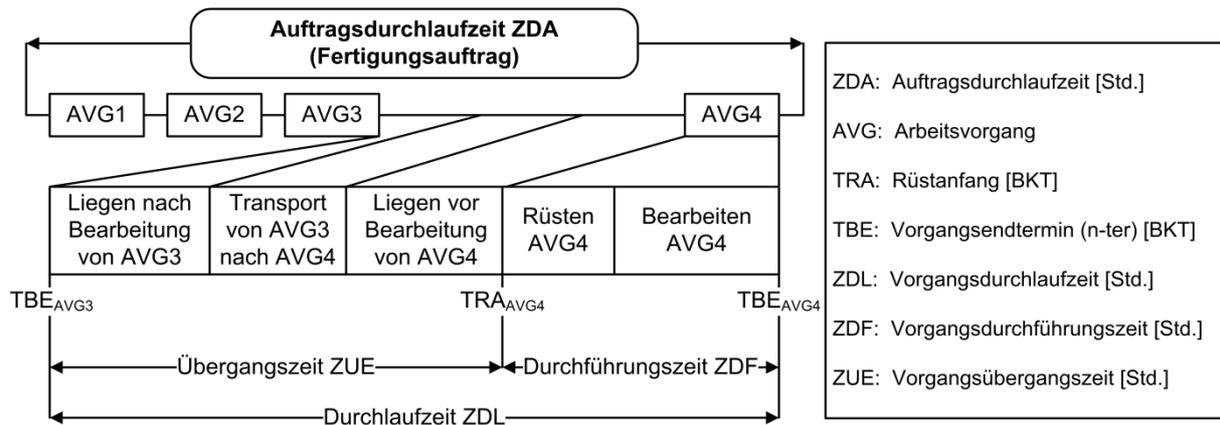


Abbildung 5: Durchlaufzeitanteile [i.A.a. Lödding/2008b]

Die Termineinhaltung eines Kundenauftrags wird in der nach außen gerichteten Perspektive durch die *Lieferterminabweichung* gemessen. Diese bildet die Differenz zwischen dem realisierten und dem ursprünglich geplanten Liefertermin. Dabei wird sie häufig in Form der sogenannten *Liefertreue* angegeben, als Prozentsatz der Aufträge, deren Lieferterminabweichung innerhalb eines vorgegebenen Toleranzfensters liegt. Ihr wird die höchste Bedeutung aller logistischen Kenngrößen für den Unternehmenserfolg beigemessen. Die Liefertreue wird durch die Teilprozesse einer Wertkette bestimmt (Lödding 2008b).

In der nach innen gerichteten Perspektive wird die Zielgröße *Terminreue* analog zur Liefertreue als Prozentsatz von Aufträgen definiert, deren *Terminabweichung (TAA)* innerhalb eines vorgegebenen Toleranzfensters liegt. Die Terminreue kann für jede Art von Prozess gemessen werden, für den ein Plan- und ein Ist-Datum, wie in Abbildung 6 (i.A.a. Lödding 2008b) dargestellt, besteht (VDI 2004, Wiendahl 2008b).

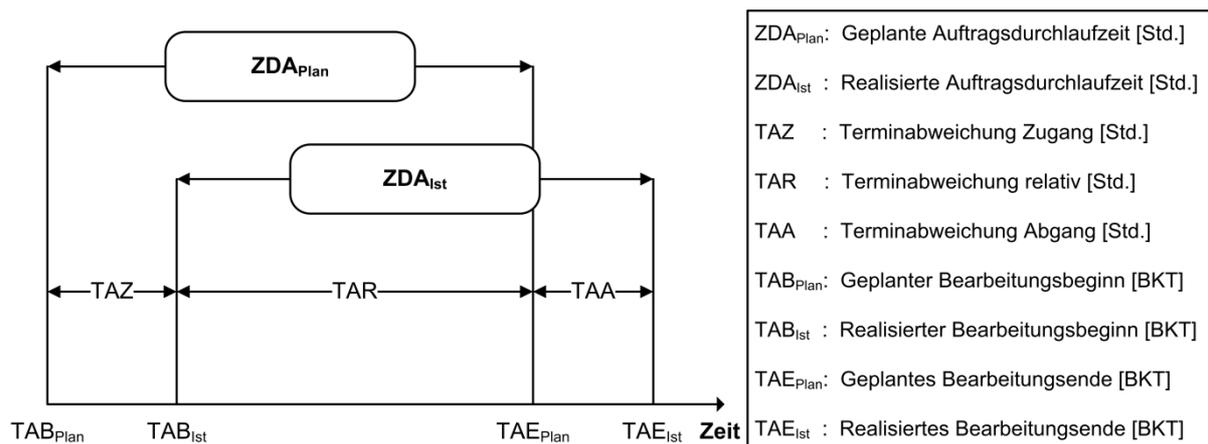


Abbildung 6: Definition der Terminabweichung [i.A.a. Lödding/2008b]

Die Kosten eines Kundenauftrags werden im Teilprozess Fertigung im Wesentlichen durch die sogenannten *Herstellkosten* bestimmt. Diese berechnen sich aus der Summe der Material- und Fertigungskosten in ihren jeweiligen Einzel- oder Gemeinkostenanteilen. Während der Einzelkostenanteil, wie zum Beispiel die Kosten der Ausgangsteile oder die auftragsbezogenen Lohnkosten der Mitarbeiter, nicht durch die Fertigungssteuerung beeinflussbar ist, kann der Gemeinkostenanteil eines Auftrags direkt durch die Fertigungssteuerung beeinflusst werden.

So nimmt die Fertigungssteuerung in der nach innen gerichteten Perspektive direkten Einfluss auf den *Umlaufbestand* und auf die damit verbundenen Kapital-, Beschaffungs-, Lagerungs-, Wartungs- und Verwaltungskostenanteile der Materialgemeinkosten. Außerdem beeinflusst die Fertigungssteuerung die *Auslastung* einer Fertigung und damit auch die Zins-, Abschreibungs- und Betriebsmittelkostenanteile der Fertigungsgemeinkosten (Arnold et al. 2008, Berg 2008, Lödning 2008b, Gatzke 2010).

### **Wirkungsgefüge der Fertigungssteuerung**

Bei dieser Einflussnahme auf die Leistungsmerkmale Zeit und Kosten einer Produktion agiert die Fertigungssteuerung jedoch in einem elementaren Zielkonflikt. Die vier Zielgrößen Fertigungsdurchlaufzeit, Termintreue, Umlaufbestand und Auslastung stehen sich zum Teil sowohl gleich- als auch gegengerichtet gegenüber. In diesem Zusammenhang spricht man häufig von dem sogenannten Dilemma der Ablaufplanung nach GUTENBERG (Gutenberg 1951), das Abbildung 7 (i.A.a. Nyhuis 2008) verdeutlicht. Wie der Kurvenverlauf der einzelnen Kenngrößen zeigt, muss die Fertigungssteuerung in Abhängigkeit von der logistischen Zielsetzung das fertigungsspezifische Optimum zwischen kurzen Lieferzeiten, einer hohen Termintreue und einer hohen Kapazitätsauslastung finden (Arnold et al. 2008).

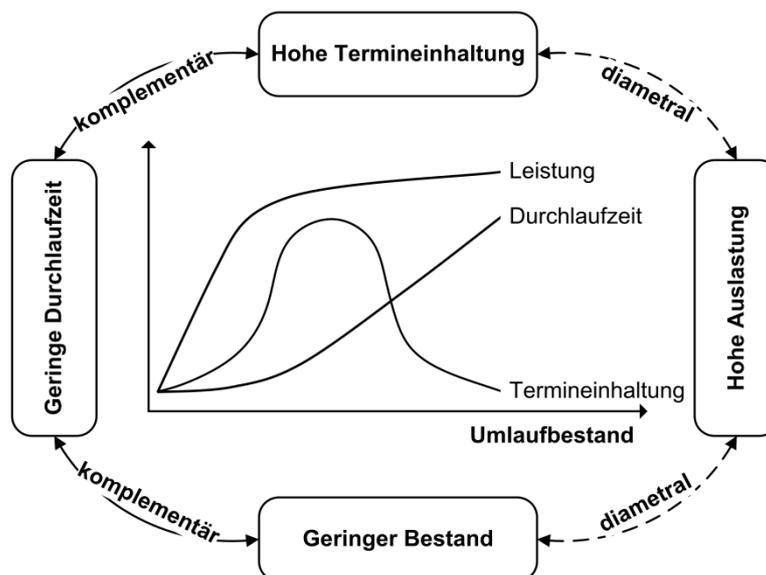


Abbildung 7: Dilemma der Ablaufplanung [i.A.a. Nyhuis/2008]

Für diese Positionierung ist es von essenzieller Bedeutung, die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen und zwischen den Zielgrößen und den Aufgaben der Fertigungssteuerung zu verstehen. Hierfür haben sich im Lauf der Zeit verschiedene Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle etabliert.

Das *Trichtermodell* nach WIENDAHL und BECHTE begreift ein Produktionssystem als Trichter, dessen Öffnung den wartenden Bestand repräsentiert und dessen Durchflussleistung durch die Kapazität des Produktionssystems bestimmt wird. Durch diese Modellierung werden die Zielgrößen, Bestand, Durchlaufzeit und Leistung in einen logischen Bezug zueinander gebracht, der mittels eines Übertrags in ein Durchlaufdiagramm rechnerisch bestimmt werden kann (Bechte 1980, Wiendahl 1997). Die folgende Abbildung zeigt (i.A.a. Wiendahl 2008b) diesen Zusammenhang.

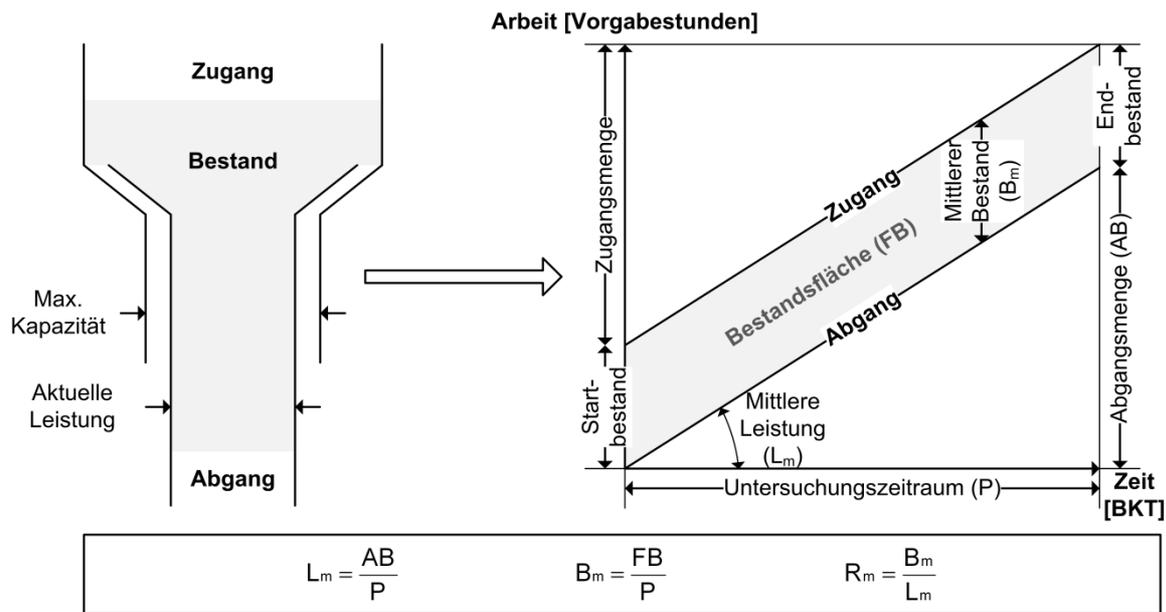


Abbildung 8: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm [i.A.a. Wiendahl/2008b]

Im Durchlaufdiagramm wird die mittlere Leistung ( $L_m$ ) durch die Steigung der idealisierten Abgangs- und Zugangskurve repräsentiert. Der mittlere Bestand ( $B_m$ ) ergibt sich wiederum aus der Fläche zwischen den beiden Kurven. Aus beiden Kennwerten lässt sich mithilfe der sogenannten Trichterformel die mittlere Reichweite ( $R_m$ ) aus dem Verhältnis von mittlerem Bestand und mittlerer Leistung ableiten. Die mittlere Reichweite entspricht im eingeschwungenen Betriebszustand der mittleren Durchlaufzeit der durchfließenden Arbeitsstunden (Wiendahl 2008b).

Aufbauend auf diesem Grundzusammenhang des Trichtermodells hat sich in der Produktionslogistik die *Theorie der logistischen Kennlinien* nach NYHUIS etabliert. Diese basiert auf der Idee, den Zusammenhang zwischen den logistischen Zielgrößen als Kennlinie zu modellieren und zu berechnen. Dazu existiert ein umfassendes mathematisches Erklärungsmodell, durch das sich alle Grundzusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen als Kennlinien beschreiben lassen. Neben der in Abbildung 9 (i.A.a. Lödding 2008b) gezeigten Modellierung von Durchlaufzeit, Leistung und Terminabweichung in Abhängigkeit vom Bestand können Kennlinien auch eingesetzt werden, um beispielsweise die Termintreue eines Arbeitssystems oder den Servicegrad eines Lagers in Abhängigkeit eines Bestandverlaufs abzubilden. Man spricht in diesem Zusammenhang von Termin- beziehungsweise Servicegradkennlinien (Nyhuis 2003).

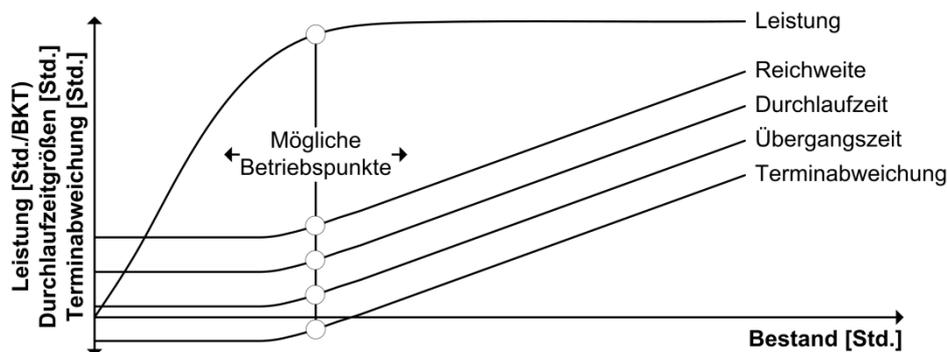


Abbildung 9: Produktionskennlinien ausgewählter logistischer Kenngrößen [i.A.a. Lödding/2008b]

Durch die experimentell-deduktive Ableitung eines parametrisierbaren Kennlinienmodells auf Basis der sogenannten  $C_{Norm}$ -Funktion erlaubt die *Theorie der logistischen Kennlinien* auch die approximierte Berechnung von Kennlinien in einem konkreten Anwendungsfall. Dies ermöglicht die praktische Anwendung der Kennlinientheorie, um beispielsweise Planparameter für die Produktionsplanung und -steuerung, für das Produktionscontrolling oder für die Fabrikplanung zu ermitteln. Dabei dienen die Kennlinien fast immer zur logistischen Positionierung, das heißt zur Festlegung einer regelbaren Größe, wie dem Bestand in Abhängigkeit von einer Zielgröße wie der Auslastung. Somit ermöglicht die *Theorie der logistischen Kennlinien* eine zieloptimale Positionierung im Dilemma der Ablaufplanung zwischen niedrigen Beständen und Durchlaufzeiten einerseits und einer hohen Auslastung andererseits in der betrieblichen Praxis (Nyhuis 2003, Nyhuis & Wiendahl 2009).

Allerdings ist bei der Anwendung der Kennlinienmodelle zu beachten, dass diese einen eingeschwungenen Betriebszustand voraussetzen, bei dem keine tendenzielle Veränderung der Auftragszeitstruktur oder der Bedarfsvarianz auftritt. Schwankungen des Bestands und ein nicht paralleler Verlauf der Zugangs- und Abgangskurve schränken die Aussagekraft von Produktionskennlinien stark ein (Nyhuis 2003, Schneider 2004, Fischer 2007, Nyhuis 2008, Nyhuis & Wiendahl 2009).

In Ergänzung zu den bisher beschriebenen Modellierungsmöglichkeiten des Zusammenhangs zwischen den logistischen Zielgrößen stellt das *Modell der Fertigungssteuerung* nach LÖDDING den erweiterten Zusammenhang zwischen den logistischen Zielgrößen und den Aufgaben der Fertigungssteuerung her. In dem in Abbildung 10 (i.A.a. Lödding 2008a, b) dargestellten Modell werden die Steuerungsaufgaben in ihrer Wirkweise auf die logistischen Zielgrößen modelliert. Dabei werden in Anlehnung an einen Regelkreis die Fertigungssteuerungsziele als Zielgrößen begriffen, die über die zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen als Stellgrößen von der Steuerung geregelt werden. Dadurch wird ein umfassender Verständniszusammenhang für das Steuerungswirkungsgefüge geschaffen<sup>1</sup>.

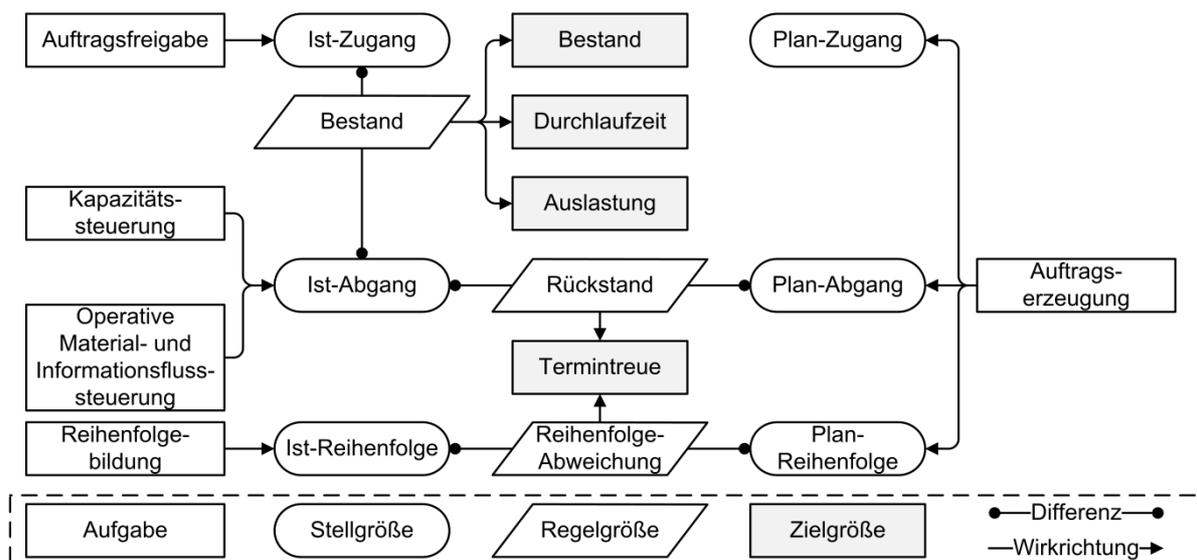


Abbildung 10: Erweitertes Modell der Fertigungssteuerung [i.A.a. Lödding/2008a, b]

<sup>1</sup>In der Darstellung hier ist das Modell um die Steuerungsaufgabe der operativen Material- und Informationsflusssteuerung erweitert, da diese mit ihrem Einfluss auf den Ist-Abgang in dem bisherigen Modell noch nicht berücksichtigt wurde.

### 2.1.3 Steuerungsrelevante Einflussparameter

Die in dem Modell der Fertigungssteuerung modellierte Wirkungsweise der Aufgaben der Fertigungssteuerung hängt direkt von der Ausgestaltung der einzelnen Aufgaben ab. Diese findet in Abhängigkeit von dem Erzeugnisspektrum und der Auftragsstruktur einer Fertigung statt. Vom „Fit“ zwischen dem Erzeugnis- und Auftragspektrum und dem Fertigungssteuerungskonzept hängt die Zielerreichung einer Fertigungssteuerungsstrategie ab (Wiendahl 1998, Oosterman et al. 2000, Wiendahl & Westkämper 2006, Lödding 2008b, Wiendahl 2008a).

Das Fertigungsprinzip, welches das grundlegende Layout und die räumliche Anordnung der Fertigungsmittel in einer Werkstatt beschreibt (Czichos & Hennecke 2008), ist im Verständnis der vorliegenden Arbeit keine direkte Bestimmungsgröße der Fertigungssteuerung. Vielmehr ist es genauso wie die Fertigungssteuerungsstrategie das Resultat der Determinanten des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur einer Produktion. So werden das Fertigungsprinzip und die Fertigungssteuerungsstrategie parallel zueinander als Bestandteile des Produktionskonzepts schon im Rahmen des Fabrikplanungsprozesses festgelegt (Schenk & Wirth 2004, Grundig 2008). Aus diesem Grund sind die im Folgenden (in Abgleich mit Schenk & Wirth 2004, Westkämper 2006, Dyckhoff & Spengler 2007, Arnold et al. 2008, Grundig 2008, Wiendahl 2008b, Awiszus et al. 2009) beschriebenen Fertigungsprinzipien immer mit dafür geeigneten Fertigungssteuerungsstrategien verbunden.

Die *Punktfertigung* (synonym: Baustellenfertigung) stellt eine ortsfeste Fertigungsform dar. Bei ihr werden alle für die Produktion notwendigen Betriebsmittel an eine zentrale Verbaustelle gebracht. Als Fertigungsprinzip eignet es sich für große unbewegliche Erzeugnisse und wird dementsprechend in der industriellen Praxis vor allem im Bereich des Anlagen-, Großmaschinen- und Schiffbaus eingesetzt.

Das Fertigungsprinzip *Werkstattfertigung* sieht eine Anordnung der Betriebsmittel nach dem sogenannten Verrichtungsprinzip vor, bei dem alle Betriebsmittel gemäß ihrer fertigungstechnischen Ähnlichkeit gruppiert werden. Dieses Fertigungsprinzip kommt vor allem im Einzel- und Kleinserienbereich zum Einsatz, da es eine sehr hohe Variation der Fertigungsprozessfolgen zulässt.

Eine geringere Flexibilität bezüglich der Variation der Prozessfolgen weist das Fertigungsgrundprinzip der *Reihenfertigung* auf. Bei der Reihenfertigung werden Betriebsmittel nach dem sogenannten Gegenstandsprinzip angeordnet. Das heißt, fertigungstechnisch verschiedene Betriebsmittel werden anhand ihrer Zuordnung zu einem Produkt gruppiert. Für dieses Fertigungsprinzip existieren verschiedene Materialflussflexibilitätsabstufungen, die von einem universellen Fertigungsabschnitt für ein breites Produktspektrum über eine Fertigungsgruppe für die Komplettbearbeitung einer Teilefamilie bis hin zu einer erzeugnisspezifischen Fertigungsreihe reichen.

Die Extremausprägung der Reihenfertigung stellt das Fertigungsprinzip der *Fließfertigung* dar. Eine Fließreihe bildet die exakte Prozessreihenfolge eines einzelnen Erzeugnisses ab. Dieses Fertigungsprinzip ist somit am unflexibelsten im Hinblick auf die Materialflussvariation, aber zugleich das produktivste aller Fertigungsgrundprinzipien.

Als steuerungsrelevante Merkmale des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur werden von den meisten Autoren in unterschiedlichen Begriffszusammenhängen die Variantenvielfalt, die Wiederholhäufigkeit, die Vielteiligkeit der Erzeugnisstruktur, die Mengenvarianz, die zeitliche Bedarfsverlaufsvarianz, das Änderungsaufkommen sowie die technologische Erzeugnisreife genannt (in Abgleich mit Holm 1973, Rabus 1980, Adam 1988, Büdenbender 1991, Graf 1991, Breker 1995, Oosterman et al. 2000, Lödding 2001, Henrich et al. 2004, Lopitzsch 2005, Stevenson et al. 2005, Seibold 2006, Jodlbauer 2007, Lödding 2008b, Bornhäuser 2009).

Bei deren Ausprägungen kann zwischen den folgenden typischen Merkmalskombinationen unterschieden werden.

Merkmal des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur	Typische Merkmalsausprägung		
	Werkstattfertigung im Einzel- und Kleinserienbereich	Segmentierte Reihenfertigung im Mittelserienbereich	Fließfertigung im Großserienbereich
Variantenvielfalt	Hoch	Mittel	Gering
Wiederholhäufigkeit	Gering	Mittel	Hoch
Vielteiligkeit der Erzeugnisstruktur	Hoch	Mittel	Gering
Mengenvarianz	Hoch	Mittel	Gering
Bedarfsverlaufsvarianz	Hoch	Mittel	Gering
Änderungsaufkommen	Hoch	Mittel	Gering
Technologische Erzeugnisreife	Gering	Mittel	Hoch

Tabelle 2: Steuerungsrelevante Merkmale des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur

Die hier dargestellten Merkmale werden gemeinhin als steuerungsrelevant eingestuft, da sie in ihrer jeweiligen Ausprägung die Komplexität und Turbulenz in der Ablaufsteuerung einer Fertigung jeweils unterschiedlich stark beeinflussen (Büdenbender 1991, Freitag 2005, Jodlbauer 2007, Brackel 2009). Komplexität beschreibt in diesem Zusammenhang die Kompliziertheit der Ablaufsteuerung, das heißt die Vielzahl und Vielfalt der durch die Steuerung beeinflussbaren Parameter und Operationen in ihrer Auswirkung auf den Produktionsablauf in seiner zeitlichen Veränderung (Ulrich & Probst 1988, Krallmann et al. 2002, Lohse 2002, Freitag 2005, Böse et al. 2007, Zsifkovits & Krenn 2008). Unter Turbulenz ist dagegen im Fall der Ablaufsteuerung die Auswirkung der immanenten Planungsunsicherheit in Form unvorhergesehener Ablaufänderungen zu verstehen. Diese resultiert aus der Differenz zwischen notwendigen und verfügbaren Informationen zur Bearbeitung einer Planungsaufgabe sowie aus der Vielzahl und Vielfalt möglicher Störfaktoren (Wiendahl 2002, Liepelt 2003, Wiendahl 2004, Freitag 2005, Mula et al. 2006, Westkämper 2007, Bornhäuser 2009, Lindemann & Gronau 2009, Meißner 2009).

Zur Operationalisierung des Zusammenhangs zwischen den Merkmalen des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur sowie der Komplexität und Turbulenz

in der Fertigungssteuerung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuer Beschreibungsansatz entwickelt, der auf die Definition von Fertigungssteuerung als die systematische Anpassung und Umsetzung der durch die Produktionsplanung gesetzten Planparameter (vgl. Kapitel 2.1.1) zurückgreift<sup>2</sup>. Durch die Fertigungssteuerung beeinflussbare Planparameter sind die zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen<sup>3</sup> (Zülch 1989, 1990, Graf 1991, Lödding 2008b). Deren Struktur wird von ihrer intrinsischen Variabilität beziehungsweise Veränderlichkeit (Hübner 2001) bestimmt, also der Anzahl unterschiedlicher Zustände, die ein Planparameter annehmen kann (Altendorfer et al. 2008). Im Verständnis der Nachrichtentechnik ist Variabilität dabei in einen planbaren Anteil in Form von Variation und in einen nicht planbaren Anteil in Form von Fluktuation zu unterteilen (Vasilescu 2005). Dementsprechend resultiert jedes spezifische Auftrags- und Erzeugnisspektrum in einer spezifischen Variabilität der durch die Fertigungssteuerung beeinflussbaren zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen (Li & Meerkov 2000, Altendorfer et al. 2008, Curry & Feldman 2009). Die Ursache von Steuerungskomplexität ist somit Planparametervariation, während die Turbulenz in der Fertigungssteuerung durch Planparameterfluktuation verursacht wird (Dobberstein 1997, Freitag 2005, Mainzer 2008, Bornhäuser 2009, ElMaraghy et al. 2009, Samy & ElMaraghy 2010).

Durch diese gedankliche Dekomposition lassen sich die oben beschriebenen steuerungsrelevanten Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Variabilität der zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen, wie in Abbildung 11 dargestellt, einordnen. Die Planparametervariation, das heißt die planbare Veränderbarkeit der zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen, wird direkt durch die Variantenvielfalt, die Wiederholhäufigkeit, die Vielteiligkeit der Erzeugnisstruktur sowie die Mengenvarianz bestimmt (ElMaraghy et al. 2009). Die Planparameterfluktuation, das heißt die nichtplanbare Veränderbarkeit der zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen, wird dagegen durch die zeitliche Bedarfsverlaufsvarianz, das Änderungsaufkommen sowie die technologische Erzeugnisreife determiniert (Wiendahl 2002).

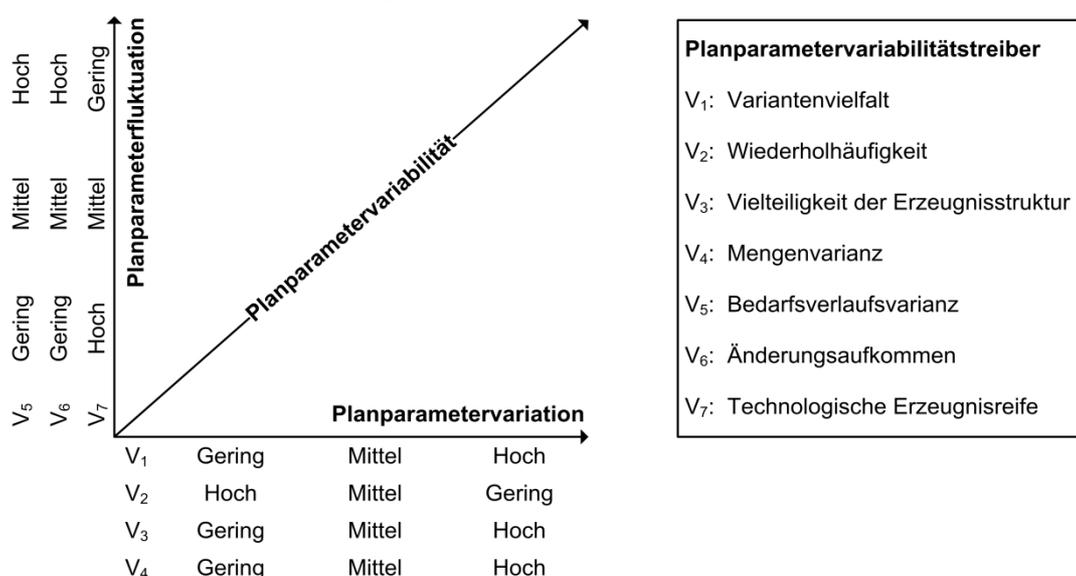


Abbildung 11: Planparametervariabilitätstreiber des Auftrags- und Erzeugnisspektrums

<sup>2</sup>Alternative Beschreibungsansätze der Komplexität und Turbulenz von Logistiksystemen finden sich bei Böse et al./2007.

<sup>3</sup>ZÜLCH nennt außerdem die Losgröße als einen von der Fertigungssteuerung beeinflussbaren Planparameter. Da die Losgröße jedoch häufig schon im Rahmen der Materialbedarfsplanung festgelegt wird, kann sie auch als ein Planparameter der vorangehenden Produktionsplanung interpretiert werden (Lödding 2008b).

Mit diesem im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu vorgestellten Beschreibungsmodell lässt sich die Wirkweise der steuerungsrelevanten Merkmale des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur auf die Variabilität der zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen reduzieren. Diese Variabilität wird damit zur bestimmenden Stellgröße bei der anforderungsgerechten Ausgestaltung der Aufgaben der Fertigungssteuerung im konkreten Anwendungsfall (Altendorfer et al. 2008). Zudem bietet sie als operationalisierter Variabilitätsgrad eine hohe Vergleichbarkeit für die Untersuchung unterschiedlicher Fertigungstypologien und kann infolgedessen als Referenzmaß bei der Bewertung der logistischen Zielerreichung unterschiedlicher Fertigungssteuerungskonzepte im konkreten Anwendungsfall herangezogen werden.

#### 2.1.4 Konfiguration der Fertigungssteuerung

Zur anforderungsgerechten Abstimmung der Aufgaben der Fertigungssteuerung auf einen vorliegenden Planparametervariabilitätsfall existiert eine Reihe von Konfigurationsansätzen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Dabei handelt es sich ausschließlich um Konfigurationsansätze, welche die explizite Ausgestaltung der Fertigungssteuerung hinsichtlich ihres Steuerungsmechanismus und Prozessrahmens zum Ziel haben. Ansätze, die auf die Konfiguration der Produktionsplanung und -steuerung im Bezug auf ihre informationstechnische Implementierung zielen, werden an dieser Stelle nicht beschrieben. Detaillierte Beschreibungen solcher Ansätze finden sich bei Schomburg/1980 und Schuh/2006.

Einen allgemeinen Orientierungsrahmen zur Konfiguration eines Fertigungssteuerungskonzepts bietet das Regelwerk zur Ausgestaltung der Fertigungssteuerung nach LÖDDING. In elf Leitlinien wird darin generisch beschrieben, anhand welcher Regelgrößen, nach welchen logistischen Zielen und an welchen Angriffspunkten ein Steuerungsmechanismus auszugestalten ist. Diese Regeln können sowohl bei der Ausgestaltung eines Fertigungssteuerungskonzepts als auch bei der Neuentwicklung von Fertigungssteuerungsstrategien zur Anwendung kommen (Lödding 2001).

Des Weiteren können bei der Ausgestaltung eines Fertigungssteuerungskonzepts auch die sogenannten *Logistischen Grundgesetze* nach WIENDAHL und NYHUIS zur Orientierung dienen. Die neun Gesetzmäßigkeiten erklären grundlegende Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen und geben dadurch Handlungsanweisungen hinsichtlich ihrer Beeinflussung und Regelung (Nyhuis 2003, Nyhuis & Wiendahl 2009). Folglich handelt es sich dabei um Regeln bezüglich der Parameterkonfiguration von Fertigungssteuerungsverfahren.

Eine konkrete Möglichkeit zur Ausgestaltung eines Fertigungssteuerungskonzepts im Anwendungsfall stellt NYHUIS mit einer Methodik vor, die sich stark an der sogenannten morphologischen Analyse nach ZWICKY orientiert (Zwicky 1989). Als Basis dient dem Ansatz die Erstellung eines Anforderungskatalogs in Abhängigkeit von der Auftragsstruktur und dem Erzeugnisspektrum sowie der logistischen Zielsetzung einer Fertigung. Darauf aufbauend werden für die festgelegten Anforderungen aufgabenbezogene Lösungselemente aus einer Lösungsmorphologie ausgewählt. Die Zuordnung der Lösungselemente zu den Anforderungsbündeln erfolgt anhand der bekannten Eignung einzelner Fertigungssteuerungsverfahren (Nyhuis et al. 2006, Nyhuis et al. 2009b, Nyhuis & Münzberg 2010).

Mithilfe dieser Vorgehensweise kann prinzipiell für jeden Anwendungsfall ein Fertigungssteuerungskonzept konfiguriert werden. Allerdings weist die Methodik im aktuellen Entwicklungsstand noch einen geringen Detaillierungs- und Standardisierungsgrad auf, den es zukünftig weiter zu systematisieren gilt. Systematisierungsansätze wie der in Kapitel 2.1.3 vorgestellte Planparametervariabilitätsbegriff sowie dessen im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte Operationalisierung können diese Entwicklung unterstützen.

### 2.1.5 Steuerungsansätze und -verfahren

Im Verlauf der Jahre haben sich im produktionslogistischen Forschungsfeld der Fertigungssteuerung drei hauptsächliche Forschungsbereiche herausgebildet. Während die *Materialflusstechnik* die technologische Ausgestaltung der Material- und Informationsflusssteuerung untersucht, wird im Bereich der *Informatik* vor allem an der informationstechnischen Implementierung von Steuerungsstrategien geforscht. Der dieser Arbeit zugrunde liegende dritte Forschungsbereich der *Verfahrensforschung* beschäftigt sich primär mit der ablauforganisatorischen Ausgestaltung der Fertigungssteuerung, wobei er dabei in die Teilbereiche der Operations Research und der nicht-mathematischen Verfahrensforschung unterteilt werden kann (Franke 2006, Dyckhoff & Spengler 2007, Pawellek 2007, Arnold et al. 2008, Lödding 2008b, Arnold & Furmans 2009, Böge 2009, Martin 2009).

Der Teilforschungsbereich der Operations Research sucht vor allem nach mathematischen Lösungsmodellen für das Grundproblem der Fertigungssteuerung. An den dabei entwickelten Lösungsansätzen wird jedoch häufig der hohe theoretische Abstraktionsgrad und die geringe Praxisrelevanz bemängelt (Scherer 1998, Oosterman et al. 2000, Teunis 2003, Becker 2005, MacCarthy 2006, Fischer 2007, Monch 2007, Land 2008, Lödding 2008b). In vielen Fällen handelt es sich bei den Lösungsmodellen um theoretisch abstrahierte Benchmarking-Probleme, die aufgrund ihrer vielen Restriktionen in der Praxis nicht anwendbar sind. Umstände, Fertigungsstrukturen, Prozesse und Mitarbeiterfaktoren werden häufig nicht berücksichtigt (MacCarthy 2006). So kritisiert zum Beispiel SCHERER: „While some are still solving the ‚10 jobs x 10 machines‘ problem and waiting for their thoroughly reviewed papers to be published, in industry such measures as group technology, KANBAN, teamwork and KAIZEN have proved to be feasible means of improving industrial performance at the shop floor level.“ (Scherer 1998, S.3).

Dieses Defizit an Praxisnähe gleicht der zweite Teilbereich der Verfahrensforschung, die nicht-mathematische Verfahrensforschung aus. Ihr Forschungsfokus liegt im Kontext der Fertigungssteuerung auf der Suche nach praktikablen Heuristiken für den arbeitsorganisatorischen Ablauf einer Fertigung. Dabei steht bei der Lösungssuche nicht das theoretische Leistungsoptimum, sondern die Anwendbarkeit in der Praxis im Vordergrund. Diese Art der Verfahrensforschung steht somit zwischen einer technozentrischen und anthropozentrischen Sichtweise auf den Forschungsbereich der Fertigungssteuerung (Junge et al. 2003, Lödding 2008b). Da auch das Ziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung eines praxisrelevanten Steuerungskonzepts besteht, konzentriert sich die folgende Vorstellung bekannter Steuerungsansätze und -verfahren auf Lösungsalternativen aus dem Bereich der nicht-mathematischen Verfahrensforschung.

Diese Art von Fertigungssteuerungsverfahren beinhaltet Hilfsmittel und Regelwerke zur Entscheidungsstandardisierung, die damit der Beschleunigung und Entlastung der Entscheidungsprozesse dienen (Lödding 2008b). Man spricht in diesem Zusammenhang von Heuristiken, da diese Verfahren anstatt auf ein globales Optimum auf eine schnell erreichbare lokale Verbesserung zielen und darüber hinaus auf einer einfachen, regelbasierten und praxisbewährten Vorgehensweise basieren. Dabei können die Verfahren sowohl eine oder mehrere Steuerungsstrategien zur Lösung einer oder mehrerer Aufgaben der Fertigungssteuerung umfassen und dabei auf unterschiedlichen Aggregationsniveaus eines Produktionssystems zum Einsatz kommen (Zülch 1990, Graf 1991, Lödding 2008b).

Mögliche Aggregationsniveaus eines Produktionssystems sind die in folgender Abbildung dargestellten Systemebenen, wobei jede Ebene ein mögliches Subsystem eines Gesamtproduktionssystems darstellt. Ein solches Produktionssystem kann im Verständnis der Systemtheorie als abstraktes System begriffen werden, das mithilfe von material- und informationsflusstechnisch vernetzten Produktionsprozessen Inputfaktoren, wie zum Beispiel Material, Energie, Information und Raum, in wertgesteigerte Outputfaktoren, wie zum Beispiel Produkte transformiert. Die Transformation findet dabei im sozio-kulturellen, technologischen, ökonomischen, rechtlichen und politischen Kontext des umgebenden Umweltsystems unter Verwendung von Arbeitskräften und Arbeitsmitteln statt (Schenk & Wirth 2004, Günther & Tempelmeier 2005, Westkämper 2006, Dyckhoff & Spengler 2007, Grote & Feldhusen 2007, Böge 2009, Müller et al. 2009a). Für die Fertigungssteuerung ist in einem solchen Produktionssystem als Objektbereich hauptsächlich die Arbeitssystem- und Fertigungsbereichsebene relevant. Mögliche Steuerungsobjekte können sowohl einzelne Arbeitssysteme als auch komplette Fertigungsbereiche sein.

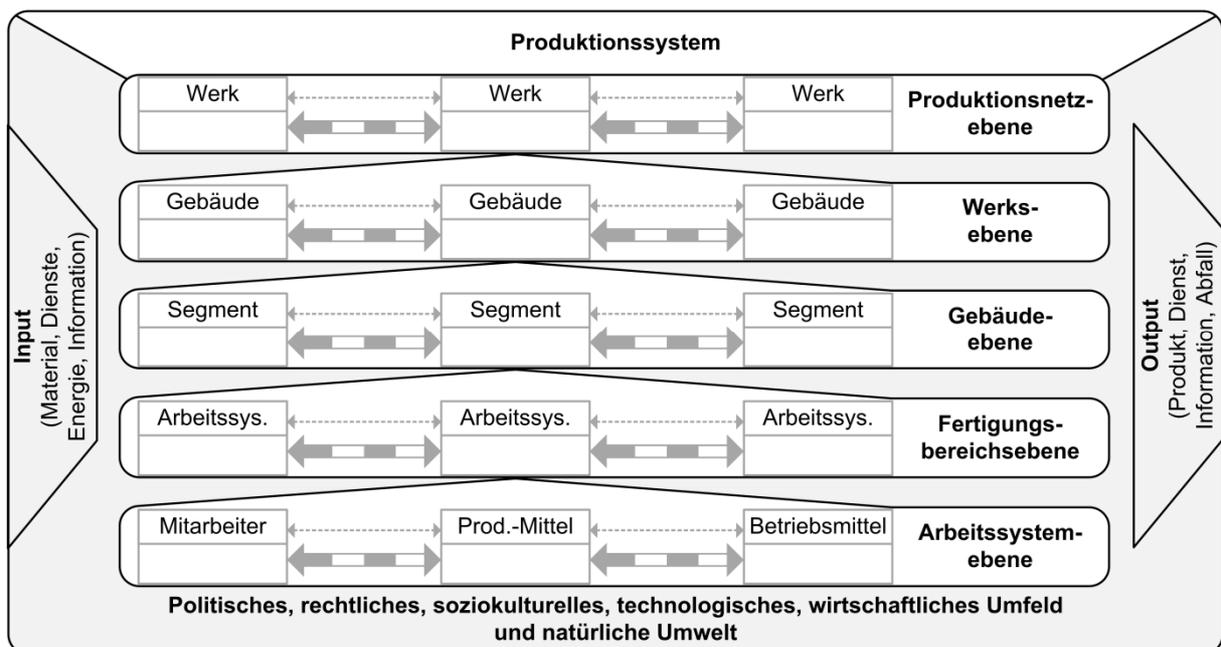


Abbildung 12: Steuerungsobjekte in einem Produktionssystem

### 2.1.5.1 Klassifikationsansätze

Zur Klassifikation der Verfahrensansätze existiert in der Literatur eine Reihe unterschiedlicher Klassifikationskriterien. Diese dienen zum einen zur Systematisierung der bekannten Verfahren entsprechend einer spezifischen Logik und zum anderen zur Abschätzung der prinzipiellen Eignung einzelner Verfahren für eine spezifische Fertigungstypologie. Im Folgenden werden die gängigsten Klassifizierungskriterien vorgestellt.

Ein häufig angewendetes Klassifizierungskriterium ist die Unterteilung der Steuerungsverfahren nach dem *Push- oder Pull-Prinzip*. Dieses Kriterium unterscheidet Fertigungssteuerungsverfahren danach, ob sie sinngemäß Aufträge durch eine Fertigung schieben oder aus einer Fertigung ziehen. Allerdings existiert in der Literatur bis dato kein einheitliches Verständnis darüber, anhand welcher Merkmale diese beiden Grundprinzipien festzustellen sind (Spearman & Zazanis 1992, Gstettner 1998, Sader 2005). Eine mögliche Abgrenzung bieten die in Tabelle 3 (i.A.a. Spearman et al. 1990, Spearman & Zazanis 1992, Wiendahl 1997, Gstettner 1998, Sader 2005, Wildemann 2008) dargestellten Kriterien.

Unterscheidungsmerkmal	Pull-Prinzip	Push-Prinzip
Art der Produktionsauslösung	Kundenbedarf ohne Termin	Kundenauftrag mit Termin
Ort der Produktionsauslösung im Materialfluss	Hinter dem Steuerungsobjekt	Vor dem Steuerungsobjekt
Ausrichtung der Material- und Informationsflüsse	Informationsfluss entgegen der Materialflussrichtung	Informationsfluss entlang der Materialflussrichtung,

Tabelle 3: Unterscheidungsmerkmale des Pull- und Push-Prinzips

Ein weiteres Klassifikationskriterium stellt die Unterscheidung der Steuerungsverfahren in *zentrale und dezentrale Verfahren* dar. Dabei werden die Steuerungsverfahren nach dem Ausgangspunkt ihres Wirkungsmechanismus unterschieden. Verfahren, deren Mechanismus von einer zentralen Steuerungsinstanz aus auf ein Steuerungsobjekt wirkt, werden als zentrale Verfahren bezeichnet. Bei Verfahren, deren Steuerungsmechanismus von Steuerungsobjekten auf Arbeitssystemebene aus angreift, spricht man dagegen von dezentralen Steuerungsverfahren (Zäpfel 1998, Bornhäuser 2009).

Als Klassifikationskriterium hat sich außerdem die *primäre Regelgröße* eines Fertigungssteuerungsverfahrens etabliert. So kann Fertigungssteuerung auch als Fertigungsregelung begriffen werden, da die Fertigungssteuerung, genauso wie die Regelung, die Anpassung von Planparametern in Abhängigkeit von einer Führungsgröße zum Ziel hat. In diesem Verständnis wird eine Fertigung oder ein Arbeitssystem, wie in Abbildung 13 dargestellt, als Regelmodell aufgefasst, dessen Regelgrößen entweder den Bestand<sup>4</sup>, gemessen in Arbeitsinhalten oder Stückzahlen, den Rückstand, gemessen in Arbeitsinhalten oder Stückzahlen oder die Leistung in Form der prozentualen Kapazitätsauslastung in einem Zeitabschnitt darstellen (Duffie & Falu 2002, Pawellek 2007, Dangelmaier 2009, Nyhuis et al. 2009a).

<sup>4</sup>Die Begrifflichkeiten Bestand und Belastung werden häufig synonym verwendet, da beide eine Durchführungszeitmenge ausdrücken. Während jedoch unter Belastung ausschließlich die Menge der ausstehenden Arbeitsinhalte vor ihrer Bearbeitung verstanden wird, kann der Begriff Bestand sowohl ausstehende Arbeitsinhalte als auch fertig bearbeitete Arbeitsinhalte beschreiben (Lödding 2008b, Curry & Feldman 2009, Fredendalla et al. 2010).

Die Regelung erfasst dabei fortlaufend die Regelgröße Bestand, Leistung oder Rückstand und vergleicht diese mit einer definierten Führungsgröße. In Abhängigkeit vom Ergebnis dieses Vergleichs wird eine Stellgröße, wie zum Beispiel Bestand, Termin oder Kapazität angepasst. Die Fertigungsregelung kann dabei entweder zentral, dezentral, fertigungsbereichsbezogen oder arbeitssystembezogen erfolgen. Außerdem kann die Regelung vor oder nach einem Steuerungsobjekt angreifen und sich entweder auf ein Maximum oder ein Minimum der Führungsgröße beziehen (Dyckhoff & Spengler 2007, Pawellek 2007, Hamann 2008, Lödding 2008a).



Abbildung 13: Modell der Fertigungsregelung

Darüber hinaus können Steuerungsverfahren auch anhand der ihr zugrunde liegenden *Aufgabe* kategorisiert werden. Allerdings büßt dieses Klassifikationskriterium bei Lösungsansätzen die mehrere Aufgaben der Fertigungssteuerung abdecken an Trennschärfe ein (Lödding 2008b).

### 2.1.5.2 Funktionsweisen

Die folgende Beschreibung der Funktionsweisen der einzelnen Verfahren verwendet zur Klassifikation eine Triangulation aus den in Kapitel 2.1.5.1 dargestellten Klassifikationskriterien. Als primäres Kriterium werden die Verfahren anhand ihrer zu erfüllenden Aufgaben unterschieden. Bei der Beschreibung der Verfahren zur Auftragseinlastung kommt außerdem eine Kombination der Klassifikationskriterien Regelgröße und Wirkmechanismusangriffspunkt zum Einsatz. Die Darstellung der Funktionsweise der einzelnen Verfahren ist dabei relativ kurz gehalten. Eine detaillierte Übersicht der einzelnen Verfahren findet sich bei Lödding/2008b.

#### **Verfahren zur Auftragseinlastung**

Unter dem Begriff Auftragseinlastung werden die Steuerungsteilaufgaben Auftrags-erzeugung und Auftragsfreigabe subsumiert (Schneider et al. 2005, Arnold et al. 2008). Diese Pauschalisierung ist im Hinblick auf eine Verfahrensklassifizierung sinnvoll, da die Auftragserzeugung häufig an einen Freigabemechanismus gekoppelt ist und manche Steuerungsverfahren sowohl die Auftragserzeugung als auch die Auftragsfreigabe regeln. Aus diesem Grund handelt es sich bei den im folgenden Abschnitt beschriebenen Verfahren nicht nur um Verfahren, die entweder die Auftragserzeugung oder die Auftragsfreigabe regeln, sondern auch um Verfahren, die beide Aufgaben integrieren.



Auf einem leistungsgeregelten Vorgangnetzplan basiert auch die Methode der *Nivellierung*. Allerdings bricht die Nivellierung nicht wie die FSZ die einzelnen Erzeugnisse entsprechend ihrer Stücklisten auf die einzelnen Arbeitsprozesse herunter. Vielmehr wird versucht, die auf Erzeugnis- oder Variantenebene auftretenden Bedarfe verschiedener Kunden über einen definierten Zeitraum in ein leistungsoptimales Nivellierungsmuster einzuplanen, das rollierend angepasst wird. Dieses gilt dann für einen festen Planungshorizont als Reihenfolgen- und Terminvorgabe in der Fertigungsdurchführung. Damit stellt die Nivellierung eine flexiblere Form der FSZ dar, da sie eine höhere Planparametervariation zulässt (Buhl et al. 2009, Buhl & Deuse 2009).

Einen Kompromiss aus einem starren Mengenkorsett und einem flexiblen Terminnetzplan stellt die *TFS (Taktororientierte Fertigungssteuerung)* dar. Dieser Ausgestaltungsvariante liegt die Idee zugrunde, eine Fertigung in feste Durchlaufzeitsegmente einzuteilen, in die alle Aufträge eingelastet werden. Die Regelgröße Leistung passt dabei jedoch nicht die Vorgangsecktermine der Aufträge, sondern den Kapazitätsbedarf eines Durchlaufzeitsegments als Stellgröße an. Daher kann die taktororientierte Fertigungssteuerung prinzipiell eine hohe Planparametervariation kompensieren. Allerdings wird für diese Verfahrensvariante eine hohe Kapazitätsflexibilität in den einzelnen Durchlaufzeitsegmenten vorausgesetzt (Bornhäuser et al. 2005, Bornhäuser 2009).

### **Bestandsregelnde Auftragseinlastungsverfahren**

Die im Folgenden vorgestellten bestandsregelnden Auftragseinlastungsverfahren können prinzipiell in das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Klassifikationsschema in Tabelle 4 eingeordnet werden. Dabei wird in Verfahren mit einer auf einer zentralen Bestandsgrenze basierenden zentralen Bestandsregelung (Fall 1), in Verfahren mit einer auf dezentralen Bestandsgrenzen basierenden zentralen Bestandsregelung (Fall 2) sowie in Verfahren mit einer auf dezentralen Bestandsgrenzen basierenden dezentralen Bestandsregelung (Fall 3) unterschieden. Bei einer Bestandsgrenze kann es sich jeweils um eine Ober- oder Untergrenze handeln, die entweder vor oder nach einem Steuerungsobjekt wirkt (Fredendalla et al. 2010). Somit ergibt sich ein Klassifizierungssystem mit drei Klassifikationsebenen.

Die sogenannten belastungsregelnden Auftragseinlastungsverfahren werden als Variante der Bestandsregelung auch in dieses generische Klassifikationsschema eingeordnet. Der Belastungsbegriff beschreibt die Menge ausstehender Arbeitsinhalte und entspricht damit dem vor einem Steuerungsobjekt zur Bearbeitung ausstehenden Bestand (Lödding 2008b, Fredendalla et al. 2010).

<b>Bestandsregelnde Auftragseinlastung</b>												
Art der Regelung	Zentrale Bestandsregelung (fertigungsbereichbezogene Grenze) (Fall 1)				Zentrale Bestandsregelung (arbeitssystembezogene Grenzen) (Fall 2)				Dezentrale Bestandsregelung (arbeitssystembezogene Grenzen) (Fall 3)			
	Danach (1.1)		Davor (1.2)		Danach (2.1)		Davor (2.2)		Danach (3.1)		Davor (3.2)	
Art der Limitation	MIN (1.1.1)	MAX (1.1.2)	MIN (1.2.1)	MAX (1.2.2)	MIN (2.1.1)	MAX (2.1.2)	MIN (2.2.1)	MAX (2.2.2)	MIN (3.1.1)	MAX (3.1.2)	MIN (3.2.1)	MAX (3.2.2)

Tabelle 4: Verfahren zur bestandsorientierten Auftragseinlastung

Bei der in Abbildung 15 schematisierten, zentralen Bestandsregelung mit einer zentralen Bestandsuntergrenze nach dem Steuerungsobjekt Fertigungsbereich (Fall 1.1.1) prüft eine zentrale Steuerungsinstanz, ob die Regelgröße Bestand nach dem Steuerungsobjekt eine zentrale Bestandsuntergrenze unterschreitet. Falls dies der Fall ist, wird die Stellgröße Bestand durch die Freigabe neuer Aufträge angepasst. Dadurch wird ein Bestands- beziehungsweise Lieferabriss im nachfolgenden Prozess vermieden. Aufgrund des nachgelagerten Bestands eignet sich diese Verfahrenskategorie nur für eine geringe Planparametervariation. Eine Ausgestaltungsvariante stellt das BBV dar.

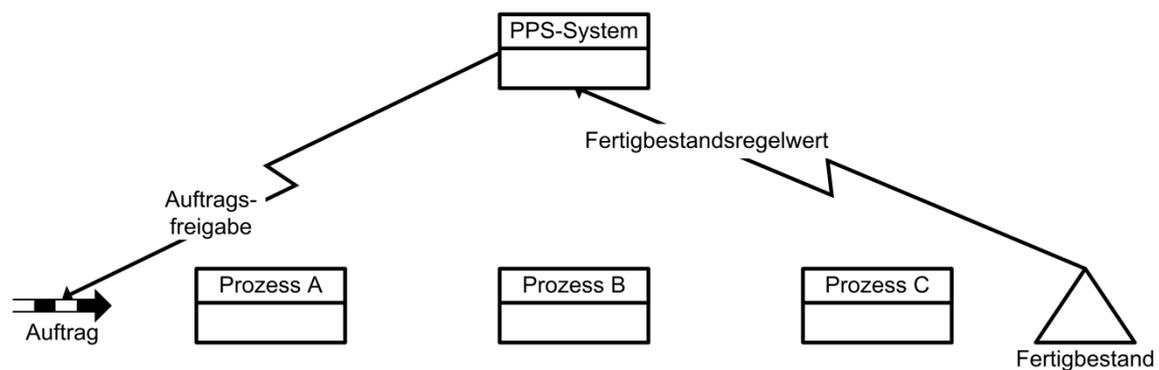


Abbildung 15: Zentrale Bestandsregelung mit einer zentralen Bestandsuntergrenze (Fall 1.1.1)

Das *BBV* (*Bestellbestandsverfahren*) definiert für den Fertigwarenbestand einer Produktion anhand der zu erwartenden Nachfrage und der Produktionsdurchlaufzeit einen Mindestbestand. Falls der Fertigbestand diesen Mindestbestand unterschreitet, werden neue Aufträge zu Anpassung des Bestandsniveaus freigegeben (Lödding 2008b).

Alternativ zu der vorangehend beschriebenen Variante kann die zentrale Bestandsregelung auch mit einer zentralen Bestandsobergrenze vor dem Steuerungsobjekt Fertigungsbereich kombiniert werden (Fall 1.2.2). Bei dieser, in Abbildung 16 dargestellten Kombination wird der Bestand einer Fertigung oder eines Fertigungsabschnitts an einer Bestandsobergrenze vor dem Steuerungsobjekt von einer zentralen Steuerungsinstanz aus geregelt. Dabei wird erst bei Unterschreitung eines definierten Bestandsniveaus die Stellgröße Bestand durch die Freigabe neuer Aufträge angepasst. Somit wird eine Überlastung des Fertigungsbereichs vermieden. Als Ausgestaltungsvarianten haben sich die CONWIP- und die Engpasssteuerung etabliert, die beide eine mittlere Planparametervariation abbilden können.

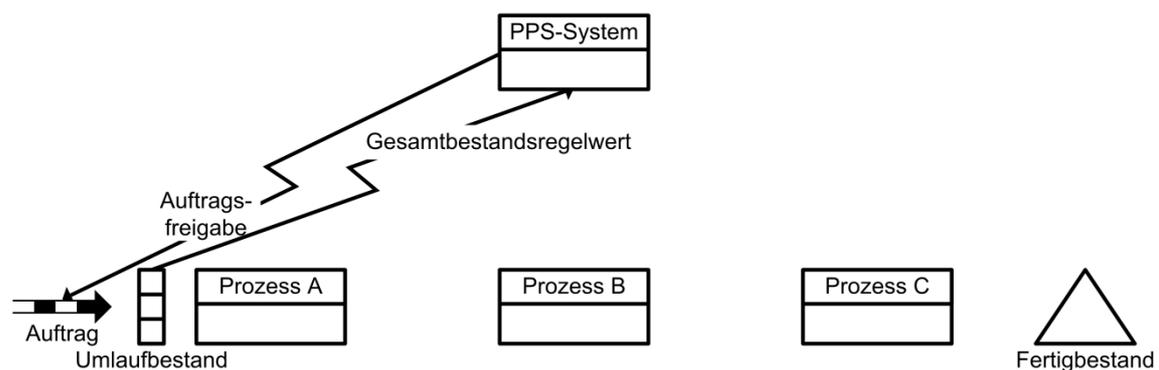


Abbildung 16: Zentrale Bestandsregelung mit einer zentralen Bestandsobergrenze (Fall 1.2.2)

Die *CONWIP (Constant Work in Process)-Steuerung* setzt den beschriebenen Mechanismus für einen Gesamtfertigungsabschnitt um. Die dafür notwendige Informationsflusssteuerung wird durch Kanbankarten abgebildet. Die Anzahl der Auftragskanbans stellt dabei das Bestandslimit des Fertigungsabschnitts dar. Ein Auftrag kann nach der CONWIP-Logik immer erst dann freigegeben werden, wenn dafür am Ende der Fertigung wieder ein Auftragskanban zur Verfügung steht (Spearman et al. 1990, Altendorfer et al. 2008).

Die gleiche kanbanbasierte Informationsflusssteuerung verwendet auch die Ausgestaltungsvariante der *Engpasssteuerung*. Allerdings bezieht sich ihre Regelungstrecke nur auf den Fertigungsabschnitt vor einem Engpass. Ihr Ziel ist es, die Engpässe einer Fertigung im Sinne der sogenannten „Theory of Constraints“<sup>5</sup> vor einer Überlastung zu schützen (Altendorfer et al. 2008).

Eine grundsätzlich andersartige Möglichkeit zur bestandsorientierten Fertigungsregelung stellt die in Abbildung 17 skizzierte zentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsuntergrenzen nach den einzelnen Steuerungsobjekten auf Arbeitssystemebene dar (Fall 2.1.1). In dieser Ausgestaltungsvariante der Bestandsregelung wird nach jedem Steuerungsobjekt eine spezifische Bestandsuntergrenze implementiert. Bedarfe werden auf diese Bestandstöpfe zentral eingelastet. Falls durch den bedarfsinduzierten Bestandsabfluss eine der dezentralen Bestandsuntergrenzen unterschritten wird, muss an dem betroffenen Steuerungsobjekt nachproduziert werden. Dadurch wird eine Mindestlieferzeit beziehungsweise Maximaldurchlaufzeit des Fertigungsbereichs gewährleistet. Allerdings kann das Verfahren aufgrund der variantenbezogenen, nachgelagerten Bestände auf Arbeitssystemebene nur eine geringe Planparametervariation abbilden. Eine Ausgestaltungsvariante dieses Einlastungsmechanismus stellt die Basestock-Steuerung dar.

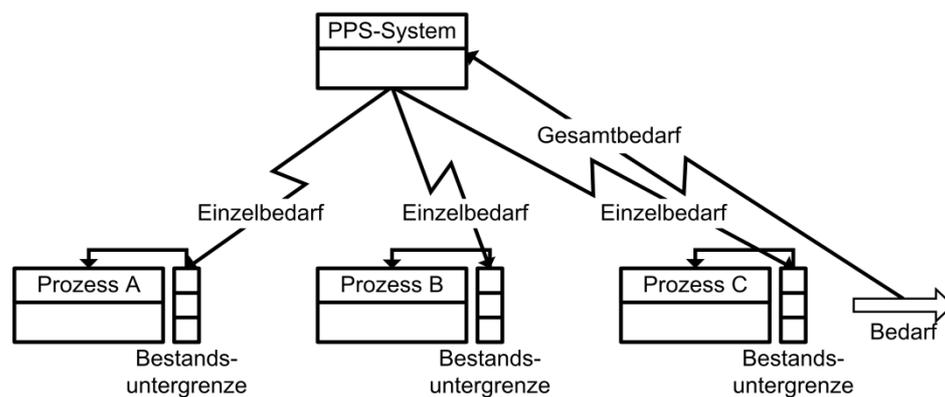


Abbildung 17: Zentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsuntergrenzen (Fall 2.1.1)

<sup>5</sup>Die von GOLDRATT entwickelte „Theory of Constraints“ basiert auf der Grundidee, dass eine Prozesskette nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied. Dementsprechend kann ein Prozess nur verbessert werden, indem das schwächste Glied gestärkt wird (Goldratt & Cox 1992). Auf Basis dieser Annahme entwickeln SPENCER und COX den folgenden grundsätzlichen Stufenprozess zur Produktionssteuerung, mit dem die „Theory of Constraints“ gemeinhin im Kontext der Fertigungssteuerung assoziiert wird (Spencer & Cox 1995, Watson et al. 2007):

1. Engpassidentifikation
2. Auslastung der Engpasskapazität
3. Anpassung aller anderen Arbeitsprozesse an den Engpass
4. Kapazitätsmaximierung am Engpass.
5. Kontinuierliche Verbesserung

Die *Basestock-Steuerung* entspricht in ihrer Ausgestaltung exakt dem oben beschriebenen Mechanismus der zentralen Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsuntergrenzen nach den Steuerungsobjekten. Jeder neu auftretende Kundenbedarf wird direkt an alle betroffenen Arbeitssysteme weitergeleitet und löst dort eine Nachproduktion der entsprechenden Kundenvariante aus. Die Arbeitssysteme produzieren dabei immer genau die Menge nach, die den Kundenbedarf abdeckt und gleichzeitig den Basisbestand („Basestock“) der Erzeugnisvariante wieder auffüllt (Graves 1988).

Eine zentrale Bestandsregelung kann auch mit dezentralen Bestandsobergrenzen vor den einzelnen Steuerungsobjekten (Fall 2.2.2) ausgestaltet werden. Bei diesem in Abbildung 18 gezeigten Bestandsregelungsmechanismus werden Aufträge von einer zentralen Steuerungsinstanz aus auf die dezentralen Bestandstöpfe eingeplant. Wird eine der dezentralen Bestandsobergrenzen überschritten, wird der Auftrag nicht freigegeben und zur Einlastung zurückgestellt. Durch diese Logik wird eine Überlastung des Gesamtfertigungsbereichs vermieden. Da die meisten Ausgestaltungsansätze dieser Bestandsregelungsvariante mit einer zentralen MRPII-Einplanung kombiniert werden, kann diese Verfahrenskategorie prinzipiell eine beliebige Planparametervariation abbilden. Ausgestaltungsvarianten sind die WLC-, BOA-, ALP-, GPOLCA- und die COBACABANA-Steuerung.

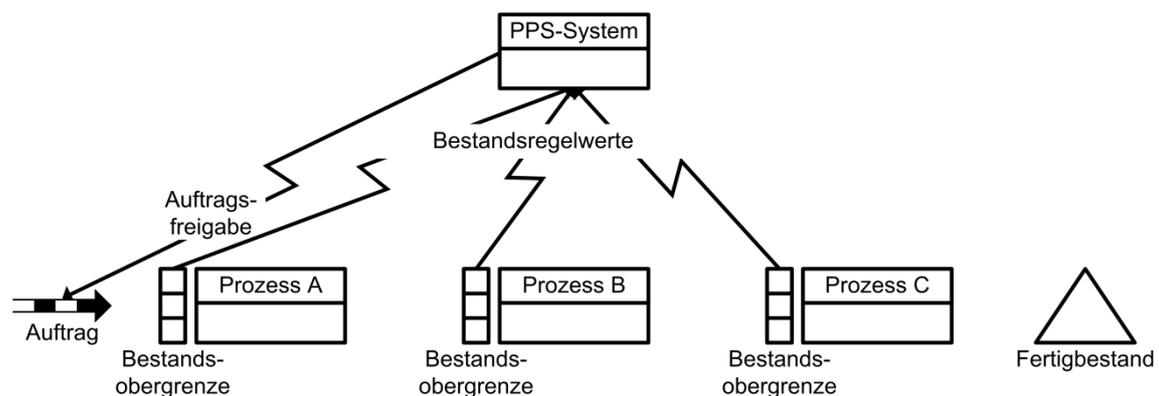


Abbildung 18: Zentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsobergrenzen (Fall 2.2.2)

Die *WLC (Workload Control)-Steuerung* stellt die Basisausgestaltungsvariante des hier beschriebenen Auftrageinlastungsmechanismus dar. In ihrer Ausgestaltung wird jedem Arbeitssystem eine dezentrale Bestandsobergrenze zugewiesen. Vor der plantermingemäßen Auftragsfreigabe wird geprüft, ob die Belastungsgrenzen einzelner Arbeitssysteme durch die Freigabe überschritten werden. Ist dies der Fall, wird der Auftrag zurückgestellt (Hendry et al. 1998, Henrich 2005).

Auch im Rahmen der *BOA (Belastungsorientierte Auftragsfreigabe)-Steuerung* wird jedem Arbeitssystem ein Bestandskonto mit einer Bestandsobergrenze zugeordnet. Von einer zentralen Steuerungsinstanz aus werden solange Aufträge gemäß ihrer Dringlichkeit freigegeben, bis die Bestandsgrenzen einzelner Arbeitsstationen dadurch überschritten werden. Dabei kommt jedoch im Gegensatz zur WLC-Steuerung ein sogenannter Einlastungsprozentsatz zur Anwendung, der festlegt, zu wie viel Prozent die Vorgangsdurchführungszeit eines Auftrags eine einzelne Arbeitsstation belastet. Die nicht freigegebenen Aufträge werden zurückgestellt und zum nächstmöglichen Zeitpunkt freigegeben (Bechte 1980, Wiendahl 1997).

Die *ALP (Auftragsfreigabe mit Linearer Programmierung)-Steuerung* ordnet ebenfalls jedem Arbeitssystem eine dezentrale Bestandsobergrenze zu. Allerdings wird im Verlauf des Verfahrens jeder Auftrag, unabhängig davon, ob sein Planstarttermin erreicht ist, zur Freigabe geprüft. Dabei werden mithilfe eines Optimierungsalgorithmus die Reihenfolge und die Anzahl von Aufträgen festgelegt, durch welche die dezentralen Bestandspuffer so nah wie möglich an ihrer Bestandsobergrenze ausgelastet werden (Irastorza & Deane 1974).

Die *GPOLCA (Generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorisation)*- sowie die *COBACABANA (Control of Balance by Card-based Navigation)-Steuerung* stellen jeweils eine Umsetzung des auf dezentralen Bestandsobergrenzen basierenden zentralen Einlastungsmechanismus mithilfe von Auftragskanbans dar. Die Grundidee in beiden Verfahrensvarianten besteht darin, jeder Arbeitsstation beziehungsweise Fertigungszelle eine begrenzte Anzahl an Auftragskanbans zuzuordnen. Aufträge werden erst dann zentral freigegeben, wenn für einen Auftrag alle dafür notwendigen Auftragskanbans der einzelnen Arbeitssysteme zur Verfügung stehen. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten besteht darin, dass die GPOLCA-Steuerung die Auftragskanbans immer einer bestimmten Kombination zweier Fertigungszellen zuordnet. Sie ist daher im Bezug auf die Planparametervariation stärker eingeschränkt als die COBACABANA-Steuerung (Fernandes & do Carmo-Silva 2006, Land 2008).

Als weitere grundsätzliche Variante der bestandsorientierten Auftragseinlastung kann eine dezentrale Bestandsregelung auch auf dezentralen Bestandsuntergrenzen nach den einzelnen Steuerungsobjekten auf Arbeitssystemebene (Fall 3.1.1) basieren. Der in Abbildung 19 dargestellte Mechanismus beruht auf dem Prinzip, dass an einem Arbeitssystem ein Teil oder eine Variante immer nachproduziert wird, wenn die nachgelagerte Bestandsuntergrenze der Variante unterschritten wird. Dadurch werden eine Mindestlieferzeit und ein selbstregelnder Produktionsfluss implementiert. Allerdings gilt dabei die Einschränkung, dass die variantenbezogenen, nachgelagerten Bestände auf Arbeitssystemebene nur eine geringe Planparametervariation erlauben. Zudem setzt die dezentrale Selbststeuerung dieser Verfahrenskategorie eine feste Prozessfolge voraus. Ausgestaltungsvarianten sind die sogenannte *Kanban-Steuerung* und Derivate derselben.

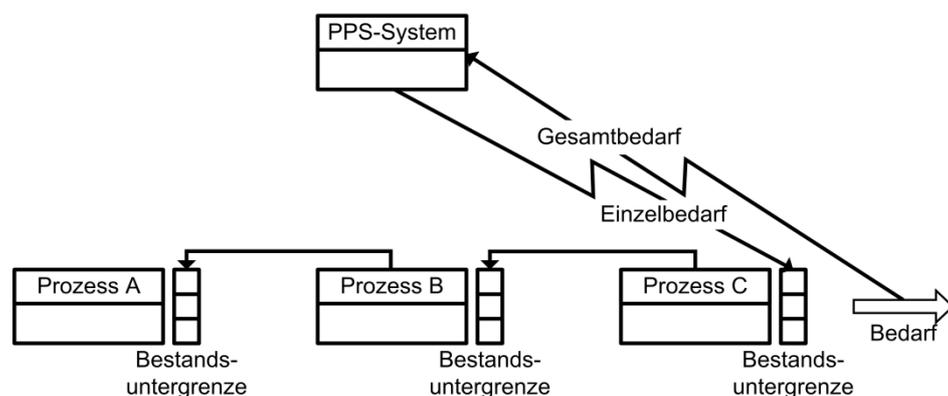


Abbildung 19: Dezentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsuntergrenzen (Fall 3.1.1)

Die *Kanban-Steuerung* setzt den beschriebenen Mechanismus mithilfe von Kanbansignalen um. Dabei befindet sich die Bestandsuntergrenze in Form eines Puffers räumlich beim Nachfolgerprozess. Beim Unterschreiten der Bestandsgrenze löst der Nachfolger durch ein Kanbansignal die Produktion beim Vorgängerprozess aus. Da mittlerweile eine Vielzahl an kanbangesteuerten Verfahren existiert, die auf unterschiedlichen Regelungsmechanismen basieren, ist die Bezeichnung „Pull-Kanban“ für diese spezielle Verfahrenskategorie treffender (Spearman et al. 1990, Geraghty & Heavey 2005, Stevenson et al. 2005, Altendorfer et al. 2008, Gonzalez & Framinan 2009, Riezebos et al. 2009, Riezebos & Klingenberg 2009, Junior & Filho 2010). Bekannte Varianten der *Pull-Kanban-Steuerung* sind die *Synchro-MRP*-, die *Hybride Kanban-CONWIP*- sowie die *SAPCO-Steuerung* (Hall 1986, Bonvik et al. 1997, Lopitzsch 2005). Eine ausführliche Abhandlung zu Pull-Kanban-Derivaten findet sich bei Nagendra & Das/1999, Geraghty & Heavey/2005, Gonzalez & Framinan/2009 und Junior & Filho/2010.

Die vorangehend beschriebene dezentrale Bestandsregelung kann schließlich auch mit den in Abbildung 20 abgebildeten dezentralen Bestandsobergrenzen vor den einzelnen Steuerungsobjekten auf Arbeitssystemebene (Fall 3.2.2) kombiniert werden. Bei diesem Mechanismus wird jedem Steuerungsobjekt eine Bestandsobergrenze zugewiesen, die seitens eines Vorgängerarbeitssystems nicht überschritten werden darf. Daraus resultiert eine dezentrale Belastungsnivellierung, wobei gleichzeitig die Gesamtfertigung vor einer Überlastung geschützt wird. Dieser Mechanismus eignet sich prinzipiell in Abhängigkeit von seiner Ausgestaltung für eine hohe Planparametervariation. Bekannte Ausgestaltungsvarianten sind die DBF- sowie die POLCA- und die BGD-Steuerung.

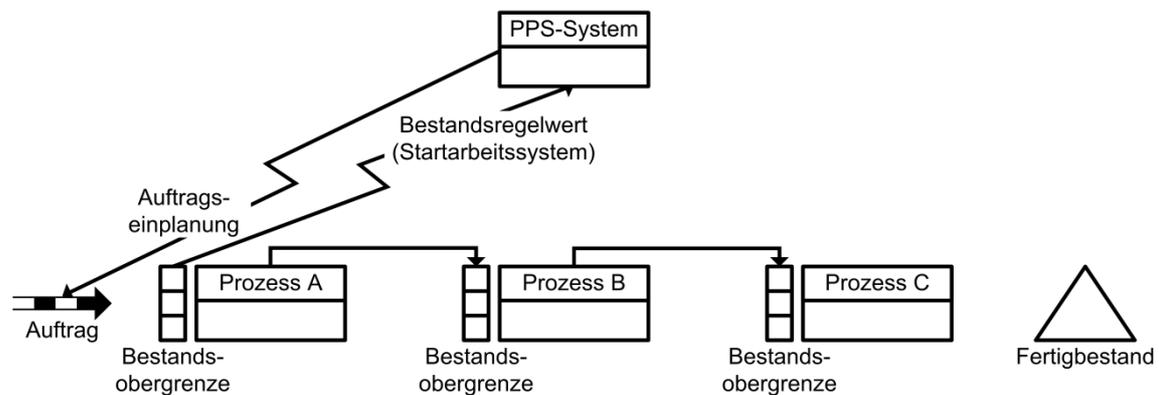


Abbildung 20: Dezentrale Bestandsregelung mit dezentralen Bestandsobergrenzen (Fall 3.2.2)

Die *DBF (Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung)-Steuerung* ist eng an den Grundmechanismus der auf arbeitssystemvorgelagerten Bestandsobergrenzen basierenden, dezentralen Bestandsregelung angelehnt. In ihrer Ausgestaltung wird eine prinzipielle Standardprozessfolge festgelegt, in der jedem Arbeitssystem eine dezentrale Bestandsobergrenze und eine Positionsnummer zugeordnet werden. Die Bestandsobergrenzen dürfen seitens eines Vorgängerarbeitssystems flexibel angesprochen, aber nicht überschritten werden, außer wenn das Vorgängerarbeitssystem eine höhere Positionsnummer aufweist (Lödding 2001, Lödding et al. 2003).

Die Ausgestaltungsvarianten der *POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorisation)*- und der *BGD (Bestandsgeregelte Durchflusssteuerung)-Steuerung* weisen prinzipiell eine ähnliche Funktionsweise auf. So sehen beide Varianten die Implementierung von festen Standardreihenfolgen vor, in denen jedem Arbeitssystem eine spezifische Bestandsobergrenze zugewiesen wird. Diese Bestandspuffer werden den möglichen Vorgängerarbeitssystemen fest zugeordnet und dürfen seitens der Vorgängerprozesse nicht überschritten werden. Dabei kommt in beiden Verfahrensvarianten eine zusätzliche Restriktion zum Einsatz, die vorsieht, dass Arbeitsvorgänge nur bearbeitet werden dürfen, wenn neben der Einhaltung der Bestandsobergrenze des Nachfolgerprozesses auch eine Plantermindringlichkeit des Auftragsvorgangs gegeben ist. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt in ihrer Ausgestaltung. Während die POLCA-Steuerung die dezentralen Bestandspuffergrenzen mit Kanbansignalen abbildet, liegt für die BGD-Steuerung kein konkreter Implementierungsvorschlag zur operativen Material- und Informationsflusssteuerung vor (Busch 1987, Suri 1998, Krishnamurthy & Suri 2009).

### **Planparametervariabilitätseignung der Auftragseinlastungsverfahren**

In Abhängigkeit von der beschriebenen Funktionsweise eignen sich einzelne Auftragseinlastungsverfahren für jeweils spezifische Planparametervariabilitätsfälle. Schon die Entwicklung eines Auftragseinlastungsverfahrens steht in der Regel im Entstehungszusammenhang mit einer typischen Betriebstypologie oder einem bestimmten Aufgabenbereich. Dementsprechend existiert für jedes Verfahren ein geeigneter Planparametervariabilitätsbereich, in dem es wirksam zur Verbesserung der logistischen Zielerreichung beitragen kann. Die folgende Abbildung zeigt die Einteilung der vorangegangenen beschriebenen Auftragseinlastungsverfahren nach den Fallgruppen aus Tabelle 4 anhand ihrer Eignung für die in Kapitel 2.1.3 beschriebenen grundsätzlichen Planparametervariabilitätsfälle. Bei dieser Einteilung setzt die Eignung für eine hohe Planparametervariabilität auch immer eine prinzipielle Anwendbarkeit im Falle einer geringeren Planparametervariabilität voraus.

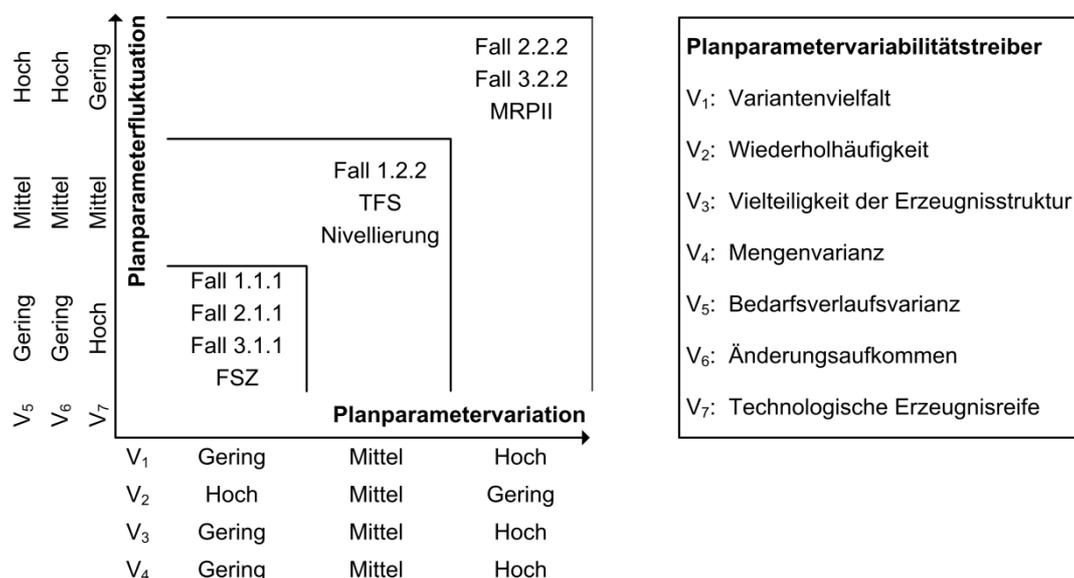


Abbildung 21: Auftragseinlastungsverfahren im Kontext ihrer Planparametervariabilitätseignung

### **Verfahren zur Reihenfolgebildung**

Bei den im Folgenden aufgelisteten Verfahren zur Reihenfolgebildung handelt es sich um eine Auswahl bekannter Prioritätsregeln, die sich als Heuristiken in der Praxis bewährt haben. Sie dienen dazu, die Reihenfolge in einer Auftragswarteschlange vor dem Steuerungsobjekt Fertigungsbereich oder Arbeitssystem anhand eines spezifischen Prioritätskriteriums zu regeln. Dabei können durch ihre Anwendung unterschiedliche, logistische Ziele verfolgt werden (Günther & Tempelmeier 1994, Schulte 1995, Conway et al. 2003, Fischer 2007, Jodlbauer 2007, Wannewetsch 2007, Wiendahl 2008b).

<b>Bezeichnung</b>	<b>Prioritätskriterium</b>	<b>Logistisches Ziel</b>
Earliest Due Date (EDD)	Dringlichster Liefertermin	Termintreue
Earliest Operation Due Date (ODD)	Dringlichster Vorgangstermin	Termintreue
First In First Out (FIFO)	Eingangstreihenfolge	Termintreue
Least Slack (LSK)	Kürzeste Übergangszeitsumme	Termintreue
Shortest Processing Time (SPT)	Kürzeste Bearbeitungszeit	Durchlaufzeit
Extended Work in Next Queue (XWINQ)	Niedrigstes Bestandsniveau aller Nachfolgerprozesse	Auslastung

Tabelle 5: Ausgewählte Verfahren zur Reihenfolgebildung

### **Verfahren zur Kapazitätssteuerung**

Die Kapazitätssteuerung verfolgt die Anpassung des Kapazitätsangebots an den vorliegenden Kapazitätsbedarf mit dem Ziel der möglichst anpassungsarmen Durchsetzung der vorgegebenen Planparameter. Als systematische Verfahren zu ihrer Ausgestaltung existieren die beiden generischen Ansätze der Rückstandsregelung sowie der LMKS.

Die *Rückstandsregelung* misst den zeitlichen oder mengenmäßigen Produktionsrückstand an einem Steuerungsobjekt anhand der gesetzten Planparameter. In Abhängigkeit von der festgestellten Abweichung wird die Kapazität des Steuerungsobjekts als Stellgröße angepasst. Voraussetzung für ihre Anwendung ist eine ausreichende Kapazitätsflexibilität und eine aussagefähige Rückstandsmessung. Die Rückstandsregelung ist prinzipiell universell anwendbar. Allerdings bedarf sie einer individuellen Ausgestaltung in Abhängigkeit von der vorliegenden Auftragsstruktur, dem Erzeugnisspektrum, der logistischen Zielsetzung und der vorliegenden Fertigungssteuerungskonfiguration sowie der vorhandenen Kapazitätsflexibilität einer Fertigung (Lödding 2008b).

Einen eingeschränkteren Anwendungsbereich weist das Verfahren der *LMKS (Leistungsmaximierende Kapazitätssteuerung)* auf. Ziel ihrer Anwendung ist es, die Engpässe einer Fertigung optimal auszulasten. Im Gegensatz zur Engpasssteuerung regelt sie dazu aber nicht die Belastung der Engpassarbeitssysteme durch einen Auftragsfreigabemechanismus, sondern die Kapazität des engpassvorgelagerten Fertigungsabschnitts. Dadurch wird eine leistungsmaximale Versorgung der Engpassarbeitssysteme unterstützt. Da sich dieses Verfahren eng an das Auftrags-einlastungsverfahren der Engpasssteuerung anlehnt, ist es in dem Anwendungskontext desselben zu bewerten (Lödding 2008b).

## **Verfahren zur Material- und Informationsflusssteuerung**

Der Material- und der Informationsfluss einer Produktion sind untrennbar miteinander verknüpft (Haller 1999, Rother & Shook 2003, Pawellek 2007, Wannenwetsch 2007, Erlach 2010). Während der Materialfluss den Transport, die Handhabung sowie das Lagern von Materialien, Halbfertig- und Fertigteilen zwischen den einzelnen Bearbeitungsprozessen beinhaltet, stellt der Informationsfluss den dafür notwendigen Fluss an Informationen zwischen den einzelnen Bearbeitungsprozessen und der zentralen Steuerungsinstanz dar. Dementsprechend geht mit der Steuerung des Materialflusses auch immer eine Steuerung des Informationsflusses einher (Haller 1999, Klug 2000, Pawellek 2007, Erlach 2010).

In der konkreten Ausgestaltung beinhaltet die Aufgabe der operativen Material- und der Informationsflusssteuerung die Überwachung und Steuerung der Material- und Informationsflüsse zwischen den einzelnen Bearbeitungsprozessen. Das umfasst den Betrieb sowie die Überwachung der Material- und Informationsflussmittel einer Produktion (vgl. Kapitel 2.1.2). Auf eine Übersicht möglicher Material- und Informationsflussmittel und Ausgestaltungsansätze von Material- und Informationssystemen wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet<sup>6</sup>. Im Folgenden werden nunmehr grundsätzliche Verfahrensansätze zur Steuerung von Material- und Informationsflussmitteln beschrieben.

Der *Milkrun* ist ein Transportkonzept, das einen zyklischen Materialtransport vorsieht. Dafür wird in einem Fertigungsbereich eine feste Route mit fixen An- und Ablieferungszeitpunkten definiert, anhand derer mithilfe einer Transportressource der Materialfluss zwischen den einzelnen Bearbeitungsprozessen erfolgt. Dadurch werden sowohl der Transport- als auch der Steuerungs- und Koordinationsaufwand des Materialflusses minimiert (Baudin 2004, Müller et al. 2009d). Prinzipiell setzt ein Milkrun eine geringe Planparametervariation voraus.

Das Transportkonzept der *Hol- oder Bringschuld* stellt zwei grundsätzliche Möglichkeiten der Übergabe von Informationen und Materialien dar. Das Konzept regelt die prinzipielle Übergabeverantwortlichkeit zwischen einzelnen Material- und Informationsflussressourcen. Die Bringschuld eignet sich immer dann, wenn Material und Informationen von einem Materialflusssknoten an mehrere unterschiedliche Nachfolger weitergegeben wird. Dagegen kann die Holpflicht nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn einem Nachfolger ein Vorgänger fest zugeordnet ist (Carbon 1999a, Wiendahl 2002, Bornhäuser 2009).

Bei den grundsätzlichen Verfahren zur Informationsweitergabe wird zwischen dem Konzept der *sensorischen Informationsübermittlung* durch Sehen, Hören oder Fühlen und dem Konzept der *maschinellen Datenübertragung* durch die Übermittlung und Verarbeitung von Zeichenfolgen beziehungsweise Daten unterschieden. Während eine sensorische Informationsübermittlung beispielsweise mithilfe von Kanbansignalen erfolgen kann, wird ein maschineller Datenaustausch häufig durch Transponder- oder Codierungssysteme realisiert. Beide Übermittlungsarten können auch in Kombination zueinander eingesetzt werden (Arnold et al. 2008, Schieck 2008).

---

<sup>6</sup>Weiterführende Darstellungen zu Material- und Informationssystemen finden sich bei Köhler/1959, Haller/1999, Hompel et al./2007, Arnold et al./2008, Arnold & Furmans/2009 und Martin/2009.



### 2.1.6 Zwischenfazit

Die Übersicht von Fertigungssteuerungsverfahren der nicht-mathematischen Verfahrensforschung anhand ihrer Eignung für die einzelnen Steuerungsaufgaben in Tabelle 6 zeigt ein sehr heterogenes Angebot an Ausgestaltungsvarianten. Bei den meisten Ansätzen handelt es sich um Verfahren, welche nur die Auftragsfreigabe oder -erzeugung innerhalb der Fertigungssteuerung übernehmen. Insbesondere bei Verfahren zur Kapazitätssteuerung und zur operativen Material- und Informationsflussteuerung besteht ein offensichtliches Defizit an systematischen Verfahrensansätzen. Auch eine ganzheitliche Integration aller Aufgaben der Fertigungssteuerung kann keines der bestehenden Steuerungskonzepte vollständig leisten.

Diese Heterogenität der Steuerungsverfahrenlandschaft ist ihrem historischen Entwicklungszusammenhang geschuldet. Genauso wie bei dem übergeordneten Bereich der Produktionswissenschaft handelt es sich auch bei dem Teilbereich der Steuerungsverfahrenforschung um eine gewachsene Forschungsdisziplin. Dementsprechend geht mit der Weiterentwicklung der Produktionsorganisation immer auch die Entwicklung neuer Steuerungsansätze einher. Genauso wie in der Produktionsorganisation in den letzten Jahren eine Entwicklung weg von einer funktionalen Trennung hin zu einer zunehmenden Segmentierung und Vernetzung der Fertigung stattgefunden hat (Müller & Ackermann 2007), ist es auch im Bereich der Steuerungsverfahrenforschung in der Vergangenheit immer wieder zu Paradigmenwechseln gekommen, die zu teilweise völlig verschiedenartigen Steuerungsverfahrensansätzen für einzelne Fertigungstypologien geführt haben.

Aus diesem Entstehungszusammenhang heraus erklärt sich die unterschiedliche Eignung der einzelnen Verfahrensansätze für die grundsätzlichen Fertigungsstrukturfälle und deren Planparametervariabilitätsausprägung. In der Übersicht in Tabelle 6 zeigt sich zwar eine ausgewogene Verteilung hinsichtlich geeigneter Ansätze für eine hohe beziehungsweise geringe Planparametervariation, allerdings können nur wenige Fertigungssteuerungsverfahren eine hohe Planparameterfluktuation und damit auch eine hohe Turbulenz und Planungsunschärfe kompensieren.

Diese Einteilung der Verfahren basiert auf den Erkenntnissen verschiedener Autoren, welche die einzelnen Fertigungssteuerungsverfahren im Bezug auf ihre Verwendbarkeit für einzelne Merkmalsausprägungen des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur einer Fertigung beurteilen. Durch das in Kapitel 2.1.3 neu eingeführte Beschreibungsmodell der Planparametervariabilität als Funktion der Determinanten des Erzeugnisspektrums und der Auftragsstruktur kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine systematische Klassifikation der einzelnen Verfahren vorgenommen werden. Somit hilft das vorgestellte Beschreibungsmodell die Wirkungszusammenhänge zwischen den Fertigungsdeterminanten und der Steuerungsfähigkeit einer Fertigung zu verstehen. Darüber hinaus bietet das Modell die Möglichkeit zur Operationalisierung der Planparametervariabilität einer Fertigung beispielsweise in Form von Variabilitätskennzahlen. Mit diesen können die Auswirkungen der Steuerungsprämissen unterschiedlicher Fertigungstypologien auf ihre jeweilige Steuerungsfähigkeit beurteilt werden.

Die Steuerungsprämissen der Betriebstypologie Musterfertigung bei Systemlieferanten werden nun im folgenden Abschnitt diskutiert.

## 2.2 Musterfertigung bei Systemlieferanten

Bei einem Muster (synonym: Prototyp) handelt es sich um ein Testexemplar eines späteren Serienerzeugnisses, das sowohl zur Beurteilung von Form, Funktion, Entwicklungsqualität, Kosten und Herstellbarkeit als auch zur Erprobung des zukünftigen Serienerzeugnisses in übergeordneten Wertschöpfungsstufen dient (Hirsch 1992, Steinbuch 1999, Westkämper 2006). Prinzipiell unterscheidet man zwischen Design- und Funktionsmustern für Vorversuche, Funktions- und Versuchsmuster für Funktions- und Dauererprobungen sowie seriennahen Erst- beziehungsweise Freigabemustern zur Beurteilung der Einsatzfunktionalität (Schubert 1964, Eversheim 1996, Westkämper 2006, Müller et al. 2009c). Muster werden in jeder Produktneu- oder -weiterentwicklung zur permanenten physischen Validierung des Entwicklungsstatus benötigt (Eversheim 1996, Bullinger 2002, VDA 2004a, Wiendahl 2008b). Dadurch erklärt sich, dass „die Fertigung von Modellen und Musterteilen einen wesentlichen Einfluss auf die Produktentwicklungszeit nimmt“ (Bullinger 1997, S. 171).

Aufgrund der wesensgemäßen Bestimmung von Mustern, Entwicklungsstände eines Erzeugnisses abzubilden, unterliegt die allgemeine betriebliche Aufgabe Musterfertigung einer besonderen Grundvoraussetzung. Muster zu fertigen bedeutet die auftragsbezogene Produktion von Neukonstruktionen mit unscharfen Prozessinformationen. Dabei müssen Entscheidungen in der Fertigungsplanung zu einem Zeitpunkt getroffen werden, in dem nur wenig Wissen bezüglich der späteren Fertigungsprozessauslegung vorhanden ist. Insbesondere die Festlegung des Planparameters Prozessvorgabezeit wird infolgedessen zum Risikofaktor (Schubert 1964, Brankamp 1971, Hirsch 1992, Kuhlmann 1994). Diese in Abbildung 22 (i.A.a. Hirsch 1992) schematisch dargestellte, immanente Planungsunschärfe verdeutlicht die hohe Relevanz von Erfahrungswissen in einer Musterfertigung.

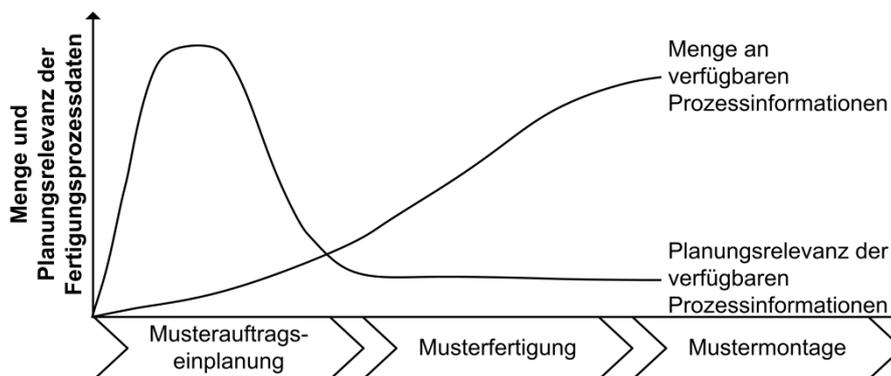


Abbildung 22: Planungsunschärfe der Musterfertigung

Unter dem Begriff Musterfertigung wird die Herstellung von Mustern in einer autonomen Organisationseinheit verstanden (Schubert 1964, Hirsch 1992, Stirzel & Hüntelmann 2006). In der Regel handelt es sich dabei um einen eigenständigen Fertigungsbereich, der alle Funktionen einer Produktion in Form einer Arbeitsvorbereitung, Teilefertigung und Montage umfasst (Schubert 1964, Wamecke 1995). Insofern stellt die Musterfertigung bei der Einordnung in die unterschiedlichen Strukturebenen eines Produktionssystems (vgl. Abbildung 12) ein Subsystem auf der Fertigungsbereichsstrukturebene eines Produktionssystems dar.

### 2.2.1 Systemlieferanten der Automobilindustrie

Systemlieferanten (synonym: Tier 1 Supplier, Systempartner, Systemführer, Systemintegratoren) sind Zulieferunternehmen der Automobilindustrie, die mit hohem Eigenentwicklungs- und Wertschöpfungsanteil technisch komplexe Systeme für die Anwendung im Automobil entwickeln und damit ein breites Spektrum an Automobilherstellern beliefern (Bungard & Hofmann 2002, Gehrke 2003, Kurek 2004, Becker 2007). Sie unterscheiden sich gegenüber anderen Automobillieferanten vor allem durch den hohen Eigenentwicklungsanteil ihrer Produkte, der wiederum aus der hohen technischen Komplexität derselben resultiert. In der Regel handelt es sich bei den Erzeugnissen von Systemlieferanten um Systemlösungen, die komplette Funktionsbereiche eines Fahrzeugs abdecken (Wildemann 1997, Gehrke 2003, Becker 2007, Baumann 2008).

Infolge der schon in der Einleitung erwähnten Trends kommt es zukünftig zu einer breiten Konsolidierung der Zulieferstrukturen der Automobilindustrie. Dabei erhöht sich der Anteil fremdbezogener Systeme am Gesamt-Fahrzeug stark, wobei insbesondere der Wertschöpfungsanteil der Systemlieferanten anteilig wächst. Das führt dazu, dass die schon aktuell hohe Bedeutung der Systemlieferanten für die Automobilherstellung zukünftig weiter zunehmen wird. Systemlieferanten stehen damit vor der Herausforderung, einen wesentlichen Anteil an der Automobilherstellung zu übernehmen (Wildemann 1997, Kinkel & Lay 2004, Kurek 2004, Wildemann 2004, Schuh et al. 2005, Hab & Wagner 2006, Becker 2007, Fuß 2008, Dannenberg et al. 2009, Schuh et al. 2009, Winterhoff et al. 2009).

Dem mit der Wertschöpfungserhöhung einhergehendem Kostenrisiko in der Produktentwicklung sowie der zunehmenden kundenseitigen Produktdiversifizierung versuchen Systemlieferanten mit Plattformstrategien zu begegnen. Diese bieten neben dem generellen Kostenvorteil der Produktstandardisierung auch den Vorteil, die hohen Vorabkosten einer Systementwicklung auf mehrere Kundenprojekte verteilen zu können. Plattformprojekte entwickeln sich folglich zur bestimmenden Produktentwicklungsform von Systemlieferanten in der Zukunft (Risse 2003, Kinkel & Lay 2004, Kurek 2004, Wildemann 2004, Bischoff 2007, Jodlbauer 2007). Der zugrunde liegende Produktentstehungsprozess solcher Systemplattformen wird dabei zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor (Fitzek 2005, Becker 2007, Baumann 2008).

### 2.2.2 Musterfertigung im Produktentstehungsprozess

Grundsätzlich umfasst der Produktentstehungsprozess alle der Serienproduktion vorgelagerten Aktivitäten. Er bildet, wie in folgender Abbildung (i.A.a. VDA 2004b) schematisiert, die integrierende Klammer des Konzeptions- und Realisierungsprozesses neuer Produkte und umfasst dabei die Zeitdauer vom Beginn der Produktkonzeption bis zum Abschluss des Serienhochlaufs, die sogenannte Time-to-Market (Risse 2003). Ziel des Produktentstehungsprozesses ist die Entwicklung eines marktfähigen Produkts in Form einer Neu-, Weiter-, Varianten- oder Anpassungsentwicklung (Risse 2003). Gemeinhin wird der Produktentstehungsprozess als der wichtigste Faktor des Unternehmenserfolgs angesehen (Scholz-Reiter et al. 2005).

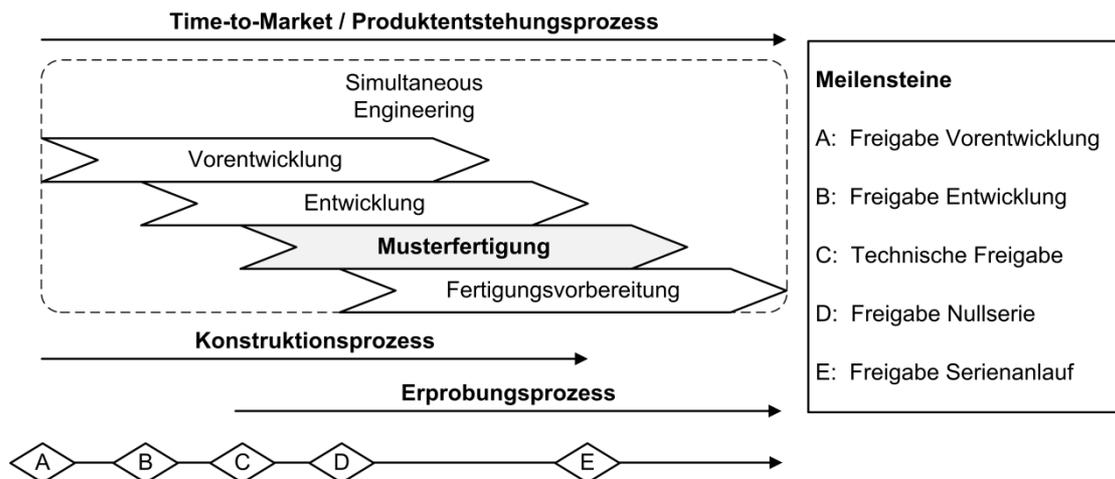


Abbildung 23: Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie [i.A.a. VDA/2004b]

Die Musterfertigung ist neben der Vorentwicklung, der Entwicklung und der Fertigungsvorbereitung einer von vier Teilprozessen, die in einer zeitlich versetzten Zeitfolge die Produktentstehungszeit bestimmen. Prinzipiell ist die Phase der Musterfertigung zwischen der Konstruktionsphase und der Erprobungsphase einzuordnen. Allerdings ist bei dieser Einordnung keine klare zeitliche Abgrenzung möglich, da es aufgrund des mittlerweile in der industriellen Praxis vorherrschenden Simultaneous Engineerings zu einer starken Überlappung und einer vertikalen Integration aller vier Zeitphasen des Produktentstehungsprozesses kommt (Bullinger 2002, Hegenscheidt 2003, Risse 2003, Bischoff 2007, Näser & Müller 2007).

Im spezifischen Produktentstehungsprozess von Systemlieferanten nimmt die Musterfertigung eine maßgebliche Verbindungsfunktion zwischen dem Produktkonzept und der Produktrealisierung ein. So erfordert die technologische Komplexität der Erzeugnisse von Systemlieferanten eine durchgängige gemeinschaftliche Abstimmung zwischen den Systemlieferanten und den Fahrzeugherstellern (VDA 2000, Gehrke 2003, Bufka 2004, Kinkel & Lay 2004, Kurek 2004, Romberg et al. 2005, Hab & Wagner 2006, Baumann 2008, Kirst 2008, Schmid & Grosche 2008). Erzeugnismuster dienen dabei als Abstimmungsplattform zwischen Produktentwicklung, Serienprozessplanung und den Kunden. Sie werden sowohl zur Erprobung bei den externen Kunden einer Produktplattform als auch zur Funktionsprüfung in der internen Produktentwicklung eingesetzt. Darüber hinaus kann die Musterfertigung als Erfahrungsträger die Serienfertigungsprozessplanung und Produktentwicklung bezüglich der Optimierung der Herstellbarkeit der jeweiligen Entwicklungsstände einer Produktplattform unterstützen. Durch diese Funktion trägt die Musterfertigung erheblich zum Erfolg des Produktentstehungsprozesses von Systemlieferanten bei, da sie die Entwicklung der Serienproduktqualität im Verhältnis zur Anlaufzeit maßgeblich beschleunigt (Schubert 1964, Kuhn 2002, Braess & Seiffert 2005, Stirzel & Hüntelmann 2006, Bischoff 2007, Kienzle 2008, Kirst 2008, Müller et al. 2009c).

Die zeitliche Einordnung der einzelnen Musterphasen in den Produktentstehungsprozess von Systemlieferanten ist in der folgenden Grafik abgebildet. Die dabei dargestellten und (i.A.a. Kienzle 2008, Müller et al. 2009c) im Folgenden beschriebenen Zeitphasen sind ungefähre Mittelwerte, die im Einzelfall differieren können.

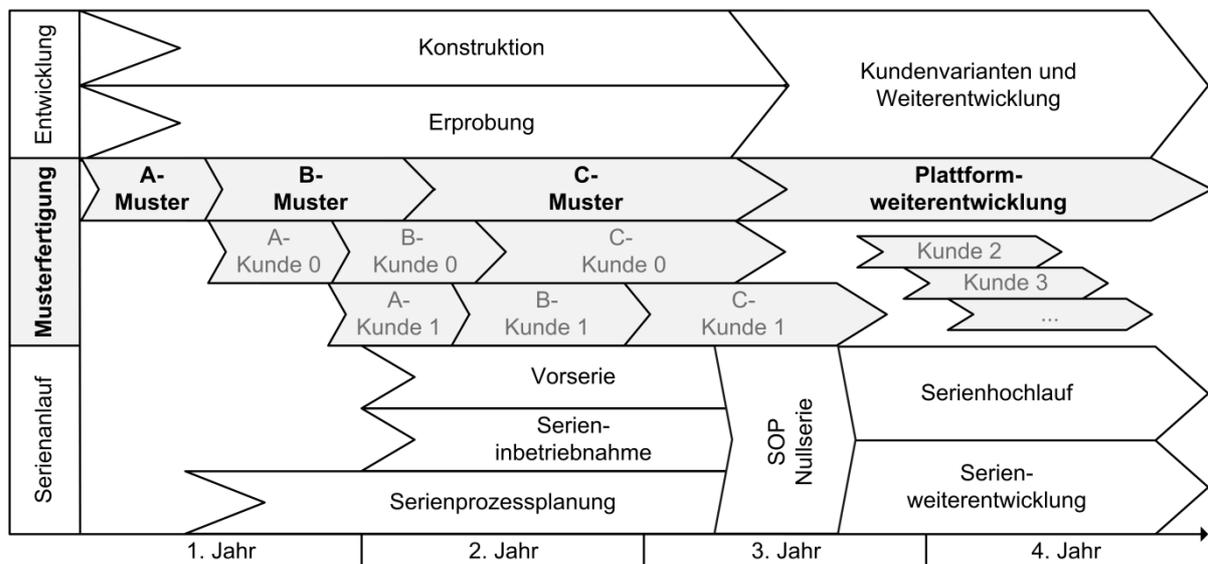


Abbildung 24: Musterfertigung im Produktentstehungsprozess [i.A.a. Müller et al./2009c]

In den ersten drei bis sechs Monaten des Produktentstehungsprozesses, der sogenannten A-Musterphase, dienen Muster hauptsächlich zur internen Bestätigung des Produktentwurfs und seiner Grundfunktionen. Die Produktentwicklung legt anhand der A-Muster das Design und die Grundfunktionalität eines Erzeugnisses fest. Die ersten A-Muster für die Kunden dienen dem grundsätzlichen Abgleich von Produktfunktionalität und Kundenanforderungen.

Nachdem die Grundfunktionalität durch die A-Musterphase bestätigt ist, rückt in den darauffolgenden neun bis zwölf Monaten die Herstellbarkeit in größeren Stückzahlen in den Vordergrund. In der sogenannten B-Musterphase entscheiden die Produktentwicklung, die Serienfertigungsplanung und der Einkauf auf Basis des B-Musterstands, mit welchen Fertigungsprozessen das Erzeugnis in der späteren Serienfertigung hergestellt werden kann und welche Lieferanten für den Fremdbezug in Frage kommen. Die an die Kunden gelieferten B-Muster unterliegen in dieser Musterphase schon detaillierten Spezifikationen und werden seitens der Kunden hinsichtlich ihrer Verbaubarkeit und Integration in das Gesamtfahrzeug getestet.

Den Abschluss der Plattformentwicklung bildet die anschließende, 12 bis 15 Monate dauernde C-Musterphase. Sie dient vor allem zur finalen Abstimmung der Erzeugnisspezifikationen und der Logistikprozesse mit den Kunden, welche die C-Muster in ihren Montageeinrichtungen und Testträgern im Dauereinsatz erproben. Der hohe Stückzahlanteil von über 80% an der Gesamtstückzahl aller gefertigten Muster belegt den hohen Aufwand dieser abschließenden Feinabstimmung.

Der beschriebene Abstimmungsprozess setzt sich auch nach dem Abschluss der Plattformentwicklung und dem Start of Production (SOP) in einer zeitlich versetzten Kundenvarianten-Musterfertigung fort. So wird eine Systemplattform in der Regel nach ihrer Initialentwicklung für einen eingeschränkten Kreis von Erstkunden an eine Vielzahl weiterer Kunden vermarktet. Das macht für jeden neuen Kunden eine erneute Spezifikationsabstimmung im Rahmen der beschriebenen Musterphasen notwendig. Dadurch kann die Musterfertigung fast den gesamten Produktlebenszyklus eines Erzeugnisses überdauern.

Somit stellt sich an eine Musterfertigung bei Systemlieferanten die Anforderung, permanent Prototypen verschiedener Erzeugnisse in vielfältigen Kundenvarianten und in jeweils unterschiedlichen Produktreifegraden parallel zu fertigen. Die dafür einzuplanenden Bedarfe treten unregelmäßig auf und unterliegen aufgrund der hohen Bedeutung der gefertigten Muster für den Produktentstehungsprozess einem hohen Termindruck (Kienzle 2008, Müller et al. 2009c).

### 2.2.3 Systemische Steuerungsprämissen der Musterfertigung

Diese Anforderung wirkt sich in einer besonderen Ausprägung des Auftrags- und Erzeugnisspektrums einer Musterfertigung aus, die zu der in Kapitel 1 beschriebenen hohen Planparametervariabilität und damit zur Komplexität und Turbulenz in der Ablaufsteuerung einer Musterfertigung führen. Im Folgenden sind diese spezifischen Ausprägungen der Steuerungsprämissen beschrieben.

#### ***Planparametervariationstreiber***

Haupttreiber der Planparametervariation einer Musterfertigung ist die Anforderung, viele unterschiedliche Erzeugnisse, Kundenvarianten und Musterreifstände parallel zu fertigen. Dadurch ist eine Musterfertigung von einer *hohen Variantenvielfalt* geprägt, wobei die einzelnen Varianten in einer *geringen Wiederholhäufigkeit* auftreten. Zudem führt die wesensgemäße Bestimmung von Systemlieferanten dazu, dass die gefertigten Erzeugnisse in der Regel eine sehr *komplexe technologische Erzeugnisstruktur* aufweisen (Kienzle 2008, Müller et al. 2009c).

Die daraus resultierende Planparametervariation soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Ein Diesel-Common-Rail-Einspritzsystem besteht in der Regel aus vier Teilsystemen mit insgesamt bis zu 50 verschiedenen Einzelteilen, die alle mit metallzerspanenden Fertigungsverfahren in einem Fertigungsbereich einer Musterfertigung hergestellt werden. Ein solches Gesamtsystem wird häufig an bis zu 100 verschiedene Kunden vermarktet und dementsprechend angepasst. Im Beispiel wird angenommen, dass bei einer neuen Erzeugnisvariante ein Fünftel aller Einzelteile geometrisch abgewandelt wird. Infolgedessen können bei durchschnittlich fünf Entwicklungsständen pro Kundenvariante allein im Produktentstehungsprozess einer einzigen Systemplattform bis zu 5.000 geometrisch bestimmter, verschiedener Einzelteile als Unikatfertigungsbedarf mit anspruchsvollen Fertigungstoleranzen im µm-Bereich auftreten (Kienzle 2008, Awiszus et al. 2009, Müller et al. 2009c, Reif 2010). Jedes dieser Einzelteile setzt dabei spezifische Prozessfolgen und Arbeitsinhalte voraus.

Zusätzlich zu dieser aus dem Erzeugnisspektrum einer Musterfertigung resultierenden Planparametervariation tritt eine *stark schwankende Mengenvarianz* der Fertigungsbedarfe einer Musterfertigung auf. So werden in der A-Musterphase durchschnittlich fünf Muster pro Fertigungsauftrag gefertigt, wohingegen in der C-Musterphase Auftragslosgrößen von über 150 Stück üblich sind (Müller et al. 2009c). Dementsprechend kommt es zu starken Schwankungen der zu fertigenden Arbeitsinhalte pro Fertigungsauftrag, die damit die zeitliche Variation der Prozessfolgen inhaltlich verstärken. Die Auftragsstruktur einer Musterfertigung kann folglich mit einem Netz verglichen werden, das eine hohe Komplexität aufweist, die durch die stark unterschiedlichen Netzmaschengrößen verstärkt wird.

### Planparameterfluktuationstreiber

Die Planparameterfluktuation in der Ablaufsteuerung einer Musterfertigung wird durch die *stark schwankende zeitliche Bedarfsverlaufsvarianz* bestimmt. Aufgrund der Dynamik in der Produktentwicklung und bei der Vermarktung einer Systemplattform treten Musterprimärbedarfe häufig ohne Vorankündigung auf. Die in der Folge auftretenden Auslastungsschwankungen einer Gesamtmusterfertigung können monatlich stark variieren. In der Folge treten viele ungeplante Vertauschungen und Priorisierungen auf, die zu einer hohen Planparameterfluktuation in Bezug auf die zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen führen.

Ein weiterer Fluktuationstreiber für die Ablaufsteuerung ist auch das *hohe Änderungsaufkommen* einer Musterfertigung. Technologische Änderungswünsche seitens der Produktentwicklung treten in einer Musterfertigung naturgemäß in nahezu jedem Auftrag auf. Dieses Änderungsaufkommen ist in der A-Musterphase am höchsten und nimmt mit zunehmender Produktreife bis in die C-Musterphase ab. Dadurch wird die Haltbarkeitsdauer der gesetzten Planparameter im Hinblick auf die zeitliche Staffelung der Prozessfolgen stark eingeschränkt.

Diese Einschränkung der Haltbarkeitsdauer wird durch die *geringe technologische Erzeugnisreife* von Mustern zusätzlich verstärkt. Wie schon in Kapitel 2.2 dargestellt, unterliegen Muster der wesensgemäßen Bestimmung, unreife Entwicklungsstände abzubilden. Aus diesem Grund herrscht im kompletten Fertigungs- und Produktionsplanungsprozess eines Musterauftrags eine hohe systemimmanente Planungsunschärfe vor. Diese bezieht sich sowohl auf Prozessparameter, Prozessvorgabezeiten als auch auf Gutausbringungsmengen und nimmt erst mit zunehmender Produktreife von der A-Musterphase bis in die C-Musterphase ab.

Die folgende Abbildung fasst noch einmal die steuerungsrelevanten Merkmale der Auftragsstruktur und des Erzeugnisspektrums des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung zusammen.

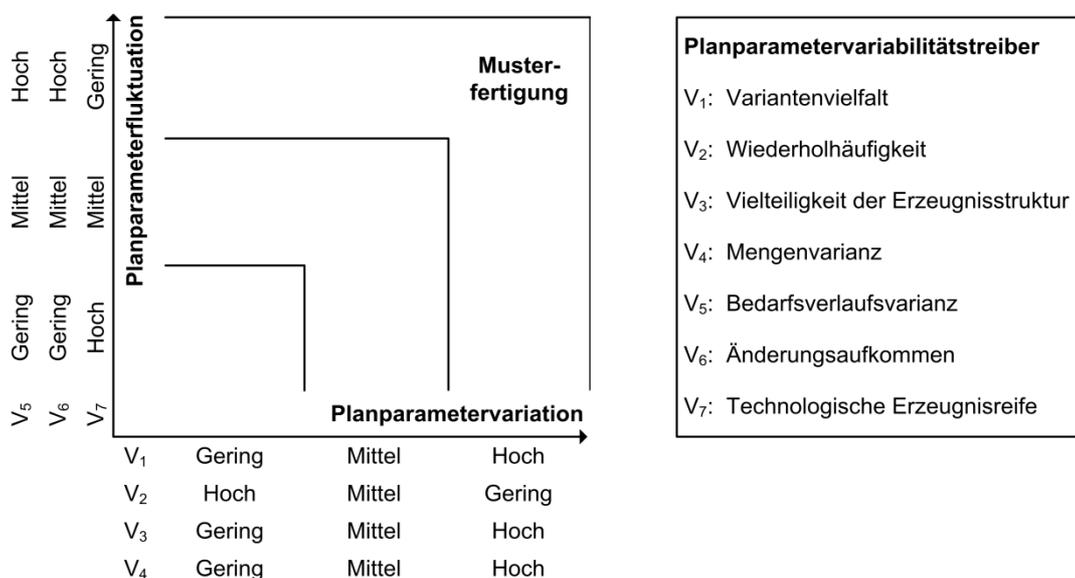


Abbildung 25: Planparametervariabilitätsfall „Musterfertigung“

## 2.2.4 Zwischenfazit

Insgesamt herrscht in einer Musterfertigung bei Systemlieferanten eine hohe Planparametervariabilität vor. Die Basis dafür bildet eine hohe, durch die Auftragsstruktur und das Erzeugnisspektrum einer Musterfertigung induzierte Planparametervariation. So müssen in einer Musterfertigung variantenreiche Prozessfolgen bearbeitet werden, die sich durch eine hohe Variation ihrer Arbeitsinhalte verkomplizieren. Zusätzlich tritt aufgrund der wesensgemäßen Bestimmung einer Musterfertigung, unreife Entwicklungsstände zu fertigen, eine hohe Planungsunschärfe in Form von Bedarfsverlaufsschwankungen, Störungen und Änderungen auf (Schubert 1964, Müller et al. 2009c), die zu einer hohen Planparameterfluktuation führen.

Mit diesen Besonderheiten grenzt sich die Musterfertigung als Betriebstypologie von anderen spezifischen Fertigungsformen, wie der Werkzeug- und Formenfertigung im Einzel- und Kleinserienumfeld ab. Zwar werden auch im Werkzeug- und Formenbau kleine Serien mit Unikatcharakter gefertigt, jedoch handelt es sich dabei in der Regel um abgewandelte, eingeschwungene Wiederholfertigungen eines bestimmten Werkzeugtyps. Produktmuster sind jedoch meist gänzlich neue Erzeugnisse deren unbekannte Prozessspezifikationen zu einer hohen Planungsunschärfe führen.

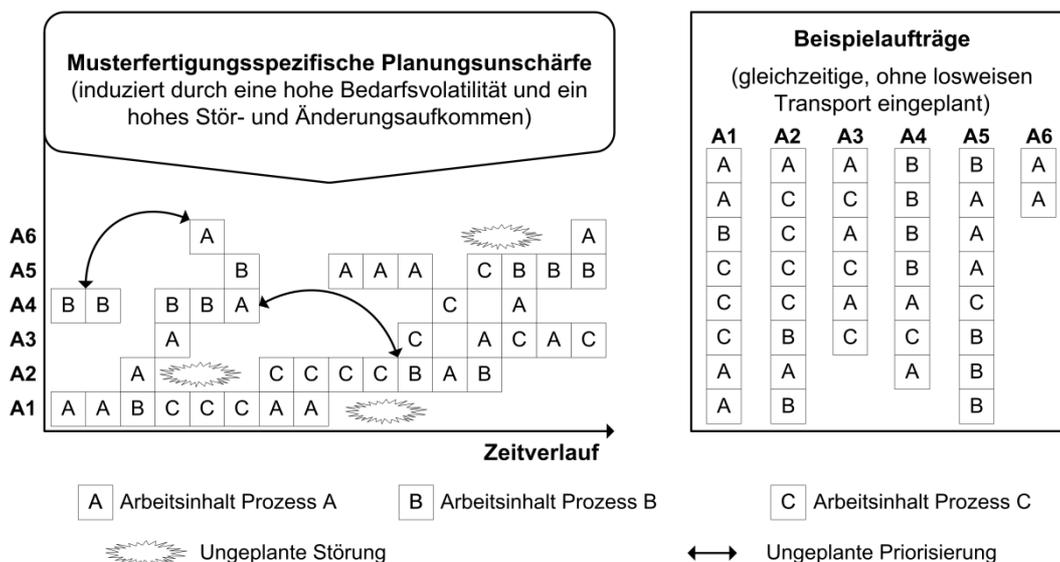


Abbildung 26: Schematisches Auftragsnetz einer Musterfertigung bei Systemlieferanten

So resultiert aus der in Abbildung 26 anhand von sechs Beispielaufträgen skizzierten Prozessfolgevariation einer Musterfertigung ein komplexes Einplanungsproblem. Planerisch muss entschieden werden, ob Aufträge, wie in der Abbildung dargestellt, leistungsoptimal verteilt werden und sich dadurch in ihrer Durchlaufzeit verlängern oder ob Aufträge am Stück gefertigt werden und dafür Auslastungsverluste einzelner Arbeitssysteme hingenommen werden. Problematisch wird diese komplexe Einplanung durch die musterfertigungsspezifische Planungsunschärfe. Die daraus resultierenden, permanent notwendigen Plananpassungen machen einen stabilen Produktionsablauf nahezu unmöglich. Infolgedessen tritt in der betrieblichen Praxis das schon erwähnte systemische Steuerungsproblem einer Musterfertigung auf.

Zu klären ist nun, wie sich die spezifische Planparametervariabilität einer Musterfertigung konkret auf die Steuerungsfähigkeit derselben auswirkt. Daher bedarf es einer tiefgehenden Untersuchung dieses Zusammenhangs.

## 3 FERTIGUNGSSTEUERUNG IN DER MUSTERFERTIGUNG VON SYSTEMLIEFERANTEN

---

Im folgenden Kapitel wird analog zum dritten Prozessschritt des Forschungsprozesses der vorliegenden Arbeit der relevante Anwendungszusammenhang der Problemstellung Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten erfasst. Dabei werden vor allem die konkreten Auswirkungen des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung für dessen Steuerungsfähigkeit untersucht. Aus den festgestellten Zusammenhängen leiten sich konkrete Anforderungen an ein Fertigungssteuerungskonzept zur Steuerung einer Musterfertigung ab, die am Ende des Kapitels zusammengefasst sind.

### 3.1 Planparametervariabilitätsfall Musterfertigung

Bei den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen systemischen Steuerungsprämissen handelt es sich um die grundsätzlichen Determinanten der Planparametervariabilität einer Musterfertigung von Systemlieferanten. Um die Auswirkungen dieser Planparametervariabilität auf die Steuerungsfähigkeit einer Musterfertigung messbar zu machen, bedarf es einer Operationalisierung. Da sich die für die Fertigungssteuerung relevante Planparametervariabilität in der Arbeitsinhaltsfolgenvariabilität konzentriert, ist diese für die zugrunde liegende Problemstellung zu analysieren. Der Planparameter Arbeitsinhaltsfolge kann dafür in Arbeitsinhalt und Prozessfolge untergliedert werden.

Zur Messung der Variation der Planparameter Arbeitsinhalt und Prozessfolge haben sich im Forschungsbereich der Produktionslogistik verschiedene Methoden etabliert. Neben der Messung statistischer Verteilungsmerkmale werden häufig multivariate oder grafische Analyseverfahren eingesetzt. Diese Methoden können jedoch für sich alleine immer nur eine Teildimension der Variation messen. Insbesondere im Hinblick auf den Zeitbezug ist bei der Messung der Variation zwischen statischer Variation und dynamischer Variation zu unterscheiden.

Auch zur Messung des Fluktuationsanteils existieren in der Produktionslogistik verschiedene Messmethoden. Allerdings ist die Fluktuation weitaus schwieriger zu operationalisieren, sodass sich ihre Messung in der Regel auf Einflussgrößen wie die Veränderungsgeschwindigkeit oder die Vielzahl möglicher Störfaktoren beschränkt. Zudem kann auch die Analyse indirekter Indikatoren zur Messung der Planparameterfluktuation eingesetzt werden.

Um eine möglichst umfassende Bewertung der Auswirkungen des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung auf die Steuerungsfähigkeit zu gewährleisten, kommt im Rahmen dieser Arbeit eine Triangulation der hier aufgeführten Methoden zum Einsatz. Zur Analyse der Variation der Parameter Arbeitsinhalt und Prozessfolge werden, wie in Abbildung 27 dargestellt, eine Materialfluss- und eine Arbeitsinhaltsanalyse verwendet. Dagegen wird die Planparameterfluktuation durch eine Bedarfsverlaufs- und Störfaktoranalyse gemessen. Diese Teilanalysen setzen sich wiederum aus einzelnen Analysemethoden zusammen, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Variation beziehungsweise Fluktuation der einzelnen Planparameter untersuchen. Die Methoden werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

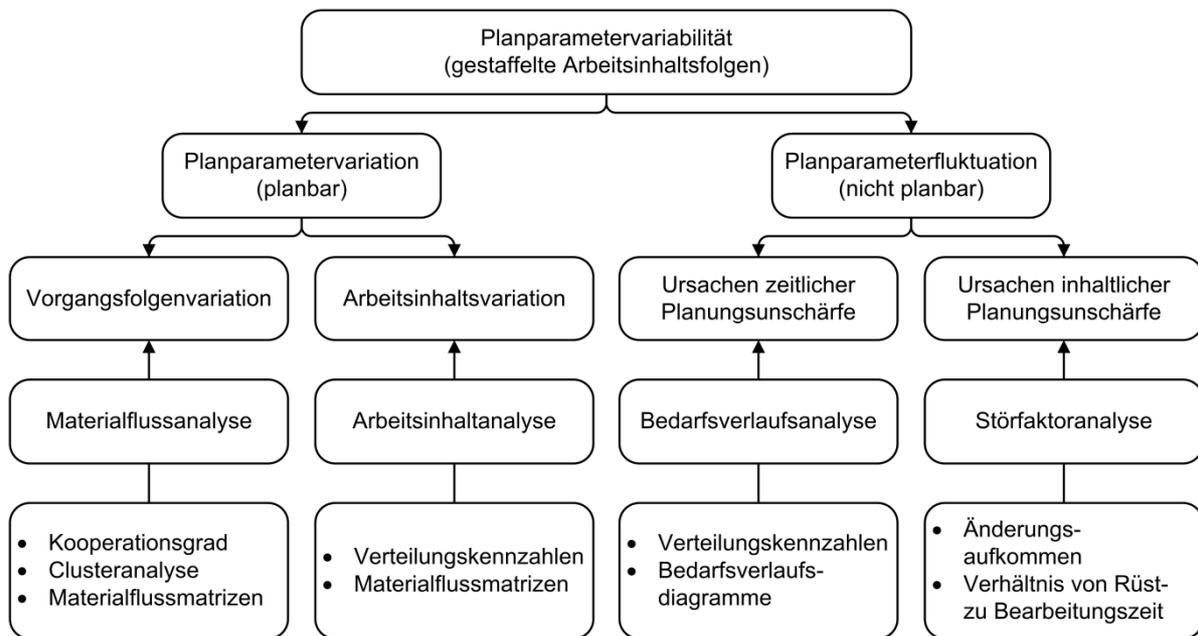


Abbildung 27: Angewandte Analysemethoden zur Messung der Planparametervariabilität

Das hier dargestellte Analysekonzept wird auf drei Fallstudien der betrieblichen Praxis angewandt. Bei den Analyseobjekten handelt es sich um drei Musterfertigungen eines Automobilsystemlieferanten. Dieser gehört auf dem Gebiet der Kraftfahrzeugtechnik zu den Weltmarktführern bei Systemen in den Bereichen Einspritztechnik, Fahrzeugsicherheitssysteme, elektrische Maschinen und Fahrzeugkommunikationssysteme. Die drei untersuchten Musterfertigungen haben jeweils zwischen 150 und 350 Mitarbeiter und stellen Muster für Dieseleinspritzsysteme her. Gemäß der Klassifikation von Fertigungsverfahren nach DIN8580 (DIN 2003) handelt es sich bei allen drei Musterfertigungen um Fertigungsbereiche mit ausschließlich trennenden Bearbeitungsprozessen<sup>7</sup>.

Die analysierten Datensätze bilden die vollständigen Auftragsdurchläufe aller Fertigungsaufträge mit den jeweiligen Arbeitsinhalten und Arbeitsfolgen im Zeitraum zwischen den Jahren 2008 und 2009 ab. Sie können anhand der in Tabelle 3 aufgelisteten Merkmale charakterisiert werden.

Merkmal	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Zeitraum	2008 - 2009	2008 - 2009	2008 - 2009
Arbeitssysteme (inkl. externer Arbeitsplätze)	150	153	143
Aufträge	4289	5714	3625
Arbeitsvorgänge	22658	41949	22259

Tabelle 7: Fallstudien Datensätze

<sup>7</sup>Die Verfahren der Fertigungsverfahrenshauptgruppe Trennen zählen in Deutschland zu den wichtigsten Bearbeitungsverfahren der industriellen Fertigung. 2008 entfielen über 83% des Umsatzvolumens deutscher Werkzeugmaschinenhersteller auf Werkzeugmaschinen trennender Bearbeitungsverfahren (VDW 2009). Die hohe Einsatzflexibilität von Trennverfahren macht eine komplexe mehrstufige Bearbeitung in einzelnen Prozessschritten nötig. Infolgedessen weisen Fertigungsbereiche mit trennenden Bearbeitungsprozessen typischerweise eine hohe Materialflusskomplexität und einen losweisen Teiletransport auf (Awiszus et al. 2009).

### 3.1.1 Ausprägungen der Planparametervariation

#### 3.1.1.1 Materialflussanalyse

##### **Kooperationsgrad nach SCHMIGALLA**

Der Kooperationsgrad nach Schmigalla wird häufig als Kriterium zur Untersuchung der Struktureignung von Fertigungssystemen verwendet. Zu seiner Ermittlung wird die mittlere Anzahl von Maschinen bestimmt, mit denen eine Maschine im Rahmen des Produktionsprogramms verbunden ist. Dazu wird die folgende Formel verwendet (Schmigalla 1970, Dolezalek 1973, Schmigalla 1995, Grundig 2008).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^M m_i}{M} \quad (1)$$

K: Kooperationsgrad

M: Anzahl aller Maschinen

$m_i$ : Anzahl der Maschinen mit einer Materialflussbeziehung zu Maschine  $i$

Der mithilfe dieser Formel berechnete Kennwert lässt einen grundsätzlichen Rückschluss auf die statische Komplexität eines Fertigungsbereichs und damit auch auf die statische Prozessfolgenvariation in der Fertigungssteuerung zu. Er ist also ein Maß für die Variation der Vorgangsfolgen.

Ein steigender Kooperationsgrad geht mit einer Steigerung der mittleren Anzahl der Arbeitssysteme und einer Steigerung der Prozessfolgenvariation einher (Schmigalla 1995). Dabei reicht der Wertebereich von  $K_{\text{MIN}} = 1$ , bei einer verketteten Fließfertigung bis hin zu  $K_{\text{MAX}} = M$  im Fall einer M:M-vernetzten Werkstattfertigung. Typische Wertebereiche der industriellen Praxis liegen bei  $K = 1$  bis 5 bei  $M > 30$  im Fall von Reihenfertigungen und  $K = 5$  bis 10 bei  $M > 30$  im Fall von komplex vernetzten Werkstattfertigungen (Dolezalek 1973, Grundig 2008).

##### **Anwendungsfall**

Im Fall der drei vorliegenden Fallstudienuntersuchungen konnten folgende Kooperationsgrade im Erzeugnisspektrum von 2008 bis 2009 ermittelt werden.

Zeitraum	Fall 1	Fall 2	Fall 3
2008 bis 2009	K = 19,8	K = 13,4	K = 9,0

Tabelle 8: Kooperationsgrade der drei Fallstudien im Vergleich

##### **Implikationen für die Fertigungssteuerung**

Die ermittelten Werte liegen alle im Extrembereich der von DOLEZALEK beschriebenen Vergleichswerte aus der industriellen Praxis. Somit ist davon auszugehen, dass die Prozessfolgenvariation in einer Musterfertigung außergewöhnlich hoch ist. Zudem treten in einem solchen Wertebereich typischerweise viele Rückflüsse auf, welche die Festlegung einer standardisierten Prozessabfolge nahezu unmöglich machen (Dolezalek 1973, Grundig 2008).

Aus diesem Grund kann der Konfiguration der Ablaufsteuerung keine feste oder regelmäßig auftretende Prozessabfolge zugrunde gelegt werden. Außerdem verkompliziert sich die zentrale Auftragseinplanung, da jede Neuplanung oder Anpassungsplanung innerhalb eines komplexen Netzplans erfolgen muss.

### **Clusteranalyse der Auftrags-Maschinen-Matrix**

Die Clusteranalyse gehört zusammen mit der Faktorenanalyse und der multidimensionalen Skalierung zu den sogenannten strukturentdeckenden Verfahren der multivariaten Analysemethoden. Sie dient dazu, eine Menge von Objekten in möglichst homogene, klar voneinander trennbare Gruppen (Cluster) zu unterteilen. Dazu werden die einzelnen Objekte anhand verschiedener, die Objekte beschreibender Eigenschaften beziehungsweise Merkmale quantitativ miteinander verglichen. Das dabei verwendete Messkriterium zur Messung der Ähnlichkeit beziehungsweise der Unähnlichkeit wird als Ähnlichkeitsmaß beziehungsweise Distanzmaß bezeichnet. Die Clusteranalyse bietet den Vorteil einer sehr flexiblen Anwendung, da sie Objekte anhand verschiedener Merkmale in unterschiedlichen Skalenniveaus strukturieren kann (Backhaus 2008).

Die für die Clusteranalyse relevanten Skalenniveaus sind auf binäre Variablen reduzierte Nominalskalen sowie metrische Skalen wie die Intervall- oder Ratioskala. In Abhängigkeit von dem vorliegenden Skalenniveau der objektbeschreibenden Variablen und dem Ziel der Clusteranalyse kann auf eine Vielzahl unterschiedlicher Distanz- und Ähnlichkeitsmaße in Kombination mit unterschiedlichen Gruppierungsalgorithmen zurückgegriffen werden. Eine weiterführende Methodenbeschreibung und Systematisierung der Clusteranalyse sowie eine detaillierte Übersicht der Distanz- und Ähnlichkeitsmaße sowie Gruppierungsalgorithmen, die sich sowohl zur Analyse binärer als auch metrischer Variablen eignen, finden sich unter anderem bei Lance & Williams/1966, Steinhausen & Langer/1977, Bacher/1996 und Backhaus/2008.

Prinzipiell wird bei der Clusteranalyse zwischen graphentheoretischen, optimierenden, partitionierenden und hierarchischen Verfahren unterschieden (Backhaus 2008). Da sich die hierarchisch-agglomerative Clusteranalyse in der produktionswissenschaftlichen Forschung bewährt hat (Eberwein 1989, Backhaus 2008, Nachtwey 2010), wird dieser Verfahrenstyp im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet.

Die hierarchisch-agglomerative Clusteranalyse verläuft in einem iterativen Prozess. Zu Beginn bildet jedes einzelne Objekt ein eigenständiges Cluster. Für alle Cluster wird die jeweilige Distanz beziehungsweise Ähnlichkeit zueinander berechnet. Im weiteren Verlauf werden Schritt für Schritt jeweils immer die beiden Cluster mit der geringsten Distanz fusioniert. Damit verringert sich die Zahl der verbleibenden Cluster in jeder Iteration um eins. Für jeden Iterationsschritt wird das Distanzmaß beziehungsweise der Ähnlichkeitskoeffizient neu berechnet. Zum Schluss bleibt ein Cluster übrig, der alle Objekte umfasst (Brosius 1998, Backhaus 2008).

Im Ergebnis liefert dieser Algorithmus einen Vorschlag zur sukzessiven Gruppierung der betrachteten Objektmenge. Zum einen werden dabei Cluster mit einer hohen Ähnlichkeit identifiziert und zum anderen kann die heterogenitätsoptimale Anzahl von Clustern innerhalb einer Objektmenge anhand des Verlaufes der Distanz- oder Ähnlichkeitsmaßwerte auf den verschiedenen Fusionierungsstufen (Verschmelzungsniveaus) bestimmt werden. Zur Beurteilung der Heterogenitäts- beziehungsweise Homogenitätsgüte einzelner Cluster stehen eine Reihe von Kennzahlen zur Verfügung. Einen umfassenden Überblick dazu gibt Bacher/1996.

Im Zusammenhang der Materialflussanalyse kommt die Clusteranalyse schon seit Anfang der 1970er-Jahre zum Einsatz. Die Grundidee dieser Anwendungsvariante besteht darin, Ähnlichkeiten innerhalb eines Teile- beziehungsweise Prozessfolgen-spektrums zur Fertigungsstrukturierung im Rahmen des Fabrikplanungsprozesses zu nutzen. Dazu wird die Ähnlichkeit von Prozessfolgen anhand einer binär skalierten Auftrags-Maschinen-Matrix des Erzeugnisspektrums für einen bestimmten Zeitraum untersucht. Daraus lassen sich Rückschlüsse bezüglich der Selbstähnlichkeit der Vorgangskombinationen ziehen. Diese sind insbesondere bei der Festlegung des Produktionskonzepts von besonderer Relevanz (McAuley 1972, Specht 1983, Weber 1983, Cheng et al. 1996, Arnold et al. 2008, Nachtwey 2010).

### **Anwendungsfall**

Im vorliegenden Untersuchungsfall wird die Clusteranalyse zur Untersuchung der Auswirkungen der Prozessfolgenähnlichkeit im Hinblick auf die Steuerungsfähigkeit einer Musterfertigung verwendet. Dazu werden jeweils die binär skalierten Auftrags-Maschinen-Matrizen der drei Fallstudien mithilfe einer hierarchisch-agglomerativen Clusteranalyse untersucht. Zur Clusterung kommt der *Jaccard-Ähnlichkeitskoeffizient* in Kombination mit dem *Average-Linkage- Gruppierungsalgorithmus* zum Einsatz, da sich diese Kombination bei der Analyse der Prozessfolgenähnlichkeit bewährt hat (Eberwein 1989, Schendera 2009).

Der *Jaccard-Ähnlichkeitskoeffizient* eignet sich gut zur Analyse der Prozessfolgen-ähnlichkeit, da er zwei Auftragsprozessfolgen nur dann als ähnlich betrachtet, wenn sie mindestens eine Prozessstation gemeinsam durchlaufen. Er bewertet also im Gegensatz zu anderen Koeffizienten, wie zum Beispiel dem Simple-Matching-Koeffizienten, ausschließlich das Vorhandensein einer Eigenschaft. Das ist wichtig, da das Nichtvorhandensein einer Eigenschaft vor dem Hintergrund der Bewertung von Prozessfolgenähnlichkeiten kein sinnvolles Bewertungskriterium darstellt (Eberwein 1989, Confessore et al. 2008, Schendera 2009). Der Jaccard-Ähnlichkeitskoeffizient berechnet sich (i.A.a. Steinhausen & Langer 1977) wie folgt:

$$S_{ij} = \frac{a}{a + b + c} \quad (2)$$

$S_{ij}$  : Ähnlichkeit zwischen den Objekten i und j

a: Eigenschaft sowohl bei Objekt<sub>i</sub> als auch bei Objekt<sub>j</sub> vorhanden

b: Eigenschaft bei Objekt<sub>i</sub> nicht vorhanden; bei Objekt<sub>j</sub> vorhanden

c: Eigenschaft bei Objekt<sub>i</sub> vorhanden; bei Objekt<sub>j</sub> nicht vorhanden

Resultierendes Distanzmaß:

$$d_{ij} = 1 - S_{ij} \quad (3)$$

$d_{ij}$  : Distanz zwischen den Objekten i und j

$S_{ij}$  : Ähnlichkeit zwischen den Objekten i und j

Resultierender Wertebereich:

$$W_{d_{ij}} = \{0, 1\} \quad (4)$$

Der *Average-Linkage-Gruppierungsalgorithmus* hat sich zur Analyse der Prozessfolgenähnlichkeit bewährt, da er im Gegensatz zu anderen Verfahren wie beispielsweise dem Single-Linkage-Verfahren nicht zur Kettenbildung mit einer tendenziell geringen internen Homogenität der einzelnen Cluster neigt. Er vereinigt jeweils nur die beiden Cluster mit dem minimalen gewogenen arithmetischen Mittel aus den Zwischenklassendistanzen. Dadurch liefert das Verfahren Cluster mit einer guten internen Homogenität bei ebenfalls zufriedenstellender Heterogenität zwischen den Clustern (Eberwein 1989, Schendera 2009). Der Gruppierungsalgorithmus berechnet (i.A.a. Steinhausen & Langer 1977) die Distanz zwischen den Clustern einer Fusionierungsstufe anhand der folgenden Formel:

$$d_{qi}^{neu} = \frac{1}{2} * (d_{pi} + d_{qi}) \quad (5)$$

$d_{qi}^{neu}$ : neue Distanz nach der Fusion einer Gruppe q mit einer Gruppe p

$d_{pi}$ : Distanz des p-ten Clusters zu Cluster i

$d_{qi}$ : Distanz des q-ten Clusters zu Cluster i

Die im vorliegenden Untersuchungsfall ermittelten Distanzmaße werden in Form eines sogenannten Struktogramms des Ähnlichkeitskoeffizienten dargestellt. Dafür wird zu jedem Fusionierungsschritt entlang einer X-Achse der Wert des Jaccard-Koeffizienten in dessen Wertebereich zwischen 0 und 1 auf einer Y-Achse abgetragen (Bortz 2005).

Bei der Interpretation der Struktogramme in Abbildung 29 steht der Wert 1 für eine vollkommene Übereinstimmung der Merkmalseigenschaften aller bis dahin fusionierten Objekte und der Wert 0 für einen vollkommenen Unterschied zwischen den Merkmalseigenschaften (Bortz 2005). Kommt es im Verlauf der Fusionierung zu einer sprunghaften Veränderung der Kennzahl, so zeigt sich diese in einem ausgeprägten Knick des Verlaufs. Dieser Knick wird häufig als sogenanntes Ellenbogen-Kriterium bezeichnet, das als Schwelle interpretiert wird, ab der von einer weiteren Fusionierung abzusehen ist. Das heißt, das Ellenbogen-Kriterium zeigt die Anzahl der Cluster in einem Struktogramm an, bis zu der eine hohe interne Homogenität der gebildeten Cluster vorherrscht (Bacher 1996).

Des Weiteren ist bei der Ergebnisinterpretation der Struktogramme in Abbildung 29 zu beachten, dass anhand der dargestellten Struktogramme nur die Ähnlichkeit der Prozesskombination auf den einzelnen Fusionierungsstufen beschrieben wird. So enthält die in Abbildung 28 ausschnittsweise dargestellte Auftrags-Maschinen-Matrix zwar die Informationen über das Vorhandensein eines Prozesses in einer Auftragsprozessfolge, allerdings bleibt die Reihenfolge innerhalb dieser Kombination unberücksichtigt. Zudem werden auch Rückflüsse innerhalb einer Auftragsprozessfolge durch die Auftrags-Maschinen-Matrix nicht erfasst.

	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	AS7	AS8	AS9	AS10	AS11	AS12	AS13	AS14	AS15	AS16
Auftrag 1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Auftrag 2	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Auftrag 3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Auftrag 4	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Auftrag 5	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0

Abbildung 28: Exemplarische Auftrags-Maschinen-Matrix

Die folgende Abbildung zeigt die Clusteranalysen-Struktogramme der 3 Fallstudien.

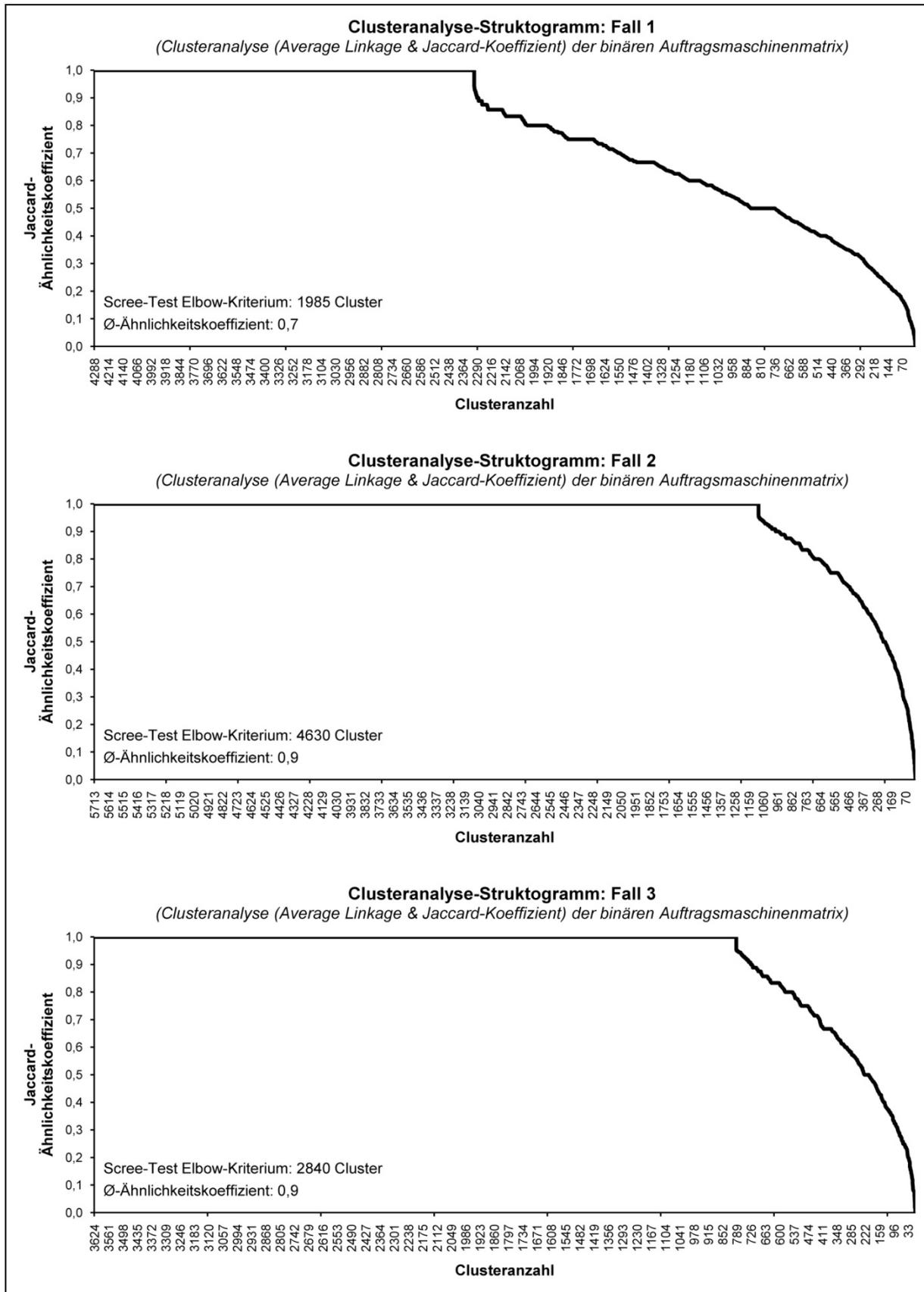


Abbildung 29: Clusteranalysen-Struktogramme der 3 Fallstudien

### ***Implikationen für die Fertigungssteuerung***

Alle drei Struktogrammkurven zeigen ein relativ frühes Abknicken ihrer Verläufe. Das bedeutet, dass es schon bei einer hohen Clusteranzahl zu starken Merkmalsunterschieden der Prozesskombination einzelner Aufträge kommt. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass nur relativ wenige Aufträge mit einer identischen Prozesskombination innerhalb der Auftragsstruktur einer Musterfertigung auftreten. Konkret ergibt die Auswertung der Clusterhäufigkeit, dass ein Auftrag im Durchschnitt nur ungefähr 2,5-mal bei Fall 1 und 2,8-mal in den Fällen 2 und 3 in zwei Jahren mit exakt der gleichen Prozesskombination vorkommt. Dabei sind die Reihenfolgen und mögliche Rückflüsse innerhalb der Prozesskombination nicht berücksichtigt.

Infolge dieser hohen Inhomogenität der Prozessfolgen kann der Ablaufsteuerung einer Musterfertigung keine regelmäßig auftretende Prozessabfolge zugrunde gelegt werden. Die schon durch die hohen Kooperationsgrade vermutete hohe Prozessfolgenvariation wird mit der Clusteranalyse also bestätigt. Sie führt dazu, dass fast jeder Auftrag eine neue Prozesskombination aufweist. Infolgedessen muss jede Plananpassung der Fertigungssteuerung in einem neuen Netzplan erfolgen.

### ***Materialflussmatrizen im Zeitverlauf***

Die vorangegangenen Analysen haben ausschließlich die Untersuchung der statischen Prozessfolgenvariation zum Ziel gehabt. Zur Bewertung der dynamischen Prozessfolgenvariation eignet sich die im Folgenden vorgestellte Analyse der Materialflussmatrizen im Zeitverlauf.

Eine Materialflussmatrix stellt die Beziehung zwischen den Bearbeitungsprozessen eines Produktionsbereichs quantitativ dar. Dazu werden alle Bearbeitungsprozesse als Absende- und Empfangselemente in einer Matrix übereinander aufgetragen. Tritt ein Materialfluss zwischen zwei Bearbeitungsprozessen auf, wird dieser entsprechend in der Matrix markiert. Man spricht bei einer solchen Darstellung deshalb auch häufig von einer Von-Nach-Matrix. Materialflussmatrizen sind ein gängiges Mittel der Materialflussanalyse, deren Anwendung insbesondere im Zusammenhang mit der Materialflussplanung in der VDI-Richtlinie 2498 geregelt ist (Arnold et al. 2008, Grundig 2008, Arnold & Furmans 2009).

Der einfachste Fall einer Materialflussmatrix ist eine sogenannte Adjazenzmatrix. In einer solchen Von-Nach-Matrix wird einzig das Vorhanden- beziehungsweise das Nichtvorhandensein einer Materialflussbeziehung durch einen Binärwert markiert. Dadurch liefert eine Adjazenzmatrix ein Abbild aller Materialflussbeziehungen innerhalb eines Produktionsbereichs. Allerdings lässt sie keinen Rückschluss auf die quantitativ-qualitative Relevanz der Materialflussbeziehungen zu.

Aus diesem Grund kann die Aussagekraft einer Adjazenzmatrix durch die Bewertung der Materialflussbeziehungsstärke mithilfe einer Leistungsgröße erhöht werden (Gienke & Kämpf 2007, Arnold & Furmans 2009). Dazu wird eine auftretende Materialflussbeziehung in der Matrix mit dem kumulierten Wert einer Leistungskenngröße belegt. Mögliche Leistungsgrößen sind die Distanz, Dauer, Menge, Anzahl, Kosten oder Kapazitäten eines Materialflusses (Schenk et al. 2009). Mithilfe einer solchen „leistungsgewichteten“ Adjazenzmatrix lässt sich neben der Flussrichtung auch die Flussintensität der Materialflüsse bewerten (Grundig 2008).

### Anwendungsfall

Für die Bewertung der dynamischen Prozessfolgevariation im vorliegenden Untersuchungsfall ist eine gewichtete Materialflussmatrix allein jedoch nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird im Anwendungsfall zudem der zeitliche Verlauf der gewichteten Materialflussmatrizen analysiert. Dazu werden pro Fall alle Aufträge der Jahre 2008 bis 2009 in vier Halbjahre unterteilt und für jedes Halbjahr eine Materialflussmatrix gebildet. Als Leistungsgröße wird dabei die Anzahl der Materialflusskontakte herangezogen. Dadurch kann die Materialflussintensität in Form der Materialflusshäufigkeit bewertet werden. Den Ausschnitt einer solchen häufigkeitsgewichteten Adjazenzmatrix zeigt die folgende Abbildung.

	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	AS7	AS8	AS9	AS10	AS11	AS12	AS13	AS14	AS15	AS16	AS17
AS1	0	0	0	13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS2	0	0	0	234	0	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS3	0	0	0	59	1	0	5	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1
AS4	0	0	0	0	109	95	0	0	0	0	0	0	1	42	0	0	0
AS5	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Abbildung 30: Ausschnitt einer häufigkeitsgewichteten Adjazenzmatrix im Anwendungsfall

Die auf der folgenden Seite gezeigten Punktmuster repräsentieren eine stark verkleinerte Darstellung der häufigkeitsgewichteten Adjazenzmatrizen aller drei Fallbeispiele über ein halbes Jahr. Eine vergrößerte Darstellung dieser Matrizen findet sich im Anhang. Schwarz markiert sind ausschließlich Materialflussknotenschwerpunkte, das heißt Materialflussknotenpunkte, welche die meisten Materialflüsse aufweisen und dabei zusammen 80% aller Materialflussbeziehungen ausmachen. Deren Konzentrationsmaß ist als Kennwert  $K_{80}$  in Tabelle 9 angegeben.

$$K_{80} = \frac{mfk_{80}}{MFK} \quad (6)$$

$K_{80}$ : Konzentrationsmaß aller Materialflussschwerpunkte

MFK: Anzahl aller Materialflussknotenpunkte

$mfk_{80}$ : Anzahl der Materialflussknotenpunkte, welche die meisten Materialflusskontakte aufweisen und kumuliert 80% aller Materialflusskontakte ausmachen

Die Matrizen können auf zwei unterschiedliche Weisen interpretiert werden. Zum einen zeigt der grafische Vergleich der einzelnen Halbjahre zueinander, wie sich die Materialflussschwerpunkte in Form der schwarzen Punkte im Zeitverlauf verändern. Zum anderen kann diese Veränderung anhand der in Tabelle 9 abgebildeten Kennwerte quantitativ bewertet werden. Die Tabellenwerte geben dabei im Bezug auf die Materialflussschwerpunkte an, wie sich der Materialfluss im Laufe eines halben Jahres innerhalb des entsprechenden Fallbeispiels prozentual verändert hat. Gemessen wird die Veränderung der Materialflussknotenpunkte, welche die meisten Materialflüsse aufweisen und dabei zusammen 80% aller Materialflussbeziehungen ausmachen. Folgende Mengen werden diesbezüglich prozentual bewertet:

- Menge der veränderten Knotenschwerpunkte = Materialflussveränderung
- Menge der zusätzlichen Knotenschwerpunkte = Materialflussdispersion
- Menge der weggefallenen Knotenschwerpunkte = Materialflusskonzentration

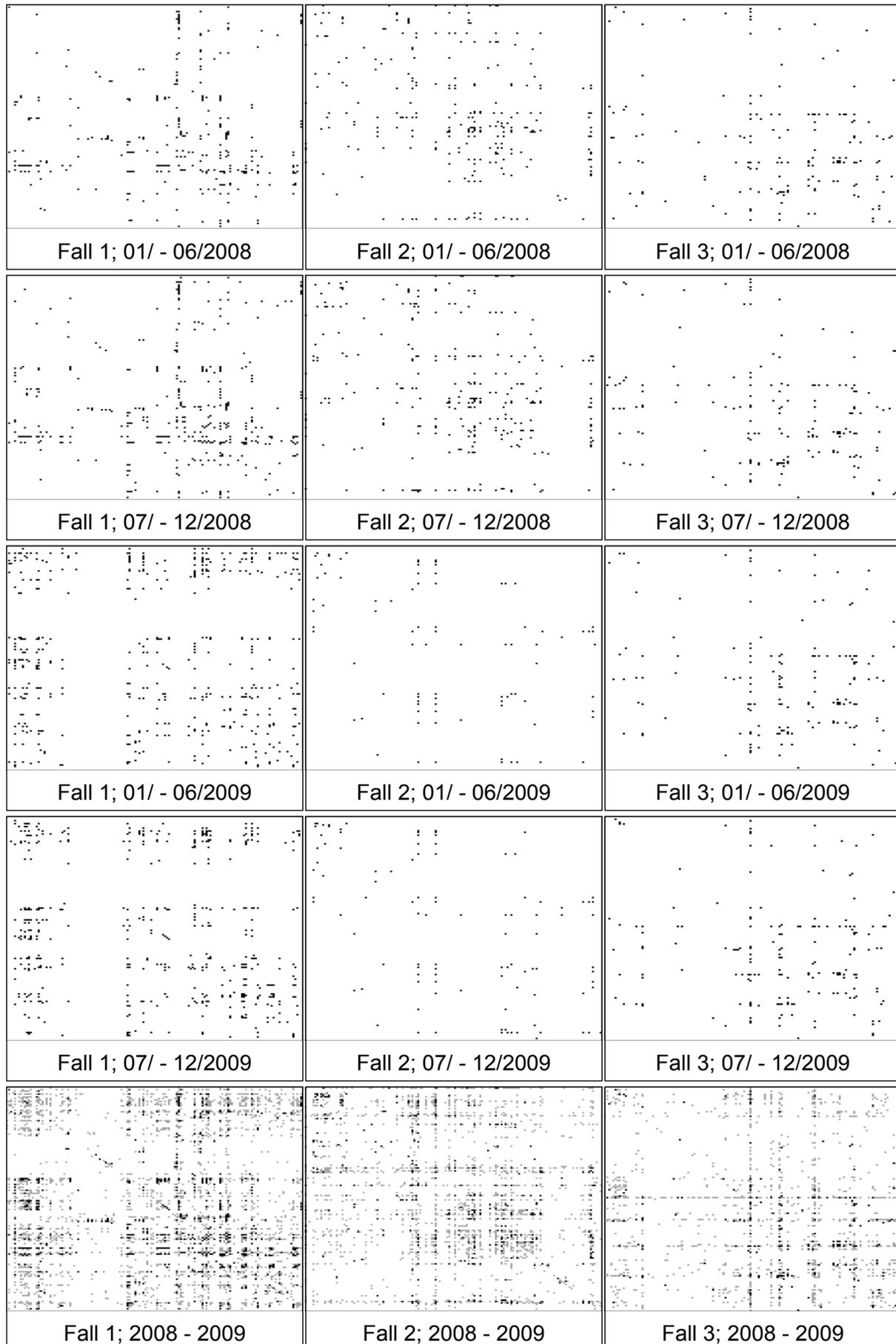


Abbildung 31: Materialflussmatrizen (Materialflussknotenschwerpunkte) im Zeitverlauf

Zeitraum	Fall 1 ( $K_{80} = 32\%$ )	Fall 2 ( $K_{80} = 30\%$ )	Fall 3 ( $K_{80} = 46\%$ )
1. Halbjahr 2008 auf 2. Halbjahr 2008	65% (23% Dispersion + 42% Veränderung)	50% (5% Dispersion + 45% Veränderung)	32% (2% Dispersion + 30% Veränderung)
2. Halbjahr 2008 auf 1. Halbjahr 2009	95% (12% Dispersion + 83% Veränderung)	82% (69% Konzentration + 13% Veränderung)	26% (5% Konzentration + 21% Veränderung)
1. Halbjahr 2009 auf 2. Halbjahr 2009	54% (3% Dispersion + 51% Veränderung)	43% (20% Dispersion + 23% Veränderung)	42% (12% Dispersion + 30% Veränderung)

Tabelle 9: Prozentuale Veränderung der Materialflussknotenschwerpunkte im Zeitverlauf

### **Implikationen für die Fertigungssteuerung**

Die grafische Analyse der Materialflussmatrizen aus Abbildung 31 zeigt eine drastische Veränderung der Materialflussschwerpunkte im Zeitverlauf. Die Anordnung der Materialflussschwerpunkte verändert sich im Verlauf eines halben Jahres sehr stark. Zudem weisen die Materialflussmatrizen der drei Fallbeispiele optisch eine sogenannte Netzstruktur auf, die auf eine hohe Materialflussvernetzung mit vielen Rückflüssen schließen lässt (Müller & Ackermann 2007, Grundig 2008). In allen drei Fallbeispielen besteht also eine hohe dynamische Prozessfolgenvariation.

Diese zeitliche Dynamik der Prozessfolgen wird auch quantitativ durch die in Tabelle 9 gelisteten Kennzahlen bestätigt. So verändert sich der Materialfluss einer Musterfertigung in den Fallbeispielen im Durchschnitt um 54% pro Halbjahr. Das bedeutet, dass durchschnittlich 54% aller Materialflüsse, die im ersten Halbjahr zwischen den Materialflussknotenschwerpunkten einer Musterfertigung stattfinden, im darauffolgenden Halbjahr zwischen neuen oder veränderten Materialflussknotenschwerpunkten fließen.

Demzufolge muss die Fertigungssteuerung einer Musterfertigung nicht nur Plananpassungen in einem komplexen Auftragsnetz durchsetzen, sondern sie muss darüber hinaus auch eine permanente Veränderung dieses Auftragsnetzes kompensieren. Insofern bestätigen sich nochmals die Feststellungen der Kooperationsgrad- und Clusteranalyse, dass der Ablaufsteuerung einer Musterfertigung keine feste Prozessabfolge zugrunde gelegt werden kann, da ein permanenter Prozessfolgenwechsel vorherrscht.

#### **3.1.1.2 Arbeitsinhaltsanalyse**

##### **Variationsmessung der Arbeitsinhaltsverteilung**

Zur Messung der statischen Planparametervariation im Bezug auf die Arbeitsinhalte bietet sich der von Karl Pearson eingeführte Variationskoeffizient als Kennzahl an. Er ist ein Maß für die relative Streuung einer Merkmalsverteilung und wird in der deskriptiven Statistik vor allem zum Streuungsvergleich von Merkmalsverteilungen eingesetzt. Aufgrund seiner Dimensionslosigkeit eignet er sich besonders gut, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Streuungen gleichartiger, aber unterschiedlich dimensionierter beziehungsweise verschiedener kardinaler Merkmale herzustellen. Als Kennzahl wird der Variationskoeffizient als Quotient der Standardabweichung und dem arithmetischem Mittel einer Merkmalsverteilung definiert (Sachs 2003).

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\bar{x} - x_i)^2}}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

v: Variationskoeffizient

$\sigma$ : Standardabweichung

$\bar{x}$ : Arithmetisches Mittel

$x_i$ : Merkmalsausprägung einer Beobachtungsreihe

n: Anzahl aller Merkmalsausprägungen einer Beobachtungsreihe

Bei der Anwendung des Variationskoeffizienten ist darauf zu achten, dass die abgebildeten Merkmalsverteilungen keine negativen Merkmalsausprägungen aufweisen, da sonst ein verzerrtes Abbild der Verteilung entsteht (Mayer 2005). Als Faustregel gilt ein Variationskoeffizientenwert von  $> 0,5$  als Indikator für eine starke empirische Streuung der zugrunde liegenden Merkmalsverteilung (Eckstein 2006).

### **Anwendungsfall**

Im Fall der vorliegenden Untersuchung wird die Kennzahl Variationskoeffizient zur Variationsmessung der Arbeitsinhaltsverteilung verwendet. Aus der festgestellten Streuung kann direkt auf die Variation des Planparameters Arbeitsinhalt geschlossen werden. Der große Vorteil bei der Anwendung dieser Kennzahl im Rahmen der vorliegenden Untersuchung liegt in ihrer Dimensionslosigkeit. So spielt es für die Vergleichbarkeit der vorliegenden Ergebnisse keine Rolle, ob der Mittelwert der fallbezogenen Durchführungszeiten im Minuten-, Stunden-, oder Tagesbereich liegt.

Die in Tabelle 10 aufgeführten Kennwerte bilden sowohl den Mittelwert als auch die Standardabweichung aller Variationskoeffizienten der Durchführungszeiten auf Arbeitssystemebene ab. Das heißt, für jedes Arbeitssystem einer Fallstudie wurde ein Variationskoeffizient der Arbeitsinhaltsverteilung gebildet und dann mit den Variationskoeffizienten der anderen Arbeitssysteme aggregiert. Der Variationskoeffizient eines einzelnen Arbeitssystems berechnet sich dabei wie folgt:

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad (8)$$

$$ZAU_s = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(ZAU_m - ZAU_i)^2}}{N}$$

$$ZAU_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{N}$$

$ZAU_v$ : Variationskoeffizient der Arbeitsvorgangsvorgabezeiten

$ZAU_s$ : Standardabweichung der Arbeitsvorgangsvorgabezeiten [Std.]

$ZAU_m$ : Mittlere Vorgabezeit eines Arbeitsvorgangs [Std.]

$ZAU_i$ : Vorgabezeit eines Arbeitsvorgangs [Std.]

N: Anzahl aller Arbeitsvorgänge

Kenngröße	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Mittelwert (m) der Variationskoeffizienten der Arbeitsvorgangsvorgabezeiten (ZAU <sub>v</sub> )	2,6	1,9	2,6
Standardabweichung (s) der Variationskoeffizienten der Arbeitsvorgangsvorgabezeiten (ZAU <sub>v</sub> )	2,2	1,4	3,2

Tabelle 10: Verteilungsmerkmale der Vorgangsvorgabezeiten auf Arbeitssystemebene

### **Implikationen für die Fertigungssteuerung**

Die Mittelwerte der Variationskoeffizienten aller drei Fälle weisen einen sehr hohen Wert auf, der deutlich über der von ECKSTEIN genannten Grenze von 0,5 liegt (Eckstein 2006). Dieser Umstand an sich deutet auf eine hohe Streuung der Arbeitsinhalte an den einzelnen Arbeitssystemen hin. NYHUIS nennt darüber hinaus 0,9 als einen typischen Wert für den Mittelwert der Variationskoeffizienten der Arbeitsinhaltsverteilungen auf Arbeitssystemebene in der industriellen Praxis, wobei Werte  $> 1$  in einer hohen Planparametervariabilität resultieren (Nyhuis 2003, Nyhuis & Wiendahl 2009). Der Mittelwert einer Musterfertigung liegt mit 2,4 deutlich über dieser Grenze, woraus zu schließen ist, dass im Fall einer Musterfertigung eine außergewöhnlich hohe Streuung der Arbeitsinhalte vorliegt.

Diese starke Streuung der Arbeitsinhalte resultiert in einer Erhöhung der Komplexität in der Fertigungssteuerung einer Musterfertigung. Die hohe Variation der sich ständig verändernden Prozessfolgen wird durch die starke Arbeitsinhaltsvariation verstärkt. Die Prozessfolgenvariation kann als ein komplexes Netz betrachtet werden, das aufgrund der hohen Arbeitsinhaltsvariation sehr inhomogene Maschen aufweist. Dadurch wird jede Plananpassung in einem solchen Netz zusätzlich erschwert, wobei die Arbeitsinhaltsstreuung im Speziellen zu höheren Durchlaufzeit- und Auslastungsverlusten führt. Damit bestätigt sich auch im Planparametervariabilitätsfall Musterfertigung das vierte logistische Grundgesetz nach NYHUIS, wonach der Mittelwert und die Streuung der Auftragszeiten das logistische Potenzial einer Fertigung mitbestimmen (Nyhuis 2003).

### **Materialflussmatrizen im Zeitverlauf**

Die vorangegangene Variationsmessung der Arbeitsinhaltsverteilung gibt nur die statische Dimension der Arbeitsinhaltsvariation wieder. Zur Bewertung der dynamischen Arbeitsinhaltsvariation werden deshalb in analoger Vorgehensweise zur Materialflussanalyse in Kapitel 3.1.1.1 die arbeitsinhaltsgewichteten Materialflussmatrizen im Zeitverlauf analysiert.

Dabei wird anstatt der Anzahl der Materialflusskontakte die kumulierte Summe der Arbeitsinhalte eines Materialflusses als Leistungsgröße herangezogen. Arbeitsinhaltschwerpunkte sind also Materialflussknotenpunkte, welche die größten kumulierten Arbeitsinhalte aufweisen und dabei zusammen 80% aller Materialflussbeziehungen ausmachen. Damit folgt die Berechnung des Konzentrationsmaßes  $K_{80}$ , wie auch die grafische und quantitative Interpretation der im Folgenden dargestellten arbeitsinhaltsgewichteten Materialflussmatrizen dem gleichen Vorgehensschema wie in Kapitel 3.1.1.1. Auch für diesen Anwendungsfall findet sich eine vergrößerte Darstellung der einzelnen Matrizen im Anhang.

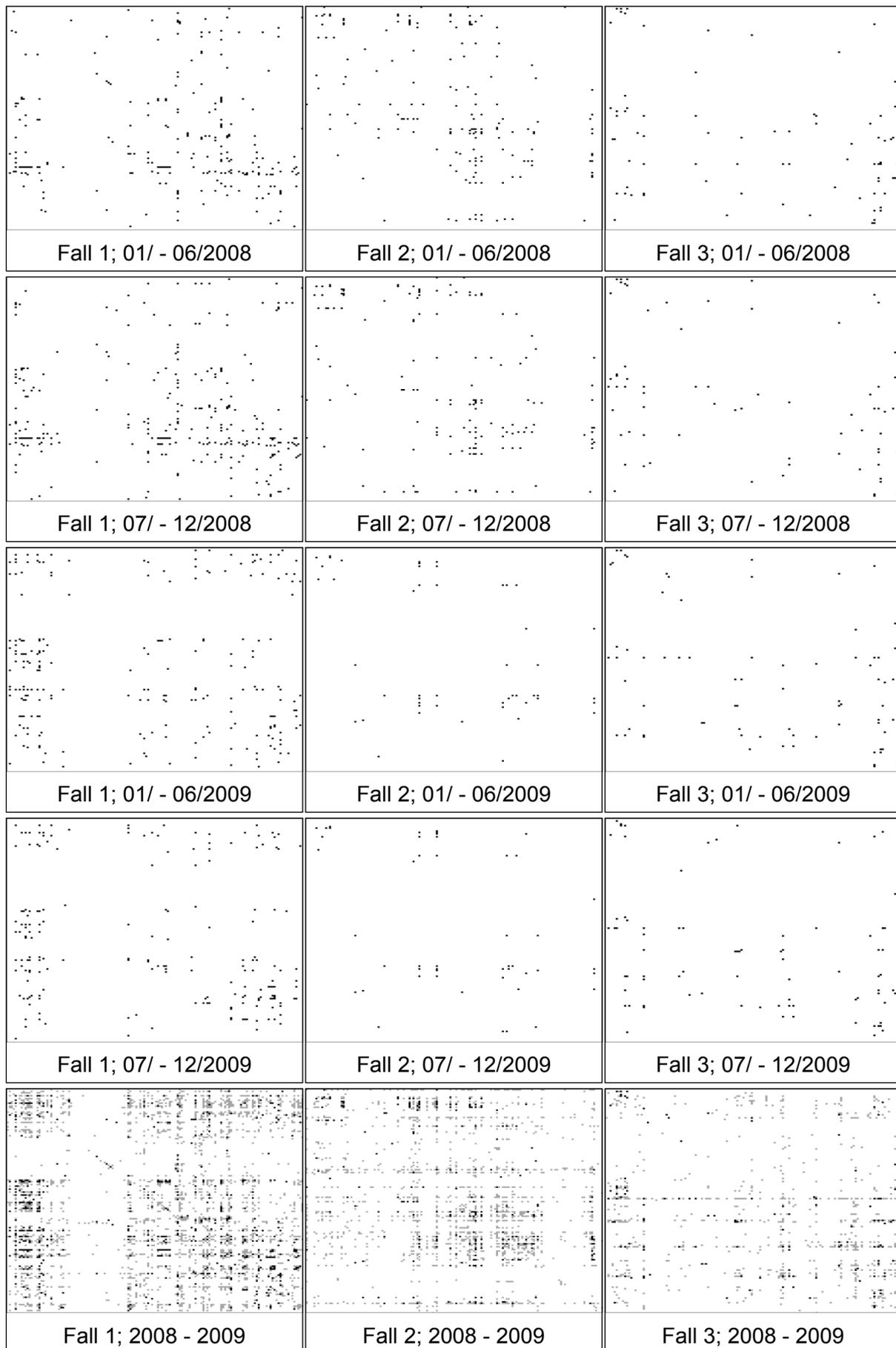


Abbildung 32: Materialflussmatrizen (Arbeitsinhaltsschwerpunkte) im Zeitverlauf

Zeitraum	Fall 1 ( $K_{80} = 19\%$ )	Fall 2 ( $K_{80} = 17\%$ )	Fall 3 ( $K_{80} = 21\%$ )
1. Halbjahr 2008 auf 2. Halbjahr 2008	75% (13% Dispersion + 62% Veränderung)	53% (12% Konzentration + 41% Veränderung)	49% (9% Konzentration + 40% Veränderung)
2. Halbjahr 2008 auf 1. Halbjahr 2009	82% (19% Konzentration + 63% Veränderung)	80% (66% Konzentration + 14% Veränderung)	58% (4% Dispersion + 54% Veränderung)
1. Halbjahr 2009 auf 2. Halbjahr 2009	66% (14% Konzentration + 52% Veränderung)	27% (2% Konzentration + 25% Veränderung)	61% (4% Dispersion + 57% Veränderung)

Tabelle 11: Prozentuale Veränderung der Arbeitsinhaltschwerpunkte im Zeitverlauf

### Implikationen für die Fertigungssteuerung

Bei der grafischen Analyse der arbeitsinhaltsgewichteten Adjazenzmatrizen in Abbildung 32 zeigt sich analog zu der Auswertung der Materialflussmatrizen in Abbildung 31 eine starke Veränderung der Arbeitsinhaltschwerpunkte im Zeitverlauf. Obwohl es sich dabei nicht um die gleichen Arbeitssystempaare wie in Abbildung 31 handelt, ist der Effekt bei den arbeitsinhaltsgewichteten Adjazenzmatrizen in Abbildung 32 der gleiche. Die Arbeitsinhaltschwerpunkte und damit die Auslastungsschwerpunkte einer Musterfertigung verändern sich im Laufe eines Halbjahres sehr stark. Die Ablaufsteuerung einer Musterfertigung ist daher mit einer hohen dynamischen Arbeitsinhaltsvariation konfrontiert.

Diese bestätigt sich auch quantitativ anhand der in Tabelle 11 gelisteten Kennwerte. So beträgt die durchschnittliche Veränderung der Arbeitsinhaltschwerpunkte einer Musterfertigung 61% pro Halbjahr. Infolgedessen kann im Zusammenhang mit einer Musterfertigung von einer permanenten Veränderung der Belastungsschwerpunkte ausgegangen werden.

Dementsprechend muss sich die Fertigungssteuerung einer Musterfertigung auf permanent neu auftretende Belastungsschwerpunkte einstellen. Das führt dazu, dass jede Auftragseinplanung und Planparameteranpassung in einem Auftragsnetz erfolgt, dessen Netzknoten als auch Maschengrößen sich kontinuierlich stark verändern.

#### 3.1.2 Ausprägungen der Planparameterfluktuation

Im Gegensatz zur Planparametervariation kann die Fluktuation der zeitlich gestaffelten Arbeitsinhaltsfolgen nicht direkt gemessen werden. Das liegt im Wesentlichen daran, dass für einen ungeplanten Zustand in der Regel kein analysierbarer Planwert vorliegt. Auch bietet die Messung der Auswirkung der Planparameterfluktuation keinen verlässlichen Weg zur Operationalisierung, da es nahezu unmöglich ist, aus einer Ergebnisgröße, wie zum Beispiel dem Liegezeitannteil oder einem Auslastungsverlust, den Fluktuationsanteil herauszuinterpretieren.

Aus diesem Grund beschränkt sich die vorliegende Untersuchung auf die Messung und Operationalisierung der Einflussgrößen der Planparameterfluktuation einer Musterfertigung. Diese sind Primärbedarfsschwankungen sowie ungeplante Störungen (Corsten 2002, Wiendahl 2002, Tönshoff et al. 2005, Bornhäuser 2009, Meißner 2009).

### 3.1.2.1 Bedarfsverlaufsanalyse

Um die Primärbedarfsschwankung zu messen, ist es sinnvoll, die anfallenden Primärbedarfe in Form der dafür benötigten Prozesszeiten in ihrem zeitlichen Verlauf zu messen. Anhand eines solchen Bedarfsverlaufs kann die Primärbedarfsschwankung auf unterschiedlichen Aggregationsniveaus herausgelesen werden. Zur Darstellung des Bedarfsverlaufs haben sich in der produktionswissenschaftlichen Forschung zwei Darstellungsformen etabliert.

Die erste Möglichkeit stellt das schon in Kapitel 2.1.2 beschriebene Durchlaufdiagramm dar. In diesem wird entweder für ein einzelnes Arbeitssystem oder für einen gesamten Fertigungsbereich der Zugang in Form von Arbeitsinhalten als kumulierte Treppenkurve über einer Abgangskurve aufgetragen. Dadurch erlaubt das Durchlaufdiagramm sowohl eine grafische als auch quantitative Analyse des Durchsatzverhaltens eines Produktionssystems (vgl. Kapitel 2.1.2). Es wird daher häufig zur Analyse von Produktionssystemen in ihrem Leistungsverhalten herangezogen (Wiendahl 1997, Engelhardt-Nowitzki 2008).

Die zweite gebräuchliche Variante der Darstellung des Bedarfsverlaufs stellt die zeitintervallskalierte Kumulierung der Zugangsmengen in Form eines einfachen Balkendiagramms dar. Dabei werden anhand einer definierten Zeitintervallskala pro Zeitintervall alle Arbeitsinhalte der Zugänge kumuliert und als Balken über der Zeitskala aufgetragen. Aus einem solchen Bedarfsverlaufdiagramm wird die Bedarfsschwankung eines Produktionssystems im Rahmen der gewählten Zeitaggregation ersichtlich. Damit eignet sich diese Darstellungsform besonders gut für eine reine Verlaufsbeobachtung.

#### **Anwendungsfall**

Zur Analyse der Bedarfsverlaufsschwankungen einer Musterfertigung eignet sich die Variante des Bedarfsverlaufdiagramms besser als das Durchlaufdiagramm. Das von einem Durchlaufdiagramm dargestellte Durchsatzverhalten eines Produktionssystems ist hinsichtlich der zu untersuchenden Planparameterfluktuation einer Musterfertigung nicht relevant. Für die Planparameterfluktuation sind vielmehr die zugangsseitigen Bedarfsschwankungen ausschlaggebend. Zudem kann ein Durchlaufdiagramm im Gegensatz zu einem Bedarfsverlaufdiagramm nicht den Ursachenzusammenhang einer Bedarfsmenge in ihrer Dekomposition auf die einzelnen Ebenen eines Produktionssystems darstellen. Aus diesen Gründen wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung allein das Bedarfsverlaufdiagramm zur Analyse des Bedarfsverlaufs verwendet.

Den im Folgenden dargestellten Bedarfsverlaufdiagrammen der drei Fallstudien liegt eine monatskalierte Zeitskala zugrunde. Diese Auflösung gewährleistet einen ausreichenden Detaillierungsgrad im Hinblick auf die Ergebnisinterpretation im Kontext der Steuerungsfähigkeit einer Musterfertigung, da auch die typischen Einplanungszeiträume einer Musterfertigung ungefähr einen Monat betragen. Außerdem sind in den Diagrammen neben den monatlichen Gesamtbedarfsmengen auch die zugrunde liegenden Teilbedarfsmengen der einzelnen Prozessgruppen abgebildet. In Ergänzung dazu liefert Tabelle 12 einen Überblick der mittleren, monatlichen Bedarfsschwankung auf den jeweiligen steuerungsrelevanten Aggregationsniveaus einer Musterfertigung.

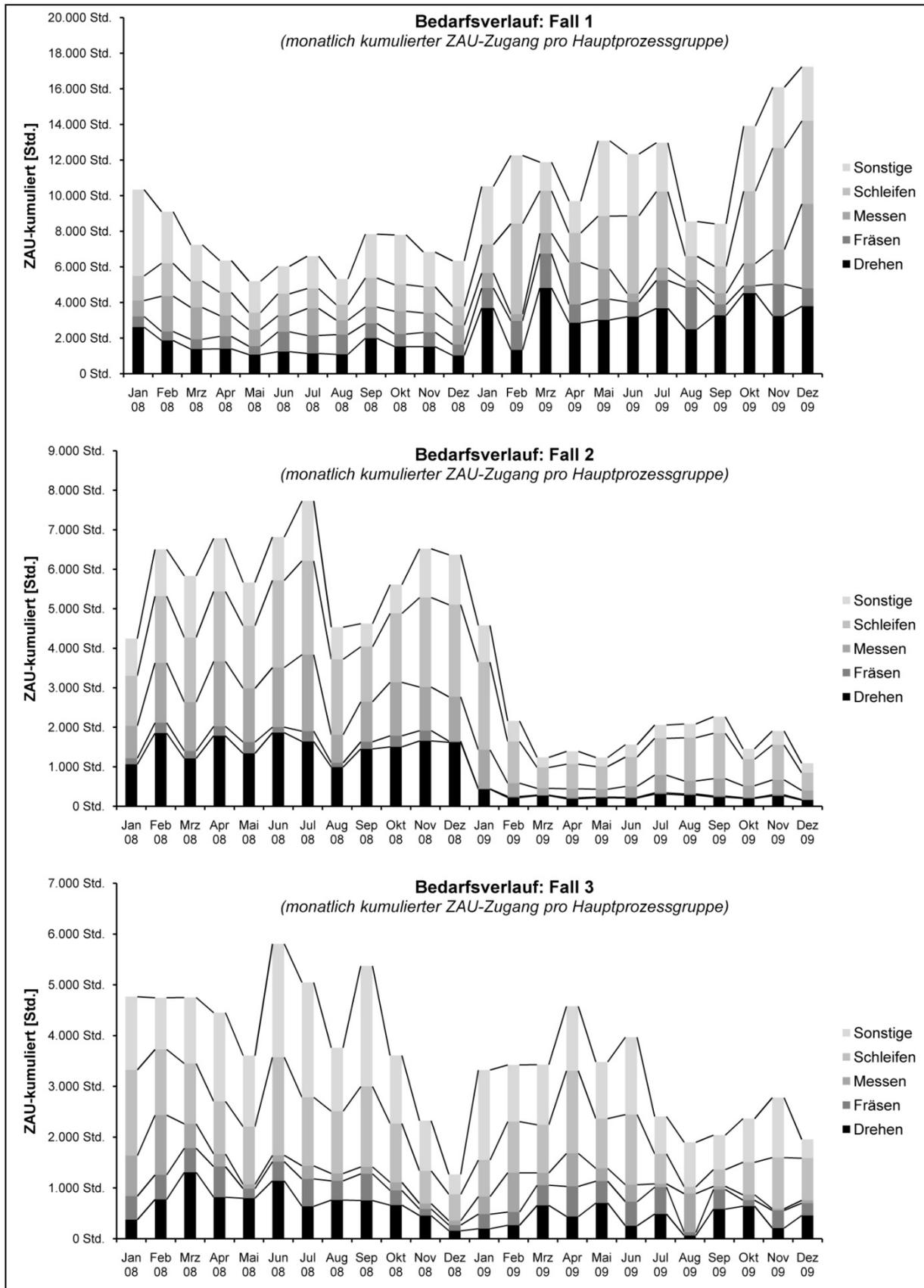


Abbildung 33: Bedarfsverläufe auf Prozessgruppenebene

Aggregationsniveau	Fall 1: Ø-Bedarfsdelta als Berechnungsfaktor zur Basis des Vorgängermonats [%]	Fall 2: Ø-Bedarfsdelta als Berechnungsfaktor zur Basis des Vorgängermonats [%]	Fall 3: Ø-Bedarfsdelta als Berechnungsfaktor zur Basis des Vorgängermonats [%]
Gesamtfertigungsebene	± 19%	± 22%	± 27%
Prozessgruppenebene	± 44%	± 33%	± 70%
Arbeitssystemebene	± 210%	± 76%	± 129%

Tabelle 12: Mittlere, monatliche Bedarfsschwankung auf verschiedenen Aggregationsniveaus

### Implikationen für die Fertigungssteuerung

Die Bedarfsverlaufdiagramme der drei Musterfertigungen weisen sehr starke monatliche Bedarfsschwankungen auf, wobei kein systematischer Trend in den Schwankungen zu erkennen ist. Darüber hinaus wird aus den Diagrammen ersichtlich, dass sich die Bedarfsschwankungen auf Gesamtfertigungsebene in quasi kontraktierenden Wellenbewegungen auf den jeweiligen Prozessgruppenebenen fortsetzen und sich zusätzlich in ihren Schwankungen verstärken. Dieser Effekt wird auch durch die quantitative Analyse in Tabelle 12 bestätigt. So führt die durchschnittliche Bedarfsschwankung von 23% auf Gesamtfertigungsebene zu einer durchschnittlichen Bedarfsschwankung von 49% auf Prozessgruppenebene und schließlich zu einer Bedarfsschwankung von durchschnittlich 138% auf Arbeitssystemebene.

Somit ist die Fertigungssteuerung einer Musterfertigung mit einer hohen Bedarfsvolatilität konfrontiert, bei der die monatliche Auslastungsschwankung auf Arbeitssystemebene im Schnitt um 138% variiert. Das führt dazu, dass sich die Musterfertigungssteuerung, wie schon anhand der Arbeitsinhaltsvariationsmessung festgestellt, auf permanent verändernde Belastungsschwerpunkte einstellen muss. Darüber hinaus führt die hohe Bedarfsvolatilität zu ungeplanten Vertauschungen, da Bedarfe auch immer mit unplanbaren Priorisierungen einhergehen. Infolgedessen erhöht sich die Unsicherheit bezüglich der Kapazitätsverfügbarkeit bei der Auftragseinplanung erheblich, da sich die Kapazitätssituation eines feinterminierten Auftrags schon unmittelbar nach seiner Freigabe ungeplant verändern kann.

#### 3.1.2.2 Störfaktoranalyse

Die Planungsunschärfe und die damit einhergehende Planparameterfluktuation einer Musterfertigung werden neben der Bedarfsvolatilität auch durch das Störungsaufkommen einer Musterfertigung geprägt. Mögliche Störfaktoren sind Änderungen sowie ungeplante Ablaufstörungen (Wiendahl 2002, 2004, Tönshoff et al. 2005, VDA 2006, Scholz-Reiter et al. 2009b).

Diese Unsicherheitsfaktoren können direkt durch das Änderungs- und Störungsaufkommen, aber auch durch indirekte Indikatoren, wie zum Beispiel dem mittleren Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeit pro Auftrag gemessen werden (Kolditz 2009). Dabei ist das Rüst- zu Bearbeitungszeitverhältnis ein aussagekräftiger Indikator, da es als Verhältniszahl einen Rückschluss auf den unplanbaren Anteil eines Fertigungsprozesses und damit auf die Produktreife eines Erzeugnisses zulässt. Pauschal gilt, je höher das Rüst- zu Bearbeitungszeitverhältnis, desto höher die Planungsunschärfe (Spur & Stöferle 1979, Büdenbender 1991).

### Anwendungsfall

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird das durchschnittliche Änderungsaufkommen pro Fertigungsauftrag aller drei Fallbeispiele gemessen. Folgende Änderungsgründe sind dabei erfasst und in Tabelle 13 ausgewertet:

- Erzeugnisänderungen
- Fertigungsprozessänderungen
- Stückzahländerung und Stornierungen
- Terminänderung

Änderungsquote	Fall 1:	Fall 2:	Fall 3:
Ø-Änderungen pro Fertigungsauftrag	0,75	0,64	0,30

Tabelle 13: Mittlere Änderungsquote pro Fertigungsauftrag

Außerdem wird für die Untersuchung das durchschnittliche Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeit aller Fertigungsaufträge als indirekter Indikator der Planparameterfluktuation gemessen und in der folgenden Tabelle ausgewiesen.

Durchschnittliches Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeit pro Fertigungsauftrag	Fall 1:	Fall 2:	Fall 3:
Ø-(Rüstzeit / Bearbeitungszeit) pro Fertigungsauftrag [%]	515%	239%	142%

Tabelle 14: Mittleres Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeit pro Fertigungsauftrag

### Implikationen für die Fertigungssteuerung

Die Auswertung des Änderungsaufkommens zeigt, dass in einer Musterfertigung Auftragsänderungen an der Tagesordnung sind. Im Durchschnitt ist mindestens jeder zweite Auftrag von einer Änderung betroffen. Gemäß der Definition von BÜDENBENDER ist eine Musterfertigung damit eine Fertigungstypologie, die unter einem sehr hohen Änderungseinfluss steht (Büdenbender 1991).

Auch die Auswertung des durchschnittlichen Verhältnisses von Rüst- zu Bearbeitungszeit pro Fertigungsauftrag deutet auf ein hohes Störungsaufkommen in einer Musterfertigung hin. So beträgt das mittlere Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeit 3:1. Das bedeutet, dass ein Fertigungsauftrag für eine effektive Bearbeitungszeit von zehn Stunden 30 Stunden Rüstzeit benötigt. Dieser hohe Rüstanteil lässt auf eine hohe planerische Unsicherheit bezüglich der Prozessparameter, Prozessvorgabezeiten als auch Gutasbringungsmengen schließen (Spur & Stöferle 1979, Büdenbender 1991).

Demzufolge muss sich die Fertigungssteuerung in einer Musterfertigung von Systemlieferanten auf eine hohe Planungsunschärfe und damit auf eine sehr geringe Haltbarkeitsdauer der gesetzten Planparameter einstellen. Fast jeder Auftrag ist von ungeplanten Störungen und Änderungen betroffen. Dadurch erhöht sich bei der Auftragseinplanung die Unsicherheit bezüglich der Kapazitätsverfügbarkeit sowie bezüglich der Haltbarkeit eines gesetzten Arbeitsinhaltsfolgenszenarios. Die gesetzten Planparameter einzelner Fertigungsaufträge können schon direkt nach der Freigabe ad absurdum geführt werden.

### 3.1.3 Ergebniszusammenfassung

Die Untersuchung der Ausprägung der Planparametervariation einer Musterfertigung von Systemlieferanten durch die Materialfluss- und Arbeitsinhaltsanalyse hat gezeigt, dass in einer Musterfertigung eine außergewöhnlich hohe Variation der Planparameter Arbeitsinhalt und Prozessfolge vorherrscht. So führen die hohe Variantenvielfalt, die geringe Wiederholhäufigkeit, die stark schwankende Mengenvarianz sowie die komplexe technologische Erzeugnisstruktur einer Musterfertigung zu einem komplizierten, variationsreichen Auftragsnetz, das durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- Keine regelmäßig auftretenden Prozessabfolgen
- Permanent neu auftretende Prozessfolgekombinationen
- Kontinuierlicher, schneller Prozessfolgenwechsel
- Inhomogene Arbeitsinhaltsverteilung
- Ständig neu auftretende Belastungsschwerpunkte

Darüber hinaus hat die Untersuchung der Planparameterfluktuationausprägung einer Musterfertigung von Systemlieferanten durch die Bedarfsverlaufs- und Störfaktoranalyse ergeben, dass eine Musterfertigung von einer hohen Fluktuation der Planparameter Arbeitsinhalt und Prozessfolge betroffen ist. Die Ursachen dafür liegen in der stark schwankenden zeitlichen Bedarfsverlaufsvarianz, dem hohen Änderungsaufkommen sowie der geringen technologischen Erzeugnisreife einer Musterfertigung. Diese Prämissen führen zu folgender Ausprägung der Einflussgrößen der Planparameterfluktuation:

- Hohe Bedarfsvolatilität mit einem hohen Risiko ungeplanter Priorisierungen
- Hohes Störaufkommen in Form von ungeplanten Störungen und Änderungen

Daraus resultieren eine hohe Planungsunschärfe und Unsicherheit bezüglich der Festlegung der Prozessparameter, -vorgabezeiten und Ausbringungsmengen. Folglich weist ein Musterfertigungsauftrag meist eine äußerst geringe Haltbarkeitsdauer seiner Planparameter Arbeitsinhalt und Prozessfolge auf.

### 3.2 Abgeleitete Anforderungen an ein Steuerungskonzept

Durch die spezielle Ausprägung der Planparametervariabilität einer Musterfertigung bei Systemlieferanten stellen sich besondere Anforderungen an das Fertigungssteuerungskonzept einer solchen Fertigungstypologie. Diese sind im Folgenden zusammengefasst.

Die erste zentrale Anforderung an das Steuerungskonzept einer Musterfertigung ist die Kompensationsfähigkeit im Bezug auf die musterfertigungsspezifische Planparametervariation. Alle Aufgaben der Fertigungssteuerung müssen in einer Art und Weise ausgestaltet sein, dass ein komplexes, sich permanent veränderndes Auftragsnetz abgebildet werden kann. Die Fertigungssteuerung muss dementsprechend immer wieder neu auftretende, sich schnell verändernde Prozessabfolgen bei ständig neuen Belastungsschwerpunkten kompensieren können.

Die zweite zentrale Anforderung an ein Fertigungssteuerungskonzept für eine Musterfertigung stellt die Fähigkeit zur Kompensation der spezifischen Planparameterfluktuation dar. Die Fertigungssteuerung einer Musterfertigung muss in ihrer Konfiguration an eine hohe Bedarfsvolatilität und ein hohes Störaufkommen angepasst werden. Dabei muss sie in die Lage versetzt werden, die hohe Planungsunschärfe und die daraus resultierende geringe Haltbarkeitsdauer der Planparameter bei der Festlegung und Anpassung der Arbeitsinhaltsfolgen ausgleichen zu können.

Darüber hinaus sollte das Fertigungssteuerungskonzept die Hauptziele einer Musterfertigung, eine hohe Termintreue und eine kurze Durchlaufzeit (Müller et al. 2009c) unterstützen und zudem alle Aufgaben der Fertigungssteuerung ganzheitlich integrieren. Im Sinne des Forschungsziels der vorliegenden Arbeit sollte das Fertigungssteuerungskonzept einer Musterfertigung darüber hinaus eine hohe Praktikabilität und Praxisrelevanz aufweisen.

Folgende Abbildung fasst diese zentralen Anforderungen noch einmal zusammen.

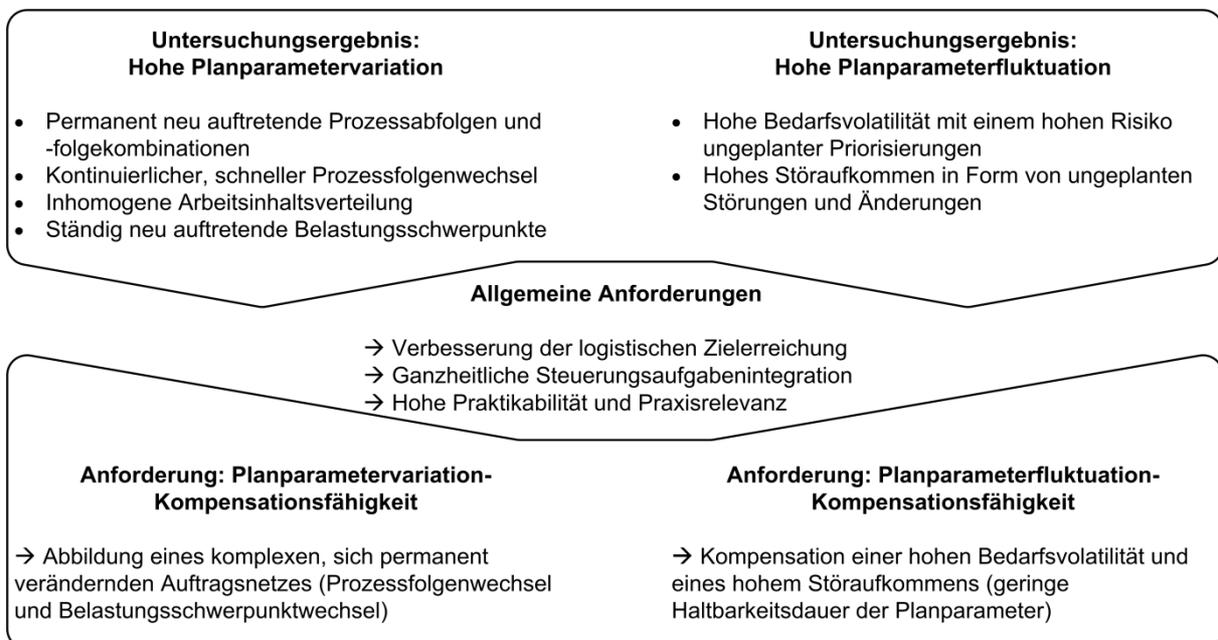


Abbildung 34: Abgeleitete Anforderungen an ein Fertigungssteuerungskonzept

### 3.3 Eignung bekannter Steuerungsverfahren

Aufgrund der vorliegenden Ausprägung der Planparametervariabilität ist die in der betrieblichen Praxis vorkommende Fertigungsstruktur einer Musterfertigung in der Regel das Werkstattfertigungsprinzip (Müller et al. 2009c). Dadurch wird die Auswahl möglicher Fertigungssteuerungsstrategien<sup>8</sup> stark eingegrenzt. Prinzipiell eignen sich dezentrale, bestandsgerichtete Auftragseinlastungsverfahren wie die DBF-, BGD- oder POLCA-Steuerung sowie zentrale Auftragseinlastungsverfahren mit dezentralen Bestandsobergrenzen wie die WLC-, BOA-, ALP-, GPOLCA- oder die COBACABANA-Steuerung. Von den zentralen, leistungsgeregelten Auftragseinlastungsverfahren kann nur die MRPII-Steuerung die hohe Planparametervariation einer Werkstattfertigung kompensieren (vgl. Kapitel 2.1.5.2).

<sup>8</sup>Verfahren zur Reihenfolgebildung, Kapazitätssteuerung oder Material- und Informationsflusssteuerung sind in der Regel unabhängig von der vorliegenden Planparametervariabilität einsetzbar und werden deshalb hier nicht näher diskutiert.

### Eignung zentraler Auftragseinlastungsverfahren

Alle zentralen Auftragseinlastungsverfahren, ob bestands- oder leistungsgeregelt, sind im Kontext der Musterfertigung bei Systemlieferanten mit dem Problem einer hohen Planparameterfluktuation konfrontiert. So setzen zentrale Verfahren, unabhängig von ihrer Ausgestaltung, Planparameterwerte in Form von Arbeitsinhalten und Prozessfolgen schon vor der Auftragsfreigabe fest. Diese festgelegten Werte haben über den gesamten Fertigungsdurchlauf hinweg Bestand. Wenn jedoch im Fertigungsablauf eine Störung oder ungeplante Priorisierung auftritt, ist davon das gesamte Auftragsnetz betroffen. Manche Autoren sprechen in diesem Zusammenhang auch von einem Schneeballeffekt (Stevenson et al. 2005, Dickmann 2007). Dadurch entsteht zum einen ein hoher Anpassungsaufwand und zum anderen wird jedes Planungsszenario, welches aus einer Regelungsentscheidung resultiert, durch die unweigerlich folgenden Plananpassungen ad absurdum geführt. Dieses Problem der Zeitdistanz zwischen der Planparameterfestlegung und der notwendigen Planparameteranpassung liegt allen zentralen Auftragseinlastungsansätzen gleichermaßen zugrunde (Tönshoff & Teunis 2001, Drew et al. 2004, Freitag 2005, Dickmann 2007, Arnold et al. 2008, Scholz-Reiter et al. 2008, Bornhäuser 2009).

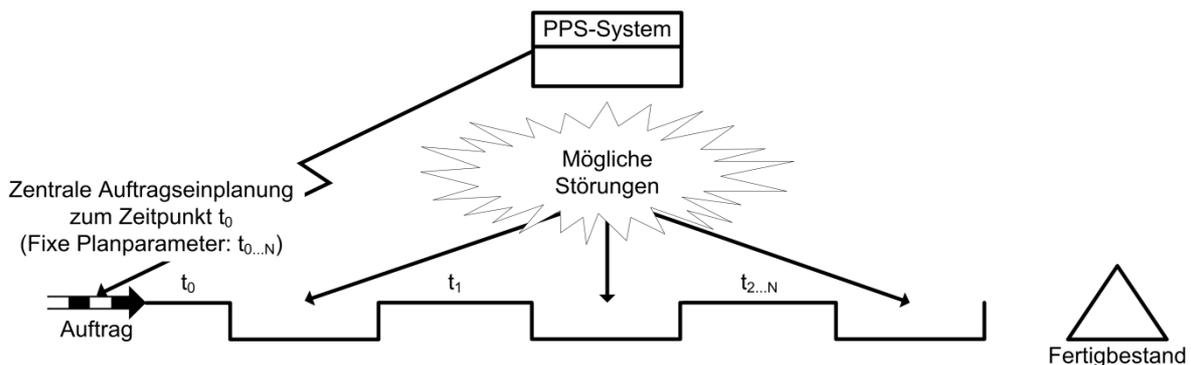


Abbildung 35: Problem der Zeitdistanz zentraler Einlastungsansätze

In einer Musterfertigung bei Systemlieferanten weisen Planparameter eine besonders kurze Haltbarkeitsdauer auf. So treten in fast jedem Musterauftrag Änderungen, Störungen oder ungeplante Priorisierungen auf, die jede Planung zu einem vorangegangenen Zeitpunkt zunichtemachen (vgl. Kapitel 3.1.3). Dementsprechend müssen zentrale Auftragseinlastungsansätze die ursprünglich geplanten Arbeitsinhaltsfolgen permanent einem komplexen, sich ungeplant verändernden Auftragsnetz einer Musterfertigung anpassen. Zudem verliert eine zentrale Einlastungsregelung in Anbetracht der sehr kurzen Haltbarkeitsdauer der Planparameter an Wirksamkeit, da sich jede Regelungsentscheidung auf ein Szenario bezieht, das nicht in der ursprünglich prognostizierten Form eintritt.

Dieses Problem soll anhand des folgenden stark vereinfachten Zahlenbeispiels verdeutlicht werden. Dafür gelten folgende Pauschalwerte für eine Musterfertigung:

- Ø-Anzahl von Fertigungsaufträgen pro Jahr: 4000 Stück
- Betriebskalendertage [BKT] pro Jahr: 250
- Ø-Durchlaufzeit pro Fertigungsauftrag: 25 Arbeitstage
- Ø-Anzahl Änderung/Störung/Priorisierung pro Fertigungsauftrag: 0,5

Mit diesen Vorgaben und unter der Annahme, dass sich eine Änderung, Störung oder ungeplante Priorisierung zeitlich auf das gesamte Auftragsnetz einer Musterfertigung auswirkt, muss der gesamte Netzplan einer Musterfertigung durchschnittlich achtmal am Tag vollständig angepasst werden. Jeder Auftrag ist also achtmal am Tag von einer direkten oder indirekten Plananpassung betroffen. Im Verlauf eines Auftragsdurchlaufs wird ein Fertigungsauftrag infolgedessen im Durchschnitt 200-mal angepasst. Dementsprechend ist es nahezu unmöglich, für einen solchen Auftrag vor seiner Freigabe exakte Termine oder zukünftige Leistungs- oder Belastungsszenarien zu prognostizieren.

Aus diesem Grund können zentrale Auftragseinlastungsverfahren, unabhängig davon, ob sie den Bestand oder die Leistung regeln, nicht oder nur unter einem extrem hohen Anpassungsaufwand in einer Musterfertigung bei Systemlieferanten als sinnvolle Steuerungsstrategie eingesetzt werden.

### ***Eignung dezentraler Auftragseinlastungsverfahren***

Eine weitaus bessere Eignung für eine hohe Planparameterfluktuation in Kombination mit einer hohen Planparametervariation weisen Ansätze auf, die auf einer dezentralen Regelung basieren. Bei einer dezentralen Regelung übernehmen einzelne Steuerungsobjekte unabhängig von einer zentralen Planungsinstanz die Regelungsentscheidung. Dadurch können neu auftretende Störungen oder Priorisierungen quasi direkt vor Ort ausgeglichen werden, ohne eine aufwendige Plananpassung nach sich zu ziehen. Infolgedessen wird das Problem der Zeitdistanz zwischen der Planparameterfestlegung und der notwendigen Anpassung vermieden (Okubo et al. 2000, Letmathe 2002, Kresken & Baumann 2006, Windt 2006, Scholz-Reiter et al. 2007, Günthner 2008, Hülsmann & Austerschulte 2008, Windt 2008, Gierth 2009, Gronau & Lindemann 2009, Kolditz 2009, Scholz-Reiter et al. 2009a, Scholz-Reiter et al. 2010). Allerdings gibt eine dezentrale Fertigungsregelung den Anspruch einer absoluten Beherrschbarkeit und Determinierbarkeit eines Auftragsnetzplans auf.

Als dezentrale Regelungsansätze für die Fertigungstypologie Werkstattfertigung eignen sich vor allem Auftragseinlastungsverfahren mit dezentralen Bestandsobergrenzen vor den einzelnen Steuerungsobjekten. Bei einem solchen Ansatz wird für jedes Arbeitssystem eine Bestandsobergrenze definiert, die seitens der Vorgänger nicht überschritten werden darf (vgl. Kapitel 2.1.5.2). Dadurch wird ein einfacher Regelungsmechanismus geschaffen, der zum einen den Gesamtbestand eines Fertigungsbereichs auf einem definierten Niveau regelt und zum anderen für eine gleichmäßige Belastungsverteilung und damit für eine höhere Gesamtproduktivität sorgt.

Die zwangsläufig auftretenden Störungen und Priorisierungen finden in einem solchen System weiterhin statt. Allerdings führen sie nicht wie bei zentralen Ansätzen zu massiven Anpassungen des gesamten Auftragsnetzplans. Stattdessen werden sie vor Ort direkt und zeitnah durch die Regelentscheidung einzelner Arbeitssysteme kompensiert. Dadurch kann zwar keine exakte Erreichung der gesetzten Planparameterwerte gewährleistet werden, jedoch führen die autonom getroffenen Steuerungsentscheidungen meist zu verbesserten Ergebnissen auf übergeordneter Ebene und damit zu einer Verbesserung der Gesamtzielerreichung.

Als Ausgestaltungsvarianten einer dezentralen, bestandsregulierten Auftragseinlassung existieren die POLCA-, die BGD- und die DBF-Steuerung (vgl. Kapitel 2.1.5.2). Obwohl alle drei Ansätze auf dem gleichen, oben beschriebenen Mechanismus der dezentralen Bestandsobergrenzen basieren, sind diese Verfahrensvarianten hinsichtlich ihrer Eignung für den konkreten Einsatz in einer Musterfertigung kritisch zu bewerten. Problematisch ist, dass ihre Ausgestaltung jeweils feste Prozessabfolgen als Quasi-Standardablauf eines Fertigungsauftrags vorsieht.

So wird bei der DBF jedem Steuerungsobjekt eine Positionsnummer zugewiesen, die die relative Position des Steuerungsobjekts im Gesamtmaterialefluss repräsentiert. Diese Positionsnummer dient dazu, gegenseitige Blockaden der Arbeitssysteme im Rahmen des Regelwerks der DBF zu vermeiden (Lödding 2001).

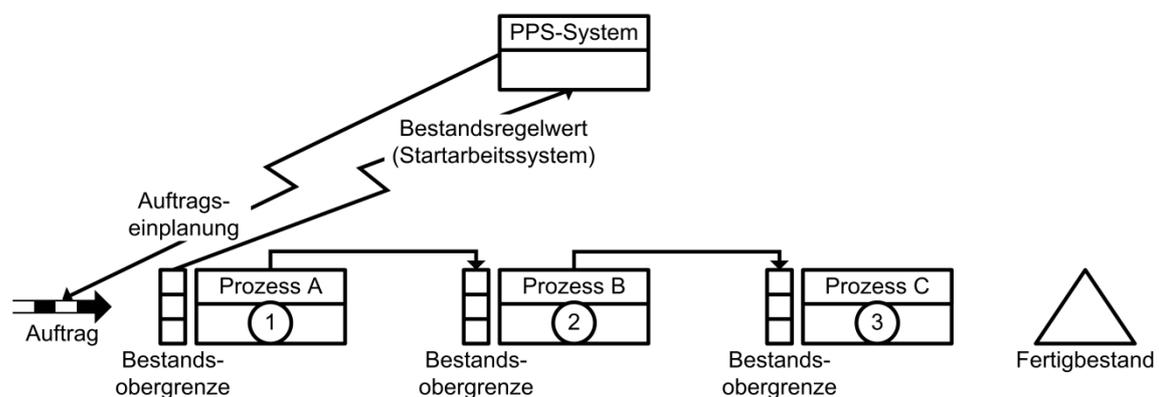


Abbildung 36: Ausgestaltungsvariante DBF-Steuerung

Auch die POLCA- und die BGD-Steuerung sehen die Implementierung einer festen Standardreihenfolge vor. In ihrer Ausgestaltung werden für eine Fertigung fixe Prozessketten bestimmt, in denen jedem Arbeitssystem Bestandsobergrenzen an fest definierten vorgelagerten Stationen zugewiesen werden. Diese Puffer dürfen von den Vorgängerarbeitssystemen nicht überschritten werden (Busch 1987, Suri 1998).

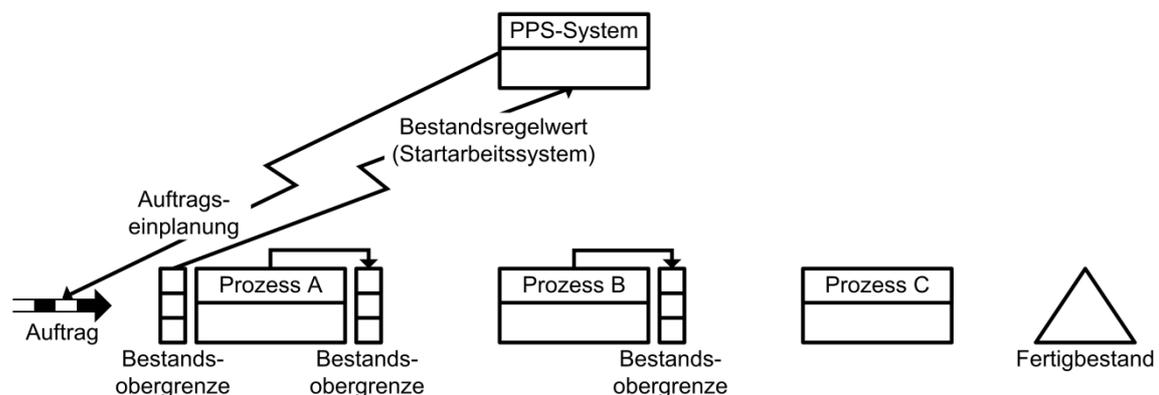


Abbildung 37: Ausgestaltungsvariante POLCA- und BGD-Steuerung

Da der Musterfertigung bei Systemlieferanten aber ein komplexes, sich permanent veränderndes Auftragsnetz zugrunde liegt, können beide Ausgestaltungsvarianten nicht eingesetzt werden. Die permanent neu auftretenden, sich schnell verändernden Prozessabfolgen machen die Festlegung einer Standardreihenfolge beziehungsweise die Definition von festen Belastungsschwerpunkten unmöglich.

### 3.4 Konkretisierung des Handlungsbedarfs

Da sowohl die bekannten Ausgestaltungsvarianten der dezentralen Bestandsregelung als auch zentrale Auftragseinlastungsansätze für die Steuerung einer Musterfertigung nur eingeschränkt geeignet sind, weist der Planparametervariabilitätsfall Musterfertigung bei Systemlieferanten, wie in Abbildung 38 dargestellt, ein Defizit an geeigneten Fertigungssteuerungsansätzen auf. Das ist der Grund dafür, dass in der betrieblichen Praxis bis dato noch keine geeigneten Ansätze zur Steuerung einer Musterfertigung gefunden wurden und die Musterfertigung in diesem Zusammenhang als systemischer Steuerungsproblemfall gilt (Müller et al. 2009c).

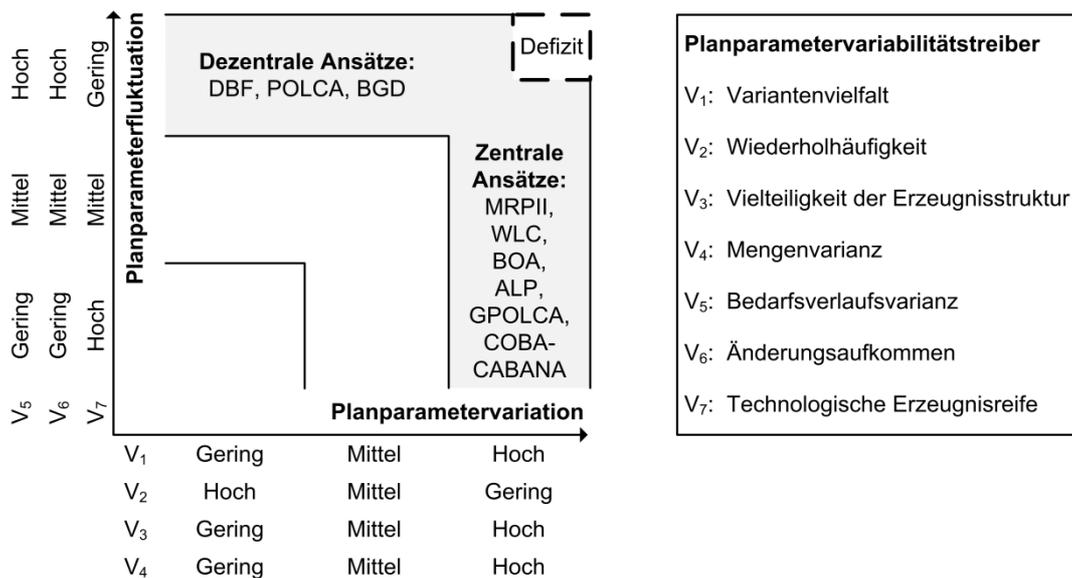


Abbildung 38: Verfahrensdefizit im Kontext des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung

Aus diesem Grund besteht ein Handlungsbedarf, ein neues Steuerungskonzept zu entwickeln, das sowohl die spezifische Ausprägung der Planparametervariation als auch die spezifische Ausprägung der Planparameterfluktuation einer Musterfertigung kompensieren kann. Ein solches Steuerungskonzept sollte die Zielerreichung einer Musterfertigung hinsichtlich der Termintreue und Durchlaufzeit positiv beeinflussen und zudem alle Aufgaben der Fertigungssteuerung ganzheitlich integrieren. Im Selbstverständnis der vorliegenden Arbeit sollte das Fertigungssteuerungskonzept darüber hinaus eine hohe Praktikabilität und Praxisrelevanz aufweisen.

## 4 MUSTERFERTIGUNGSSTEUERUNG MIT DEM PUSH-KANBAN-KONZEPT

---

Auf Basis des abgeleiteten Handlungsbedarfs und den in Kapitel 3.2 dargestellten Anforderungen wird im Sinne des vierten Prozessschritts des Forschungsprozesses der vorliegenden Arbeit ein neues Fertigungssteuerungskonzept für eine Musterfertigung bei Systemlieferanten entwickelt und im Folgenden vorgestellt.

### 4.1 Konzeptansatz

Das Konzept basiert auf der schon in Kapitel 3.3 diskutierten Idee, die hohe Planparametervariabilität einer Musterfertigung durch die Dezentralisierung der Fertigungssteuerung zu kompensieren. Es sieht die Verlagerung der Entscheidungsfunktionen von den zentralen Planungs- und Steuerungsinstanzen auf die dezentralen Steuerungsobjekte einer Fertigung vor. Die Steuerungsobjekte werden auf diese Weise befähigt, selbstständig zu interagieren sowie autonom Informationen zu verarbeiten und Entscheidungen zu treffen. Sie sind somit in der Lage, sich selbst zu steuern (Scholz-Reiter et al. 2007, Windt & Hülsmann 2007, Hülsmann & Austerschulte 2008, Scholz-Reiter et al. 2008, Gierrh 2009, Kolditz 2009).

Eine solche Selbststeuerung vermeidet wesentliche Probleme zentraler Steuerungsansätze, da sie die Möglichkeit bietet, Störungen und Planänderungen direkt zu kompensieren, ohne dabei einen komplexen Auftragsnetzplan zu verändern. Dadurch führt der Einsatz einer dezentralen Steuerung zu den folgenden Effekten (Scherer 1998, McFarlane & Bussmann 2000, Bullinger 2002, Damien & Salah 2002, Wildemann 2002, Kresken & Baumann 2006, Scholz-Reiter et al. 2007, Windt & Hülsmann 2007, Günthner 2008, Hülsmann & Austerschulte 2008, Scholz-Reiter et al. 2008, Gronau & Lindemann 2009, Scholz-Reiter et al. 2009a):

- Komplexitätsreduktion
- Erhöhung der Flexibilität
- Reduktion des Planungs- und Anpassungsaufwands
- Einbindung, Autonomie und Zusammenarbeit der Mitarbeiter

Allerdings wird für das Erreichen dieser positiven Effekte der Anspruch der absoluten Beherrsch- und Planbarkeit des Fertigungsablaufs aufgegeben. Dezentrale, selbststeuernde Systeme weisen zwar in der Regel eine positive Emergenz auf, das heißt, die autonom getroffenen Steuerungsentscheidungen tragen zu einer Verbesserung der Gesamtzielerreichung bei, jedoch können dezentrale Systeme nie exakt auf ein globales Optimum abgestimmt werden .

Zur Ausgestaltung der Selbststeuerung existieren in den produktionslogistischen Disziplinen unterschiedliche Ansätze. Bekannte Beispiele sind neuronale Netze zur dezentralen Bestandsregelung im Forschungsbereich der Operations Research (Hamann 2008), Agentensysteme im Bereich der Informationstechnologie (Lieske 2005, Mönch 2006), RFID-Systeme im Bereich der Materialflusstechnik (Müller et al. 2004, Faupel 2009) und dezentrale Fertigungssteuerungsverfahren im Bereich der nicht-mathematischen Verfahrensforschung (Busch 1987, Suri 1998, Lödging 2001).

Darüber hinaus bestehen verschiedene spezifische Organisationskonzepte der Selbststeuerung, wie unter anderem die heterarchische Hierarchie, die Heterarchie<sup>9</sup>, die mindestinterdependente Autonomie und die Anarchie (Weller 1999, Blecker & Kaluza 2004, Duffie 2007, Fairtlough & Clegg 2007). Deren Anwendbarkeit, dass heißt der optimale Grad der Selbststeuerung im Bezug auf ein vorliegendes Produktionssystem wird unter anderem von dessen innerer Strukturkomplexität, des Determinismus seines Umweltsystems, der vorliegenden Entscheidungsautonomie sowie den intrinsischen und extrinsischen Zielen beeinflusst (Wiendahl 1998, Windt 2008, Gierth 2009, Kolditz 2009, Scholz-Reiter et al. 2009a). Zur Durchdringung dieses Zusammenhangs entwickelt der Sonderforschungsbereich 637 der Universität Bremen seit dem Jahr 2004 ein umfassendes Beschreibungs- und Erklärungsmodell, das Selbststeuerung als ein neues Paradigma logistischer Prozesse ergründet.

Allerdings ist es im aktuellen Stand des Wissens noch nicht möglich den optimalen Grad der Selbststeuerung in der Fertigungssteuerung für eine spezifische Fertigungstypologie anhand ihrer Determinanten analytisch abzuleiten. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Arbeit auf den pragmatischen Vorschlag verschiedener Autoren zurückgegriffen, die zur Kompensation einer hohen Planparametervariabilität in der Fertigungssteuerung die Selbststeuerungsausprägung der heterarchischen Hierarchie als geeignetes Konzept vorschlagen (Blecker & Kaluza 2004).

Dieses häufig unter verschiedenen begrifflichen Abwandlungen beschriebene Konzept sieht zur Steuerung einer komplexen Fertigungstypologie einen hierarchischen Rahmen vor, in dem selbststeuernde, heterarchisch organisierte Steuerungsobjekte den Auftragsdurchlauf übernehmen. Dabei kann die Fertigungssteuerung in eine hierarchische, planerische Funktion und in einen heterarchisch strukturierten Steuerungsbereich unterteilt werden. Während die zentrale Funktion Fertigungsaufträge erstellt und überwacht, werden die Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung, Kapazitätssteuerung sowie die Transport- und Informationsflusssteuerung dezentral von den Steuerungsobjekten einer Fertigung übernommen (Breker 1995, Dobbertein 1997, Ramsauer 1997, Scherer 1998, Zäpfel 1998, Okubo et al. 2000, Bullinger 2002, Damien & Salah 2002, Letmathe 2002, Lohse 2002, Teunis 2003, Müller et al. 2004, Arnold et al. 2008, Günthner 2008, Bornhäuser 2009, Ounnar & Pujo 2009).

## 4.2 Konzeptelemente

Das im Folgenden vorgestellte Push-Kanban-Konzept spannt einen solchen heterarchisch-hierarchischen Konzeptrahmen, indem es eine robuste Auftragseinplanung, quasi als Terminkorsett mit einer dezentralen, selbststeuernden Fertigungsregelung kombiniert. Dabei besteht das Konzept aus fünf Teilelementen, die jeweils eine Aufgabe der Fertigungssteuerung übernehmen.

Das erste Element, die „*Robuste Einplanung*“ deckt die Aufgabe der Auftragserstellung ab. Die Methodik sieht eine näherungsweise Ermittlung „robuster“ Vorgangsecktermine vor, die gewissermaßen als Eckterminrahmen der dezentralen Selbststeuerung als Orientierungspunkte dienen.

---

<sup>9</sup>Der Begriff Heterarchie als Komplement zum Begriff Hierarchie geht auf die Neurophysiologen MCCULLOCH und PITTS zurück, die damit die Funktionsweise eines neuronalen Netzes beschreiben (McCulloch & Pitts 1943). Im erweiterten Sinne ist Heterarchie eine Organisationsform, in der Organisationseinheiten nicht in einem Über- und Unterordnungsverhältnis zueinander stehen, sondern gleichberechtigt beliebige Beziehungen zueinander eingehen können (Ehrenreich, et al. 1995).

Das zweite Element der „*Dezentralen Bestandsregelung*“ entspricht dem schon in Kapitel 3 diskutierten Auftrageinlastungsmechanismus, der dezentralen Bestandsregelung. Durch dessen Implementierung wird ein einfacher, selbststeuernder Belastungsabgleich zwischen den einzelnen Arbeitssystemen geschaffen.

In Ergänzung dazu kommt als drittes Element eine „*Terminorientierte Reihenfolgepriorisierung*“ als Reihenfolgeregelung zum Einsatz. Diese beinhaltet die Anwendung einer Prioritätsregel, die zu einer Verbesserung der logistischen Zielerreichung hinsichtlich der Terminsituation einer Fertigung führt.

Die Kapazitätssteuerung wird im Rahmen des Konzepts durch das vierte Element einer „*Engpassorientierten Kapazitätsregelung*“ ausgestaltet. Diese sieht eine kurzfristige Kapazitätsregelung an den auftretenden Engpassarbeitssystemen einer Fertigung vor.

Als quasi umfassende Ausgestaltungsklammer dient schließlich das fünfte Element der „*Vorwärtsverknüpften Kanbanregelkreise*“. Dieses übernimmt die operative Material- und Informationsflusssteuerung in einer Musterfertigung. Dabei dienen die entwickelten Kanbanregelkreise zum einen der Integration der anderen Konzeptelemente in ein umfassendes, selbststeuerndes Regelungskonzept, zum anderen ermöglichen sie eine planparametervariationsgerechte Ausgestaltung der dezentralen Bestandsregelung.

Insgesamt bilden die fünf Elemente, wie in Abbildung 39 schematisch dargestellt, ein ganzheitliches Fertigungssteuerungskonzept, bei dessen Anwendung Fertigungsaufträge mithilfe von vorwärtsverknüpften Kanbanregelkreisen durch eine Fertigung gesteuert werden. Da die Aufträge dabei zentral eingeplant werden und der kanbangesteuerte Informationsfluss entlang dem Materialfluss verläuft, handelt es sich bei dem Konzept gemäß der Klassifizierung aus Kapitel 2.1.5.1 um eine Push-Steuerung. Daraus leitet sich der Konzeptname „*Push-Kanban*“ ab.

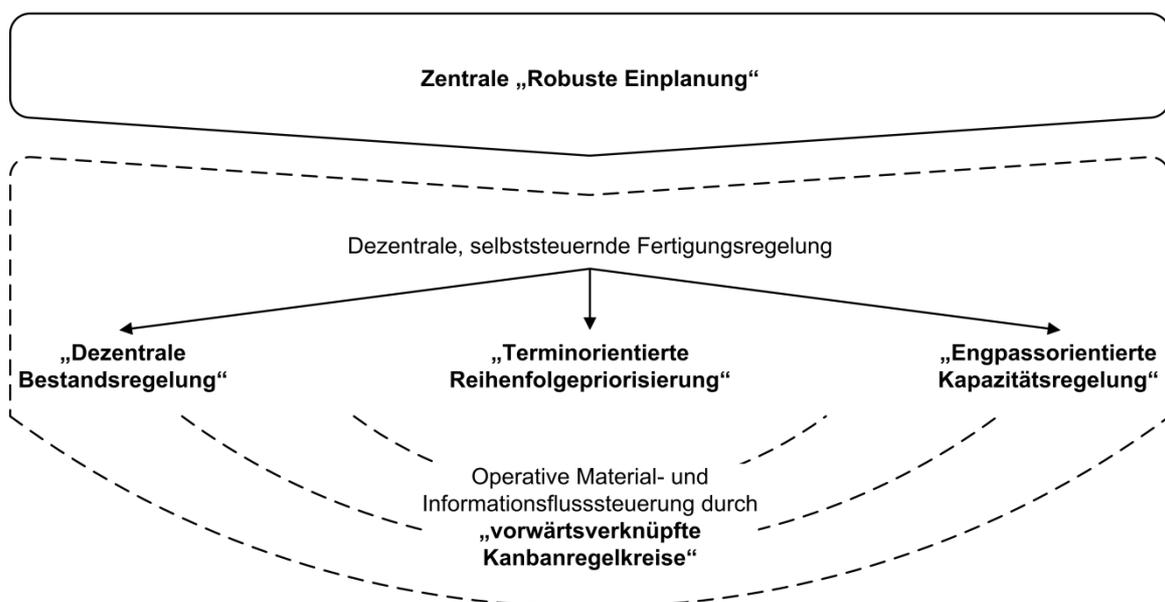


Abbildung 39: Das Push-Kanban-Konzept

### 4.3 Konzeptausgestaltung

Die im Folgenden beschriebenen Ausgestaltungsansätze der einzelnen Elemente des Push-Kanban-Konzepts stellen mögliche Lösungsalternativen dar, die im Kontext einer Erweiterung des Konzepts auch modular verwendbar sind. Insbesondere das Element „Robuste Push-Einplanung“ sowie die Kombination aus den Elementen „Dezentrale Bestandsregelung“, „Terminorientierte Reihenfolgepriorisierung“, „Engpassorientierte Kapazitätsregelung“ und „Vorwärtsverknüpfte Kanbanregelkreise“ können auch unabhängig voneinander eingesetzt werden.

#### 4.3.1 Element „Robuste Einplanung“

Die Aufgabe der Auftragserstellung besteht darin, die groben zeitlichen Vorgaben der Grobterminierung mit der aktuellen Kapazitätssituation abzugleichen. Daraus werden konkrete Vorgangsecktermine abgeleitet, welche die zeitliche Staffelung der Arbeitsinhaltsfolgen bestimmen.

Als Ausgestaltungsvarianten existieren die grundsätzlichen Ansätze der Vorwärts-, Rückwärts- sowie Mittelpunktterminierung. Während die Vorwärtsterminierung, ausgehend von einem fixen Starttermin, den frühestmöglichen Fertigstellungstermin berechnet, geht die Rückwärtsterminierung von einem fixen Bedarfsendtermin aus, um den spätestmöglichen Starttermin eines Auftrags zu bestimmen. Als Alternative kann auch die sogenannte Mittelpunktterminierung zum Einsatz kommen, bei der von dem Arbeitsvorgang eines Engpassarbeitssystems aus sowohl eine Vorwärts- als auch eine Rückwärtsterminierung stattfinden (Schuh & Roesgen 2006, Wannewetsch 2007, Arnold et al. 2008).

Zur Terminberechnung werden Schätz-, Vergangenheitswerte und Neuberechnungen der Vorgangsdurchführungszeiten sowie die erfahrungswertbasierten Übergangszeiten zwischen den Arbeitssystemen herangezogen. In Abhängigkeit von der Granularität der Planung wird die Durchlaufzeit eines Auftrags entweder aus der Summe der auftragsbezogenen oder aus der Summe der arbeitsplatzbezogenen Durchführungs- und Übergangszeiten berechnet (Arnold et al. 2008, Bauer 2009).

Sowohl die Wahl der Terminierungsmethodik und der Berechnungsbasis als auch die Wahl der Berechnung selbst haben im Abgleich mit der vorliegenden Fertigungstypologie zu erfolgen. Allgemein gilt, dass mit der Zunahme der Planparametervariabilität der Aufwand der Feinterminierung abnehmen sollte. So lohnt sich bei stabilen Prozessen eine hohe Planungsgenauigkeit, wohingegen bei stochastischen Prozessen eine deutlich gröbere Planung zweckmäßig ist (Zäpfel 1996).

Bei einer hohen Turbulenz, wie im Planparametervariabilitätsfall Musterfertigung, sollten Plantermine deshalb anstatt einer hohen Genauigkeit eine möglichst hohe Robustheit aufweisen. Robust ist ein Termin dann, wenn er unempfindlich gegenüber ungeplanten Schwankungen ist und trotzdem zu akzeptablen Ergebnissen hinsichtlich der Termintreue führt (Zäpfel 1996, Enderlein 1998, Brinzer et al. 2005, Frischke 2006, Gebhard 2009, Gronau & Lindemann 2009). Als Mittel zur Erreichung einer höheren Robustheit können in der Terminierung Schätz- und Erwartungswerte, Wahrscheinlichkeitsszenarien sowie Puffer und Sicherheitszuschläge zur Anwendung kommen (Zäpfel 1996, Guiffrida & Nagi 1998, Gebhard 2009).

Die Methodik der „Robusten Einplanung“ im Push-Kanban-Konzept lehnt sich an einen Vorschlag von ZÄPFEL an, der für den Fall einer hohen Turbulenz eine Kombination aus einem groben Terminkorsett und einer dezentralen Feinplanung vorsieht (Zäpfel 1996). Im Rahmen der „Robusten Einplanung“ wird dieses grobe Terminkorsett durch eine approximierende Terminschätzung ermittelt. Die ermittelten Schätzwerte haben dabei nicht den Anspruch einer exakten Terminvorgabe, sondern dienen vielmehr als robuste Orientierungspunkte der selbststeuernden Fertigungsregelung im Push-Kanban-Konzept.

Die Grundidee hinter der Methodik der approximierten Terminschätzung besteht darin, den allgemein bekannten Zusammenhang eines „nahezu proportionalen Anstieg[s] der Auftrags-Durchlaufzeit mit der Anzahl der Arbeitsvorgänge“ (Wiendahl 1997, S. 76) zu nutzen, um aus den Vergangenheitsdaten einer Fertigung ein Regressionsmodell zur Prognose zukünftiger Auftragsdurchlaufzeiten abzuleiten. So bestehen in den Auftragsvergangenheitsdaten einer Fertigung in der Regel starke Korrelationen zwischen Auftragsmerkmalen wie der Vorgangszahl oder der Durchführungszeit und der Durchlaufzeit eines Auftrags. Diese können zur Ermittlung eines Regressionsmodells herangezogen werden, das wiederum zur Prognose zukünftiger Auftragsdurchlaufzeiten dient (Müller et al. 2009b).

Im Anwendungsfall werden dabei anhand der Vergangenheitsdaten eines Fertigungsbereichs mithilfe einer Korrelationsanalyse Auftragsmerkmale ermittelt, die in einem starken Zusammenhang mit der Auftragsdurchlaufzeit stehen. Dieser Zusammenhang wird durch die Methodik der multiplen Regressionsanalyse in eine lineare Gleichung der folgenden Form überführt<sup>10</sup>.

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + \dots + b_i * X_i \quad (9)$$

Y: Schätzung der abhängigen Variablen (Auftragsdurchlaufzeit)

X<sub>i</sub>: Kovariablen (z.B. Vorgangszahl, Auftragsdurchführungszeit u.a.)

b<sub>i</sub>: Regressionsparameter

Dadurch entsteht eine lineare Gleichung der obigen Form, in der die Auftragsdurchlaufzeit aus dem Produkt verschiedener Auftragsmerkmale berechnet wird. Mit dieser Gleichung kann für einen vorliegenden Fertigungsauftrag anhand der gesetzten Auftragsplanparameterwerte die voraussichtliche Durchlaufzeit prognostiziert werden. Der ermittelte Schätzwert wird dann im Verhältnis der Vorgangsdurchführungszeiten auf die einzelnen Vorgangzieltermine herunter gebrochen. Die ursprünglich sukzessiven Planungsphasen der Durchlauf- und Feinterminierung gehen dabei in einer einzigen Feinterminierungsphase nach Auftragsfreigabe auf.

Insgesamt lassen sich mit dieser Vorgehensweise robuste Ecktermine ermitteln, die zur Kompensation der Planparameterfluktuation einer Musterfertigung beitragen können. Sie dienen als quasi robuste Orientierungspunkte für die im Folgenden beschriebene dezentrale Fertigungsregelung.

<sup>10</sup>Weiterführende Beschreibungen der Korrelationsanalyse und multiplen Regressionsanalyse finden sich bei Backhaus/2008.

### 4.3.2 Element „Dezentrale Bestandsregelung“

Der im Rahmen des Push-Kanban-Konzepts implementierte Auftragsfreigabemechanismus entspricht der schon in Kapitel 2 und 3 diskutierten „*Dezentralen Bestandsregelung*“. Diese sieht dezentrale Bestandsobergrenzen vor den einzelnen Steuerungsobjekten einer Fertigung vor, die seitens der Vorgänger nicht überschritten werden dürfen. Dadurch wird ein einfacher, selbststeuernder Belastungsabgleich zwischen den einzelnen Arbeitssystemen geschaffen, der eine dezentrale Auftragssteuerung ermöglicht. Zudem erlaubt die Dezentralität des Mechanismus eine zeitnahe Reaktion auf ungeplante Planparameterschwankungen in den dezentralen Steuerungsinstanzen (vgl. Kapitel 3.3). Es entsteht eine hohe „Materialflussflexibilität“ in Form der Fähigkeit des Steuerungssystems, ungeplant wechselnde Materialströme kompensieren zu können (Das & Nagendra 1993, Gebhard 2009). Gleichzeitig führt der auftretende Effekt der Belastungsnivellierung zu einer positiven Emergenz des Gesamtsystems.

Folgende Abbildung soll diesen Wirkungszusammenhang verdeutlichen, wobei in der rechten Hälfte des Bildes das Schema einer Werkstattfertigung ohne eine dezentrale Bestandsregelung gezeigt wird, während die linke Hälfte des Bildes die gleiche Situation mit einer dezentralen Bestandsregelung darstellt.

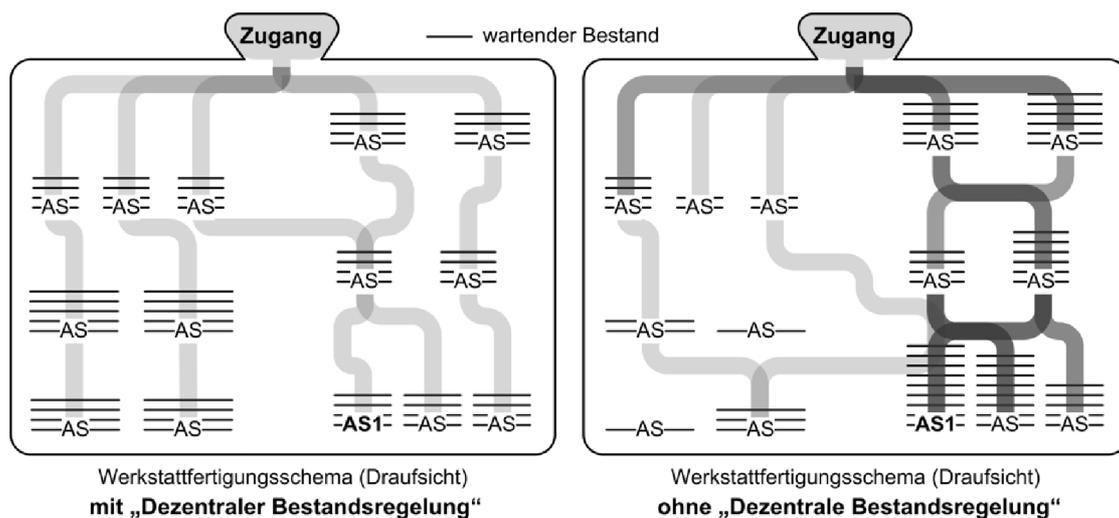


Abbildung 40: Effekt der „Dezentralen Bestandsregelung“ im Push-Kanban-Konzept

Tritt an dem in der Darstellung hervorgehobenen AS1 eine ungeplante Störung auf, zeigt sich der folgende Effekt. Unabhängig davon, ob eine dezentrale Bestandsregelung vorliegt, verspäten sich alle Aufträge, die vor dem AS1 warten oder zu einem späteren Zeitpunkt über das AS1 laufen. In einem Steuerungssystem ohne dezentrale Bestandsgrenzen produzieren allerdings alle dem AS1 vorgelagerten AS weiterhin Aufträge für das AS1. In einem Steuerungssystem mit dezentralen Bestandsobergrenzen werden von den vorgelagerten AS stattdessen andere Aufträge, die nicht über das AS1 laufen, in der Bearbeitung vorgezogen. Dadurch beschleunigen sich Aufträge, die nicht über das AS1 laufen, was zu einer Gesamtliegezeitreduktion und damit zu einer Durchlaufzeitverringerung des Gesamtsystems führt. Die dezentrale Bestandsregelung kann mit dieser Wirkweise durch zeitnahe Reaktionen in ihren dezentralen Steuerungsinstanzen flexibel auf ungeplante Störungen reagieren.

Darüber hinaus impliziert die dezentrale Bestandsregelung den Effekt einer Begrenzung des Gesamtbestands einer Fertigung, der grundsätzlich allen bestands-geregelten Auftragseinlastungsverfahren zugrunde liegt. Dieser wirkt sich positiv auf die Prognosefähigkeit einer Fertigung hinsichtlich der zu planenden Auftragsdurchlaufzeiten aus. Dadurch wird der Aufwand für Priorisierungen und ungeplante Vertauschungen reduziert (Land & Gaalman 1996, Hendry et al. 1998, Land & Gaalman 1998, Land 2004, Ebben et al. 2005, Land 2006, Duffie et al. 2008, Fredendalla et al. 2010).

Bei der Ausgestaltung der „*Dezentralen Bestandsregelung*“ weicht das Push-Kanban-Konzept von den in Kapitel 3 diskutierten Ausgestaltungsvarianten der DBF-, BGD- und POLCA-Steuerung ab. Diese drei Varianten sehen jeweils die Implementierung einer Prozessstandardreihenfolge in Form von Engpassarbeitssystemen beziehungsweise Positionsnummern vor. Da aber die Prozessabfolgen und Belastungsschwerpunkte einer Musterfertigung stark variieren, kann für das Push-Kanban-Konzept keine Prozessstandardreihenfolge zugrunde gelegt werden. Vielmehr bedarf es einer Ausgestaltungsvariante, welche die permanent wechselnden Prozessfolgen und Belastungsschwerpunkte kompensieren kann. Eine solche beschreibt Kapitel 4.3.5.

### 4.3.3 Element „Terminorientierte Reihenfolgepriorisierung“

Das dritte Element des Push-Kanban-Konzepts, die „Terminorientierte Reihenfolgepriorisierung“ entspricht der Aufgabe der Reihenfolgeregelung in der Fertigungssteuerung. Prinzipiell geht es bei der Festlegung der Auftragsreihenfolge darum, in Abhängigkeit von der logistischen Zielsetzung einer Fertigung die optimale Reihenfolge unterschiedlicher Aufträge zur Bearbeitung zu bestimmen. Reihenfolgen können dabei sowohl in Auftragswarteschlangen vor einem Fertigungsbereich als auch vor einzelnen Arbeitssystemen festgelegt werden. Dazu stehen unter anderem die in Kapitel 2.1.5.2 beschriebenen Prioritätsregeln zur Verfügung.

Im Kontext einer dezentralen, selbststeuernden Fertigungsregelung kommt der Reihenfolgebildung an den einzelnen Arbeitssystemen eine besondere Bedeutung zu, da in einem selbststeuerndem System die Steuerungsobjekte dazu befähigt werden, autonome Entscheidungen zu treffen. Die getroffenen Steuerungsentscheidungen sollen zu einer positiven Emergenz des Gesamtsystems beitragen und müssen daher auf ein Gesamtziel ausgerichtet sein.

In der selbststeuernden Fertigungsregelung des Push-Kanban-Konzepts sind durch die dezentralen Steuerungsobjekte zwei Fragestellungen zu beantworten:

- Welcher Auftrag ist zu bearbeiten?
- Kann ein Auftrag im Hinblick auf den Nachfolgerprozess bearbeitet werden?

Während die letztere Fragestellung durch die dezentralen Bestandsobergrenzen der einzelnen Arbeitssysteme geregelt ist, wird die erste Fragestellung durch den Einsatz der ODD (Earliest Operation Due Date)-Reihenfolgeregelung beantwortet. Diese priorisiert Fertigungsaufträge nach den vorliegenden Vorgangsterminen an einer Arbeitsstation. Dabei hat der Auftrag die höchste Priorität, dessen Vorgangstermin die kürzeste Zeitdauer bis zu seiner Planfertigstellung an einer Arbeitsstation aufweist (Sauer 2002, Geiger 2005).

Verschiedene Untersuchungen haben ergeben, dass die ODD-Regel im Vergleich mit anderen bekannten Prioritätsregeln die besten Ergebnisse hinsichtlich der Reduktion der Terminabweichung und hinsichtlich der Reduktion der Terminabweichungsschwankungen aufweist (Baker 1984, Moser & Engell 1992, Rose 2003, Awate & Saraph 2007). Daher wird sie als Prioritätsregel für das Push-Kanban-Konzept eingesetzt. Sie unterstützt das logistische Hauptziel einer Musterfertigung, eine hohe Termintreue (Müller et al. 2009c), und trägt darüber hinaus zum Ziel der Terminrobustheit im Zusammenspiel mit dem Element der „Robusten Einplanung“ bei (Baker 1984).

Hinsichtlich der praktischen Implementierung stellt die ODD-Regel zudem eine sehr aufwandsarm zu implementierende Heuristik dar, da sie keinen Berechnungsaufwand oder zusätzliche Daten aus einem zentralen Planungssystem erfordert. Stattdessen werden Aufträge einfach anhand der ausgewiesenen Vorgangsendtermine an den einzelnen Arbeitsstationen priorisiert.

#### **4.3.4 Element „Engpassorientierte Kapazitätsregelung“**

Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es, die vorhandenen Kapazitäten an die aktuellen Produktionsplanungsparameter anzupassen, um die logistische Zielerreichung einer Fertigung zu verbessern. Zu ihrer Ausgestaltung existieren die in Kapitel 2.1.5.2 beschriebenen Regelungsansätze.

Die Verfahrensvariante der Rückstandsregelung ist im Kontext einer Musterfertigung nicht sinnvoll anwendbar, da weder an den einzelnen Arbeitsstationen noch für die Gesamtmusterfertigung eine geeignete Messgröße zur Rückstandsmessung definiert werden kann. So ist es aufgrund der hohen Planparametervariabilität einer Musterfertigung nicht möglich, ein Planergebnis und damit eine Rückstandsregelgröße hinsichtlich Zeit oder einer Stückzahl zu bestimmen.

Auch der Einsatz der LMKS ist unter diesem Aspekt kritisch zu bewerten. Diese Verfahrensvariante sieht die Festlegung von statischen Engpässen vor, die aber in Anbetracht der ständig wechselnden Belastungsschwerpunkte einer Musterfertigung nicht bestimmbar sind.

Aus diesem Grund wurde für das Push-Kanban-Konzept ein neuer Kapazitätssteuerungsmechanismus entwickelt. Das Element der „Engpassorientierten Kapazitätsregelung“ sieht eine Kapazitätssteuerung an den Bestandsgrenzen der „Dezentralen Bestandsregelung“ vor. Sie tritt immer dann in Kraft, wenn die Bestandsgrenze eines Arbeitssystems den zulaufenden Materialfluss abregelt. Dabei wird von einem überlasteten Arbeitssystem, an dem keine freie Pufferzeit für die sich im Vorlauf befindenden Aufträge zur Verfügung steht ein Regelsignal ausgelöst. Durch dieses Regelsignal wird eine Kapazitätsbedarfsindikation angezeigt und die Kapazität des entsprechenden Arbeitssystems im Rahmen der vorhandenen Kapazitätsflexibilität erweitert. Somit wird die Kapazität bedarfsgerecht an die wechselhaft auftretenden Belastungsschwerpunkte angepasst und damit der Gesamtdurchsatz optimiert. Bei dieser Verfahrensvariante handelt es sich folglich um eine Art systematisches „Firefighting“, dem die Erkenntnis zugrunde liegt, dass in einer Musterfertigung von Systemlieferanten keine statischen Kapazitätsengpässe bestimmbar sind.

### 4.3.5 Element „Vorwärtsverknüpfte Kanbanregelkreise“

Die Aufgabe der operativen Material- und Informationsflusssteuerung besteht im Rahmen der Fertigungssteuerung vor allem in der zieloptimalen Steuerung und Überwachung der Material- und Informationsflüsse zwischen den Bearbeitungsprozessen und der zentralen Steuerungsinstanz. Während die Ausgestaltung der Materialflusssteuerung in Form des Transportprinzips und der zugehörigen Transportressourcen relativ stark durch die Planparametervariabilität und die geometrische Bestimmtheit der Erzeugnisse determiniert werden, bietet die Ausgestaltung der operativen Informationsflusssteuerung gewisse Freiheitsgrade. So können zur Informationserfassung, -speicherung und -weitergabe neben informationstechnischen Systemen wie zum Beispiel Betriebsdatenerfassungs (BDE) - oder Manufacturing Execution (MES)-Systeme alternativ auch visuell-haptische Informationsträger zur Anwendung kommen (Kurbel 2005, Kletti 2006, Arnold et al. 2008, Riezebos et al. 2009).

Visuell-haptische Informationsträger bieten den Vorteil einer einfachen sensorischen Wahrnehmung, die zu einer hohen Akzeptanz bei den Mitarbeitern führt. Dadurch weisen sie eine hohe Praktikabilität und Transparenz auf. Das ist der Grund dafür, dass sich in der industriellen Praxis vor allem Steuerungsverfahren etabliert haben, die auf visuell-haptischen Informationsträgern basieren (Spearman et al. 1990, Wiendahl 1997, Liker 2004, Geraghty & Heavey 2005, Dickmann 2007, Gonzalez & Framinan 2009, Riezebos et al. 2009).

Der bekannteste visuell-haptische Informationsträger ist der Kanban. Kanban ist das japanische Wort für visuelles Signal oder Karte. Als Begrifflichkeit hat sich das Wort in der Produktionslogistik im Zusammenhang mit der aus Japan stammenden Lean-Management-Philosophie etabliert (Wildemann 1984, Womack et al. 1990, Ohno 1993, Bicheno 1998, Monden 1998, Schönsleben 2002). Ursprünglich wurde damit die mit Kanbansignalen ausgestaltete Pull-Steuerung assoziiert. Da aber mittlerweile eine Vielzahl an kanbangesteuerten Verfahren existiert, die Kanbans unabhängig von ihrem Steuerungsprinzip als Steuerungssignale einsetzen, ist der Kanban zu einem universellen Steuerungstool geworden (vgl. Kapitel 2.1.5.2).

Die Idee hinter dem Element „Vorwärtsverknüpfte Kanbanregelkreise“ im Push-Kanban-Konzept besteht darin, den Informationsträger Kanban im Kontext einer Musterfertigung zur Informationsflusssteuerung einzusetzen und damit die beschriebenen Vorteile, in Form von Visualität, Praktikabilität und Transparenz, auch für diese komplexe und turbulente Fertigungstypologie nutzbar zu machen. Dazu werden die Bestandsobergrenzen der „Dezentralen Bestandsregelung“ durch sogenannte Zeitkanbans (Kanban = Zeitwertkarte) abgebildet und durch flexible Regelkreise miteinander verknüpft. Dadurch entsteht ein vorwärtsvermaschtes Kanbanregelkreisnetz, das den Materialfluss vollständig flexibel abbilden kann und dabei folgende Informationen zwischen den Arbeitsstationen disponiert:

- Auftragsinformationen (Auftragsmerkmale, Prozessinformationen, Termine)
- Informationen zur Belastungssituation (Arbeitssystem, Vorgänger, Nachfolger)
- Informationen zu Kapazitätsbedarfen
- Informationen zu Dringlichkeiten und Prioritäten

Das kanbanbasierte Informationsflussnetz führt zu einer vollständigen Entkopplung der Informations- und Materialflüsse vom Werkstattlayout und zu einer Reduktion der Steuerungskomplexität (Bornhäuser 2009). Zudem ermöglicht es den Einsatz der „Dezentralen Bestandsregelung“ im Kontext der hohen Planparametervariabilität einer Musterfertigung, da die dezentralen Bestandsgrenzen flexibel miteinander verknüpft werden. Darüber hinaus ermöglicht es auch eine ganzheitliche Integration aller Elemente des Push-Kanban-Konzepts.

### 4.4 Konzeptablauf

Der Ablauf des integrierten Push-Kanban-Konzepts stellt sich wie folgt dar:

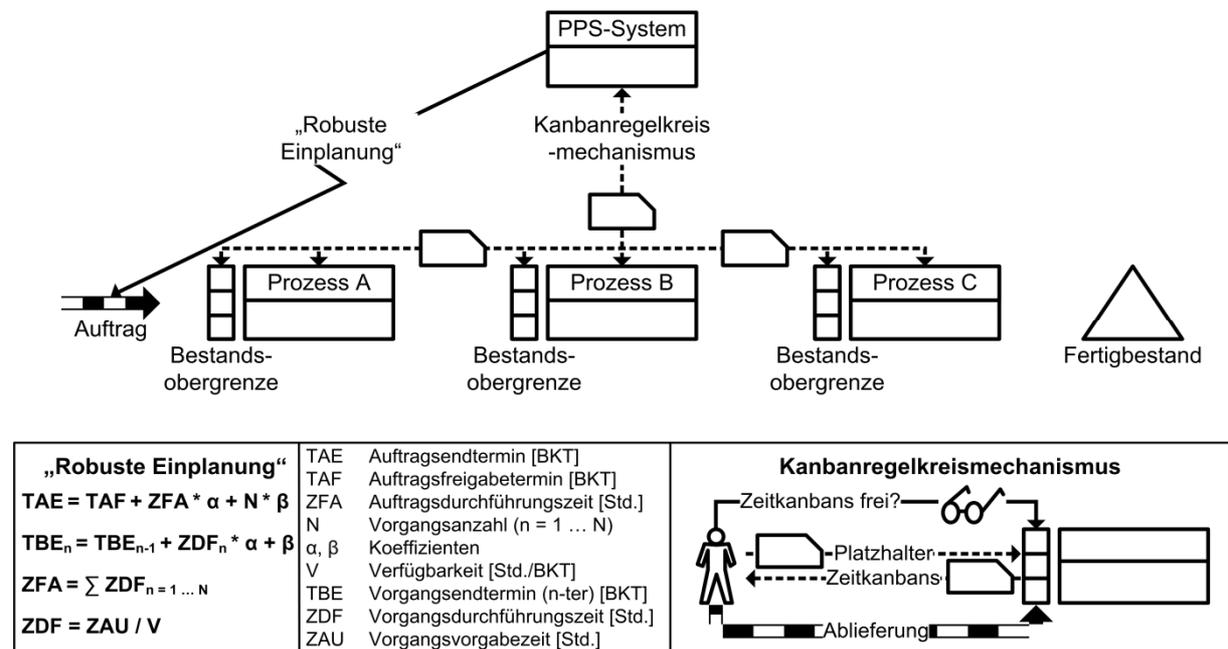


Abbildung 41: Push-Kanban-Konzeptablauf

Zum besseren Verständnis wird im Folgenden ein fiktiver Auftragsdurchlauf im Bezug auf das in Abbildung 41 dargestellte Steuerungskonzept beschrieben.

Die Auftragssteuerung beginnt mit einer Verfügbarkeitsprüfung und zentralen Auftragsfreigabe in der hierarchischen Funktion des PPS-Systems. Dabei werden alle Fertigungsaufträge in der Reihenfolge ihrer Kundenwunschtermine freigegeben, für die freie Zeitkanbans am ersten Arbeitssystem ihrer Prozessfolge zur Verfügung stehen.

Die freigegebenen Aufträge werden im Anschluss feinterminiert. Durch die Anwendung der in Abbildung 41 dargestellten Methodik der „Robusten Einplanung“ werden in diesem Schritt Vorgangzieltermine ermittelt, welche einen robusten, hierarchischen Zielrahmen für die im Folgenden beschriebene dezentral ablaufende Auftragssteuerung durch den Werkstattbereich bilden.

Im Rahmen der Durchlaufsteuerung der terminierten Aufträge durch die Fertigung gilt für alle Steuerungsinstanzen der in Abbildung 41 skizzierte und im Folgenden verbal beschriebene Kanbanregelkreismechanismus:

1. Es ist immer der Auftrag mit dem dringlichsten Vorgangsendtermin zur Bearbeitung auszuwählen.
2. Bevor ein Auftrag bearbeitet werden darf, ist am Nachfolgerprozess zu prüfen, ob für die Prozessvorgabezeit des zu bearbeitenden Arbeitsvorgangs genügend freie Zeitkanbans verfügbar sind.
  - a. Falls verfügbar, ist das Zeitäquivalent der Prozessvorgabezeit in Zeitkanbans des Nachfolgerprozesses für die Zeit der Bearbeitung zu belegen und zwischenzeitlich ein Platzhalterkanban zu hinterlassen.
  - b. Falls nicht verfügbar, ist der Auftrag mit dem nächstdringlichen Vorgangsendtermin analog zu den vorherigen Schritten zu prüfen.

Die in dem Regelkreis eingesetzten Platzhalterkanbans dienen dazu, einem Arbeitssystem den indirekten, auf das System zulaufenden Bestand anzuzeigen. Dadurch ist das Steuerungsobjekt Arbeitsplatz jederzeit in der Lage, im Auftragsnetz sowohl vorwärts als auch rückwärts „zu sehen“ und autonom zu analysieren, welche Aufträge mit welcher Dringlichkeit auf den Arbeitsplatz zulaufen. Diese Informationen können durch die Mitarbeiter genutzt werden, um im Falle einer Unterauslastung des eigenen Arbeitssystems eigenständig einen systematischen Auftragsplit das heißt eine Überlappung mit einem sich im Vorlauf befindenden Vorgängerarbeitssystem durchzuführen. Darüber hinaus bieten Platzhalterkanbans die Möglichkeit, wechselseitige Blockaden mit anderen Arbeitssystemen zu erkennen und gegebenenfalls lösen zu können.

Nach dem Abschluss der Bearbeitung eines Auftrags werden im Sinne des Transportkonzepts der Bringschuld alle Auftragsunterlagen, -teile und zugeordneten Zeitkanbans durch den Fertigungsmitarbeiter des Vorgängerarbeitssystems an den entsprechenden Folgearbeitsplatz gebracht. Dadurch ist zum einen eine feste Verknüpfung von Material- und Informationsfluss sichergestellt und zum anderen bieten sich vielfältige Potenziale zur Verbesserung der direkten Zusammenarbeit von Mitarbeitern in Form einer Regelkommunikation bei der Auftragsübergabe.

Die Kapazitätssteuerung erfolgt über den gesamten Auftragsdurchlauf hinweg durch die Funktion der Fertigungssteuerung. Die Zeitkanbanpuffer dienen dabei als visuelle Kapazitätsbedarfsindikatoren, welche neu auftretende Belastungsschwerpunkte durch die Nichtverfügbarkeit der zugehörigen Zeitkanbans an den Arbeitsstationen anzeigen. Sind an einem Arbeitssystem keine Zeitkanbans mehr verfügbar, wird die Kapazität im Rahmen der vorhandenen Kapazitätsflexibilität erweitert.

Mit der Implementierung des hier in Form eines Auftragsdurchlaufs beschriebenen Push-Kanban-Steuerungskonzepts wird eine Fertigung befähigt, Aufträge selbstlenkend zu steuern, wobei zwar die Art der Entscheidungsfindung durch ein Regelwerk vorherbestimmt ist, die Entscheidung selbst aber vom Mitarbeiter situationsabhängig getroffen wird. Dabei sind die Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung, Kapazitäts- sowie die Transport- und Informationsflusssteuerung ganzheitlich in einem Kanbanregelkreismechanismus integriert. Außerdem erhöht der Einsatz der Kanbansignale die Visualität, Transparenz und Praktikabilität der Steuerungsprozesse und regt zugleich eine stärkere Kommunikation zwischen den Mitarbeitern an (Dobberstein 1997, MacCarthy 2006, Zahn et al. 2009).

### 4.5 Konzeptmerkmale und -einordnung

Das Push-Kanban-Konzept stellt ein neuartiges Fertigungssteuerungskonzept dar, welches alle Aufgaben der Fertigungssteuerung ganzheitlich in einen heterarchisch-hierarchischen Konzeptrahmen integriert. Dabei kombiniert es eine robuste Push-Einplanung mit einem dezentralen, selbststeuernden Kanbanregelkreismechanismus, der eine Ausgestaltungsvariante der dezentralen Bestandregelung darstellt.

Der Einsatz der Kanbansystematik unterstützt die Standardisierung der operativen Material- und Informationsflusssteuerung und schafft zugleich eine hohe Visualität, Transparenz und Praktikabilität der Steuerungsprozesse. Zudem ermöglichen die Kanbanregelkreise eine ganzheitliche Integration der „Dezentralen Bestandsregelung“, der „Terminorientierten Reihenfolgepriorisierung“ sowie der „Engpassorientierten Kapazitätsregelung“.

In seiner Ausgestaltung dient das Push-Kanban-Konzept zur Kompensation der spezifischen Planparametervariabilität einer Musterfertigung bei Systemlieferanten. So wird durch die Kanbanregelkreise eine Entkopplung der Material- und Informationsflüsse vom Layout eines Werkstattbereiches erreicht. Dadurch kann eine hohe Planparametervariation mit einem komplexen, sich permanent verändernden Auftragsnetz kompensiert werden. Auch die Elemente der „Robusten Einplanung“, der „Dezentralen Bestandsregelung“ sowie der „Terminorientierten Reihenfolgepriorisierung“ unterstützen die Fähigkeit zur Selbststeuerung und die Robustheit des Push-Kanban-Steuerungskonzepts. Infolgedessen ist auch ein Ausgleich der hohen Planparameterfluktuation und der daraus resultierenden Planungsunschärfe einer Musterfertigung möglich.

Aufgrund dieser stark ausgeprägten Kompensationsfähigkeit einer hohen Planparametervariabilität eignet sich das Konzept ebenso für andere Fertigungstypologien. Somit ist das Push-Kanban-Steuerungskonzept nicht nur für den Steuerungsproblemfall Musterfertigung geeignet, sondern auch für jede andere Art von Werkstattfertigung im Einzel- und Kleinserienbereich, die mit ähnlichen wie den vorgestellten Variabilitätsausprägungen konfrontiert ist.

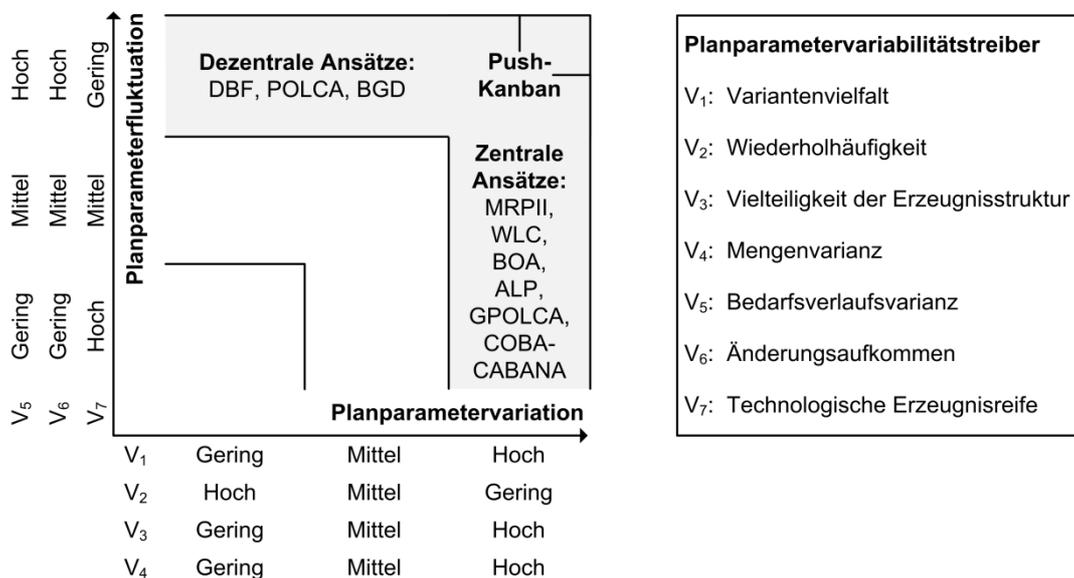


Abbildung 42: Push-Kanban im Kontext der grundsätzlichen Planparametervariabilitätsfälle

## 4.6 Konzeptauslegung

Eine Fertigung stellt ein soziotechnisches System dar (Böge 2009), das sowohl aus sozialen als auch technischen Subsystemen mit unterschiedlichen Primär- und Sekundäraufgaben besteht. Daher müssen bei der Einführung des Push-Kanban-Konzepts sowohl soziale als auch technische Aspekte berücksichtigt werden (Alioth & Frei 1990, MacCarthy 2006, Stevenson 2009).

STROHM & ULICH schlagen zur Analyse und Ausgestaltung soziotechnischer Systeme eine sogenannte „MTO-Analyse“ vor. Sie postulieren, dass die Organisationsentwicklung in Unternehmen nur dann erfolgreich sein kann, wenn sowohl menschliche, technische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigt werden (Strohm & Ulich 1997). ULICH spricht in diesem Zusammenhang von einer „joint optimization“ (Ulich 1998, S. 176). Da die von STROHM & ULICH vorgeschlagene Methodik zur Betriebsanalyse allerdings sehr umfangreich ist und das Ziel der vorliegenden Arbeit nicht in einer vertieften arbeitspsychologischen Untersuchung der Push-Kanban-Konzept-Einführung besteht, wird im Folgenden nur die grundsätzliche Betrachtungsweise eines soziotechnischen Systems in den drei Aspekten Mensch, Technik und Organisation übernommen. Damit lehnt sich die Arbeit an eine in der Produktionslogistik übliche Herangehensweise an, welche die Ausgestaltung eines Produktions- oder Logistikkonzepts im Bezug auf Mensch, Technik und Organisation vorsieht (in Abgleich mit Carbon 1999b, Drew et al. 2004, Nyhuis & Wiendahl 2004, Schenk & Wirth 2004, Wiendahl et al. 2005, Wiendahl & Westkämper 2006, Grundig 2008, Stevenson 2009).

Im Folgenden werden in diesen drei Perspektiven verschiedene Ausgestaltungsansätze des Push-Kanban-Konzepts für einen konkreten Anwendungsfall beschrieben. Dabei wird versucht, einen umfassenden Überblick der Ausgestaltungsaspekte des in dieser Arbeit entwickelten Steuerungskonzeptes zu geben. Allerdings stellen die dabei beschriebenen Lösungsansätze allein Vorschläge dar, die im Sinne des wissenschaftstheoretischen Selbstverständnisses der Arbeit weiterentwickelt und mit Alternativen ergänzt werden können.

### 4.6.1 Komponente „Mensch“

Ein wichtiger Erfolgsfaktor bei der Implementierung eines neuen Steuerungskonzepts ist der Faktor Mensch. Jede Organisationsentwicklung wird in einem soziotechnischen Produktionssystem von menschlichen Akteuren konzeptioniert und umgesetzt. Technik dient dabei einzig als vom Menschen abhängiges Instrument zum Erreichen von Planungszielen (Blutner et al. 2009). Insofern wird der Erfolg der Einführung und des Betriebs eines neuen Steuerungskonzepts immer stark von den damit arbeitenden Mitarbeitern bestimmt (Gudehus 2005, Wiendahl et al. 2005, MacCarthy 2006, Arnold et al. 2008, Korge et al. 2009, Stevenson 2009).

Im Rahmen des Push-Kanban-Konzepts kommt den Mitarbeitern eine erfolgsentscheidende Rolle bei der Systemimplementierung und dem Systembetrieb zu. Der Grund dafür liegt in der starken Dezentralität des Konzepts. Diese führt dazu, dass die Mitarbeiter in der Push-Kanban-Auftragssteuerung eine umfassende Entscheidungsverantwortung tragen und dadurch direkt, sowohl positiv als auch negativ, die Emergenz des Gesamtsystems beeinflussen können.

Insofern ist es wichtig, im Rahmen der Einführung des Push-Kanban-Konzepts ein grundlegendes Verständnis für die Konzeptfunktionsweise zu schaffen sowie die Mitarbeiter zur aktiven Unterstützung zu motivieren. Erst durch die Partizipation der Mitarbeiter kann das Konzept eine hohe organisationale Effektivität erreichen (Chavelski et al. 1997, Riedel 2005, MacCarthy 2006).

Aus diesem Grund sollte die Vermittlung der Wirkungszusammenhänge und Regeln des Konzepts in einem aktiven, handlungsorientierten Lernprozess erfolgen. In einem solchen Prozess können Mitarbeiter Wirkungszusammenhänge selbstständig erarbeiten und aktiv erfahren. Somit verspricht ein handlungsorientierter Lernprozess hohe Chancen auf eine erfolgreiche Implementierung einer Organisationsveränderungsmaßnahme (Drew et al. 2004, Dickmann 2007, Arnold et al. 2008).

Zur Ausgestaltung eines solchen handlungsorientierten Lernprozesses wird im Rahmen der Arbeit die Methode Planspiel vorgeschlagen. Ein Planspiel ist „ein Instrument, das zum Simulieren von planungsbedürftigen (Handlungs-, Ereignis-) Situationen genutzt wird, um diese besser verstehen, erfahren oder einschätzen zu können“ (Blötz 2008, S.14). Im konkreten Fall des Push-Kanban-Konzepts kann mit einem Planspiel der Konzeptablauf simuliert werden. Dadurch haben die Mitarbeiter die Möglichkeit, die neuen Prozessabläufe aktiv zu erlernen, zu erproben und zu bewerten (Klippert 2002, Schulz & Regber 2009). Infolgedessen wird eine hohe Partizipation bei den Teilnehmern des Planspiels erreicht (Keim & Buddensiek 1992, Windhoff 2001, Engelhardt-Nowitzki 2006, Scholz-Reiter & Kluge 2009).

Neben dieser aktiven Partizipation im Schulungsprozess ist es auch wichtig, die Mitarbeiter direkt in die Konzeptausgestaltung mit einzubeziehen. Bezüglich des Ausgestaltungsrahmens sollten minimale Vorgaben gemacht werden, damit die beteiligten Mitarbeiter über einen größtmöglichen Gestaltungsfreiraum verfügen. (Weller 1999, MacCarthy 2006, Balck et al. 2009). Wichtig ist es, zusammen mit den Mitarbeitern ein Leitbild der organisatorischen Ausgestaltung des Push-Kanban-Konzepts zu entwickeln und dieses gemeinsam umzusetzen (Schneider 1999).

Darüber hinaus sollten für die Mitarbeiter Anreize für eine aktive Prozessteilnahme geschaffen werden (Chavelski et al. 1997, Riedel 2005, MacCarthy 2006). Dafür steht eine Vielzahl materieller und immaterieller, anreizwirksamer Faktoren zur Verfügung (Riedel 2005). Vorschläge für mögliche anreizwirksame Faktoren im Bezug auf das Push-Kanban-Konzept zeigt die folgende Auswahl:

- Push-Kanban-erfolgsabhängige, variable Entgeltkomponente
- Push-Kanban-Ziele im Rahmen persönlicher Zielvereinbarungen
- Push-Kanban-Teamstrukturen, -Teamkennzahlen oder -Teamwettbewerbe

Bei der Ausgestaltung dieser Faktoren ist auf eine situationsabhängige, ganzheitliche Differenzierung der Anreize zu achten, das heißt, Anreize sollten sowohl materieller als auch immaterieller Natur sein und auf die Bedürfnisse, Rahmenbedingungen und Prozesse im konkreten Anwendungsfall abgestimmt werden (Riedel 2005)<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup>Weiterführende Informationen zu anreizwirksamen Faktoren sowie zur ganzheitlichen Gestaltung von Anreizsystemen im Kontext soziotechnischer Systeme finden sich bei Riedel/2005.

#### 4.6.2 Komponente „Technik“

Aus technischer Sicht sind bei der Ausgestaltung des Push-Kanban-Konzepts vor allem die geeigneten Betriebsmittel und das dazu passende Werkstattlayout sowie die arbeitssystembezogenen Bestandspuffer zu bestimmen.

##### **Betriebsmittel und Werkstattlayout**

Bei den im Rahmen des Push-Kanban-Konzepts eingesetzten Betriebsmitteln handelt es sich im Wesentlichen um Kanbansignale. Prinzipiell können folgende Kanbansignalarten unterschieden werden (Bicheno 1998, Becker 2005, Gerlach & Dickmann 2007, Wildemann 2008):

Kanbansignal	Triggersignal
Kanbankarte	An Tafel gesteckte Karte
Behälter-Kanban	Leerer Behälter
Sicht-Kanban	Freiwerdende Pufferfläche

Tabelle 15: Kanbansignale im Überblick

Das Push-Kanban-Konzept lässt sich sowohl mit Behälter-Kanbans als auch mit Kanbankarten ausgestalten. Während bei der Behälter-Kanban-Variante für jeden Arbeitsgang ein Behälter des Nachfolgerarbeitssystems durch den Vorgänger zu belegen ist, werden im Falle der Kanbankarten-Variante die der Prozessvorgabezeit entsprechende Anzahl von Zeitkanbans durch den Vorgänger belegt. Allerdings eignet sich die Verfahrensvariante mit Behältern vornehmlich für gering schwankende Stückzahlen, ähnliche Teilegeometrien und stabile Vorgangsdurchführungszeiten (Gerlach & Dickmann 2007). Daher kann sie im hochvariablen Kontext einer Musterfertigung nicht zur Anwendung kommen. Die Konzeptvariante mit Zeitkanbankarten kann dagegen eine beliebige Variabilitätsausprägung der Steuerungsplanparameter und beliebige Teilegeometrien abbilden.

Im Bezug auf die beinhalteten Informationen können Kanbansignale prinzipiell frei gestaltet werden. In Abhängigkeit von der vorliegenden Kanbanart kann ein Kanban folgende Informationsklassen enthalten (Gerlach & Dickmann 2007, Wiendahl 2008b):

- Auftrags- und Materialidentifikationsinformationen
- Transportmittelinformationen
- Quelle-Senke-Informationen
- Fertigungsprozessinformationen
- Termin- und Dringlichkeitsinformationen

Für den Konzeptablauf des Push-Kanban-Konzepts sind davon die folgenden Informationsklassen von grundlegender Relevanz:

- Auftrags- und Materialidentifikationsinformationen
- Quelle- und Zeitwertinformationen
- Termin- und Dringlichkeitsinformationen

Bei der Festlegung des räumlichen Layouts der Kanbanstationen ist zu berücksichtigen, dass Kanbansignale den Material- und Informationsfluss in einem räumlichen Fluss verbinden (Wildemann 2008). Daher sollte eine Kanbanstationsanordnung gesucht werden, die zum einen die Wege zwischen den einzelnen Stationen minimiert und zum anderen die Visualität des Material- und Informationsflusses maximiert<sup>12</sup>. Im klassischen Layout einer Werkstattfertigung bietet sich daher die Variante einer zentralen Materialflussstrecke entlang des Werkstattmittelgangs an. Durch diese wird der Material- und Informationsfluss zwischen den einzelnen Kanbanstationen zentralisiert, was zu einer hohen Transparenz und Übersichtlichkeit führt (Aurich et al. 2007, Arnold et al. 2008).

### **Arbeitssystembezogene Bestandspuffer**

Die dezentralen Bestandspuffer vor den einzelnen Arbeitssystemen stellen zentrale Anpassungsparameter des Push-Kanban-Konzepts dar. Von der zeitlichen Dimensionierung der Bestandspuffer hängt die Wirksamkeit der „Dezentralen Bestandsregelung“ im konkreten Anwendungsfall ab. So führen zu große Bestands-pufferwerte zu einem Wirksamkeitsverlust des Konzepts, wohingegen zu kleine Bestands-pufferwerte zu gegenseitigen Blockaden und Auslastungsverlusten einzelner Arbeitssysteme führen. Daher bedarf es einer praktikablen Methodik, um die dezentralen Bestandsobergrenzen des Auftragseinlastungsmechanismus der „Dezentralen Bestandsregelung“ festzulegen.

Während BUSCH im Rahmen der BGD keine Vorschläge zur Festlegung der Bestands-grenzen macht (Busch 1987), schlägt LÖDDING für die Ausgestaltungsva-riante der DBF als Mittel zur Bestandsfestlegung die logistische Kennlinientheorie vor. Demnach wird für jedes einzelne Arbeitssystem ein Zielbestand festgelegt, der mithilfe der normierten Produktionskennlinie aus dem mittleren Bestand und der Auftragszeitverteilung eines Arbeitssystems bestimmt wird. Dazu wird ein indirekter Bestand addiert, der sich aus den mittleren Beständen der Vorgängerarbeitssysteme ergibt (Lödding 2001).

Die dabei vorgesehene Berechnung der Zielbestände mithilfe der Kennlinientheorie basiert in ihrer Anwendung auf der Voraussetzung eines eingeschwungenen Betriebszustandes (vgl. Kapitel 2.1.2). Ein solcher liegt jedoch im Fall der hohen Planparametervariabilität einer Musterfertigung zu keiner Zeit vor. Stattdessen verändern sich die Netzknoten und Maschengrößen des Auftragsnetzes einer Musterfertigung permanent. Aus diesem Grund kommt es zu einer stetigen Veränderung der Auftragszeitverteilung sowie der Zugangs- und Abgangskurven der einzelnen Arbeitssysteme. Die Voraussetzungen des multidimensionalen Zusammenhanges zwischen den dezentralen Bestandsobergrenzen und der Auftragszeitverteilung verändern sich dementsprechend permanent. Daher können im Fall des Push-Kanban-Konzepts die Bestands-grenzen nicht mithilfe des Kennlinienmodells bestimmt werden. Auch die der DBF-Auslegungsmethodik zugrunde liegende Annahme fest zugeordneter Vorgänger eines Arbeitssystems zur Berechnung des indirekten Bestands (Lödding 2001) liegt im Kontext einer Musterfertigung aufgrund der permanent wechselnden Prozessabfolgen nicht vor.

---

<sup>12</sup>Analytische Verfahren zur Layoutoptimierung finden sich bei Schmigalla/1970, Schenk & Wirth/2004, Arnold et al./2008 und Schenk et al./2009.

Das ist auch der Grund, warum die zweite denkbare Alternative zur Konzeptparametrisierung, die Engpassauslegung, nicht zur Anwendung kommen kann. Diese sieht die Auslegung der Parameter eines Freigabemechanismus unter dem Prinzip der Engpassorientierung vor (vgl. Kapitel 2.1.5.2). Dabei werden bei einer Steuerungsverfahrensauslegung alle Parameter auf die optimale Versorgung der Engpässe einer Fertigung ausgerichtet. Da aber im Fall der hohen Planparametervariabilität einer Musterfertigung keine statischen Engpässe bestimmbar sind, kann diese Herangehensweise auch nicht zur Auslegung der Push-Kanban-Bestandsgrenzen herangezogen werden.

Die dritte, in der Produktionslogistik häufig angewandte Methode zur Konzeptparametrisierung ist die Simulation. Per Definition ist Simulation „ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 1997, S. 14). Bei experimentierbaren Modellen kann es sich sowohl um real existierende, physische Modelle, wie zum Beispiel einen Windkanal oder um virtuell existierende, symbolische Modelle, wie zum Beispiel einem Softwaremodell handeln (Kosturiak & Gregor 1995). Insofern kann Simulation als Methodik in einem breiten Anwendungsbereich in sehr unterschiedlichen Anwendungsformen zum Einsatz kommen (Engelhardt-Nowitzki 2008).

Zur Anwendung kommt Simulation immer dann, wenn komplexe Problemstellungen analysiert werden, die eine Abstraktion und Modellbildung und damit eine Vereinfachung der Realität notwendig machen (Kosturiak & Gregor 1995, Suhl & Mellouli 2009). Im Kontext der Produktion können solche komplexen Probleme in den Phasen der Planung, Realisierung und im Betrieb von Produktionssystemen auftreten. Typische Einsatzbeispiele der Simulation sind dabei die Layout- und Materialflussplanung in der Fabrikplanung oder die im Rahmen dieser Arbeit diskutierte Konzeptparametrisierung eines Fertigungssteuerungskonzepts in der Produktionsplanung und -steuerung (Kuhn 1993, VDI 1997, Arnold et al. 2008).

Das Problem bei der Anwendung der Methode Simulation im Kontext der Parametrisierung des Push-Kanban-Konzepts liegt in dem damit verbundenen hohen Zeitaufwand. Bei der Durchführung der Simulation in dem vorliegenden Kontext ist die Anwendung einer einfaktoriellen Versuchsplanung erforderlich<sup>13</sup>. Dabei werden alle möglichen Parameterausprägungen in Kombination zueinander getestet. Bei der Bestandsgrenzenauslegung des Push-Kanban-Konzepts würde daraus ein nicht zu bewältigender Rechenaufwand entstehen.

So würden in einem fiktiven Szenario von 50 Arbeitssystemen mit jeweils zehn Bestandsgrenzenausprägungen  $10^{50}$  verschiedene Kombinationsmöglichkeiten auftreten. Selbst unter der Annahme, dass ein Simulationslauf nur eine Rechenoperation benötigt und zur Berechnung ein Supercomputer mit einer Rechenleistung von 2,57 Petaflop/s zur Verfügung stünde, würde eine totale Enumeration  $3,7 \cdot 10^{34}$  Sekunden dauern und damit die Entstehungszeit des Universums um ein Vielfaches übersteigen (S. H. Suyu et al. 2010).

---

<sup>13</sup>Voll- und teilfaktorielle Versuchspläne zur Reduktion des Versuchsaufwands, wie sie im Rahmen der statistischen Versuchsplanung vorgeschlagen werden, können im vorliegenden Fall nicht zur Anwendung kommen, da die hohe Faktorenzahl des Push-Kanban-Konzepts zu statistisch nicht verwertbaren Ergebnissen führen würde (Wenzel et al. 2008).

Somit bleibt die Erkenntnis, dass sich weder die logistische Kennlinientheorie noch das Konzept der Engpassorientierung noch die Methodik der Simulation zur Auslegung der dezentralen Bestandsobergrenzen des Push-Kanban-Konzepts im Kontext des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung eignen.

Aus diesem Grund schlägt die vorliegende Arbeit zur Auslegung der dezentralen Bestandsgrenzen im Kontext einer Musterfertigung eine einfache Heuristik vor, die sich stark an der Auslegungsmethodik der CONWIP-Steuerung und an der von SEPEHRI & NAHANVANDI eingeführten Auslegungsheuristik zur Auslegung dezentraler Bestandsgrenzen orientiert (Sepehri & Nahavandi 2007, Lödding 2008b). Im Rahmen der in Abbildung 43 dargestellten Vorgehensweise werden die dezentralen Bestandsobergrenzen des Push-Kanban-Konzepts mit einem pauschalen Startwert belegt und in einem Quasi-Regelkreis im laufenden Betrieb einheitlich schrittweise so lange reduziert, bis sich die logistische Zielerreichung als Regelgröße verschlechtert. Infolgedessen entsteht eine einfach zu steuernde Bestandsanpassungsregelung, welche die von LÖDDING für die DBF vorgeschlagene globale Positionierung (Lödding 2001) durch ein Regelmodell ergänzt und damit der hohen Planparametervariabilität einer Musterfertigung gerecht wird. Zwar kann die globale Festlegung der Bestandsobergrenzen nicht zu dem Optimum einer individuellen, situationsangepassten Bestandsgrenzenauslegung führen, jedoch zeigen verschiedene Studien, dass auch bei einem einheitlichen Bestandsgrenzenlevel die positiven logistischen Effekte einer Bestandsregelung überwiegen (Tardif & Maaseidvaag 2001, Takahashi & Nakamura 2002, Ratering & Duffie 2003, Sepehri & Nahavandi 2007, Duffie et al. 2008, Fredendalla et al. 2010).

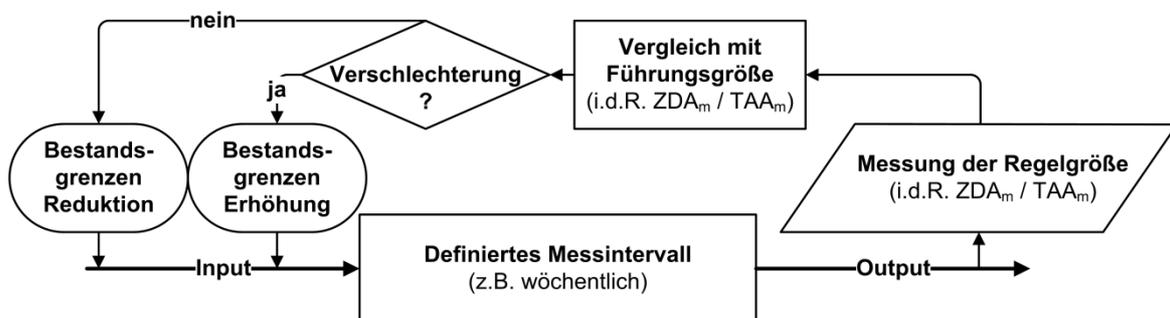


Abbildung 43: Methodik zur Ermittlung der arbeitssystembezogenen Bestandspuffer

Die hier vorgestellte Methodik birgt verschiedene Vorteile. Zum einen stellt sie eine einfache Herangehensweise dar, bei deren Anwendung nur eine für alle Arbeitssysteme einheitliche Bestandsobergrenze geregelt werden muss. Das führt zu einer hohen Praktikabilität und Mitarbeiterakzeptanz. Zum anderen wird auch die logistische Zielerreichung „robust“ verbessert, da die grundsätzlichen Vorteile der „Dezentralen Bestandsregelung“ trotz der pauschalen Parametrisierung erhalten bleiben. So führt das starre Bestandsgrenzenkorsett sowohl zu einer impliziten Belastungsnivellierung als auch zu einer Begrenzung der Gesamtdurchlaufzeit. Dabei zeigen die einheitlichen Bestandsgrenzen zuverlässig und durchsatzwirksam an, wo in einer Fertigung akute Belastungsschwerpunkte auftreten. Diese können durch das Push-Kanban-Element der „Engpassorientierten Kapazitätsregelung“ bedarfsgerecht kompensiert werden.

### 4.6.3 Komponente „Organisation“

Ein wichtiger Faktor für den Erfolg eines neuen Fertigungssteuerungskonzepts stellt die Ausgestaltung der betrieblichen Organisationsstruktur einer Fertigung dar. Im Sinn der Leitidee „structure follows process“ (Bullinger et al. 2008, S.13) ist die Organisationsstruktur auf den zu implementierenden Steuerungsmechanismus abzustimmen. Ausgestaltungsfelder sind dabei im Wesentlichen die Ablauf- und Aufbauorganisation eines Steuerungssystems und die damit verbundene Zuordnung expliziter und impliziter Verhaltensnormen (Laux & Liermann 1993, Bea & Göbel 1999, Liepelt 2003, Bullinger et al. 2008, Schlick et al. 2010).

In der Ablauforganisation einer Fertigung müssen im Rahmen der Push-Kanban-Einführung Arbeitsprozesse neu strukturiert und in einer Prozesslandschaft beziehungsweise einem umfassenden Regelwerk formalisiert werden (Laux & Liermann 1993, Adolphi 1997, Hesser 2002). Dabei sollte die Organisationsstruktur vor allem an die folgenden Teilprozesse angepasst werden:

- Kanbanregelkreis und Transport zwischen den Arbeitssystemen
- Reaktion auf Kapazitätsunterauslastung oder gegenseitige Blockaden
- Kapazitätsengpasserkennung und -anpassung
- „Robuste Einplanung“ sowie Auftragsfreigabe und -verfolgung

Neben den expliziten, standardisierten Verhaltensnormen in Form von Prozessbeschreibungen und Regeln sind im Rahmen der Konzepteinführung auch implizite Verhaltensnormen anzupassen. Diese bestehen in Zielvorgaben, welche die Mitarbeiter eigenverantwortlich verfolgen (Laux & Liermann 1993, Drew et al. 2004). Zielvorgaben im Kontext des Push-Kanban-Systems können neben logistischen Zielgrößen auch ökonomisch nicht objektivierbare Ziele, wie zum Beispiel Kommunikation oder Zusammenarbeit sein. Infolgedessen hängt die Effektivität solcher impliziter Verhaltensnormen stark von der Ausgestaltung der in Kapitel 4.6.1 beschriebenen Anreizsysteme ab.

In Abhängigkeit von der Ablauforganisation ist bei der Einführung des Push-Kanban-Konzepts auch eine geeignete Aufbauorganisation zu bestimmen. So entstehen im Rahmen der Prozessstrukturierung Aufgaben, die gegliedert und zusammen mit Entscheidungs- und Weisungsrechten an Aufgabenträger verteilt werden müssen. Dadurch bilden sich formale Organisationseinheiten (Laux & Liermann 1993, Bullinger et al. 2008). Weil das Push-Kanban-Konzept keine grundlegende Veränderung einer bestehenden Aufbauorganisation voraussetzt, genügt ein angepasstes Rollenmodell der bestehenden Organisationseinheiten. In einem solchen werden Personen Aufgaben und dafür notwendige Kompetenzen zugeordnet (Kolditz 2009). Ein Beispiel dafür zeigt die folgende Tabelle.

Rolle	Aufgaben	Notwendige Kompetenz
Werkstattmitarbeiter	Kanbanregelkreis und Transport Reaktion (Kapazitätssituation / Blockade)	Kenntnis der Verfahrensregeln
Fertigungssteuerer / Werkstattmeister	„Robuste Einplanung“ und Auftragsfreigabe Systematische Auftragsverfolgung (Überwachung / Priorisierung / Reporting)	Kenntnis der Verfahrensregeln Methodenkompetenz Prozesskompetenz

Tabelle 16: Rollen im Push-Kanban-Konzept

#### 4.6.4 Auslegungsrahmenstruktur

Im Folgenden sind noch einmal alle beschriebenen Teilaspekte der Auslegung des Push-Kanban-Konzepts in einer Übersicht zusammengefasst.

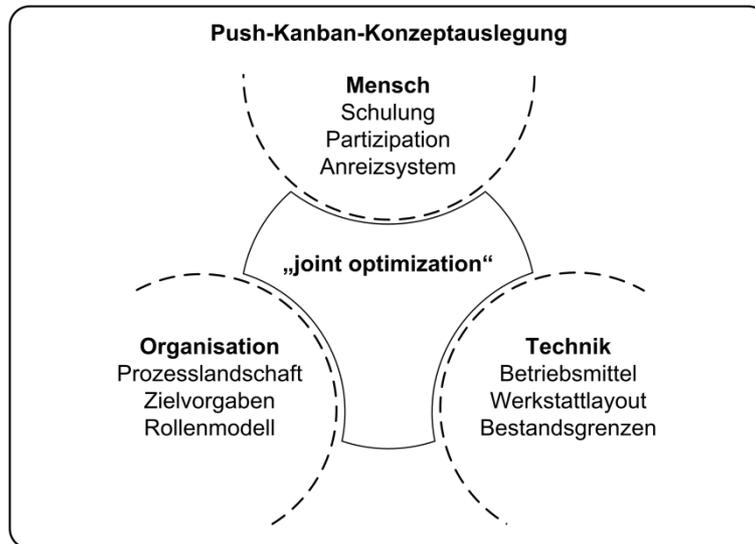


Abbildung 44: Rahmenstruktur zur Auslegung des Push-Kanban-Konzepts

Wie hier nochmals dargestellt, sollte das Push-Kanban-Konzept entsprechend den drei Perspektiven Mensch, Technik und Organisation ausgestaltet werden. In der Perspektive Mensch ist es wichtig, bei den Mitarbeitern durch einen handlungsorientierten Lernprozess ein grundlegendes Verständnis für die Konzeptfunktionsweise zu schaffen. Darüber hinaus kann ein partizipativer Ausgestaltungsprozess und ein umfassendes Anreizsystem eine hohe Mitarbeitermotivation und -partizipation bewirken. In der Perspektive Technik sind neben der Ausgestaltung der Betriebsmittel auch die dezentralen Bestandsobergrenzen zu bestimmen. Dazu kann die in Kapitel 4.6.2 vorgeschlagene Heuristik zur Anwendung kommen, in deren Rahmen die dezentralen Bestandsgrenzen auch im Betrieb geregelt werden. Bei der Ausgestaltung der organisationalen Aspekte ist neben einer angepassten Ablauforganisation auch ein geeignetes Rollenmodell der bestehenden Organisationseinheiten zu bestimmen.

Bei der Ausgestaltung dieser drei Einzelperspektiven ist es wichtig, den ganzheitlichen Aspekt der „joint optimization“, wie es Ulich beschreibt, zu berücksichtigen (Ulich 1998, S. 176). So tritt während der Konzeptauslegung zwischen den einzelnen Teilbereichen eine Vielzahl von Interdependenzen auf. Beispielsweise hängt die Ausgestaltung der Betriebsmittel und des Kanbanstationslayouts direkt von den im Rahmen der Ablauforganisation definierten Prozessen und Regeln ab. Diese werden wiederum stark von den anreizwirksamen Faktoren und der Einbindung und Schulung der Mitarbeiter beeinflusst. Insofern ist eine integrierte Ausgestaltung aller drei Auslegungsperspektiven notwendig. Nur durch eine ganzheitliche Abstimmung kann eine hohe organisationale Effektivität des Gesamtkonzepts erreicht werden.

## 5 KONZEPT-EVALUATION IM ANWENDUNGSZUSAMMENHANG

Der fünfte Prozessschritt des zugrunde liegenden Forschungsprozesses der vorliegenden Arbeit sieht eine abschließende Überprüfung der entwickelten Lösungsalternative im Anwendungsfall sowie die Beratung der Praxis vor. Dem wird durch die im Folgenden vorgestellte Evaluation des Push-Kanban-Konzepts im Anwendungszusammenhang der Betriebstypologie Musterfertigung entsprochen.

Bei der summativen Evaluation der Effekte des Push-Kanban-Konzepts in einem komplexen, soziotechnischen System wie dem der Musterfertigung tritt eine Vielzahl mehrdimensionaler Wirkungszusammenhänge auf. Deshalb ist es nicht möglich, mit rein quantitativ-analytischen Methoden zu Ergebnissen bezüglich der Wirkweise des Push-Kanban-Konzepts zu gelangen. Aus diesem Grund bieten sich die Evaluationsmethoden Simulation und betriebliche Fallstudie an, da sich beide Methoden zur Analyse und Bewertung komplexer Wirkungszusammenhänge eignen (Kosturiak & Gregor 1995, Bortz & Döring 2002, Olhager & Persson 2006).

Das entsprechend aufgebaute Evaluationskonzept zeigt die folgende Abbildung:

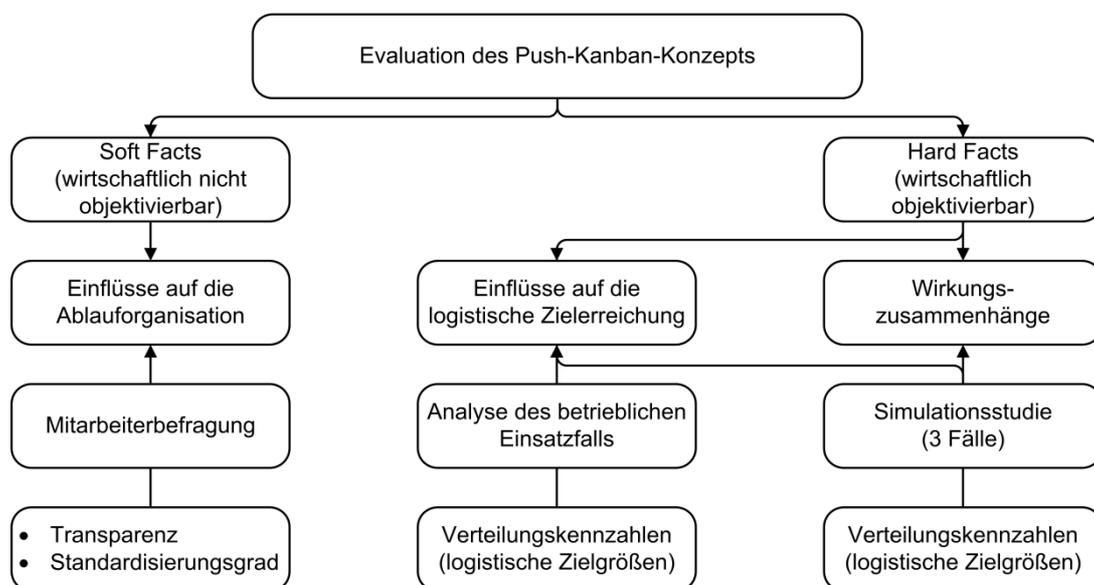


Abbildung 45: Angewandte Evaluationsmethoden zur Bewertung des Push-Kanban-Konzepts

### 5.1 Simulationsgestützte Konzeptbewertung

Als Systemlastdaten dienen der Simulationsstudie die schon in Kapitel 3 untersuchten Falldaten aus der betrieblichen Praxis. Dabei handelt es sich um die vollständigen Auftragsdurchläufe dreier Musterfertigungen eines Automobil-Systemlieferanten aus dem Zeitraum zwischen den Jahren 2008 und 2009. Tabelle 17 zeigt die charakteristischen Merkmale dieser Datensätze als Übersicht.

Merkmal	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Zeitraum	2008 - 2009	2008 - 2009	2008 - 2009
Arbeitssysteme (inkl. externer Arbeitsplätze)	150	153	143
Aufträge	4289	5714	3625
Arbeitsvorgänge	22658	41949	22259

Tabelle 17: Systemlastdaten

Die technischen Systemstrukturdaten der Simulation leiten sich direkt aus den Randbedingungen der drei Fallbeispiele ab. Dementsprechend orientieren sich die Anzahl der abgebildeten Arbeitssysteme, das Arbeitszeitmodell, die Verfügbarkeiten der Ressourcen und das stochastische Störaufkommen an den Realbedingungen der jeweiligen Musterfertigung in der betrieblichen Praxis. Die Zuordnung der in Form von Zeitkanbans abgebildeten Bestandsobergrenzen wird entsprechend der in Kapitel 4.6.2 vorgeschlagenen Auslegungsmethodik in der Versuchsplanung hinterlegt. Dabei bilden die schrittweise reduzierten Bestandsgrenzen die Parameter der Experimentenplanung, während die Variation der Regressionskoeffizienten in Form unterschiedlicher Datensätze in den Systemlastdaten abgebildet ist.

Als Simulationsergebnisgrößen werden im Rahmen der Simulationsstudie die Auftragsdurchlaufzeit (ZDA) und die Auftragsterminabweichung (TAA) pro Simulationslauf und pro Terminierungsvariante gemessen. Die Auftragsdurchlaufzeit wird dabei sowohl als absolute Kennzahl in Form der durchschnittlichen Auftragsdurchlaufzeit ( $ZDA_m$ ) als auch in Form der Verteilung ihrer Einzelwerte ausgewertet. Dagegen wird die Auftragsterminabweichung ausschließlich als absolute Kennzahl in Form der durchschnittlichen Auftragsterminabweichung ( $TAA_m$ ) erhoben. Der Umlaufbestand und die Auslastung werden nicht untersucht, da sie keine relevanten Kennzahlen für eine Musterfertigung darstellen (vgl. Kapitel 3.2).

Die erhobenen Daten werden im Rahmen der Ergebnisinterpretation für jeden Simulationslauf im Vergleich zueinander und in Vergleich zu den Originalauftragsdaten bewertet. Insofern findet hierbei ein expliziter Vergleich des Push-Kanban-Steuerungskonzepts mit dem zentral, leistungsgeregelten MRPII-Auftragseinlastungsmechanismus statt, da dieser den Originaldaten der drei Fallstudien zugrunde liegt. Durch diese zugleich implizite als auch explizite Bewertung kann sowohl die absolute als auch relative Effektivität des Push-Kanban-Konzepts umfassend bewertet werden.

### 5.1.1 Simulationsmodell

Zur Simulation komplexer Produktionsabläufe haben sich in der Simulation stochastisch diskrete Softwaresimulationsmodelle bewährt (Kosturiak & Gregor 1995, VDI 1997, Schulz 1998, Arnold et al. 2008, Schleyer & Furmans 2008, Suhl & Mellouli 2009). Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Simulationsstudie die Software *Tecnomatix Plant Simulation* als Simulationstool eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine grafische Simulationsumgebung, die der Analyse, Optimierung und dem Design von Fertigungs- und Materialflusskonzepten dient. Das integrierte Bausteinkonzept der Software stellt parametrisierbare Modellierungselemente zur Verfügung und ermöglicht sowohl eine funktions- als auch eine prozessorientierte Systemmodellierung (Bangsow 2008).

Bei dem entwickelten Push-Kanban-Softwaremodell handelt es sich gemäß der allgemein üblichen Simulationsmodellklassifikation um ein diskretes, ereignisorientiertes Modell mit einer zeitorientierten Ablaufsteuerung (Kosturiak & Gregor 1995). Diese verwendet die oben beschriebenen Systemlastdaten als deterministische Eingangsgrößen. Dabei bildet der Modellaufbau die schon beschriebenen Systemdaten mit den Systemlastdaten, den technischen Systemstrukturdaten, der Versuchsplanung und den Simulationsergebnisgrößen vollständig ab.

Die Aufbaustruktur des Modells basiert auf dem im Folgenden dargestellten Fertigungsbereichsmodell.

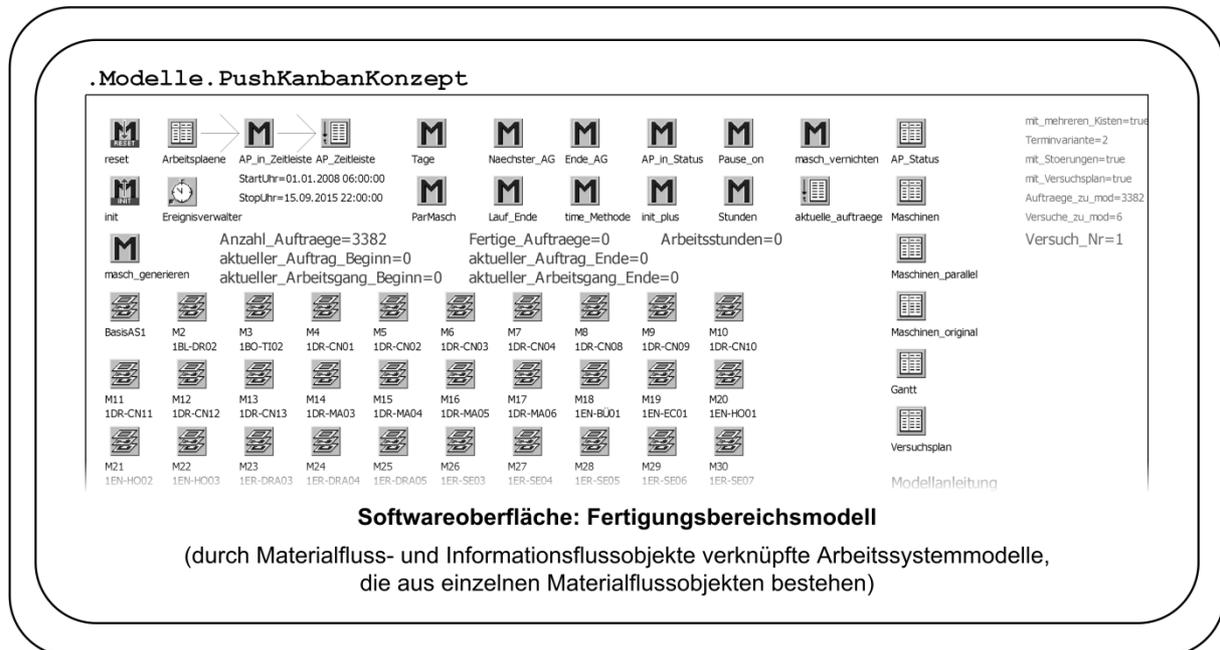


Abbildung 46: Push-Kanban-Softwaremodell: Fertigungsbereichsmodellebene

Durch die verknüpfenden Informationsbausteine des Modells ist in dem Programmablaufplan der vollständige in Kapitel 4.4 beschriebene Konzeptablauf des Push-Kanban-Konzepts hinterlegt. Den einzelnen Arbeitssystemmodellen ist dabei eine parametrisierbare Anzahl von Zeitkanban als Materialflussobjekten zugeordnet. Diese stellen die Bestandsobergrenzen der einzelnen Arbeitssysteme dar. Insgesamt bildet das Modell damit alle Push-Kanban-Elemente bis auf das Element der „Engpassorientierten Kapazitätsregelung“ mit einer hohen Abbildungsgenauigkeit ab. Dementsprechend können der Detaillierungsgrad und die Vollständigkeit des Modells als sehr hoch bewertet werden, da auch die Systemlastdaten den Originaldaten aus der betrieblichen Praxis entsprechen und die technischen Systemstrukturdaten realitätsnah abgebildet sind (Rabe et al. 2008, Wenzel & Bernhard 2008).

Zur Verifikation und Validierung des Modells wurde in Anlehnung an RABE über alle Phasen der Simulationsstudie hinweg eine umfassende Methodentriangulation aus Verifikations- und Validierungstechniken angewandt (Rabe et al. 2008). Unter anderem wurden Tracing-, Animations-, Dimensions- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt sowie Vergleiche bezüglich unterschiedlicher Modellvarianten, Teilmodelle, Zeiträume sowie Systemstruktur- und Systemlastdaten angestellt. Durch diese permanente Überprüfung ist eine hohe Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse im Bezug auf ihre Interpretation hinsichtlich der Wirkungszusammenhänge des Push-Kanban-Konzepts gewährleistet (Rabe et al. 2008).

### 5.1.2 Ergebnisinterpretation

Im Folgenden sind die aggregierten Ergebnisse der vorliegenden Simulationsstudie dargestellt und bezüglich der Wirkweise des Push-Kanban-Konzepts interpretiert.

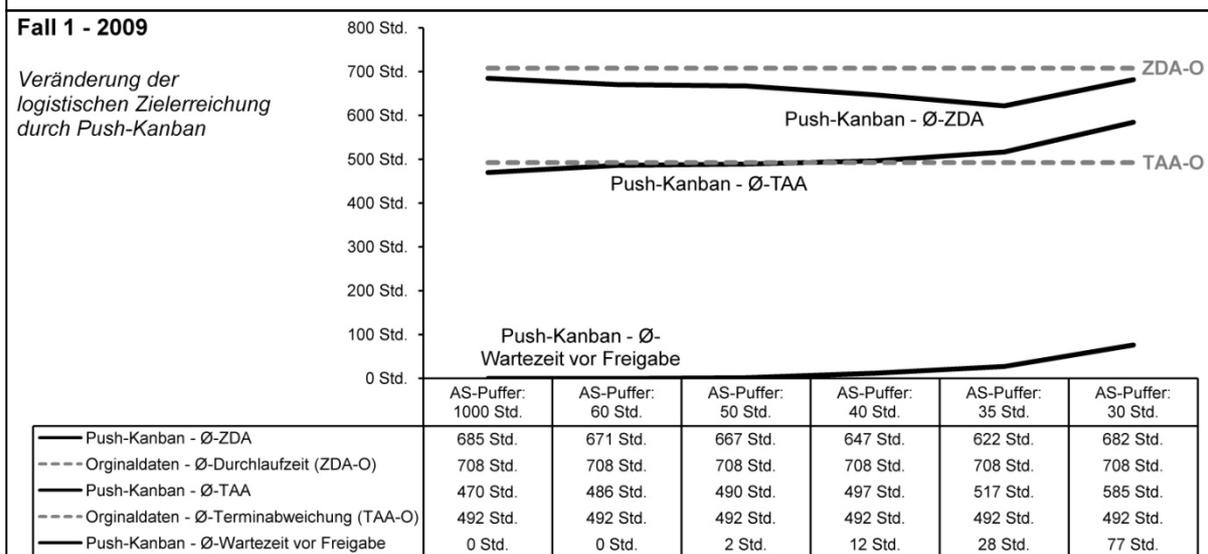
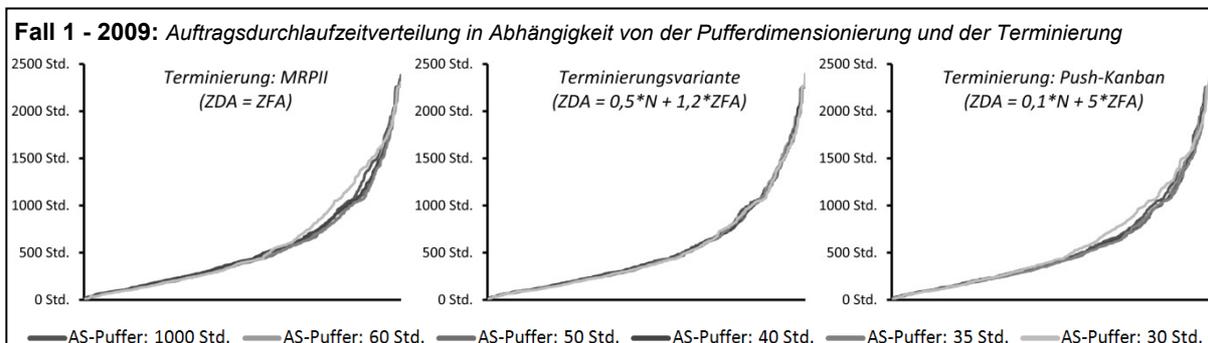
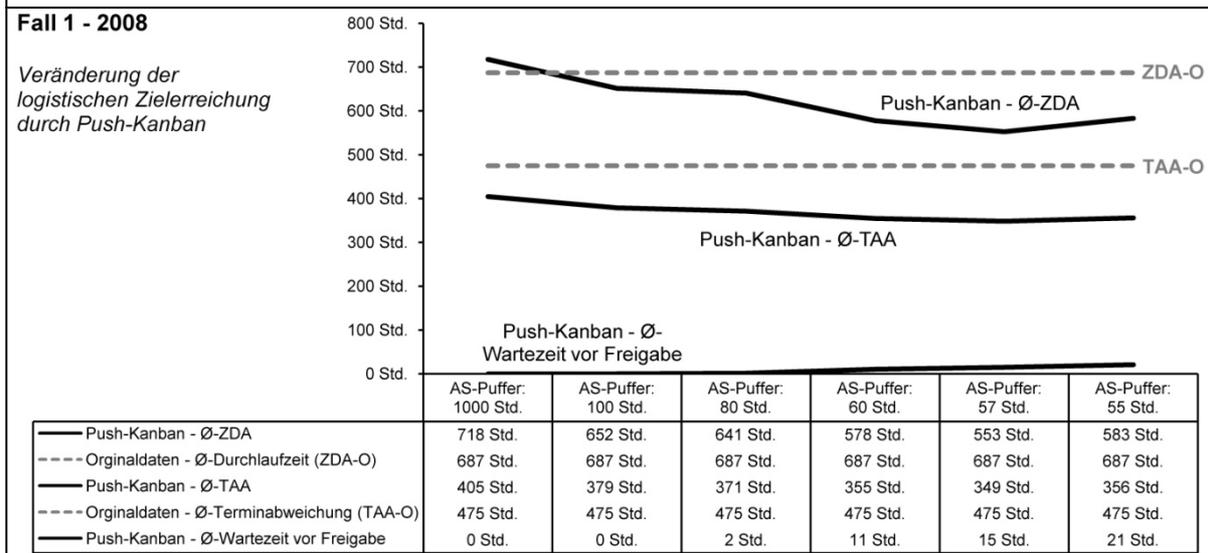
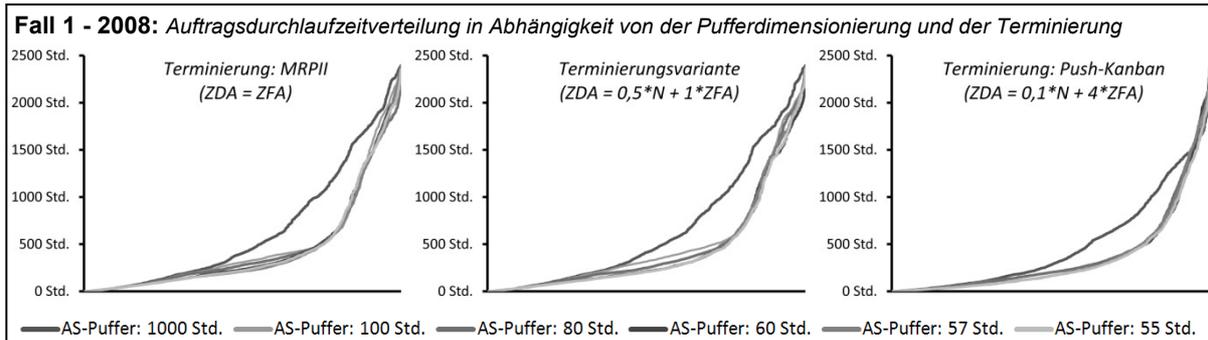


Abbildung 47: Simulationsergebnistableau: Fall 1

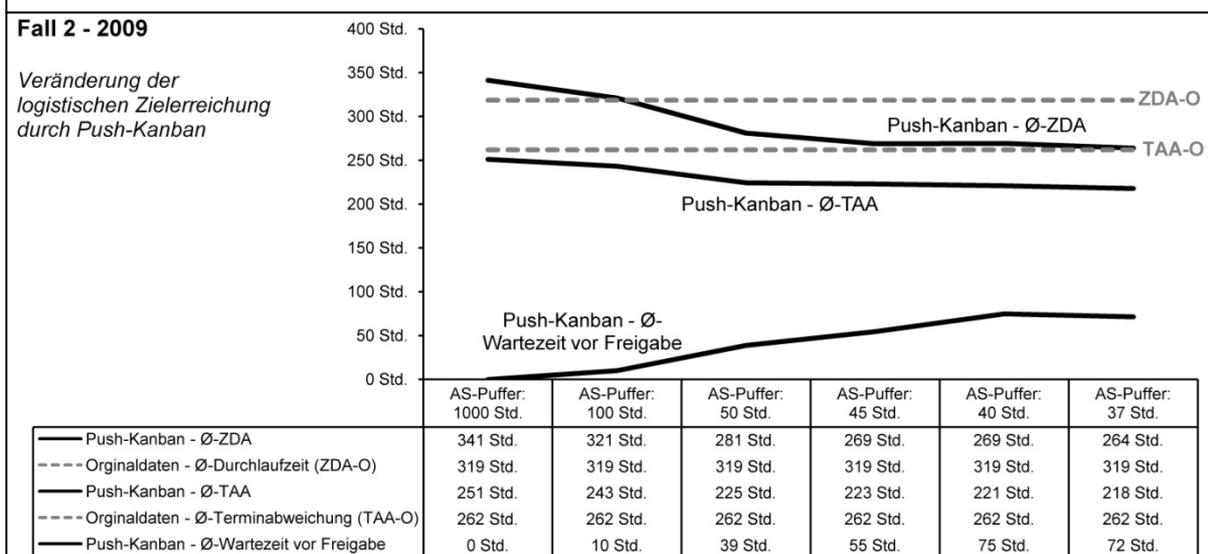
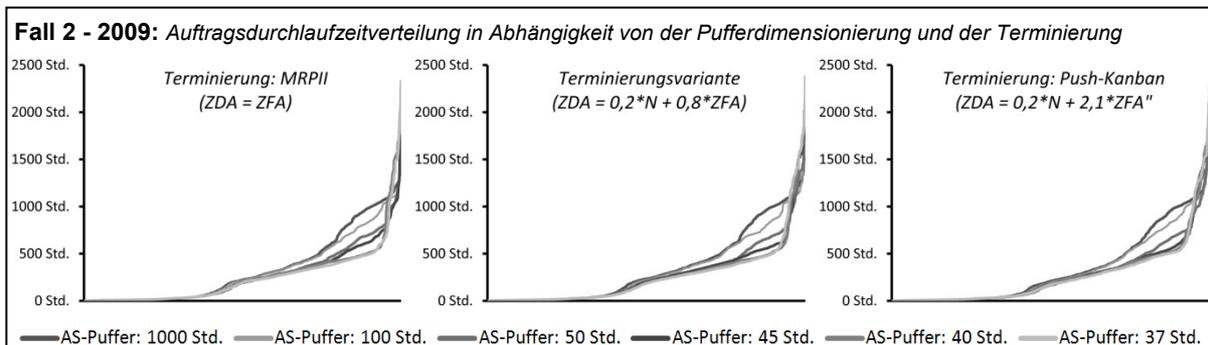
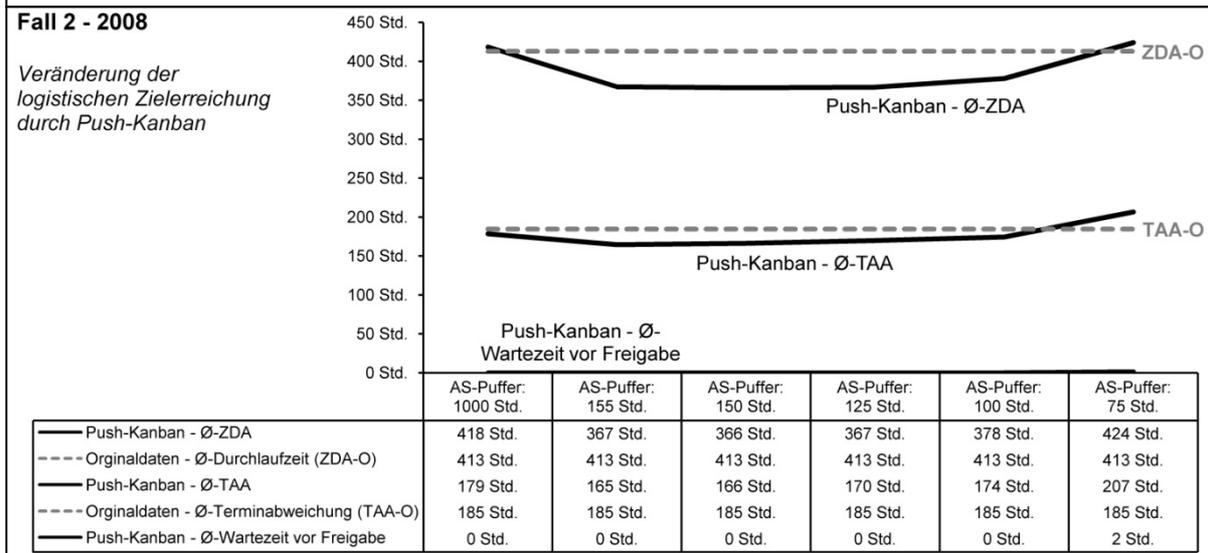
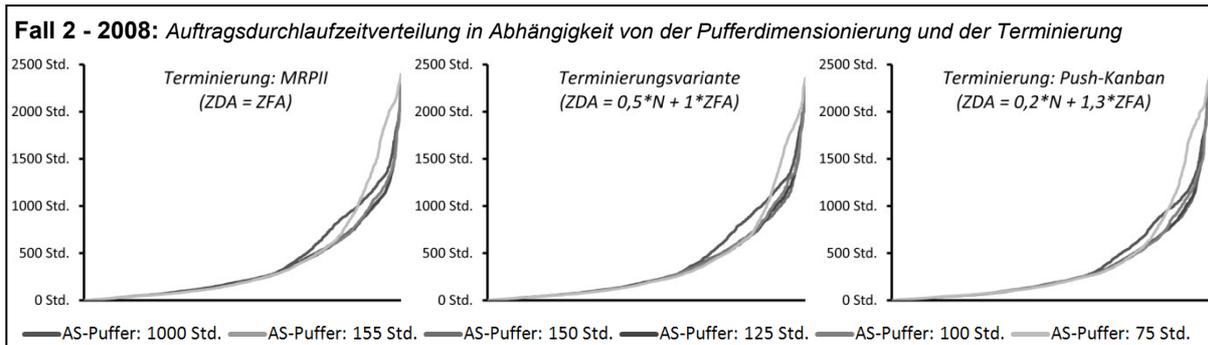


Abbildung 48: Simulationsergebnistableau: Fall 2

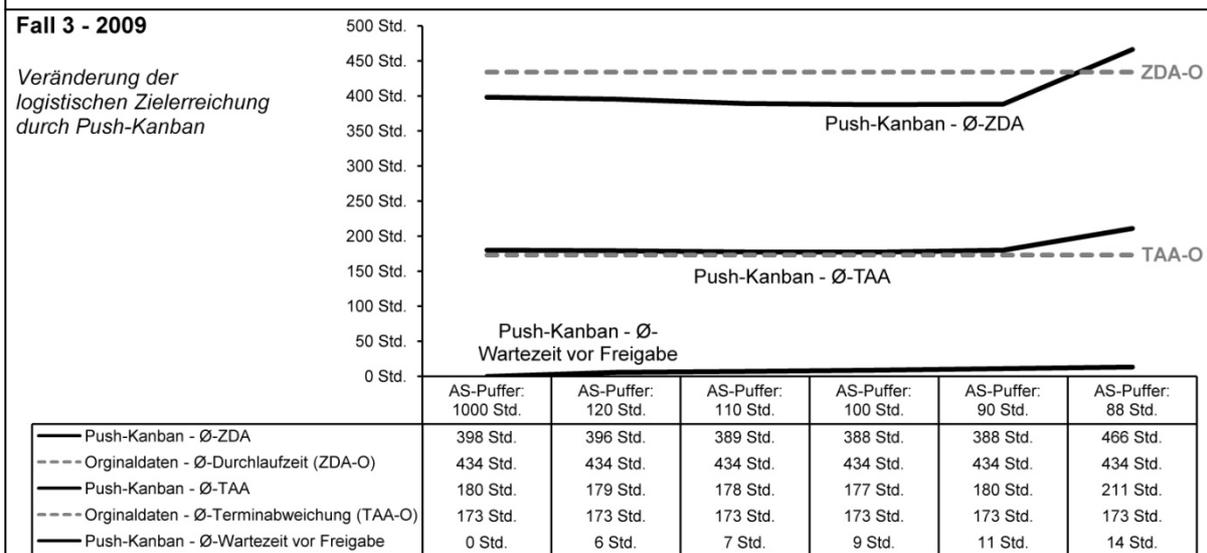
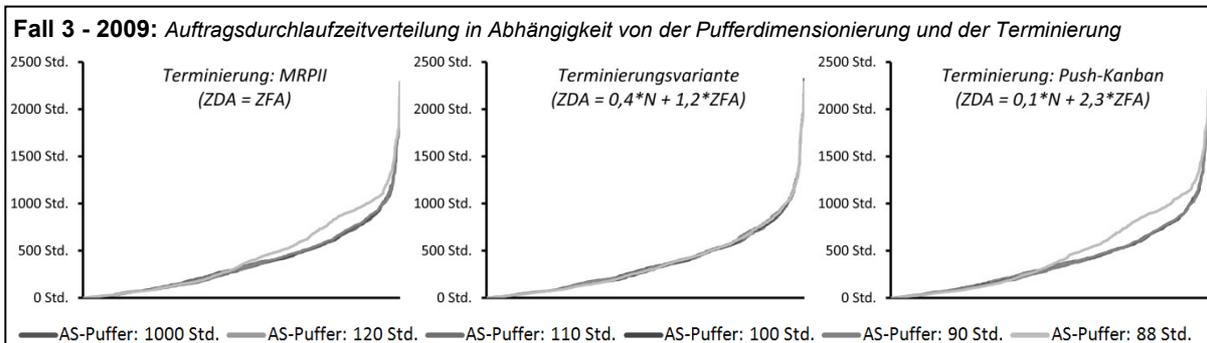
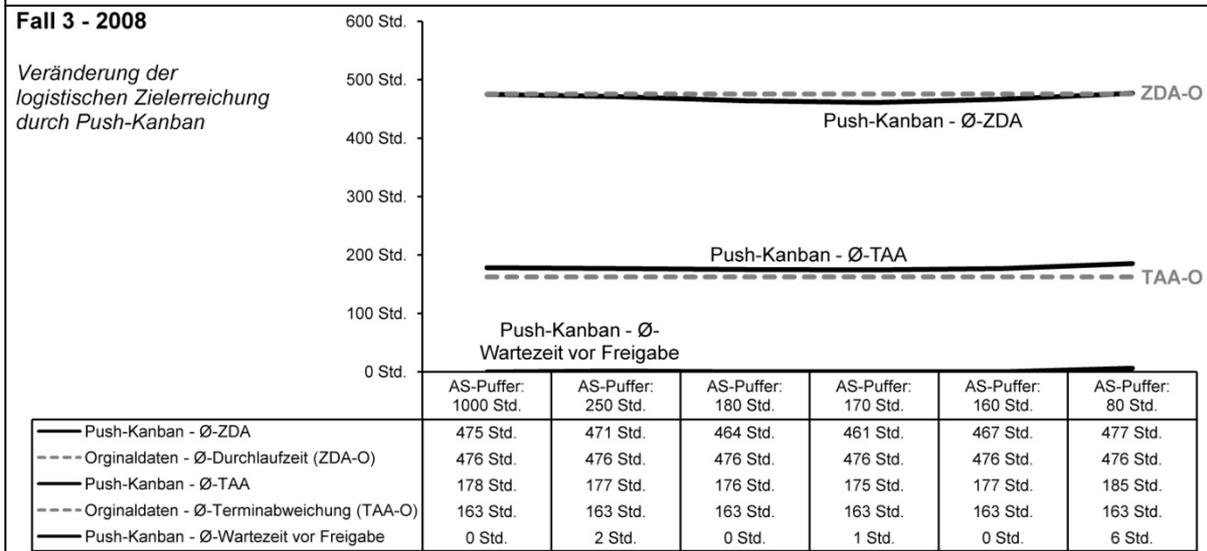
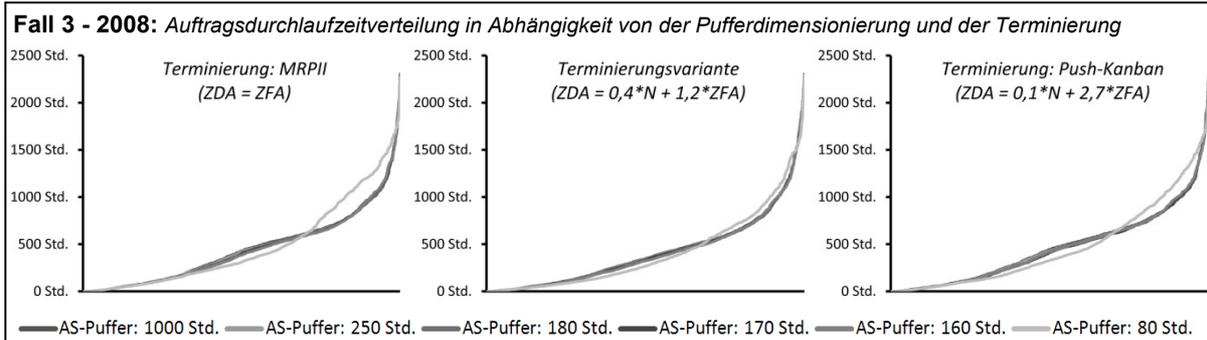


Abbildung 49: Simulationsergebnistableau: Fall 3

### Effekte der „Robusten Einplanung“

In den drei Simulationsergebnistableaus sind jeweils drei Terminierungsvarianten mit ihren unterschiedlichen Auftragsdurchlaufzeitverteilungen in Abhängigkeit von der Bestandsgrenzenstaffelung dargestellt. Dabei handelt es sich bei jeder Terminierungsvariante um eine fallspezifische Variation der Methodik der „Robusten Einplanung“, bei der die Auftragsdurchlaufzeit in Abhängigkeit von der Auftragsgesamtdurchführungszeit und der Vorgangszahl eines Auftrags bestimmt wird. Die „MRPII-Terminierung“ entspricht einer reinen Durchführungszeitverkettung, während die „Push-Kanban-Terminierung“ auf den durch die Vergangenheitsdaten ermittelten Regressionskoeffizienten basiert.

Anhand der unterschiedlichen Auftragsdurchlaufzeitverläufe aller drei Fälle ist zu erkennen, dass die Terminierung Einfluss auf die Verteilung der Auftragsdurchlaufzeiten nimmt. So zeigt sich optisch eine deutliche Variation der Auftragsdurchlaufzeitverteilung in Abhängigkeit von der Terminierungsvariante. Allerdings ist dieser Einfluss unabhängig von dem ebenfalls erkennbaren starken Zusammenhang zwischen der Bestandsgrenzenstaffelung und der Variation der Auftragsdurchlaufzeitverteilungen zu bewerten.

Aus diesem Grund ist der Zusammenhang zwischen der Terminierungsmethodik und der Veränderung der Auftragsdurchlaufzeitverteilung in der folgenden Darstellung quantitativ aggregiert.

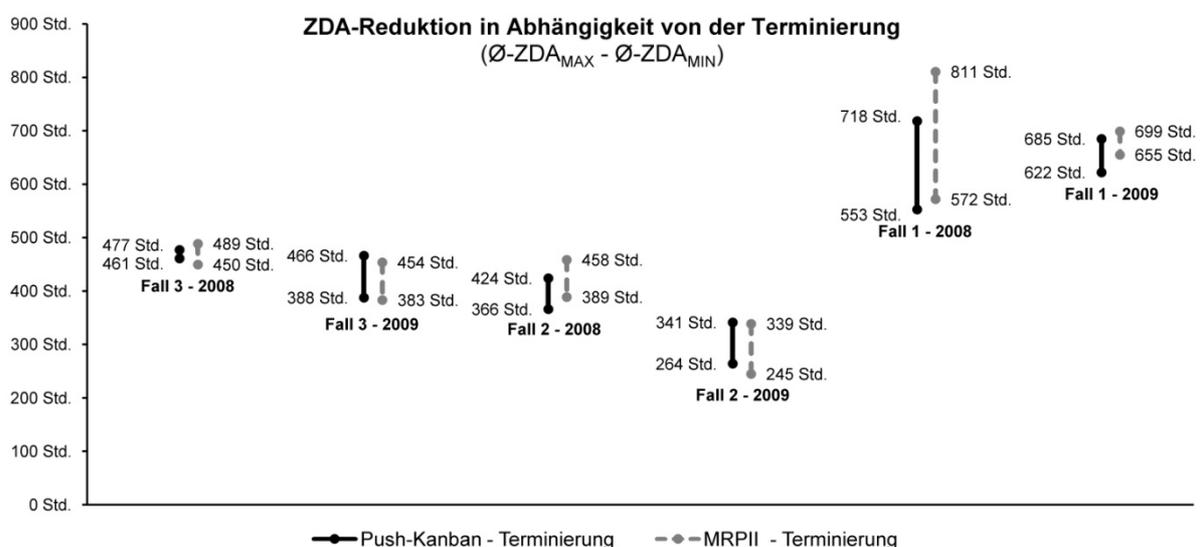


Abbildung 50: Einfluss der Terminierung auf die mittlere Auftragsdurchlaufzeit

Der Einfluss der Terminierungsmethodik auf die mittlere Auftragsdurchlaufzeit von durchschnittlich  $\pm 4\%$  zeigt, dass der Feinterminierung im heterarchisch-hierarchischen Rahmen des Push-Kanban-Konzepts eine wichtige Rolle zukommt. So werden durch die Terminierung Vorgangsecktermine vorgegeben, die der dezentralen, selbststeuernden Fertigungsregelung bei Reihenfolgevertauschungen als Orientierungsrahmen dienen. Infolgedessen verändern die terminierten Vorgangsecktermine direkt die Durchlaufzeit eines Auftrags. Im vorliegenden Fallbeispiel führt dieser Wirkungszusammenhang dazu, dass sich durch die „Robuste Einplanung“ des Push-Kanban-Konzepts die Auftragsdurchlaufzeiten tendenziell verkürzen.

### ***Effekte der dezentralen, selbststeuernden Fertigungsregelung***

Die dezentrale, selbststeuernde Fertigungsregelung des Push-Kanban-Konzepts setzt sich in dem beschriebenen Simulationsmodell aus der „Dezentralen Bestandsregelung“, der „Terminorientierten Reihenfolgepriorisierung“ und den „Vorwärtsverknüpften Kanbanregelkreisen“ zusammen. Ihre Wirkweise wird in der Simulation anhand der fallspezifischen Staffelung der dezentralen, arbeitssystembezogenen Bestandsgrenzen verdeutlicht. Diese basieren in ihrer Festlegung auf der in Kapitel 4.6.2 vorgestellten Heuristik.

An den unterschiedlichen Bestandsgrenzen der jeweiligen Fälle lassen sich zwei Effekte ablesen. Zum einen schwankt die Schwelle, ab der die dezentralen Bestandsobergrenzen einen Effekt zeigen, sehr stark von Fall zu Fall. Zum anderen zeigt die stetige Reduktion der Bestandsgrenzen stark positive Effekte hinsichtlich der Verbesserung der logistischen Zielerreichung. Aus beiden Erkenntnissen lässt sich schließen, dass die in Kapitel 4.6.2 vorgestellte Auslegungsheuristik praktikabel funktioniert und aufgrund der starken Veränderungseinflüsse einer Musterfertigung in ihrer rollierenden Anpassung notwendig ist.

Hinsichtlich der Veränderung der logistischen Zielerreichung zeigt sich in den Simulationsergebnissen ein starker Zusammenhang zwischen der Staffelung der Bestandsobergrenzen und den Verläufen der Auftragsdurchlaufzeitverteilungen. Dabei wirken die Bestandsobergrenzen vor allem in dem mittleren und oberen Auftragsdurchlaufzeitbereich. Das heißt, die aktiven Bestandsgrenzen reduzieren vor allem die Anzahl der umgangssprachlich bezeichneten „Langläufer“, also Aufträge, die überdurchschnittlich lange Durchlaufzeiten aufweisen. Damit bestätigt sich der erwartete Effekt, dass die dezentrale, selbststeuernde Fertigungsregelung des Push-Kanban-Konzepts neben einer Belastungsnivellierung auch zu einer Begrenzung der mittleren Gesamtdurchlaufzeit führt.

Insgesamt resultiert aus der schrittweisen Reduktion der Bestandsgrenzen eine stetige Verbesserung der mittleren Auftragsdurchlaufzeit und der mittleren Terminabweichung. Dabei treten ab einem gewissen Bestandsgrenzenniveau vermehrt Wartezeiten vor dem Fertigungsbereich auf, das heißt, Fertigungsaufträge können nicht mehr zum Planstarttermin freigegeben werden. Dieser Effekt der gegenseitigen Blockaden einzelner Arbeitssysteme verstärkt sich im weiteren Verlauf, sodass ab einer bestimmten Schwelle die Verbesserung der logistischen Zielerreichung abfällt. In der Praxis stellt dieses Zielerreichungsniveau den Führungswert zur Aussetzung der Bestandsgrenzenreduktion dar. Dieser Grundwirkungszusammenhang tritt in allen drei Fallbeispielen gleichsam in unterschiedlich starken Ausprägungen auf.

### ***Effekte der Planparametervariabilität der Fallstudien***

Infolgedessen liegt die Vermutung nahe, dass die Wirkweise des Konzepts auch von der zugrunde liegenden Planparametervariabilität der jeweiligen Fallstudie beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird in der folgenden Abbildung die aggregierte Verbesserung der logistischen Zielerreichung des Push-Kanban-Konzepts in Abhängigkeit von der Planparametervariabilität der zugrunde liegenden Fallstudie dargestellt. Dabei wird die Verbesserung der logistischen Zielerreichung einerseits hinsichtlich der Originaldaten der Fallstudien und andererseits im Bezug auf einen Simulationslauf ohne aktive Bestandsobergrenzen aggregiert.

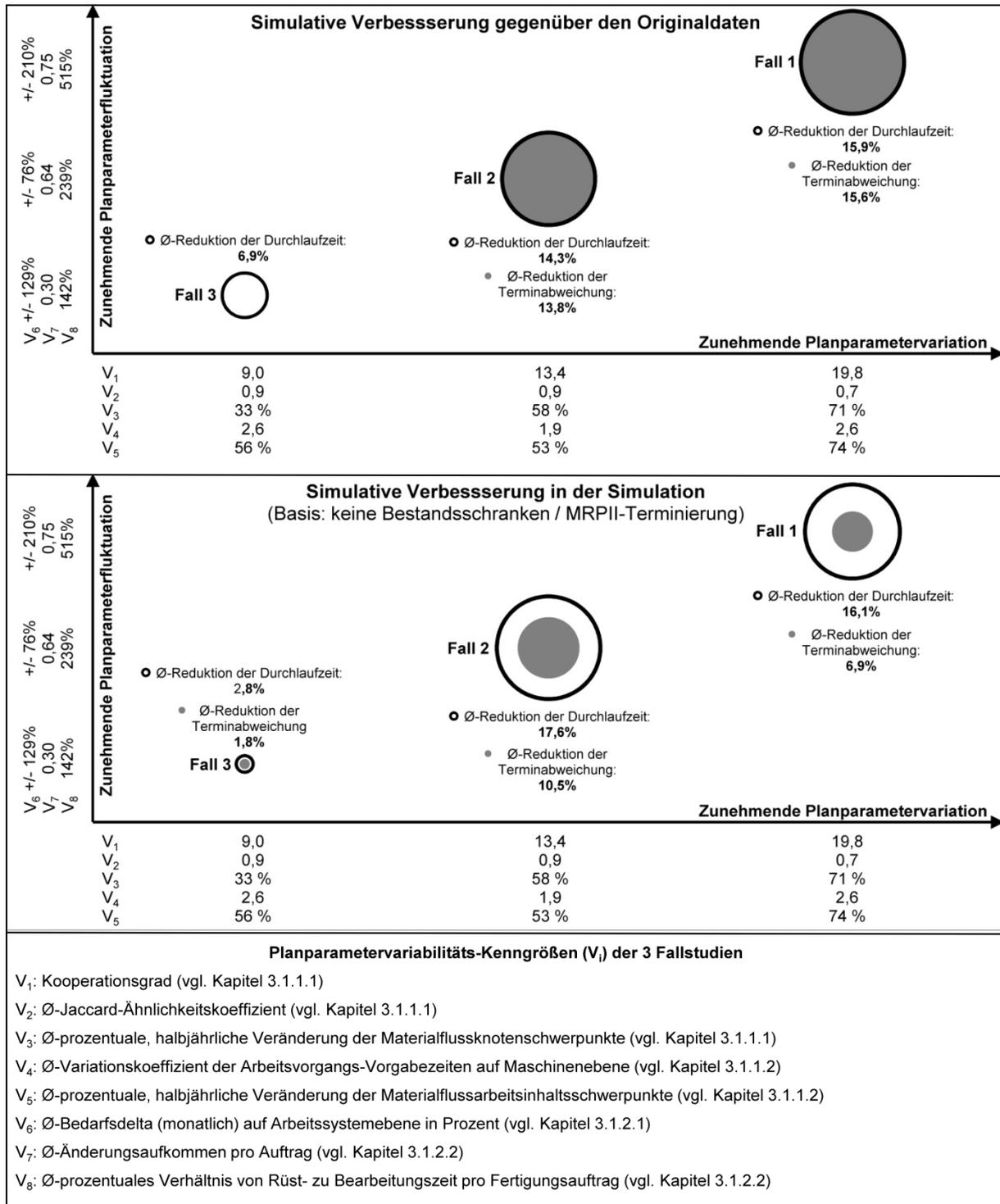


Abbildung 51: Simulative Verbesserung der logistischen Zielerreichung durch Push-Kanban

An dieser Ergebnisverdichtung können zwei Effekte abgelesen werden. Zum einen besteht eine große Deckungsgleichheit zwischen den Zielerreichungseffekten des Originaldaten- und des Simulationsdatenvergleichs, was auf eine prinzipiell hohe Gültigkeit der Ergebnisse schließen lässt (Rabe et al. 2008). Zum anderen kann eine positive Korrelation zwischen der Zunahme der Planparametervariabilität und der Zunahme der Verbesserung der logistischen Zielerreichung durch das Push-Kanban-Konzept festgestellt werden. Ob es sich dabei um einen kausalen Zusammenhang handelt, kann allerdings nicht beurteilt werden.

### **Fazit und Zusammenfassung**

Die simulative Untersuchung der Wirkungszusammenhänge des Push-Kanban-Konzepts hat gezeigt, dass der Einsatz des Konzepts die logistische Zielerreichung einer Musterfertigung bei Systemlieferanten positiv beeinflusst. Sowohl die Kennzahl Auftragsdurchlaufzeit als auch die Kennzahl Terminabweichung weisen in allen drei untersuchten Fällen eine deutliche Verbesserung auf, einerseits hinsichtlich der originalen und andererseits hinsichtlich der simulativen Ausgangssituation. Dabei tragen alle Konzeptelemente in ihrer Kombination zu einer Begrenzung der Gesamtdurchlaufzeit, dem Effekt einer Belastungsnivellierung und robusteren Vorgangseckterminen bei. Daraus resultieren kürzere Auftragsdurchlaufzeiten und eine geringere Auftragsterminabweichung und damit eine höhere Prognosefähigkeit sowie eine Verbesserung der logistischen Zielerreichung.

Zudem hat sich gezeigt, dass das entwickelte Konzept in seiner Ausgestaltung die spezifische Planparametervariabilität einer Musterfertigung bei Systemlieferanten hinreichend kompensieren kann. So wurden die vorangehend beschriebenen Konzepteffekte trotz einer hohen Arbeitsinhaltsfolgenvariation, starken Bedarfsverlaufschwankungen sowie einem hohen stochastischen Störaufkommen festgestellt.

Schließlich hat die Simulationsuntersuchung auch ergeben, dass ein starker Zusammenhang zwischen der Planparametervariabilität einer Fertigung und der Effektivität des Push-Kanban-Konzepts besteht. Hier bestätigen sich die Feststellungen verschiedener Autoren, dass die Determinanten einer Fertigung einen starken Einfluss auf die Effektivität ihrer Bestandsregelung haben (Land & Gaalman 1998, Oosterman et al. 2000, Land 2006). Zudem bestätigt sich auch das im Rahmen der Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 637 der Universität Bremen entwickelte Paradigma, dass die Effektivität der Selbststeuerung eines logistischen Systems von der zugrunde liegenden Systemkomplexität (hier: Planparametervariabilität) abhängt und dass die Effektivität der Selbststeuerung mit steigender Komplexität bis zu einem bestimmten Grad zunimmt (Windt 2008, Scholz-Reiter et al. 2009a).

### **5.2 Fallstudienbasierte Konzeptbewertung**

Die theoretisch nachweisbaren Wirkungszusammenhänge eines Fertigungssteuerungskonzepts werden in der betrieblichen Praxis häufig von soziotechnischen Effekten überzeichnet. Deshalb lässt erst ein Praxiseinsatz valide Aussagen bezüglich der Konzepteffektivität zu (Fredendalla et al. 2010). Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse einer betrieblichen Fallstudienuntersuchung des Push-Kanban-Konzepts vorgestellt.

Bei der untersuchten Fertigung handelt es sich um Fall 1 der in den vorherigen Kapiteln analysierten Falldatensätze. Der Zeitrahmen der Fallstudie erstreckt sich von Februar 2010 bis August 2010. Als Ergebnisgrößen werden im Rahmen der Fallstudie die relative Veränderung der mittleren Auftragsdurchlaufzeit  $ZDA_m$  und die der durchschnittlichen Auftragsterminabweichung  $TAA_m$  im Zeitverlauf gemessen. Zur Messung der logistisch nicht objektivierbaren Konzepteffekte wurde jeweils vor und nach der Push-Kanban-Implementierung eine identische Mitarbeiterbefragung durchgeführt. Dadurch können Konzeptwirkungszusammenhänge hinsichtlich der Praktikabilität, Transparenz und der Standardisierung messbar gemacht werden.

### 5.2.1 Konzeptausgestaltung

Die Konzeptauslegung erfolgte anhand der in Kapitel 4.6.4 dokumentierten Rahmenstruktur. Sie wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher beschrieben. Einzig auf die fallspezifische Ausgestaltung der Betriebsmittel und des Werkstattlayouts wird anhand der folgenden Abbildung näher eingegangen.



Abbildung 52: Fallbeispiel: Werkstattlayout und Zeitkanban

Wie Abbildung 52 zeigt, wurde im Rahmen der Fallstudie jedem Arbeitssystem beziehungsweise jeder Prozessgruppe eine feste Kanbanstation entlang einer zentralen Materialflusstrecke zugeordnet. Die einzelnen An- und Ablieferungsstationen verfügen jeweils über zwei fest installierte Kanbantafeln beziehungsweise -stafetten. Anhand der Stafettenbelegung ist ersichtlich, wie stark ein Arbeitssystem ausgelastet ist, ob sich Aufträge im Vorlauf befinden und ob eine Blockadesituation besteht. Dabei können drei Reaktionsfälle unterschieden werden:

- Zeitkanbanstafette leer, Platzhalterkanbanstafette belegt → Konsequenz: Blockade prüfen und Kapazitätsausweitung anfordern
- Auftragsspeicher leer, Platzhalterkanbanstafette belegt → Konsequenz: Auftragsplit mit einem sich im Vorlauf befindlichen Auftrag prüfen
- Auftragsspeicher leer, Platzhalterkanbanstafette leer → Konsequenz: Kapazitätsreduktion anfordern

Die einzelnen Kanbans sind einer Station fest zugeordnet, das heißt, sie enthalten feste Quellen- und Zeitwertinformationen. Der Austausch der Auftrags- und Materialidentifikationsinformationen sowie der Termin- und Dringlichkeitsinformationen wird über ein Steckkartensystem realisiert. Dabei wird eine Steckkarte von Prozessschritt zu Prozessschritt weitergegeben und der Auftragsfortschritt über ein Kalenderfeld visualisiert.

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der Fallstudie beschrieben und interpretiert.

## 5.2.2 Ergebnisinterpretation

### Effekte hinsichtlich der logistischen Zielerreichung

Die Kennzahlen der logistischen Zielerreichung hinsichtlich der mittleren Auftragsdurchlaufzeit  $ZDA_m$  und der durchschnittlichen Auftragsterminabweichung  $TAA_m$  haben sich im Zeitverlauf in der betrieblichen Fallstudie signifikant verbessert, wie der folgende Kennzahlenverlauf zeigt:

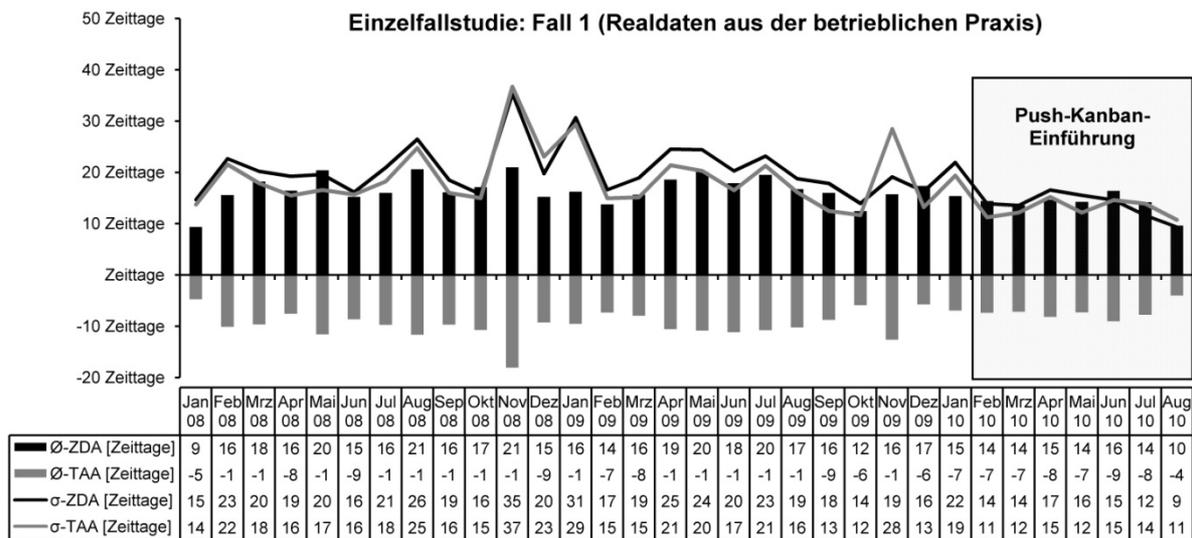


Abbildung 53: Entwicklung der logistischen Zielerreichung im Fallbeispiel

Mit einer durchschnittlichen Reduktion der mittleren Auftragsdurchlaufzeit um 17% und einer Verbesserung der Terminabweichung um ungefähr 25% im Zeitraum eines halben Jahres zeigt sich, dass die in der Simulation festgestellten Effekte des Push-Kanban-Konzepts auch in der Praxis auftreten. Deutlich ist auch der Effekt der Schwankungsreduktion anhand der Verringerung der Standardabweichung der Kennzahlen zu erkennen. Darin spiegelt sich die in Kapitel 4.3.2 beschriebene Verbesserung der Prognosefähigkeit durch die bestandsgrenzeninduzierte Begrenzung der Gesamtdurchlaufzeit wider.

### Effekte hinsichtlich der Praktikabilität, Transparenz und Standardisierung

Hinsichtlich der „weichen“ Effektivität des Push-Kanban-Konzepts wurde im Rahmen der Fallstudie eine identische Mitarbeiterbefragung vor der Konzept Einführung und am Ende des Bewertungszeitraums durchgeführt. Dabei spiegeln verschiedene Fragenkomplexe die Veränderung des Transparenz- und des Standardisierungsgrads im Verlauf der Fallstudienzeitdauer wider. Unter anderem wurden die folgenden Themen aus Sicht der Mitarbeiter evaluiert:

- Suchaufwand (Auftragsort und Suchzeiten)
- Übersichtlichkeit (Materialfluss)
- Informationsgrad (direkter und indirekter Bestand)
- Verantwortlichkeiten und Prozessstandards

Die auf Themenblöcke aggregierte Ergebnisübersicht der Befragung zeigt die folgende Abbildung.

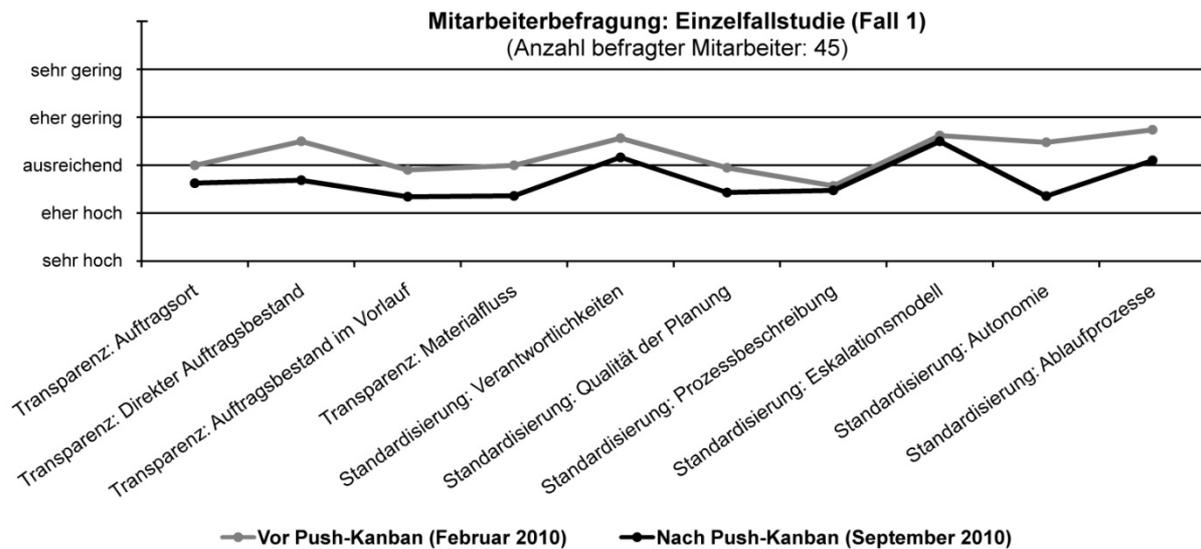


Abbildung 54: Entwicklung des Standardisierungsgrads und der Transparenz im Fallbeispiel

Das Ergebnis zeigt, dass die theoretisch hergeleiteten Konzepteffekte einer Verbesserung des Transparenz- und Standardisierungsgrads auch im Praxiseinsatz des Push-Kanban-Konzepts auftreten. So haben sich insbesondere die Bereiche des Informations- und Standardisierungsgrades wesentlich verbessert. Die Mitarbeiter fühlen sich besser informiert und sehen es als Vorteil an, autonome Entscheidungen treffen zu können. Diese „weichen Aspekte“ des Push-Kanban-Konzepts sind ein wichtiger Erfolgsfaktor bei seiner Implementierung. In der betrieblichen Fallstudie waren sie ein ausschlaggebender Grund dafür, dass das Push-Kanban-Konzept auch über die Fallstudie hinaus in der untersuchten Musterfertigung als Steuerungskonzept beibehalten wurde.

### **Fazit und Zusammenfassung**

Die betriebliche Fallstudienuntersuchung hat gezeigt, dass die theoretisch begründeten und in der Simulation nachgewiesenen Effekte des Push-Kanban-Konzepts auch im Einsatz in der betrieblichen Praxis auftreten. Dabei konnte eine durchschnittliche Reduktion der mittleren Auftragsdurchlaufzeit um 17% und eine Verbesserung der mittleren Terminabweichung um ungefähr 25% über den Zeitraum eines halben Jahres festgestellt werden. Diese Verbesserung der logistischen Zielerreichung im Praxiseinsatz spiegelt sich ziemlich genau in der simulativ gemessenen Verbesserung von ungefähr 15% der beiden Kennzahlen wider. Darin zeigt sich die hohe Validität und Glaubwürdigkeit der durch die Simulation gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere hinsichtlich der festgestellten Wirkungszusammenhänge des Push-Kanban-Konzepts.

Zudem unterstützt die Befragung der Mitarbeiter die Hypothese, dass der Einsatz der Kanban-Informationsflusssteuerung zu einer Verbesserung des Standardisierungsgrades und der Transparenz in den Ablaufprozessen einer Musterfertigung führt. Insbesondere die Zunahme der Autonomie wird von den Mitarbeitern als positiver Effekt bewertet.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die zugrunde liegenden Wirkungszusammenhänge des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung bei Systemlieferanten untersucht. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Fertigungssteuerungskonzept für eine Musterfertigung entwickelt und in seinem Anwendungszusammenhang evaluiert.

Wie die folgende Abbildung zeigt, unterteilt sich die Arbeit dabei in drei Ergebnisblöcke:

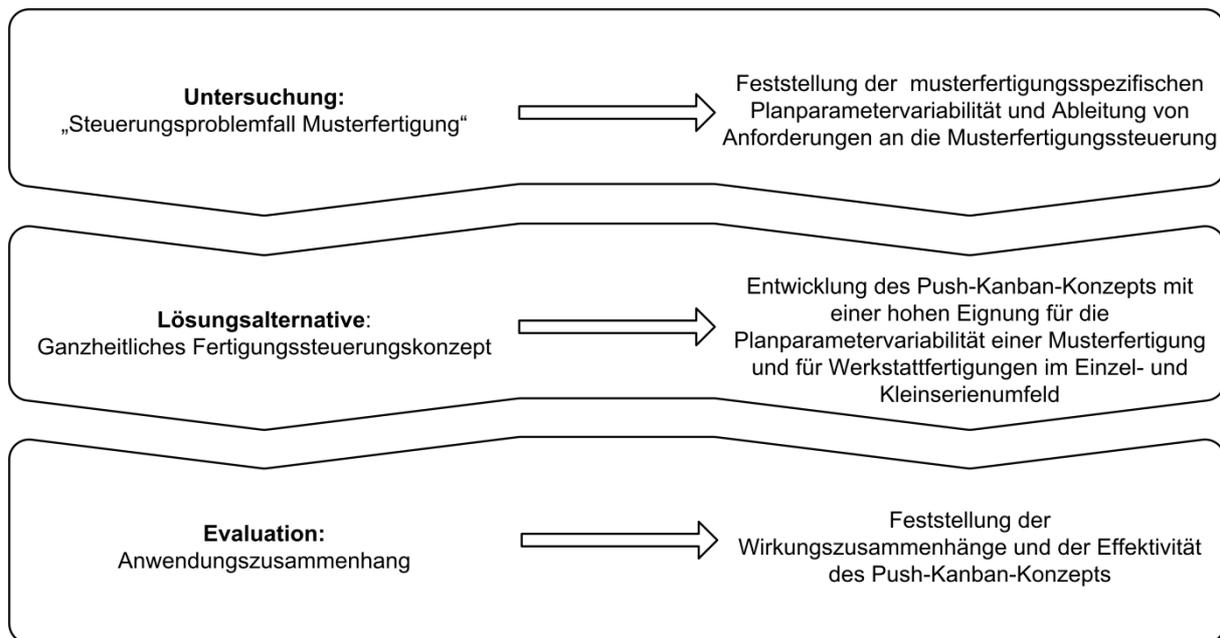


Abbildung 55: Ergebnisblöcke der Arbeit

In dem ersten Ergebnisblock sind die Wirkungszusammenhänge des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung bei Systemlieferanten anhand von drei Fallstudien aus der betrieblichen Praxis hinsichtlich ihrer Planparametervariabilität im Bezug auf die Steuerungsfähigkeit einer Musterfertigung dargestellt. Während die Variation der Arbeitsinhaltsprozessfolgen mithilfe der Methodik der Clusteranalyse, Verteilungskennzahlen und Materialflussmatrizen gemessen wird, leitet sich die Fluktuation der Arbeitsinhaltsprozessfolgen aus den Einflussgrößen Bedarfsverlauf, Änderungsaufkommen und dem Rüst- zu Bearbeitungszeitverhältnis ab. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich spezifische Anforderungen an die Fertigungssteuerung einer Musterfertigung von Systemlieferanten.

Auf diesen Anforderungen aufbauend wird im zweiten Ergebnisblock der Arbeit das Fertigungssteuerungskonzept Push-Kanban für eine Musterfertigung beschrieben. Die Lösungsalternative basiert auf dem organisatorischen Selbststeuerungsansatz der heterarchischen Hierarchie und kombiniert eine robuste Push-Einplanung mit einer dezentralen Fertigungsregelung, deren Informationsfluss mithilfe von Kanbansignalen gesteuert wird.

Durch diese Ausgestaltung bietet der Ansatz zum einen eine hohe Transparenz und Praktikabilität der Steuerungsprozesse und zum anderen ermöglichen die Kanbanregelkreise die Integration aller Aufgaben der Fertigungssteuerung in einem ganzheitlichen Konzept. Außerdem werden durch die Kanbanregelkreise die Material- und Informationsflüsse von dem Layout einer Fertigung entkoppelt, wodurch die hohe Planparametervariation einer Musterfertigung bei Systemlieferanten kompensiert werden kann. Die hohe Planparameterfluktuation einer Musterfertigung gleicht das Konzept durch die Dezentralität seiner impliziten Bestandsregelung aus.

Als Fertigungssteuerungsverfahren stellt das entwickelte Push-Kanban-Konzept neben der DBF-, der BGD- und der POLCA-Steuerung eine spezifische Ausgestaltungsvariante der dezentralen Bestandsregelung dar. Dabei eignet es sich im Speziellen zur Steuerung des Planparametervariabilitätsfalls Musterfertigung. Darüber hinaus kann es auch in anderen komplexen und turbulenten Fertigungstypologien sinnvoll eingesetzt werden.

Zur Evaluation der Effektivität wird das Konzept im dritten Ergebnisblock der Arbeit mithilfe einer Simulation der Realdaten dreier Fallstudien aus der betrieblichen Praxis untersucht. Dabei zeigt sich, dass das Push-Kanban-Konzept wesentlich zu einer Verbesserung der logistischen Zielerreichung beitragen kann. Insbesondere im Kontext einer hohen Planparametervariabilität tritt neben dem Effekt einer Belastungsnivellierung auch der Effekt einer Begrenzung der Durchlaufzeiten auf.

Diese Wirkweise kann auch anhand des untersuchten betrieblichen Einsatzfalls nachgewiesen werden. So weisen die Ergebnisse einer betrieblichen Fallstudie eine deutliche Reduktion der mittleren Terminabweichung und der mittleren Durchlaufzeit auf. Außerdem werden durch die Fallstudienuntersuchung zusätzlich die „weichen“ Konzepteffekte in Form einer Verbesserung der Transparenz und des Standardisierungsgrades bestätigt.

Die folgende Abbildung fasst die Effekte des Push-Kanban-Konzepts zusammen:

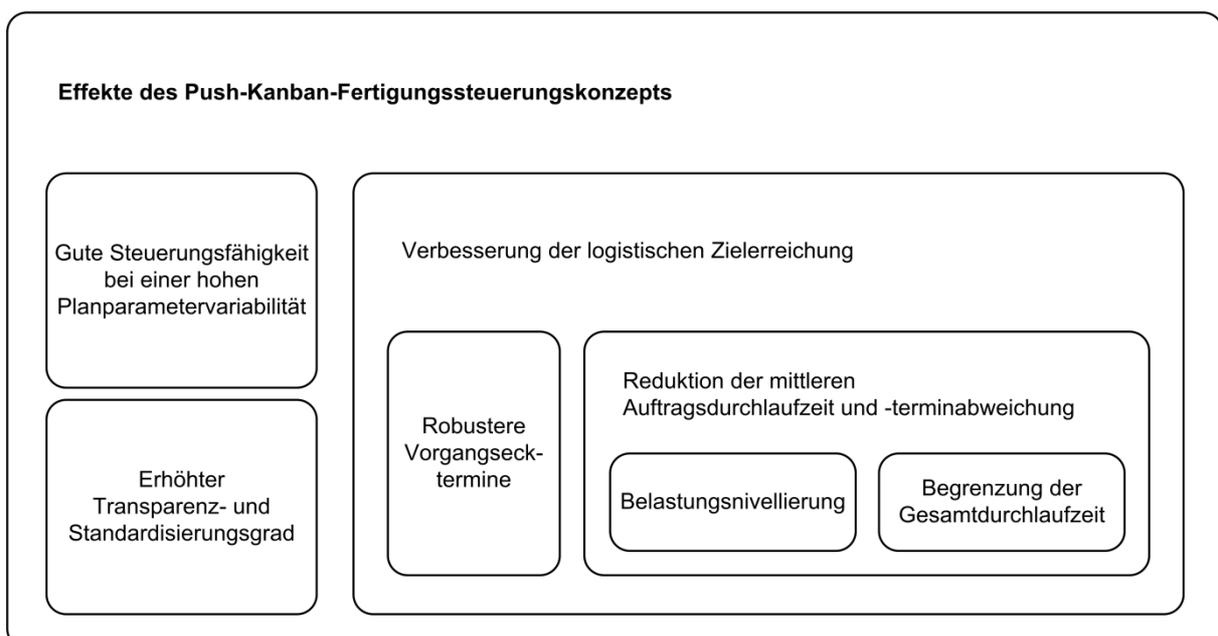


Abbildung 56: Zusammenfassung der Effekte des Push-Kanban-Konzepts

Insgesamt leistet die vorliegende Arbeit mit den hier dargestellten Ergebnissen sowohl einen Beitrag zur Erweiterung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes bezüglich des Steuerungsproblemfalls Musterfertigung als auch hinsichtlich des Forschungsbereichs Fertigungssteuerung. Dabei werden durch die Evaluation des entwickelten Push-Kanban-Konzepts anhand eines abbildungsgenauen Simulationsmodells und einer betrieblichen Fallstudie die Wirkungszusammenhänge des Konzepts wissenschaftlich eingeordnet und konkrete Hinweise zu seiner praktischen Implementierung gegeben. Dadurch stellt die vorliegende Arbeit neben einem wissenschaftlichen Beitrag im Forschungsbereich der Produktionswissenschaft auch eine Lösung für eine konkrete Problemstellung der betrieblichen Praxis dar.

### **Ausblick**

Hinsichtlich des weiteren Forschungsbedarfs ergeben sich aus der Arbeit zwei neue zukünftige Forschungsansätze.

Für die Auslegung der arbeitssystembezogenen Bestandsgrenzen der „Dezentralen Bestandsregelung“ im Push-Kanban-Konzept können alternative Vorgehensweisen zu der in Kapitel 4.6.2 vorgeschlagenen Auslegungsheuristik evaluiert werden. Eine aussichtsreiche Alternative stellt zum Beispiel die Methodik der simulationsgestützten Optimierung dar. Sie sieht eine Kopplung von Simulations- und Optimierungsverfahren vor, um trotz der Problemstellung eines großen Parameterraums den Einsatz der Simulation zur Lösung einer komplexen Problemstellung zu ermöglichen. Dazu werden mathematische Optimierungsverfahren, wie zum Beispiel *Neuronale Netze* oder *Genetische Algorithmen* eingesetzt, um in einer begrenzten Anzahl an Simulationsläufen zu einem optimierten Simulationsergebnis zu gelangen (Suhl & Mellouli 2009, März et al. 2010). Auf das Push-Kanban-Simulationsszenario konkret anwendbare Ansätze beschreiben Pierreval & Durieux-Paris/2007, Bäck et al./2008 und Hamann/2008.

Im Bezug auf die allgemeine Steuerungsverfahrenforschung zeigt die Klassifizierung der bestehenden bestandsregelnden Auftragseinlastungsansätze anhand des in Kapitel 2.1.5.2 neu eingeführten Klassifikationsschemas eine interessante Forschungslücke auf. So sind, wie die folgende Tabelle veranschaulicht, bei den bestandsregelnden Auftragseinlastungsverfahren bislang ausschließlich Ausgestaltungsvarianten in den Klassifikationsfällen 1.1.1, 1.2.2, 2.1.1, 2.2.2, 3.1.1 und 3.2.2 bekannt.

<b>Bestandsregelnde Auftragseinlastung</b>												
Art der Regelung	Zentrale Bestandsregelung (fertigungsbereichbezogene Grenze) (Fall 1)				Zentrale Bestandsregelung (arbeitssystembezogene Grenzen) (Fall 2)				Dezentrale Bestandsregelung (arbeitssystembezogene Grenzen) (Fall 3)			
	Danach (1.1)		Davor (1.2)		Danach (2.1)		Davor (2.2)		Danach (3.1)		Davor (3.2)	
Art der Limitation	MIN (1.1.1)	MAX (1.1.2)	MIN (1.2.1)	MAX (1.2.2)	MIN (2.1.1)	MAX (2.1.2)	MIN (2.2.1)	MAX (2.2.2)	MIN (3.1.1)	MAX (3.1.2)	MIN (3.2.1)	MAX (3.2.2)
Variante vorhanden	X	?	?	X	X	?	?	X	X	?	?	X

Tabelle 18: Klassifikation von Verfahren zur bestandsorientierten Auftragseinlastung

Diese bekannten Ausgestaltungsvarianten sind noch einmal in folgender Übersicht zusammengefasst:

<b>Bestehende Ausgestaltungsansätze</b>					
Fall 1.1.1	BBV				
Fall 1.1.2	<b>Keine bekannt</b>				
Fall 1.2.1					
Fall 1.2.2	CONWIP	Engpasssteuerung			
Fall 2.1.1	Basestock				
Fall 2.1.2	<b>Keine bekannt</b>				
Fall 2.2.1					
Fall 2.2.2	WLC	BOA	ALP	GPOLCA	COBACABANA
Fall 3.1.1	Pull-Kanban und Derivate				
Fall 3.1.2	<b>Keine bekannt</b>				
Fall 3.2.1					
Fall 3.2.2	DBF	BGD	POLCA	Push-Kanban	

Tabelle 19: *Bestehende Ausgestaltungsansätze zur bestandsorientierten Auftragseinlastung*

Insofern bieten die Klassifikationsfälle 1.1.2, 1.2.1, 2.1.2, 2.2.1, 3.1.2 und 3.2.1 weiteres Untersuchungspotenzial, vor allem hinsichtlich der Entwicklung grundsätzlich neuer Bestandsregelungsansätze. Im Folgenden sind zwei mögliche neue Verfahrensansätze skizziert.

Für Fall 2.2.1 wäre ein Mechanismus denkbar, der dezentrale Bestandsuntergrenzen vor jedem einzelnen Arbeitssystem implementiert, auf welche Aufträge von einer zentralen Steuerungsinanz aus eingelastet werden. Ein möglicher Regelungsmechanismus könnte dabei wie folgt funktionieren. Beim Unterschreiten einer Bestandsgrenze wird von einem Arbeitssystem ein Bedarf an die zentrale Steuerungsinanz gemeldet, beispielsweise in Form eines Kanbansignals. Dieses Signal führt zu einer Freigabe des nächstdringlichen Auftrags, der dieses Arbeitssystem belegt. Aufträge werden bei diesem Ansatz immer erst dann freigegeben, sobald eines der auftragsrelevanten Arbeitssysteme einen Bedarf indiziert.

Auch der Fall 3.2.1 bietet ein interessantes Bestandsregelungsszenario. Anstatt wie im Fall 3.2.2 mit einer vorgelagerten Bestandsobergrenze den Materialzulauf anderer Arbeitssysteme zu regeln, wäre hier ein Mechanismus denkbar, der dezentrale Bestandsuntergrenzen vor den einzelnen Arbeitssystemen vorsieht. Arbeitssysteme könnten dabei entweder immer den Nachfolger mit dem niedrigsten Bestand zur Bearbeitung auswählen, was der XWINQ-Prioritätsregel entsprechen würde, oder es wird immer der Nachfolger ausgewählt, dessen Auftrag den dringlichsten Termin aufweist und dessen Bestandsuntergrenze gleichzeitig Bedarf anzeigt.

In beiden Fällen entstehen dabei völlig neue Steuerungsstrategien, die sehr stark in Richtung einer konstanten Kapazitätsauslastung aller Bearbeitungsressourcen wirken. Welche Effekte bei der Anwendung einer solchen Strategie hinsichtlich der logistischen Zielgrößen Termintreue und Durchlaufzeit auftreten, kann nicht pauschal beantwortet werden. Zukünftige Untersuchungen könnten darüber Aufschluss geben.

---

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- Adam 1988** ADAM, D.: *Systeme zur Fertigungssteuerung*. Wiesbaden: Gabler, 1988.
- Adolphi 1997** ADOLPHI, H.: *Strategische Konzepte zur Organisation der betrieblichen Standardisierung*. Berlin: Beuth, 1997.
- Albers 2007** ALBERS, S.: *Methodik der empirischen Forschung*. Wiesbaden: Gabler, 2007.
- Alioth & Frei 1990** ALIOTH, A.; FREI, F.: Soziotechnische Systeme: Prinzipien und Vorgehensweisen. In: *Organisationsentwicklung* 9 (1990), S. 28-39.
- Altendorfer et al. 2008** ALTENDORFER, K.; HUBER, A.; JODLBAUER, H.: Behaviour of MRP, Kanban, CONWIP and DBR under dynamic environmental variability In: ENGELHARDT-NOWITZKI, C.; et al. (Hrsg.): *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation: State-of-the-Art und innovative Konzepte* Wiesbaden: Gabler, 2008, S. 113-128.
- Arnold & Furmans 2009** ARNOLD, D.; FURMANS, K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*. Berlin: Springer, 2009.
- Arnold et al. 2008** ARNOLD, D.; ISERMANN, H.; KUHN, A.; TEMPELMEIER, H.; FURMANS, K.: *Handbuch Logistik*. Berlin: Springer, 2008.
- Aurich et al. 2007** AURICH, C.; NAAB, C.; RÖSSING, M.: Transparente Strukturen verkürzen die Durchlaufzeit. In: *WB Werkstatt + Betrieb* 01 (2007), S. 68-71.
- Awate & Saraph 2007** AWATE, P. G.; SARAPH, P. V.: An extension of modified-operational-due-date priority rule incorporating job waiting times and application to assembly job shop. In: *Sadhana* 22 (2007), S. 83-100.
- Awiszus et al. 2009** AWISZUS, B.; BAST, J.; DÜRR, H.; MATTHES, K.-J.: *Grundlagen der Fertigungstechnik*. München: Hanser, 2009.
- Bacher 1996** BACHER, J.: *Clusteranalyse*. München: Oldenbourg Verlag, 1996.
- Bäck et al. 2008** BÄCK, S.; TIEFENBRUNNER, M.; GÖSSLER, G.: Optimierung von logistischen Prozessen durch die Kombination von Simulation und neuronalen Netzen. In: ENGELHARDT-NOWITZKI, C.; et al. (Hrsg.): *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation: State-of-the-Art und innovative Konzepte* Wiesbaden: Gabler, 2008, S. 163-181.
- Backhaus 2008** BACKHAUS, K.: *Multivariate Analysemethoden eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin: Springer, 2008.
- Baker 1984** BAKER, K. R.: Sequencing rules and due-date assignments in a job shop. In: *Management Science* 30 (1984), S. 1093-1104.
- Balck et al. 2009** BALCK, H.; BUNGARD, W.; HOFMANN, K.; GANZ, W.; SCHWENKER, B.; HANßEN, D.; MEINDL, R.; SCHLOSKE, A.; THIEME, P.; TEUFEL, P.: Organisationsaspekte in der Umsetzung. In: BULLINGER, H.-J.; et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung* Berlin: Springer, 2009, S. 599-694.
- Bangsow 2008** BANGSOW, S.: *Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk: Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen*. München: Hanser, 2008.
- Baudin 2004** BAUDIN, M.: *Lean logistics: the nuts and bolts of delivering materials and goods*. New York: Productivity Press, 2004.
- Bauer 2009** BAUER, J.: *Produktionscontrolling und -management mit SAP® ERP*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- Baumann 2008** BAUMANN, S.: *Kooperationsspezifika und -probleme in Supply Chain Netzwerken der Automobilindustrie* Wiesbaden: Gabler, 2008.

- Bea & Göbel 1999** BEA, F. X.; GÖBEL, E.: *Organisation – Theorie und Gestaltung*. Stuttgart: Lucius und Lucius, 1999.
- Bechte 1980** BECHTE, W.: *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. Hannover, Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau, Diss., 1980
- Becker 2007** BECKER, H.: *Auf Crashkurs : Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb*. Berlin: Springer, 2007.
- Becker 2005** BECKER, T.: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin: Springer, 2005.
- Berg 2008** BERG, K.-U.: *Die Herstellungskosten in der Bilanz, insbesondere Abgrenzung von Einzel- und Gemeinkosten*. Norderstedt: GRIN Verlag, 2008.
- Bicheno 1998** BICHENO, J.: *The lean toolbox: a quick and dirty guide for cost, quality, delivery, design and management*. Buckingham: PICSIE Books, 1998.
- Bischoff 2007** BISCHOFF, R.: *Anlaufmanagement Schnittstelle zwischen Projekt und Serie*. Konstanz: HTWG, 2007.
- Blecker & Kaluza 2004** BLECKER, T.; KALUZA, B.: *Heterarchische Hierarchie : ein Organisationsprinzip flexibler Produktionssysteme*. Klagenfurt: IfW, 2004.
- Blötz 2008** BLÖTZ, U.: *Planspiele in der beruflichen Bildung : Abriss zur Auswahl, Konzeptionierung und Anwendung von Planspielen (aktualisierter Planspielkatalog 2008) ; Multimedia-Publikation*. Bielefeld: Bertelsmann, 2008.
- Blutner et al. 2009** BLUTNER, D.; CRAMER, S.; HÄRTEL, T.: Der Mensch als Planer, Operateur und Problemlöser in logistischen Systemen. In: BUCHHOLZ, P.; CLAUSEN, U. (Hrsg.): *Große Netze der Logistik: Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559*. Berlin: Springer, 2009, S. 211-239.
- Böge 2009** BÖGE, A.: *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- Bonvik et al. 1997** BONVIK, A. M.; COUCH, C. E.; GERSHWIN, B. S.: A comparison of productionline control mechanisms. In: *International Journal of Production Research* 35 (1997), S. 789-804.
- Bornhäuser 2009** BORNHÄUSER, M.: *Reifegradbasierte Werkstattsteuerung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Diss., 2009
- Bornhäuser et al. 2005** BORNHÄUSER, M.; LICKEFETT, M.; WESTKÄMPER, E.: Taktororientierte Fertigungssteuerung. In: *Wt Werkstattstechnik* 95 (2005), S. 396-404.
- Bortz 2005** BORTZ, J.: *Statistik; Für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer, 2005.
- Bortz & Döring 2002** BORTZ, J.; DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer, 2002.
- Böse et al. 2007** BÖSE, F.; PHILIPP, T.; WINDT, K.: Der Komplexitätswürfel - Ein Instrumentarium zur Charakterisierung komplexer Produktionssysteme. In: *ZWF* 102 (2007), S. 295-298.
- Brackel 2009** BRACKEL, T. V.: *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme : Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen*. Wiesbaden: Gabler, 2009.
- Braess & Seiffert 2005** BRAESS, H. H.; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2005.

- Brankamp 1971** BRANKAMP, K.: *Planung und Entwicklung neuer Produkte*. Berlin: de Gruyter, 1971.
- Breker 1995** BREKER, J.: *Logistikorientierte Fertigungssteuerung : ein Beitrag zur ganzheitlichen Planung und Validierung von Produktionssteuerungssystemen*. Dortmund: Verl. Praxiswissen, 1995.
- Brennan & O 2002** BRENNAN, R. W.; O, W.: Evaluating alternative manufacturing control strategies using a benchmark system. In: *Journal of Engineering Manufacture* 216 (2002), S. 927-932.
- Brinzer et al. 2005** BRINZER, B.; PRIESE, J.; KLEMM, P.; PRITSCHOW, G.: Neue Ansätze zur dezentralen Produktionsregelung: Verhandlungsbasierte Produktionsregelung. In: *Wt Werkstattstechnik* 95 (2005), S. 275-281.
- Brosius 1998** BROSIUS, F.: *SPSS 8: Professionelle Statistik unter Windows*. Bonn: mitp, 1998.
- Büdenbender 1991** BÜDENBENDER, W.: *Ganzheitliche Produktionsplanung und -steuerung Konzepte für Produktionsunternehmen mit kombinierter kundenanonymer und kundenbezogener Auftragsabwicklung*. Berlin: Springer, 1991.
- Bufka 2004** BUFKA, D.: *Typologisierung von Order-to-delivery-Prozessen in der Automobilindustrie*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2004.
- Buhl et al. 2009** BUHL, M.; BOHNEN, F.; DEUSE, J.; SCHNEIDER, R.: Effiziente Kleinserienfertigung durch Produktionsnivellierung. In: *PRODUCTIVITY Management* 14 (2009), S. 19-22.
- Buhl & Deuse 2009** BUHL, M.; DEUSE, J.: Stufenmodell zur Nivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung. In: *PPS Management* 14 (2009), S. 26-29.
- Bullinger 1997** BULLINGER, H.-J.: Rapid Prototyping in der Anwendung. In: SCHUH, G.; WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): *Komplexität und Agilität: Steckt die Produktion in der Sackgasse?* Berlin: Springer, 1997, S. S.169-184.
- Bullinger 2002** BULLINGER, H.-J.: *Neue Organisationsformen im Unternehmen ein Handbuch für das moderne Management*. Berlin: Springer, 2002.
- Bullinger et al. 2008** BULLINGER, H. J.; SPATH, D.; WARNECKE, H. J.; WESTKÄMPER, E.: *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung*. Berlin: Springer, 2008.
- Bungard & Hofmann 2002** BUNGARD, W.; HOFMANN, K.: Anlaufmanagement am Beispiel der Automobilindustrie. In: BULLINGER, H.-J.; et al. (Hrsg.): *Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management*. Berlin: Springer, 2002, S. 1261-1278.
- Busch 1987** BUSCH, U.: Bestandsgeregelte Durchfluß-Steuerung. In: *CIM Management*, (1987), S. 18-23.
- Carbon 1999a** CARBON, M.: Folgen der Dezentralisierung - Anforderungen an das Informationsmanagement. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): *Effizientes Informationsmanagement in dezentralen Organisationsstrukturen*. Berlin: Springer, 1999a, S. 43 -72.
- Carbon 1999b** CARBON, M.: Wechselwirkung von Organisation und Technik. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): *Effizientes Informationsmanagement in dezentralen Organisationsstrukturen*. Berlin: Springer, 1999b, S. 165 -170.
- Chavelski et al. 1997** CHAVELSKI, A.; GROSSNER, B.; REIF, A.; ENDERLEIN, H.: *Prozessorientierte Organisationsgestaltung - Voraussetzung für Gruppenarbeit*. Chemnitz: IBF, 1997.

- Cheng et al. 1996** CHENG, C.-H.; KUMAR, A.; MOTWANI, J.: A comparative examination of selected cellular manufacturing clustering algorithms. In: *International Journal of Operations and Production Management* 15 (1996), S. 86-97.
- Chmielewicz 1970** CHMIELEWICZ, K.: *Forschungskonzeptionen der Wirtschaftswissenschaft; zur Problematik einer entscheidungstheoretischen und normativen Wirtschaftslehre*. Stuttgart: C.E. Poeschel, 1970.
- Confessore et al. 2008** CONFESSORE, G.; LUCA, P. D.; LIOTTA, G.; PACIFICI, A.: Group technology and material flows: layout design via optimisation and simulation. In: ENGELHARDT-NOWITZKI, C.; et al. (Hrsg.): *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation: State-of-the-Art und innovative Konzepte* Wiesbaden: Gabler, 2008, S. 97-111.
- Conway et al. 2003** CONWAY, R. W.; MAXWELL, W. L.; MILLER, L. W.: *Theory of Scheduling*. Mineola: Courier Dover Publications, 2003.
- Corsten 2002** CORSTEN, H.: *Entwurf eines Rahmenkonzepts für eine flexibilitätsorientierte Produktionsplanung und -steuerung bei Werkstattfertigung*. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Produktionswirtschaft, Universität Kaiserslautern, 2002.
- Curry & Feldman 2009** CURRY, G. L.; FELDMAN, R. M.: *Manufacturing systems modeling and analysis*. Berlin: Springer, 2009.
- Czichos & Hennecke 2008** CZICHOS, H.; HENNECKE, M.: *Hütte: das Ingenieurwissen*. Berlin: Springer, 2008.
- Damien & Salah 2002** DAMIEN, T.; SALAH, B.: Self-organization in distributed manufacturing control: state-of-the-art and future trends. In: IEEE (Hrsg.): *Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference*. Hammamet, 2002
- Dangelmaier 2009** DANGELMAIER, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: im Sommer keine Kirschpralinen?* Berlin: Springer, 2009.
- Dannenbergh et al. 2009** DANNENBERG, J.; STOLZ, L.; MÜNCH, R. (Hrsg.): *New Automotive Deal? Krise, Gegenmaßnahmen und Neustrukturierung der globalen Automobilzulieferindustrie*. München: OliverWyman, 2009. Studie
- Das & Nagendra 1993** DAS, S. K.; NAGENDRA, P.: Investigations into the impact of flexibility on manufacturing performance. In: *International Journal of Production Research* 31 (1993), S. 2337.
- Dickmann 2007** DICKMANN, P.: *Schlanker Materialfluss : mit Lean Production, KANBAN und neuen Innovationen*. Berlin: Springer, 2007.
- DIN 2003** DIN (Hrsg.): *DIN 8580 - Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V, 2003.
- Dobberstein 1997** DOBBERSTEIN, M.: *Optimierung von Steuerungsstrukturen in dezentralisierten Produktionssystemen*. Aachen: Shaker, 1997.
- Dolezalek 1973** DOLEZALEK, C. M.: *Planung von Fabrikanlagen*. Berlin: Springer, 1973.
- Drew et al. 2004** DREW, J.; MCCALLUM, B.; ROGENHOFER, S.: *Journey to Lean: making operational change stick*. Hampshire: Palgrave Macmillan, 2004.
- Duffie & Falu 2002** DUFFIE, N.; FALU, I.: Control-Theoretic Analysis of a Closed-Loop PPC System. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (2002), S. 379-382.
- Duffie 2007** DUFFIE, N. A.: Challenges in Design of Heterarchical Controls for Dynamic Logistic Systems. In: HAASIS, H.-D.; et al. (Hrsg.): *Dynamics in Logistics*. Berlin: Springer, 2007, S. 3-24.

- Duffie et al. 2008** DUFFIE, N. A.; ROY, D.; SHI, L.: Dynamic modeling of production networks of autonomous work systems with local capacity control In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008), S. 463-466.
- Dyckhoff & Spengler 2007** DYCKHOFF, H.; SPENGLER, T.: *Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure*. Berlin: Springer, 2007.
- Ebben et al. 2005** EBBEN, M. J. R.; HANS, E. W.; OLDE WEGHUIS, F. M.: Workload based order acceptance in job shop environments. In: *OR Spectrum* 27 (2005), S. 107-122.
- Eberwein 1989** EBERWEIN, R.-D.: *Organisation flexibel automatisierter Produktionssysteme*. Heidelberg: Physica-Verlag, 1989.
- Eckstein 2006** ECKSTEIN, P. P.: *Repetitorium Statistik: Deskriptive Statistik-stochastik-induktive Statistik*. Wiesbaden: Gabler, 2006.
- Ehrenreich et al. 1995** EHRENREICH, R. M.; CRUMLEY, C. L.; LEVY, J. E.: *Heterarchy and the analysis of complex societies*. Arlington, Va.: American Anthropological Association, 1995.
- EIMaraghy et al. 2009** ELMARAGHY, H.; AZABA, A.; SCHUH, G.; PULZ, C.: Managing variations in products, processes and manufacturing systems In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009), S. 441-446
- Enderlein 1998** ENDERLEIN, H.: *Verbundprojekt: Robuste Produktionsprozesse - Teilvorhaben: Forschung und Transfer : Abschlussbericht*. Chemnitz: iBF, 1998.
- Engelhardt-Nowitzki 2006** ENGELHARDT-NOWITZKI, C.: *Ausbildung in der Logistik*. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2006.
- Engelhardt-Nowitzki 2008** ENGELHARDT-NOWITZKI, C.: *Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement: Erfolgsfaktoren und Implementierungsszenarien*. Wiesbaden: Gabler, 2008.
- Erlach 2010** ERLACH, K.: *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*. Berlin: Springer, 2010.
- Eversheim 2002** EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung*. Berlin: Springer, 2002.
- Eversheim & Brankamp 2006** EVERSHEIM, W.; BRANKAMP, K.: Fertigungsplanung und -steuerung (ab 1965). In: EVERSHEIM, W.; et al. (Hrsg.): *100 Jahre Produktionstechnik Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen von 1906 bis 2006*. Berlin: Springer, 2006, S. 449-466.
- Eversheim 1996** EVERSHEIM, W. S., G.: *Betriebshütte: Produktion und Management - Teil 1*. Berlin: Springer, 1996.
- Fairtlough & Clegg 2007** FAIRTLOUGH, G.; CLEGG, S.: *The Three Ways of Getting Things Done: Hierarchy, Heterarchy & Responsible Autonomy in Organizations*. Axminster: Triarchy Press, 2007.
- Faupel 2009** FAUPEL, T.: *Einsatz von RFID zur Optimierung dezentraler Materialfluss-Steuerung ein Informationssystem zur Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung in Kanban*. Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität, Wirtschafts- und Verhaltenswissenschaftlichen Fakultät, Diss., 2009
- Fernandes & do Carmo-Silva 2006** FERNANDES, N. O.; DO CARMO-SILVA, S.: Generic POLCA—A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing. In: *International Journal of Production Economics* 104 (2006), S. 74-84.
- Fischer 2007** FISCHER, A.: *Modellbasierte Wirkbeschreibung von Prioritätsregeln*. Hannover, Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2007
- Fischer 2005** FISCHER, D.: *Methode zur Komplexitätsreduzierung der Auftragssteuerung in der Elektronikmontage*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2005.

- Fitzek 2005** FITZEK, D.: *Anlaufmanagement in Netzwerken Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie*. Bern: Haupt, 2005.
- Franke 2006** FRANKE, W.: *RFID: Leitfaden für die Logistik*. Wiesbaden: Gabler, 2006.
- Fredendalla et al. 2010** FREDENDALLA, L. D.; OJHAB, D.; WAYNE, J.: Concerning the theory of workload control. In: *European Journal of Operational Research* 201 (2010), S. 99-111.
- Freitag 2005** FREITAG, M.: *Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der nichtlinearen Dynamik*. Berlin: GITO, 2005.
- Frischke 2006** FRISCHKE, S.: *Simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung flexibler Produktionsbereiche auf taktischer Ebene*. Cottbus, Brandenburgischen Technischen Universität, Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Diss., 2006
- Fuß 2008** FUß, P. (Hrsg.): *Die Automobilindustrie im Umbruch: Perspektiven für den Automobilstandort Deutschland*. Stuttgart: Ernst&Young, 2008. Studie
- Gatze 2010** GATZE, U.: *Kostenrechnung und Kostenmanagement*. Berlin: Springer, 2010.
- Gebhard 2009** GEBHARD, M.: *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*. Eichstätt-Ingolstadt, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Lehrstuhl für ABWL, Diss., 2009
- Gehrke 2003** GEHRKE, G.: *Kundenbindungsstrategien industrieller Zulieferer : eine empirische Studie in der Automobilzulieferindustrie*. Aachen: Shaker, 2003.
- Geiger 2005** GEIGER, M. J.: *Multikriterielle Ablaufplanung*. Wiesbaden: Gabler, 2005
- Geitner 1995** GEITNER, U. W.: *Methoden der Produktionsplanung und -steuerung*. München: Hanser, 1995.
- Geraghty & Heavey 2005** GERAGHTY, J.; HEAVEY, C.: A review and comparison of hybrid and pull-type production control strategies. In: *OR Spektrum* 27 (2005), S. 435-457.
- Gerlach & Dickmann 2007** GERLACH, J.; DICKMANN, E.: Kanban-Karten. In: DICKMANN, P. (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss*. Berlin: Springer, 2007, S. 191-200.
- Gienke & Kämpf 2007** GIENKE, H.; KÄMPF, R.: *Handbuch Produktion: Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling*. München: Hanser, 2007.
- Gierth 2009** GIERTH, M. A.: *Beurteilung der Selbststeuerung logistischer Prozesse in der Werkstattfertigung*. Aachen, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2009
- Goldratt & Cox 1992** GOLDRATT, E. M.; COX, J.: *The goal: a process of ongoing improvement*. Great Barrington, MA: North River Press, 1992.
- Gonzalez & Framinan 2009** GONZALEZ-R., P.; FRAMINAN, J.: The pull evolution: from Kanban to customised token-based systems. In: *Production Planning & Control* 20 (2009), S. 276-287.
- Graf 1991** GRAF, K.-R.: *Systematische Untersuchung von Einflussgrößen einer Fertigungssteuerung nach dem Zieh- und Schiebeprinzip*. Karlsruhe: ifab, 1991.
- Graves 1988** GRAVES, S. C.: Safety Stocks in Manufacturing Systems. In: *International Journal of Manufacturing and Operations Management* 1 (1988), S. 67-101.
- Gronau & Lindemann 2009** GRONAU, N.; LINDEMANN, M.: Wandlungsfähigkeit der Produktion: von der Flexibilität zur Zukunftsfähigkeit. In: *Industrie Management* 25 (2009), S. 21-25.

- Grote & Feldhusen 2007** GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J.: *Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer, 2007.
- Grundig 2008** GRUNDIG, C.-G.: *Fabrikplanung: Planungssystematik- Methoden-Anwendungen*. München: Hanser, 2008.
- Gstettner 1998** GSTETTNER, S.: *Leistungsanalyse von Produktionssteuerungssystemen*. Heidelberg: Physica-Verlag, 1998.
- Gudehus 2005** GUDEHUS, T.: *Logistik : Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. Berlin: Springer, 2005.
- Guiffrida & Nagi 1998** GUIFFRIDA, A. L.; NAGI, R.: Fuzzy set theory applications in production management research: a literature survey. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 9 (1998), S. 39-56.
- Günther & Tempelmeier 1994** GÜNTHER, H.-O.; TEMPELMEIER, H.: *Stand und Entwicklungstendenzen von Systemen und Verfahren der Produktionssteuerung*. Berlin: TU Berlin, Wirtschaftswiss. Dokumentation, Fachbereich 14, 1994.
- Günther & Tempelmeier 2005** GÜNTHER, H.-O.; TEMPELMEIER, H.: *Produktion und Logistik*. Berlin: Springer, 2005.
- Günthner 2008** GÜNTHNER, W. A.: Ereignisorientierte Logistik – Ein neuer Ansatz zur Steuerung von Logistiksystemen. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 373-390.
- Gutenberg 1951** GUTENBERG, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Band 1: Die Produktion*. Berlin: Springer, 1951.
- Hab & Wagner 2006** HAB, G.; WAGNER, R.: *Projektmanagement in der Automobilindustrie : effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette*. Wiesbaden: Gabler, 2006.
- Hackstein 1989** HACKSTEIN, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS) : ein Handbuch für die Betriebspraxis*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- Hahn 1996** HAHN, D.: Strategische Produktionsplanung. In: KERN, W.; et al. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996.
- Hall 1986** HALL, R. W.: Synchro MRP: Combining Kanban and MRP. The Yamaha PYMAC System. In: APICS (Hrsg.): *Driving the productivity machine: Production Planning and Control in Japan*, 1986, S. 43-56.
- Haller 1999** HALLER, M.: *Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der variantenreichen Großserienproduktion*. München, TU München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 1999
- Hamann 2008** HAMANN, T.: *Lernfähige intelligente Produktionsregelung*. Bremen, Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Diss., 2008
- Hegenscheidt 2003** HEGENSCHIEDT, M.: *Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- Heinemeyer 1988** HEINEMEYER, W.: Die Planung und Steuerung des logistischen Prozesses mit Fortschrittszahlen. In: ADAM, D. (Hrsg.): *Systeme zur Fertigungssteuerung*. Wiesbaden: Gabler, 1988, S. 5-32.
- Hendry et al. 1998** HENDRY, L. C.; KINGSMAN, B. G.; CHEUNG, P.: The effect of workload control (WLC) on performance in make-to-order companies. In: *Journal of Operations Management* 16 (1998), S. 63-75.
- Henrich 2005** HENRICH, P.: *Applicability aspects of workload control in job shop production*. Groningen, Universität, Fakultät für Betriebswirtschaftslehre, Diss., 2005

- Henrich et al. 2004** HENRICH, P.; LAND, M.; GAALMAN, G.: Exploring applicability of the workload control concept. In: *International Journal of Production Economics* 90 (2004), S. 187-198.
- Herberg et al. 2009** HERBERG, D.; GABARDI, E.; SCHIEMENZ, M.; WEHSARG, D.; PAPIER, F.; HUBER, F. (Hrsg.): *Der Trend zu energieeffizienten Pkw: Implikationen für die deutsche Automobilindustrie*. Stuttgart: McKinsey&Company, 2009. Studie
- Herrmann 2006** HERRMANN, J. W.: A History of Production Scheduling. In: *International Series in Operations Research and Management Science* 89 (2006), S. 1-22.
- Hesser 2002** HESSER, W.: *Standardization as a management tool and factor in social integration*. Hamburg: Professur für Normenwesen und Maschinzeichnen, Univ. der Bundeswehr, 2002.
- Hirsch 1992** HIRSCH, B. E.: *CIM in der Unikatfertigung und -montage*. Berlin: Springer, 1992.
- Hochreiter 1999** HOCHREITER, T. A.: *A comparative simulation study of Kanban, CONWIP, and MRP manufacturing control systems in a flowshop*. Florida, State University System of Florida, Graduate School, 1999
- Holm 1973** HOLM, U. C.: *Einflussgrößen auf die Produktionssteuerung von Betrieben der Einzel- und Kleinserienfertigung*. Berlin, Technische Universität, Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Diss., 1973
- Hompel et al. 2007** HOMPEL, M. T.; BÜCHTER, H.; FRANZKE, U.: *Identifikationssysteme und Automatisierung*. Berlin: Springer, 2007.
- Hübner 2001** HÜBNER, F.: *Das große Fremdwörterbuch, neue Rechtschreibung*. München: Axel Juncker Verlag, 2001.
- Hülsmann & Austerschulte 2008** HÜLSMANN, M.; AUSTERSCHULTE, L.: Selbststeuerung — Ein Ansatz zur Balancierung von Flexibilität und Stabilität organisationaler Kompetenzen? In: EISENKOPF, A.; et al. (Hrsg.): *Strategisches Kompetenz-Management in der Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Gabler, 2008, S. 23-43.
- Hüttenrauch & Baum 2008** HÜTTENRAUCH, M.; BAUM, M.: *Effiziente Vielfalt: Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Berlin: Springer, 2008.
- Irastorza & Deane 1974** IRASTORZA, J.; DEANE, R.: A loading and balancing methodology for job-shop control. In: *AIEE Transactions* 6 (1974), S. 302-307.
- Jing-Wen 2003** JING-WEN, L.: Simulation-based comparison of push and pull systems in a job-shop environment considering the context of JIT implementation. In: *International Journal of Production Research* 41 (2003), S. 427-447.
- Jodlbauer 2007** JODLBAUER, H.: *Produktionsoptimierung Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung*. Berlin: Springer, 2007.
- Jostock & Bley 1994** JOSTOCK, J.; BLEY, H.: Von der Fertigungssteuerung zu einer ereignisorientierten Fertigungsregelung. In: *VDI Z* 136 (1994), S. 30-35.
- Junge et al. 2003** JUNGE, K.; MILDENBERGER, U.; WITTMANN, J.: *Perspektiven und Facetten der Produktionswirtschaft*. Wiesbaden: DUV, 2003.
- Junior & Filho 2010** JUNIOR, M. L.; FILHO, M. G.: Variations of the kanban system: Literature review and classification. In: *International Journal of Production Economics* 125 (2010), S. 13-21.
- Keim & Buddensiek 1992** KEIM, H.; BUDDENSIEK, W.: *Planspiel, Rollenspiel, Fallstudie: zur Praxis und Theorie lernaktiver Methoden*. Köln: Wirtschaftsverl. Bachem, 1992.
- Kienzle 2008** KIENZLE, F.: Produktentstehungsprozess bei Systemlieferanten - Erfolgsfaktor Musterfertigung. In: IBF (Hrsg.): *TBI 2008*. Chemnitz, 2008

- Kinkel & Lay 2004** KINKEL, S.; LAY, G.: *Automobilzulieferer in der Klemme vom Spagat zwischen strategischer Ausrichtung und Auslandsorientierung*. Karlsruhe: ISI, 2004.
- Kirst 2008** KIRST, P.: Lieferantenintegration im Produktentstehungsprozess In: SCHUH, G.; et al. (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*. Berlin: Springer, 2008, S. 93-105.
- Klaus 2009** KLAUS, P.: Logistics research: a 50 years' march of ideas. In: *Logistics Research 1* (2009), S. 53-65.
- Kletti 2006** KLETTI, J.: *MES - Manufacturing Execution System : moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung*. Berlin: Springer, 2006.
- Klippert 2002** KLIPPERT, H.: *Planspiele : Spielvorlagen zum sozialen, politischen und methodischen Lernen in Gruppen*. Basel: Beltz, 2002.
- Klug 2000** KLUG, F.: *Konzepte zur Fertigungssegmentplanung unter der besonderen Berücksichtigung von Kostenaspekten*. München: Utz, 2000.
- Köbernik 1999** KÖBERNIK, G.: *Moderne Methoden für die Fertigungssteuerung bei Werkstattfertigung*. Lohmar: Eul, 1999.
- Köhler 1959** KÖHLER, D.: *Organisation der innerbetrieblichen Materialbewegung*. Berlin: Duncker & Humblot, 1959.
- Kolditz 2009** KOLDITZ, J.: *Vorgehensmodell zur Erstellung von Fachkonzepten für selbststeuernde produktionslogistische Prozesse*. Bremen, Universität Bremen, Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme, Diss., 2009
- Königsberg & McKay 2010** KÖNIGSBERG, E.; MCKAY, K. N.: A taxonomy for understanding the origins of production control. In: *Production Planning & Control 21* (2010), S. 437-451.
- Korge et al. 2009** KORGE, A.; LENTES, H.-P.; WENGLER, M.; HARTMANN, T.; RÖHRLE, J.; KAMMÜLLER, M.: Ganzheitliche Produktionssysteme. In: BULLINGER, H.-J.; et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung* Berlin: Springer, 2009, S. 569-596.
- Kosturiak & Gregor 1995** KOSTURIAK, J.; GREGOR, M.: *Simulation von Produktionssystemen*. Berlin: Springer, 1995.
- Krallmann et al. 2002** KRALLMANN, H.; FRANK, H.; GRONAU, N.: *Systemanalyse im Unternehmen Vorgehensmodelle, Modellierungsverfahren und Gestaltungsoptionen*. München: Oldenbourg, 2002.
- Kresken & Baumann 2006** KRESKEN, T.; BAUMANN, M.: Selbstorganisierende Produktionssteuerung reagiert flexibel auf ungeplante Ereignisse. In: *MM* (2006), S. 32-35.
- Krishnamurthy & Suri 2009** KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R.: Planning and implementing POLCA: a card-based control system for high variety or custom engineered products. In: *Production Planning & Control 20* (2009), S. 596-610.
- Krishnamurthy et al. 2004** KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R.; VERNON, M.: Re-Examining the Performance of MRP and Kanban Material Control Strategies for Multi-Product Flexible Manufacturing Systems. In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems 16* (2004), S. 123-150.
- Kuhlmann 1994** KUHLMANN, T.: *Konzeption und Entwicklung eines Systems zur Koordinierung der Produktion komplexer Unikate*. Bremen: Universität Bremen, 1994.
- Kuhn 1993** KUHN, A.: *Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 1993.
- Kuhn 2002** KUHN, A.: *Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten Ergebnisbericht der Untersuchung "fast ramp up"*. Dortmund: Verl. Praxiswissen, 2002.

- Kurbel 2005** KURBEL, K.: *Produktionsplanung und -steuerung im enterprise resource planning und supply chain management*. München: Oldenbourg, 2005.
- Kurek 2004** KUREK, R.: *Erfolgsstrategien für Automobilzulieferer : wirksames Management in einem dynamischen Umfeld*. Berlin: Springer, 2004.
- Lamnek 2005** LAMNEK, S.: *Qualitative Sozialforschung : Lehrbuch*. Basel: Beltz, 2005.
- Lance & Williams 1966** LANCE, G.-H.; WILLIAMS, W.-T.: A General Theory of Classification Sorting Strategies – Vol.1: Hierarchical Systems. In: *Computer Journal* (1966), S. 373-380.
- Land 2006** LAND, M.: Parameters and sensitivity in workload control. In: *International Journal of Production Economics* 104 (2006), S. 625-638.
- Land & Gaalman 1996** LAND, M.; GAALMAN, G.: Workload control concepts in job shops: A critical assessment. In: *International Journal of Production Economics* 46-47 (1996), S. 535-548.
- Land 2004** LAND, M. J.: *Workload control in job shops, grasping the tap*. Ridderkerk: Labyrinth Publications, 2004.
- Land 2008** LAND, M. J.: Cobacabana (Control of balance by card-based navigation) - A card based system for job shop control. In: *International Journal of Production Economics* 117 (2008), S. 97-103.
- Land & Gaalman 1998** LAND, M. J.; GAALMAN, G. J. C.: The performance of workload control concepts in job shops: Improving the release method. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS* 56-57 (1998), S. 347-364.
- Laux & Liermann 1993** LAUX, H.; LIERMANN, F.: *Grundlagen der Organisation : die Steuerung von Entscheidungen als Grundproblem der Betriebswirtschaftslehre*. Berlin: Springer, 1993.
- Letmathe 2002** LETMATHE, P.: *Flexible Standardisierung : ein dezentrales Produktionsmanagement-Konzept für kleine und mittlere Unternehmen*. Wiesbaden: DUV, 2002.
- Li & Meerkov 2000** LI, J.; MEERKOV, S. M.: Production variability in manufacturing systems: Bernoulli reliability case. In: *Annals of Operations Research* 93 (2000), S. 299–324.
- Liepelt 2003** LIEPELT, B.: *Aufbau eines Instrumentes für den Leistungsvergleich von Organisationsstrukturen*. Stuttgart, WiKu Verlag, 2003
- Lieske 2005** LIESKE, O.: *Fertigungssteuerung mit Multiagentensystemen bei kundenauftragsorientierter Fertigung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- Liker 2004** LIKER, J. K.: *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New York: McGraw-Hill, 2004.
- Lindemann & Gronau 2009** LINDEMANN, M.; GRONAU, N.: Gestaltung marktorientierter Produktionssysteme In: SPECHT, D. (Hrsg.): *Weiterentwicklung der Produktion*. Berlin: Springer, 2009, S. 43-59.
- Lödding 2001** LÖDDING, H.: *Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung*. Hannover, Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Diss., 2001
- Lödding 2008a** LÖDDING, H.: Ein Modell der Fertigungssteuerung – Logistische Ziele systematisch erreichen. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 219-233.
- Lödding 2008b** LÖDDING, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. Berlin: Springer, 2008.
- Lödding et al. 2003** LÖDDING, H.; YU, K. W.; WIENDAHL, H. P.: Decentralized WIP-oriented manufacturing control (DEWIP). In: *Production Planning & Control* 14 (2003), S. 42–54.

- Lohse 2002** LOHSE, A.: *Auftragsmanagement von komplexen Produkten in agilen Unternehmensstrukturen*. Aachen: Shaker, 2002.
- Lopitzsch 2005** LOPITZSCH, J. R.: *Segmentierte adaptive Fertigungssteuerung*. Hannover, Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Diss., 2005
- MacCarthy 2006** MACCARTHY, B.: Organizational, Systems and Human Issues in Production Planning, Scheduling and Control. In: *International Series in Operations Research and Management Science* 89 (2006), S. 59-90.
- Mainzer 2008** MAINZER, K.: *Komplexität*. Paderborn: UTB, 2008.
- Martin 2009** MARTIN, H.: *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- März et al. 2010** MÄRZ, L.; KRUG, W.; ROSE, O.; WEIGERT, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin: Springer, 2010.
- Mayer 2005** MAYER, H.: *Beschreibende Statistik*. München: Hanser, 2005.
- McAuley 1972** MCAULEY, J.: Machine Grouping for Efficient Production. In: *The Production Engineer* (1972), S. 52-57.
- McCulloch & Pitts 1943** MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. In: *Bulletin of mathematical biology* 52 (1943), S. 1-2.
- McFarlane & Bussmann 2000** MCFARLANE, D. C.; BUSSMANN, S.: Developments in holonic production planning and control. In: *Production Planning & Control* 11 (2000), S. 522-536.
- McKay 2003** MCKAY, K. N.: Historical survey of manufacturing control practices from a production research perspective. In: *International Journal of Production Research* 41 (2003), S. 411-426.
- Meißner 2009** MEIßNER, S.: *Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung*. München, TU München, Fakultät für Maschinenwesen, 2009
- Mertins et al. 1992** MERTINS, K.; ALBRECHT, R.; STEINBERGER, V.: *Werkstattsteuerung - Werkstattmanagement : Wegweiser für die Einführung*. München: Hanser, 1992.
- Meyer & Kittel-Wegner 2002** MEYER, J.-A.; KITTEL-WEGNER, E.: *Die Fallstudie in der betriebswirtschaftlichen Forschung und Lehre*. Flensburg: Stiftungslehrstuhl für ABWL, 2002.
- Monch 2007** MONCH, L.: Simulation-based benchmarking of production control schemes for complex manufacturing systems. In: *Control Engineering Practice* 15 (2007), S. 1381-1393.
- Mönch 2006** MÖNCH, L.: *Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme*. Wiesbaden: DUV, 2006.
- Monden 1998** MONDEN, Y.: *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time*. Norcross: Engineering & Management Press, 1998.
- Moser & Engell 1992** MOSER, M.; ENGELL, S.: A survey of priority rules for FMS scheduling and their performance for the benchmark problem. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 31st IEEE Conference*. Tucson, 1992
- Mula et al. 2006** MULA, J.; POLERA, R.; GARCÍA-SABATERA, J. P.; LARIOA, F. C.: Models for production planning under uncertainty: A review. In: *International Journal of Production Economics* 103 (2006), S. 271-285
- Müller et al. 2004** MÜLLER, E.; JANSEN, R.; MANN, H.; HARMS, S.; RIEGEL, J.; FINGER, M.: *Integration der Transpondertechnologie zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der operativen Produktionssteuerung*. Chemnitz: iBF, 2004.

- Müller et al. 2009a** MÜLLER, E.; ENGELMANN, J.; LÖFFLER, T.; STRAUCH, J.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin: Springer, 2009.
- Müller et al. 2009b** MÜLLER, E.; RIEDEL, R.; KIENZLE, F.: Zieltermine zuverlässig prognostizieren: Näherungsweise Durchlaufterminierung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. In: *PRODUCTIVITY Management* 14 (2009), S. 33-36.
- Müller et al. 2009c** MÜLLER, E.; WUNDERLICH, R.; KIENZLE, F.: Musterfertigung im Produktentstehungsprozess von Systemlieferanten. In: *ZWF* 104 (2009), S. 396-400.
- Müller et al. 2009d** MÜLLER, S.; ROTH, A.; SCHMIDT, N.: *Märkte, Anwendungsfelder und Technologien in der Logistik: Ergebnisse und Reflexion von 20 Jahren Logistikforschung*. Wiesbaden: Gabler, 2009.
- Müller & Ackermann 2007** MÜLLER, E.; ACKERMANN, J.: Modellierung, Planung und Gestaltung der Logistikstrukturen kompetenzzellenbasierter Netze. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 305-321.
- Nachtwey 2010** NACHTWEY, A.: *Methodischer Beitrag zur Betriebsanalyse komplexer Produktionssysteme*. Chemnitz, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2010
- Nagendra & Das 1999** NAGENDRA, P. B.; DAS, S. K.: MRP/sfx: a kanban-oriented shop floor extension to MRP In: *Production Planning & Control* 10 (1999), S. 207-218.
- Näser & Müller 2007** NÄSER, P.; MÜLLER, E.: Integrierte Planungsmethodik des Anlaufmanagements - Entscheidungsunterstützung zur Planung von Anlaufmanagementprozessen in der Automobilindustrie. In: *Wt Werkstattstechnik* 97 (2007), S. 363-368.
- Nyhuis 2003** NYHUIS, P.: *Logistische Kennlinien : Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Berlin: Springer, 2003.
- Nyhuis 2008** NYHUIS, P.: Produktionskennlinien – Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 185-218.
- Nyhuis et al. 2006** NYHUIS, P.; BEGEMANN, C.; BERKHOL, D.; HASENFUß, K.: Konfiguration der Fertigungssteuerung. In: *Wt Werkstattstechnik* 96 (2006), S. 195-199.
- Nyhuis et al. 2009a** NYHUIS, P.; HARTMANN, W.; KENNEMANN, M.; MÜNZBERG, B.: Produktionsregelung mit logistischen Kennlinien. In: *Wt Werkstattstechnik* 99 (2009), S. 239-243.
- Nyhuis & Münzberg 2010** NYHUIS, P.; MÜNZBERG, B.: Konfiguration der Fertigungssteuerung - Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen. In: *Wt Werkstattstechnik* 100 (2010), S. 285-290.
- Nyhuis et al. 2009b** NYHUIS, P.; MÜNZBERG, B.; KENNEMANN, M.: Configuration and regulation of PPC. In: *Production Engineering* 3 (2009), S. 287-294.
- Nyhuis & Wiendahl 2004** NYHUIS, P.; WIENDAHL, H.-P.: 3-Sigma PPC: A Holistic Approach for Managing the Logistic Performance of Production Systems In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53 (2004), S. 371-376
- Nyhuis & Wiendahl 2009** NYHUIS, P.; WIENDAHL, H.-P.: *Fundamentals of Production Logistics: Theory, Tools and Applications*. Berlin: Springer, 2009.
- Ohno 1993** OHNO, T.: *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt: Campus-Verl., 1993.
- Okubo et al. 2000** OKUBO, H.; JIAHUA, W.; ONARI, H.: Characteristics of distributed autonomous production control. In: *International Journal of Production Research* 38 (2000), S. 4205-4216.

- Olhager & Persson 2006** OLHAGER, J.; PERSSON, F.: Simulating production and inventory control systems: a learning approach to operational excellence. In: *Production Planning and Control* 17 (2006), S. 113-127.
- Onan & Sennaroglu 2009** ONAN, K.; SENNAROGLU, B.: Comparative study of production control systems through simulation. In: MASTORAKIS, N.; SAKELLARIS, J. (Hrsg.): *Advances in Numerical Methods*. Berlin: Springer, 2009, S. 67-78.
- Oosterman et al. 2000** OOSTERMAN, B.; LAND, M.; GAALMAN, G.: The influence of shop characteristics on workload control. In: *International Journal of Production Economics* 68 (2000), S. 107-119.
- Orth 1997** ORTH, M. J.: *A comparison of push/pull hybrid manufacturing control strategies*. 1997
- Ounnar & Pujo 2009** OUNNAR, F.; PUJO, P.: Pull control for job shop: holonic manufacturing system approach using multicriteria decision-making In: *Journal of Intelligent Manufacturing* (2009).
- Pawellek 2007** PAWELLEK, G.: *Produktionslogistik: Planung- Steuerung- Controlling*. München: Hanser Verlag, 2007.
- Pierreval & Durieux-Paris 2007** PIERREVAL, H.; DURIEUX-PARIS, S.: Robust simulation with a base environmental scenario. In: *European Journal of Operational Research* 182 (2007), S. 783-793.
- Popper 1994** POPPER, K. R.: *Alles Leben ist Problemlösen - Über Erkenntnis, Geschichte und Politik*. München: Piper, 1994.
- Rabe et al. 2008** RABE, M.; SPIECKERMANN, S.; WENZEL, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer, 2008.
- Rabus 1980** RABUS, G.: *Typologie zum überbetrieblichen Vergleich von Fertigungssteuerungsverfahren im Maschinenbau*. Berlin: Springer, 1980.
- Ramsauer 1997** RAMSAUER, C.: *Dezentrale PPS-Systeme neue Strukturen bei hoher Innovationsdynamik*. Wiesbaden: Gabler, 1997.
- Ratering & Duffle 2003** RATERING, A. M.; DUFFLE, N. A.: Design and Analysis of a Closed-Loop Single-Workstation PPC System In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (2003), S. 355-358.
- REFA 1985** REFA: *Methodenlehre der Planung und Steuerung*. München: Hanser, 1985.
- Reif 2010** REIF, K.: *Dieselmotor-Management im Überblick: Einschließlich Abgastechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- Riedel 2005** RIEDEL, R.: *Heuristik zur Gestaltung ganzheitlicher Anreizsysteme aus soziotechnischer Sicht*. Chemnitz, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2005
- Riezebos et al. 2009** RIEZEBOS, J.; KLINGENBERG, W.; HICKS, C.: Lean Production and information technology: Connection or contradiction? In: *Computers in Industry* 60 (2009), S. 237-247.
- Riezebos & Klingenberg 2009** RIEZEBOS, J.; KLINGENBERG, W.: Advancing lean manufacturing, the role of IT. In: *Computers in Industry* 60 (2009), S. 235-236
- Risse 2003** RISSE, J.: *Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie ein Gestaltungsrahmen für ein logistikorientiertes Anlaufmanagement*. Bern: Haupt, 2003.
- Röhm 1997** RÖHM, E.: *Auswahl von Leitständen zur Produktionssteuerung auf der Basis dynamischer Systemvergleiche*. Aachen: Shaker, 1997.

- Romberg et al. 2005** ROMBERG, A.; HAAS, M.; HERMENAU, D.: *Der Anlaufmanager effizient arbeiten mit Führungssystem und workflow ; von der Produktidee bis zur Serie*. Stuttgart: LOG\_X, 2005.
- Rose 2003** ROSE, O.: Comparison of Due-date Oriented Dispatch Rules in Semiconductor Manufacturing. In: IERC (Hrsg.): *Proceedings of the 2003 Industrial Engineering Research Conference*. Portland, 2003
- Rother & Shook 2003** ROTHER, M.; SHOOK, J.: *Learning to See - value-stream mapping to create value and eliminate muda*. Cambridge: Lean Enterprise Institute, 2003.
- S. H. Suyu et al. 2010** S. H. SUYU; P. J. MARSHALL; M. W. AUGER; S. HILBERT; R. D. BLANDFORD; L. V. E. KOOPMANS; FASSNACHT, C. D.; TREU., T.: Dissecting the Gravitational lens B1608+656. II. Precision Measurements of the Hubble Constant, Spatial Curvature, and the Dark Energy Equation of State. In: *The Astrophysical Journal* 711 (2010), S. 201-221.
- Sachs 2003** SACHS, L.: *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Berlin: Springer, 2003.
- Sader 2005** SADER, B. H.: *Development and application of a new modeling technique for production control schemes in manufacturing systems*. Provo, Brigham Young University, Mechanical Engineering Department, Diss., 2005
- Samy & ElMaraghy 2010** SAMY, S. N.; ELMARAGHY, H. A.: Measuring the Complexity of Manual Products Assembly. In: CIRP (Hrsg.): *43rd CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Wien, 2010
- Sauer 2002** SAUER, J.: *Multi-Site Scheduling - Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen*. Oldenburg, Universität Oldenburg, Fachbereich Wirtschaftsinformatik, 2002
- Schendera 2009** SCHENDERA, C. F. G.: *Clusteranalyse mit SPSS: Mit Faktorenanalyse*. München: Oldenbourg 2009.
- Schenk & Wirth 2004** SCHENK, M.; WIRTH, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb- Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Berlin: Springer, 2004.
- Schenk et al. 2009** SCHENK, M.; WIRTH, S.; MÜLLER, E.: *Factory Planning Manual*. Berlin: Springer, 2009.
- Scherer 1998** SCHERER, E.: *Shop floor control: a systems perspective: from deterministic models towards agile operations management*. Berlin: Springer, 1998.
- Schieck 2008** SCHIECK, A.: *Internationale Logistik: Objekte, Prozesse und Infrastrukturen grenzüberschreitender Güterströme*. München: Oldenbourg, 2008.
- Schleyer & Furmans 2008** SCHLEYER, M.; FURMANS, K.: Modeling and Performance Analysis of Material Flow Systems in Discrete Time Domain In: ENGELHARDT-NOWITZKI, C.; et al. (Hrsg.): *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation: State-of-the-Art und innovative Konzepte* Wiesbaden: Gabler, 2008, S. 129-143.
- Schlick et al. 2010** SCHLICK, C.; LUCZAK, H.; BRUDER, R.: *Arbeitswissenschaft*. Berlin: Springer, 2010.
- Schmid & Grosche 2008** SCHMID, S.; GROSCHE, P. (Hrsg.): *Management internationaler Wertschöpfung in der Automobilindustrie: Strategie, Struktur und Kultur*. Bielefeld: Bertelsmann Stiftung, 2008. Studie
- Schmigalla 1970** SCHMIGALLA, H.: *Methoden zur optimalen Maschinenanordnung*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970.
- Schmigalla 1995** SCHMIGALLA, H.: *Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge*. München: Hanser 1995.

- Schneider et al. 2005** SCHNEIDER, H.; BUZACOTT, J. A.; RÜCKER, T.: *Operative Produktionsplanung und -steuerung: Konzepte und Modelle*. München: Oldenbourg, 2005.
- Schneider 2004** SCHNEIDER, M.: *Logistische Fertigungsbereichskennlinien*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004.
- Schneider 1999** SCHNEIDER, R.: Partizipation an der IT-Entwicklung. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): *Effizientes Informationsmanagement in dezentralen Organisationsstrukturen*. Berlin: Springer, 1999, S. 73-86.
- Scholz-Reiter et al. 2008** SCHOLZ-REITER, B.; BEER, C. D.; FREITAG, M.; HAMANN, T.; REKERSBRINK, H.; TERVO, J. T.: Dynamik logistischer Systeme In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 109-138.
- Scholz-Reiter et al. 2007** SCHOLZ-REITER, B.; DE BEER, C.; BOSE, F.; WINDT, K. G.: Evolution in der Logistik Selbststeuerung logistischer Prozesse. In: *VDI-Berichte 1978 (2007)*, S. 179-190.
- Scholz-Reiter et al. 2005** SCHOLZ-REITER, B.; HÖHNS, H.; KÖNIG, F.: Intelligentes Änderungsmanagement. In: WILDEMAN, H. (Hrsg.): *Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionsprozess : Produktreife - Produktneuanläufe - Produktionsauslauf*. München: TCW, Transfer-Centrum, 2005.
- Scholz-Reiter et al. 2009a** SCHOLZ-REITER, B.; GÖRGES, M.; PHILIPP, T.: Autonomously controlled production systems - Influence of autonomous control level on logistic performance. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009)*, S. 395-398.
- Scholz-Reiter et al. 2009b** SCHOLZ-REITER, B.; TOONEN, C.; TERVO, J. T.: Frühzeitige Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Werkstattfertigungen. In: *Industrie Management 25 (2009)*, S. 41-44.
- Scholz-Reiter & Kluge 2009** SCHOLZ-REITER, B.; KLUGE, E. M.: Technologiegetriebene Veränderungen bewältigen. In: *Industrie Management 25 (2009)*, S. 9-12.
- Scholz-Reiter et al. 2010** SCHOLZ-REITER, B.; REKERSBRINK, H.; GÖRGES, M.: Dynamic flexible flow shop problems - Scheduling heuristics vs. autonomous control In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology (2010)*.
- Schomburg 1980** SCHOMBURG, E.: *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*. Aachen, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 1980
- Schönsleben 2000** SCHÖNSLEBEN, P.: Varying concepts of planning and control in enterprise logistics. In: *Production Planning & Control 11 (2000)*, S. 2-6.
- Schönsleben 2002** SCHÖNSLEBEN, P.: *Integrales Logistikmanagement : Planung und Steuerung von umfassenden Geschäftsprozessen*. Berlin: Springer, 2002.
- Schubert 1964** SCHUBERT, G.: *Organisation des Musterbaus in Betrieben mit Serienfertigung*. Berlin: VEB Verl. Technik, 1964.
- Schuff 1984** SCHUFF, G.: *Bewältigung von Planabweichungen bei nachfrage- und lagergebundener Kleinserienfertigung durch eine dynamische Fertigungsplanung und -steuerung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984.
- Schuh 2006** SCHUH, G.: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin: Springer, 2006.
- Schuh & Gierth 2006a** SCHUH, G.; GIERTH, A.: Aachener PPS-Modell. In: SCHUH, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin: Springer, 2006, S. 11-27.

- Schuh & Gierth 2006b** SCHUH, G.; GIERTH, A.: Einführung. In: SCHUH, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin: Springer, 2006, S. 3-11.
- Schuh et al. 2005** SCHUH, G.; KAMPKER, A.; FRANZKOCH, B.: Anlaufmanagement - Kosten senken – Anlaufzeit verkürzen – Qualität sichern. In: *Wt Werkstattstechnik* 95 (2005), S. 405-409.
- Schuh & Roesgen 2006** SCHUH, G.; ROESGEN, R.: Aufgaben. In: SCHUH, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin: Springer, 2006, S. 28-78.
- Schuh et al. 2009** SCHUH, G.; SAUER, A.; SCHÖNUNG, M.; SCHULTE, H.; KINKEL, S.; BERRET, M.; DRESSLER, N.; RINN, T.; ZOLLENKOP, M.; GLEISBERG, J.; HUNDT, F.; SCHMIDT, A.; MOERMAN, P. A.; COMMANDEUR, H. R.; LANGERAK, F.; KUHN, A.; HELLINGRATH, B.: Vernetzte Produktion. In: BULLINGER, H.-J.; et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung* Berlin: Springer, 2009, S. 318-380.
- Schulte 1995** SCHULTE, C.: *Logistik : Wege zur Optimierung des Material- und Informationsflusses*. München: Verlag Vahlen, 1995.
- Schulz & Regber 2009** SCHULZ, K.-P.; REGBER, H.: Spielend Produktionsprobleme lösen. In: IBF (Hrsg.): *VPP 2009*. Chemnitz, 2009
- Schulz 1998** SCHULZ, M.: *Diskrete Simulation und moderne heuristische Verfahren zur Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung*. Dresden, Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Diss., 1998
- Seibold 2006** SEIBOLD, J.: *Hybride Fertigungssteuerung in der Grossserienproduktion*. Garbsen: PZH, 2006.
- Sepehri & Nahavandi 2007** SEPEHRI, M. M.; NAHAVANDI, N.: Critical WIP loops: a mechanism for material flow control in flow lines. In: *International Journal of Production Research* 45 (2007), S. 2759-2773.
- Spearman et al. 1990** SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L.; HOPP, W. J.: CONWIP: a pull alternative to kanban. In: *International Journal of Production Research* 28 (1990), S. 879-894.
- Spearman & Zazanis 1992** SPEARMAN, M. L.; ZAZANIS, M. A.: Push and pull productions systems: Issues and comparisons. In: *Operations Research* 40 (1992), S. 521-532.
- Specht 1983** SPECHT, D.: *Ermittlung von Fertigungsstrukturen in Maschinenbaubetrieben durch Faktoren- und Clusteranalyse*. Berlin, TU Berlin, Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Diss., 1983
- Spencer & Cox 1995** SPENCER, M. S.; COX, J. F.: Master Production Scheduling Development in a theory of constraints environment: Tutorial and Analysis. In: *Production and inventory management Journal* 36 (1995), S. 8-14.
- Spur & Stöferle 1979** SPUR, G.; STÖFERLE, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik*. München: Hanser, 1979
- Spur & Stöferle 1994** SPUR, G.; STÖFERLE, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik: Fabrikbetrieb*. München: Hanser, 1994.
- Steinbuch 1999** STEINBUCH, P. A.: *Fertigungswirtschaft*. Ludwigshafen (Rhein): Kiehl, 1999.
- Steinhausen & Langer 1977** STEINHAUSEN, D.; LANGER, K.: *Clusteranalyse – Einführung in die Methoden und Verfahren der Automatischen Klassifikation*. Berlin: de Gruyter, 1977.
- Stevenson 2006** STEVENSON, M.: Refining a Workload Control (WLC) concept: a case study. In: *International Journal of Production Research* 44 (2006), S. 767-790.

- Stevenson 2009** STEVENSON, M.: Practical implementation of production planning and control concepts in SMEs and MTOs: an introduction to the special issue. In: *Production Planning & Control* 20 (2009), S. 541 - 547.
- Stevenson & Hendry 2006** STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.: Aggregate load-oriented workload control: A review and a re-classification of a key approach. In: *International Journal of Production Economics* 104 (2006), S. 676-693.
- Stevenson et al. 2005** STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.; KINGSMAN, B. G.: A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. In: *International Journal of Production Research* 43 (2005), S. 869-898.
- Stirzel & Hüntelmann 2006** STIRZEL, M.; HÜNTELMANN, J.: *Erfolgsfaktoren für das unternehmensübergreifende Anlaufmanagement - eine empirische Studie*. Stuttgart: IPRI, 2006.
- Strack 1986** STRACK, M.: *Optimale Produktionssteuerung Organisation, Wirtschaftlichkeit und Einführung konventioneller und EDV-gestützter Leitstände*. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1986.
- Strohm & Ulich 1997** STROHM, O.; ULICH, E.: *Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten. Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 1997.
- Suhl & Mellouli 2009** SUHL, L.; MELLOULI, T.: *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. Berlin: Springer, 2009.
- Suri 1998** SURI, R.: Don't Push or Pull - POLCA. In: *APICS* 8 (1998), S. 32-39.
- Takahashi & Nakamura 2002** TAKAHASHI, K.; NAKAMURA, N.: Decentralized reactive Kanban system In: *European Journal of Operational Research* 139 (2002), S. 262-276.
- Tardif & Maaseidvaag 2001** TARDIF, V.; MAASEIDVAAG, L.: An adaptive approach to controlling kanban systems. In: *European Journal of Operational Research* 132 (2001), S. 411-424.
- Teich 1998** TEICH, T.: *Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren*. Lohmar: Eul, 1998.
- Teunis 2003** TEUNIS, G.: *Engpassorientierte Werkstattsteuerung für teilautonome, kooperative Fertigungen*. Garbsen: PZH, 2003.
- Tönshoff et al. 2005** TÖNSHOFF, H. K.; REINSCH, S.; SIEGBERT, J.: Flexible Planung für den Werkzeug- und Formenbau - Änderungen und Störungen reaktionsschnell bewältigen. In: *Wt Werkstattstechnik* 95 (2005), S. 858-861.
- Tönshoff & Teunis 2001** TÖNSHOFF, H. K.; TEUNIS, G.: Engpässe in der Werkstattsteuerung erkennen. In: *Wt Werkstattstechnik* 9 (2001), S. 570-574.
- Ulich 1998** ULICH, E.: *Arbeitspsychologie*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 1998.
- Ulrich 1984** ULRICH, H.: Betriebswirtschaftslehre - Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: DYLLICK, T.; PROBST, J. B. (Hrsg.): *Management*. Bern: Haupt, 1984, S. 168-199.
- Ulrich & Probst 1988** ULRICH, H.; PROBST, G.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln*. Bern: Haupt, 1988.
- Ulrich & Hill 1976** ULRICH, P.; HILL, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* (1976), S. 304-309.
- Vasilescu 2005** VASILESCU, G.: *Electronic noise and interfering signals: principles and applications*. Berlin: Springer, 2005.

- VDA 2000** VDA: *Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten*. Frankfurt am Main: Verband d. Automobilindustrie e.V., 2000.
- VDA 2004a** VDA: *Sicherung der Qualität von Lieferungen Lieferantenauswahl, Qualitätssicherungsvereinbarung, Produktionsprozess- und Produktfreigabe ; Qualitätsleistung in der Serie ; Deklaration von Inhaltsstoffen*. Frankfurt am Main: Verband d. Automobilindustrie e.V., 2004.
- VDA 2004b** VDA: *Sicherung der Qualität während der Produktrealisierung Methoden und Verfahren*. Frankfurt am Main: Verband d. Automobilindustrie e.V., 2004.
- VDA 2006** VDA: *Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette - Produktentstehung ; Reifegradabsicherung für Neuteile*. Oberursel: VDA Qualitäts-Management-Center (QMC), 2006.
- VDI 1997** VDI (Hrsg.): *VDI-3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen*. Düsseldorf: VDI, 1997.
- VDI 2004** VDI (Hrsg.): *VDI-4400 - Logistikkennzahlen für die Produktion*. Düsseldorf: VDI, 2004.
- VDW 2009** VDW (Hrsg.): *Werkzeugmaschinen-Produktion Deutschland*. Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V, 2009. Studie
- Vollmann et al. 1997** VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.: *Manufacturing planning and control systems*. New York: Irwin/McGraw-Hill, 1997.
- Voss et al. 2002** VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M.: Case research in operations management. In: *International Journal of Operations & Production Management* 22 (2002), S. 195-219.
- Wallentowitz et al. 2009** WALLENTOWITZ, H.; FREIALDENHOVEN, A.; OLSCHESKI, I.: *Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- Wamecke 1995** WAMECKE, H.-J.: *Der Produktionsbetrieb 2 - Produktion, Produktionssicherung*. Berlin: Springer, 1995.
- Wannenwetsch 2007** WANNENWETSCH, H.: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik*. Berlin Springer, 2007.
- Watson et al. 2007** WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; C., S.: The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. In: *Journal of Operations Management* 25 (2007), S. 387-402.
- Weber 1983** WEBER, G.: *Gestaltung eines integrierten Produktionssystems für die Sortenfertigung unter Einsatz der Clusteranalyse*. Stuttgart, Universität Stuttgart, 1983
- Weber 1993** WEBER, R.: *Werkstattorganisation und Werkstattsteuerung in der lean production Voraussetzungen - Methoden - praktische Beispiele - Umfeldorganisation*. Ehningen: Expert-Verl., 1993.
- Weller 1999** WELLER, A.: Dezentralisierung in produzierenden Unternehmen. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): *Effizientes Informationsmanagement in dezentralen Organisationsstrukturen*. Berlin: Springer, 1999, S. 1-42.
- Weller 2002** WELLER, R.: *Verfahren zum kurzfristigen Störfallmanagement für die flexible Werkstattsteuerung*. Heimsheim: Jost-Jetter, 2002.
- Wenzel & Bernhard 2008** WENZEL, S.; BERNHARD, J.: Definition und Modellierung von Systemlasten für die Simulation logistischer Systeme. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 488-509.

- Wenzel et al. 2008** WENZEL, S.; COLLISI-BÖHMER, S.; PITSCH, H.; RÖSE, O.; WEIß, M.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin: Springer, 2008.
- Westkämper 2006** WESTKÄMPER, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin: Springer, 2006.
- Westkämper 2007** WESTKÄMPER, E.: Management der Produktion im turbulenten Umfeld. In: *PPS Management* 12 (2007), S. 70-72.
- Wiendahl 1998** WIENDAHL, H.-H.: Zentralistische Planung in dezentralen Strukturen? – Orientierungshilfen für die Praxis In: IRB (Hrsg.): *3. Stuttgarter PPS-Seminar*. Stuttgart, 1998
- Wiendahl 2002** WIENDAHL, H.-H.: *Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld*. Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik, Diss., 2002
- Wiendahl 2004** WIENDAHL, H.-H.: Was vereinfacht dezentrale Planung und Steuerung? Gestaltungsalternativen, Einflussgrößen, Konsequenzen. In: SCHRAFT, R. D. (Hrsg.): *3Liter-PPS Vorsprung in der Produktion ; Auftragsmanagement für dezentrale Organisationsstrukturen*. Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung Produktionstechnischer Forschung, 2004, S. 7-17.
- Wiendahl 2008a** WIENDAHL, H.-H.: Stolpersteine der PPS: ein sozio-technischer Ansatz für das industrielle Auftragsmanagement In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer, 2008, S. 276-304.
- Wiendahl 1997** WIENDAHL, H.-P.: *Fertigungsregelung: logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. München: Hanser, 1997.
- Wiendahl et al. 2005** WIENDAHL, H.-P.; CIEMINSKI, G. V.; BEGEMANN, C.; NICKEL, R.: Human Factors in Production Planning and Control In: PROCESSING, I. I. F. F. I. (Hrsg.): *Integrating Human Aspects in Production Management*. Berlin: Springer, 2005, S. 113-125.
- Wiendahl 2008b** WIENDAHL, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser, 2008.
- Wiendahl & Westkämper 2006** WIENDAHL, H. H.; WESTKÄMPER, E.: Systematic Analysis of PPC System Deficiencies - Analytical Approach and Consequences for PPC Design. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2006), S. 479-482.
- Wildemann 1984** WILDEMAN, H.: *Flexible Werkstattsteuerung durch Integration von KANBAN-Prinzipien*. München: CW-Publikationen, 1984.
- Wildemann 1997** WILDEMAN, H.: *Fertigungsstrategien : Reorganisationskonzepte für eine schlanke Produktion und Zulieferung*. München: Transfer-Centrum-Verl., 1997.
- Wildemann 2002** WILDEMAN, H.: Dezentralisierung von Kompetenz und Verantwortung. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): *Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management*. Berlin: Springer, 2002, S. 334-360.
- Wildemann 2004** WILDEMAN, H.: *Entwicklungstrends in der Automobil- und Zulieferindustrie : empirische Studie*. München: Transfer-Centrum-Verl., 2004.
- Wildemann 2008** WILDEMAN, H.: *KANBAN-Produktionssteuerung - Einsatz von Karten und elektronischem Kanban zur Einführung des Hol-Prinzips*. München: Tcw, 2008.
- Wilke 2006** WILKE, M.: *Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen*. München, Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, Diss., 2006
- Windhoff 2001** WINDHOFF, G.: *Planspiele für die verteilte Produktion - Entwicklung und Einsatz von Trainingsmodulen für das aktive Erleben charakteristischer Arbeitssitua-*

- tionen in arbeitsteiligen, verteilten Produktionssystemen auf Basis der Planspielmethodik.* Aachen: Mainz, 2001.
- Windt 2006** WINDT, K.: Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik. In: FREUND, A. M.; et al. (Hrsg.): *Selbstorganisation: ein Denksystem für Natur und Gesellschaft.* Köln: Böhlau Verlag, 2006, S. 271-316.
- Windt 2008** WINDT, K.: Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik - Grenzen der Selbststeuerung. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik.* Berlin: Springer, 2008, S. 350-372.
- Windt & Hülsmann 2007** WINDT, K.; HÜLSMANN, M.: Changing Paradigms in Logistics – Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control. In: WINDT, K.; HÜLSMANN, M. (Hrsg.): *Understanding autonomous cooperation and control in logistics: the impact of autonomy on management, information, communication and material flow.* Berlin: Springer, 2007, S. 1-12.
- Winterhoff et al. 2009** WINTERHOFF, M.; KAHNER, C.; ULRICH, C.; SAYLER, P.; WENZEL, E. (Hrsg.): *Zukunft der Mobilität 2020: Die Automobilindustrie im Umbruch?* Stuttgart: ArthurD.Little, 2009. Studie
- Womack et al. 1990** WOMACK, J. P.; ROOS, D.; JONES, D. T.: *The machine that changed the world.* New York: Rawson Associates, 1990.
- Yin 2008** YIN, R. K.: *Case study research: design and methods.* London: SAGE, 2008.
- Zahn et al. 2009** ZAHN, E.; BULLINGER, H.-J.; GAGSCH, B.; WESTKÄMPER, E.; BALVE, P.; GAUSEMEIER, J.; PFÄNDER, T.; WENZELMANN, C.; SCHLOSKE, A.; THIEME, P.; BLEICHER, K.; DIERKES, M.; WILDEMANN, H.; ACKERMANN, K.-F.; BAHNER, J.; ANTON, C. H.: Neues Denken in der Unternehmensführung. In: BULLINGER, H.-J.; et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung* Berlin: Springer, 2009, S. 109-222.
- Zäpfel 1996** ZÄPFEL, G.: Production planning in the case of uncertain individual demand: Extension for an MRP II concept. In: *International Journal of Production Economics* 46/47 (1996), S. 153-164.
- Zäpfel 1998** ZÄPFEL, G.: Grundlagen und Möglichkeiten der Gestaltung dezentraler PPS-Systeme. In: CORSTEN, H.; GÖSSINGER, R. (Hrsg.): *Dezentrale Produktionsplanungs- und -steuerungs-Systeme eine Einführung in zehn Lektionen.* Stuttgart: Kohlhammer, 1998, S. 11-54.
- Zsifkovits & Krenn 2008** ZSIFKOVITS, H.; KRENN, B.: Beherrschung von komplexen Systemen durch Modellbildung und Simulation In: ENGELHARDT-NOWITZKI, C.; et al. (Hrsg.): *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation: State-of-the-Art und innovative Konzepte* Wiesbaden: Gabler, 2008, S. 55-70.
- Zülch 1989** ZÜLCH, G.: Der Strategische Steuerungsraum - Ein Ansatz zur Systematisierung von Strategien der Fertigungssteuerung. In: *VDI-Zeitschrift* 139 (1989), S. 58-65.
- Zülch 1990** ZÜLCH, G.: Systematisierung von Strategien der Fertigungssteuerung. In: ZAHN, E. (Hrsg.): *Organisationsstrategie und Produktion.* München: gmft, 1990, S. 151-178.
- Zwicky 1989** ZWICKY, F.: *Morphologische Forschung* Winterthur: Baeschlin, 1989.

## ANLAGEN

Im folgenden Anhang der Arbeit sind die häufigkeits- beziehungsweise arbeitsin- haltsgewichteten Materialflussmatrizen aus den Kapiteln 3.1.1.1 und 3.1.1.2 vergrößert dargestellt. Dies dient einer verbesserten Nachvollziehbarkeit der grafischen Analyse der Materialflussveränderung aller drei Fallbeispiele im Zeitverlauf.

Den beispielhaft vergrößerten Ausschnitt der häufigkeitsgewichteten Adjazenzmatrix aus Abbildung A-4 zeigt die folgende Abbildung.

	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	AS7	AS8	AS9	AS10	AS11	AS12	AS13	AS14	AS15	AS16	AS17
AS1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS2	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
AS3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
AS4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS5	0	6	0	0	15	0	6	6	0	0	4	0	11	0	0	5	1
AS6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	1
AS8	0	0	0	0	6	0	0	0	1	0	5	0	0	0	0	0	1
AS9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
AS10	0	4	0	0	11	0	0	6	1	0	1	0	1	0	0	0	1
AS11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
AS12	0	6	12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS16	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
AS17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	6
AS18	0	5	0	0	1	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
AS21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS23	0	0	0	0	0	0	0	1	11	0	0	0	6	0	0	3	18
AS24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS28	0	0	0	0	11	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
AS29	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	3	4
AS30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
AS31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AS32	0	1	0	0	0	0	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1
AS33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung A-1: Ausschnitt einer Materialflussmatrix (Hier: häufigkeitsgewichtete; Fall 1; 01/ - 06/2009)

Schwarz markiert sind in A1 und A2 ausschließlich Materialfluss- beziehungsweise Arbeitsinhaltschwerpunkte, das heißt Knotenpunkte, welche die meisten Kontakte beziehungsweise Arbeitsinhalte aufweisen und dabei zusammen 80% aller Materialflussbeziehungen ausmachen. Der grafische Vergleich der einzelnen Halbjahre zueinander zeigt, wie sich die Materialfluss- beziehungsweise Arbeitsin- haltsschwerpunkte in Form der schwarzen Punkte im Zeitverlauf verändern.

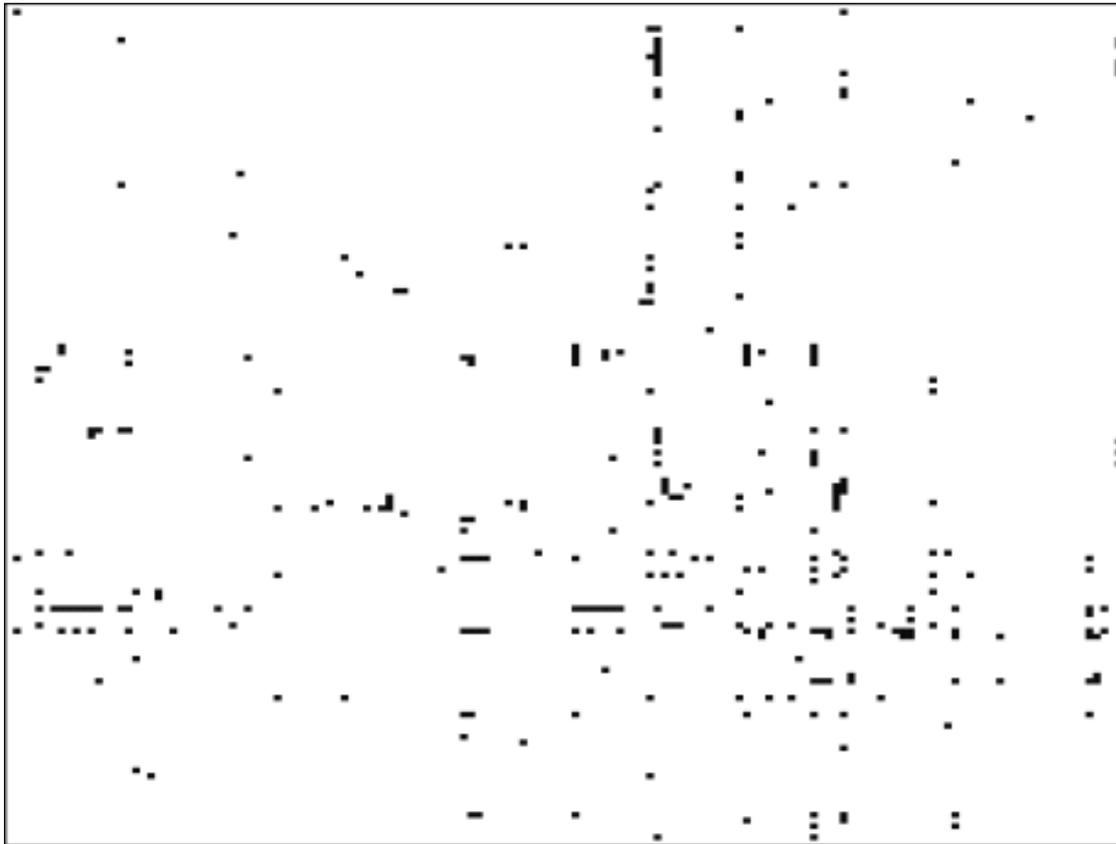
**A1 Materialflussknotenschwerpunkte im Zeitverlauf**

Abbildung A-2: Fall 1; 01/ - 06/2008

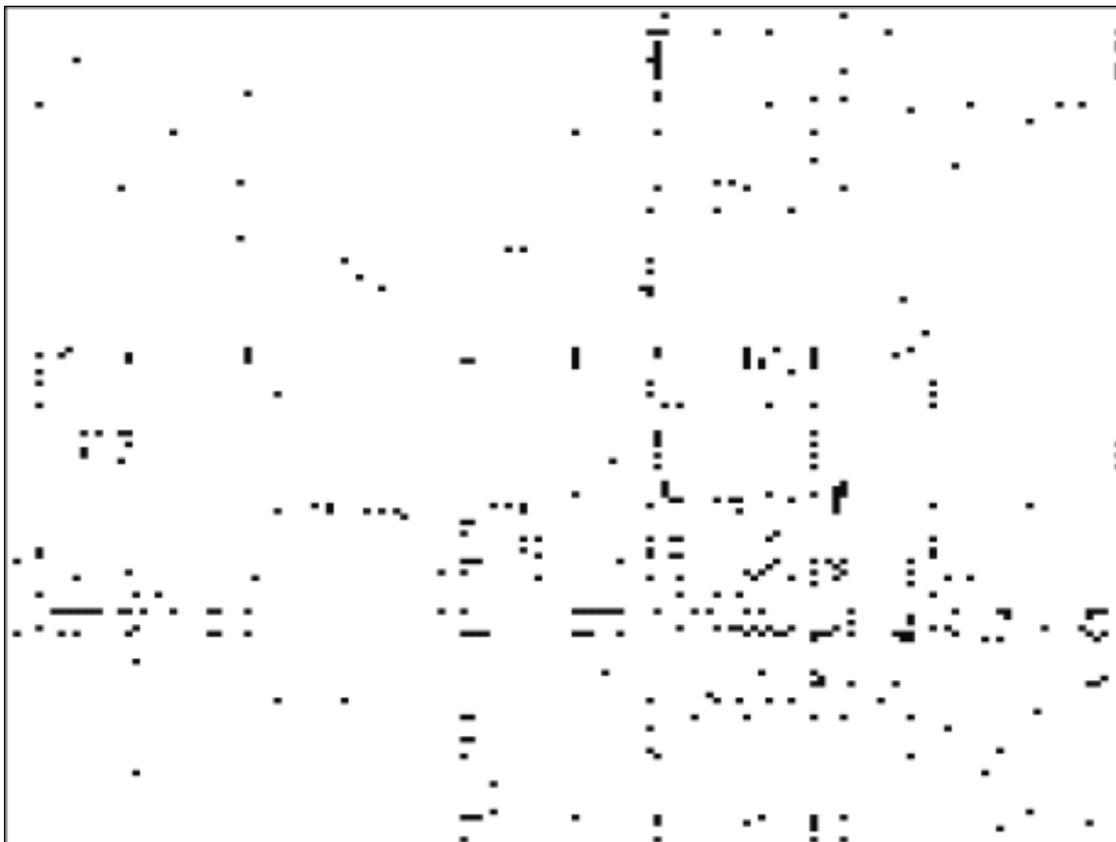
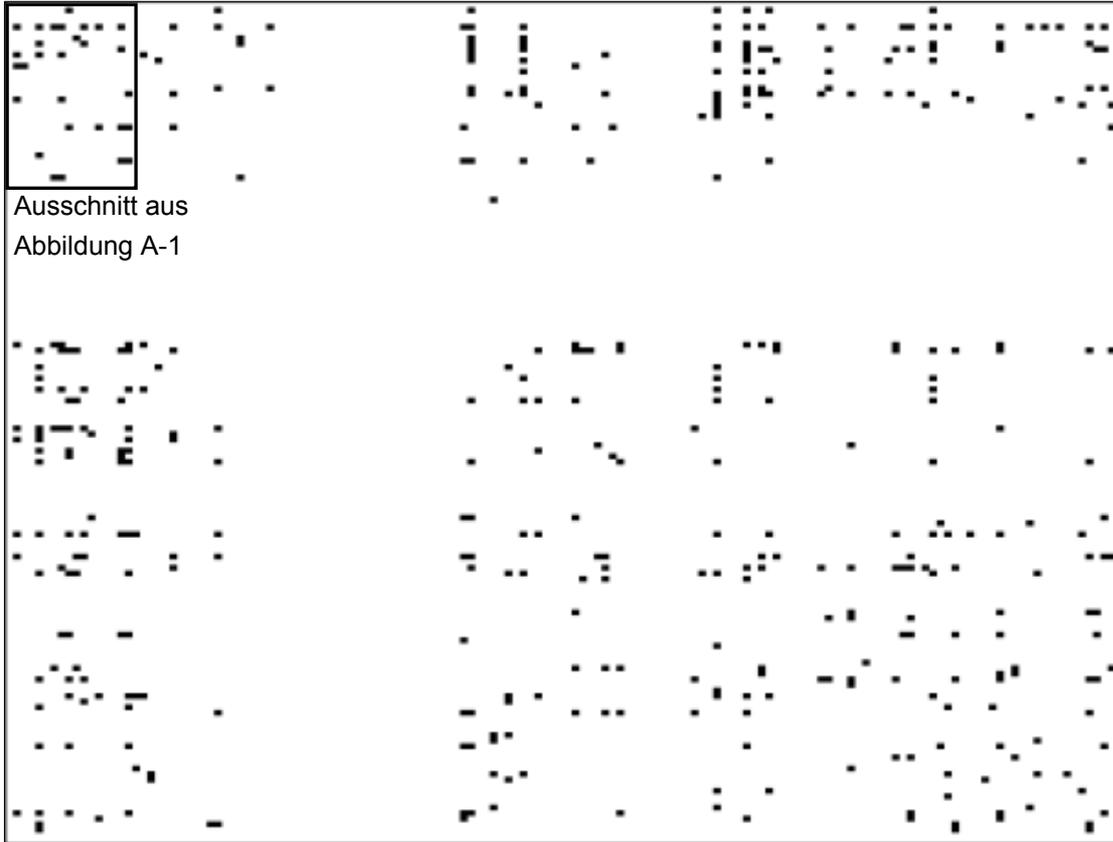


Abbildung A-3: Fall 1; 07/ - 12/2008



Ausschnitt aus  
Abbildung A-1

Abbildung A-4: Fall 1; 01/ - 06/2009

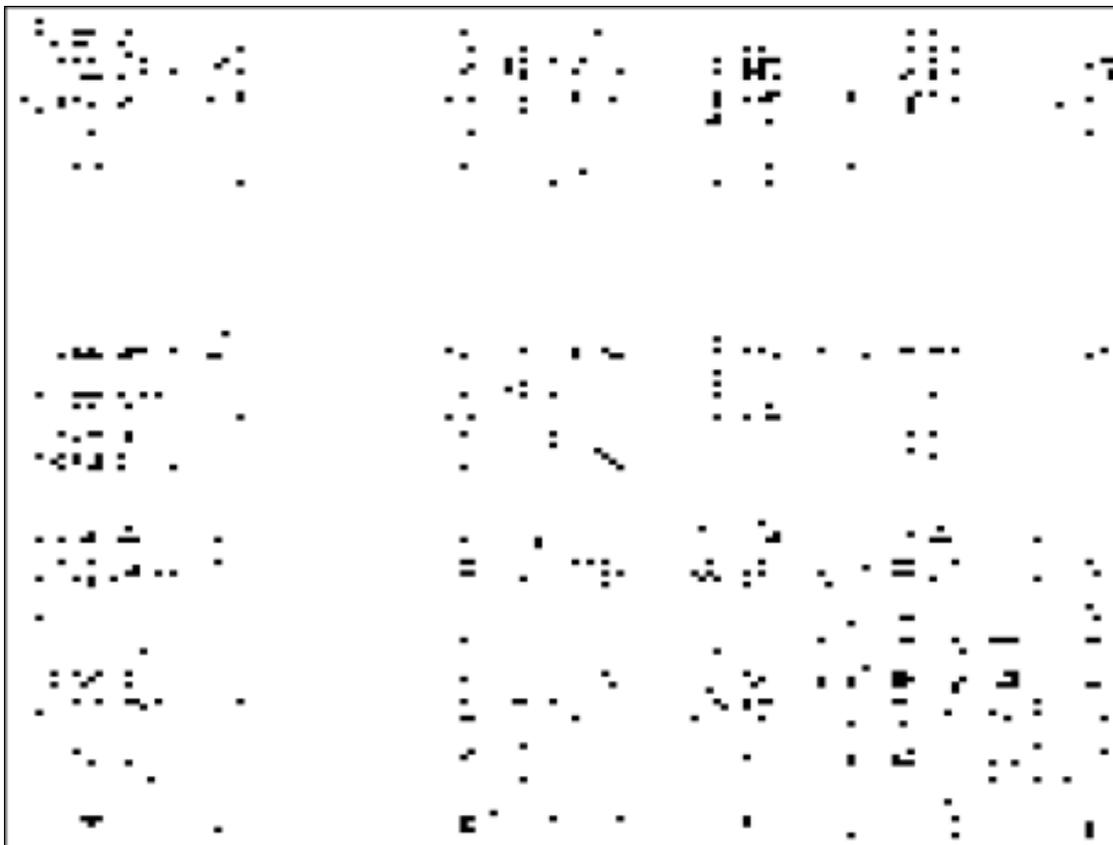


Abbildung A-5: Fall 1; 07/ - 12/2009

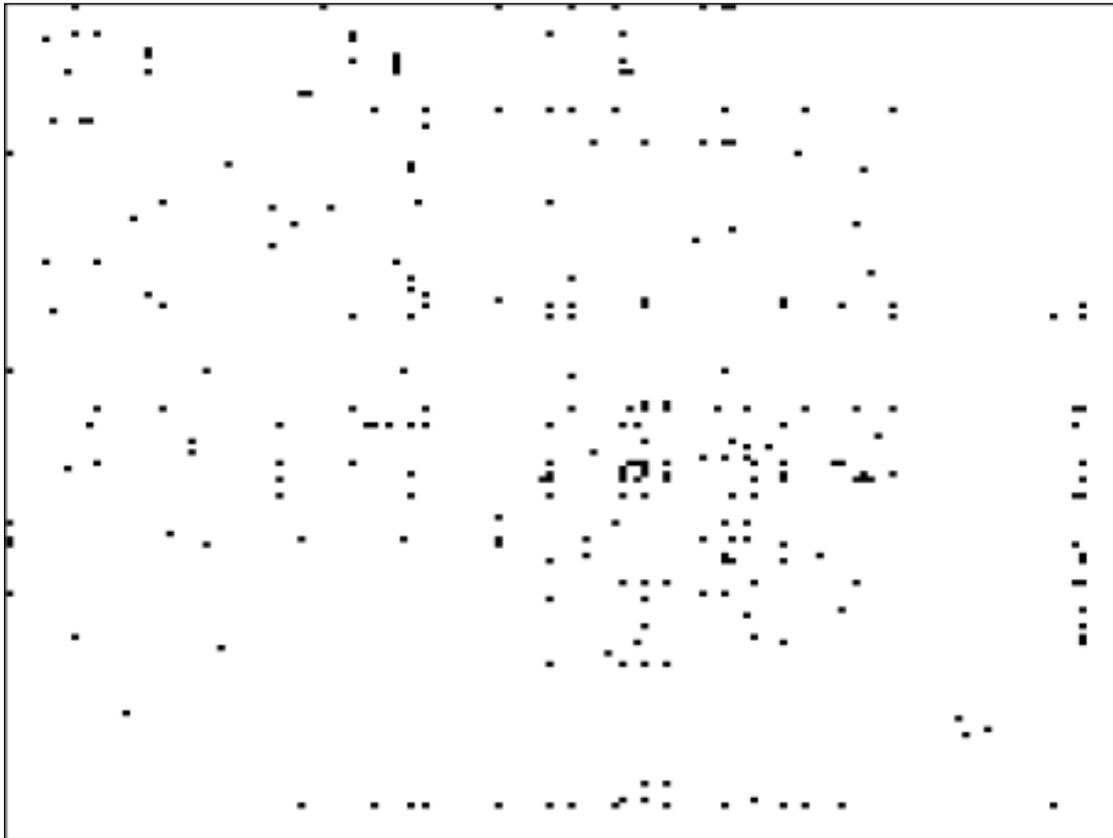


Abbildung A-6: Fall 2; 01/ - 06/2008

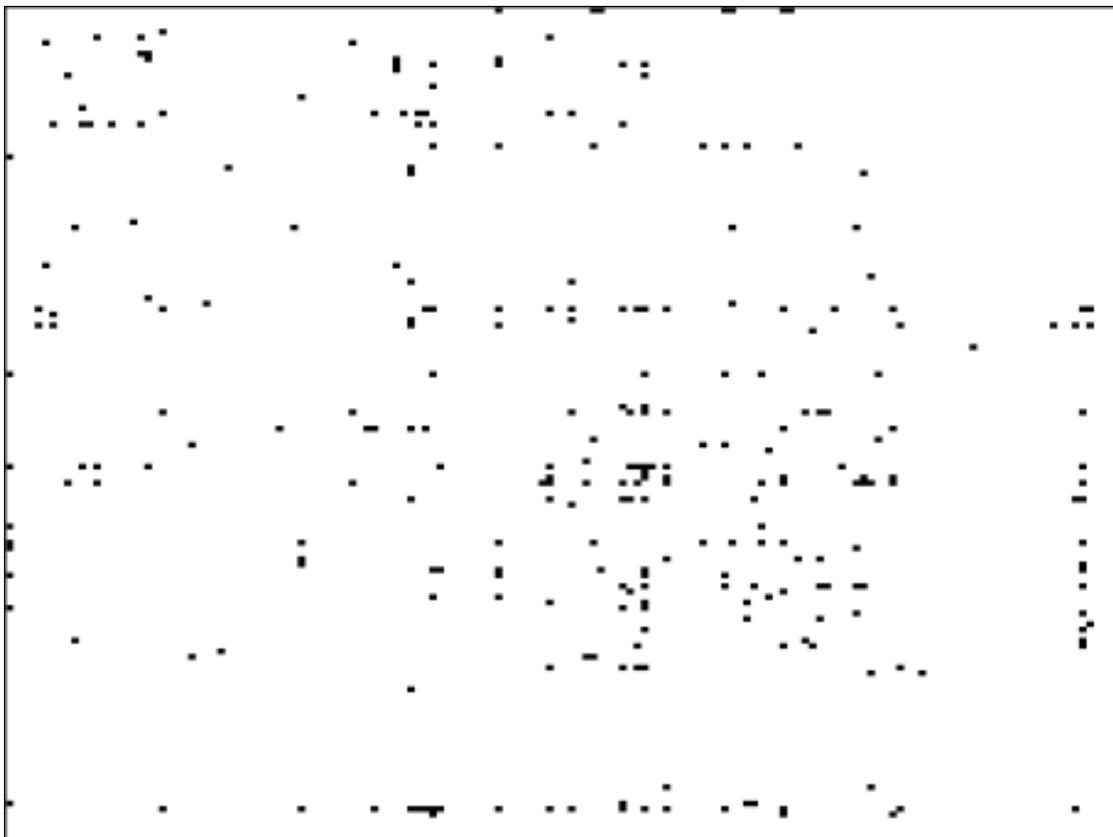


Abbildung A-7: Fall 2; 07/ - 12/2008



Abbildung A-8: Fall 2; 01/ - 06/2009

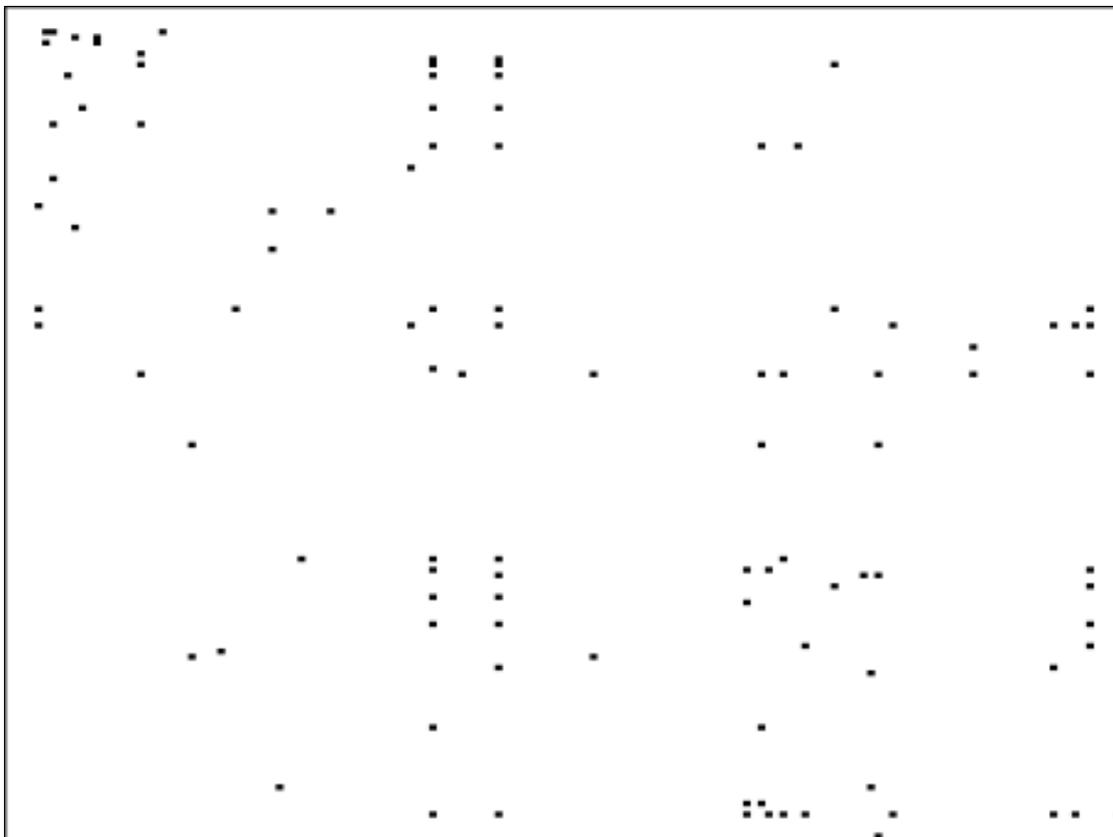


Abbildung A-9: Fall 2; 07/ - 12/2009

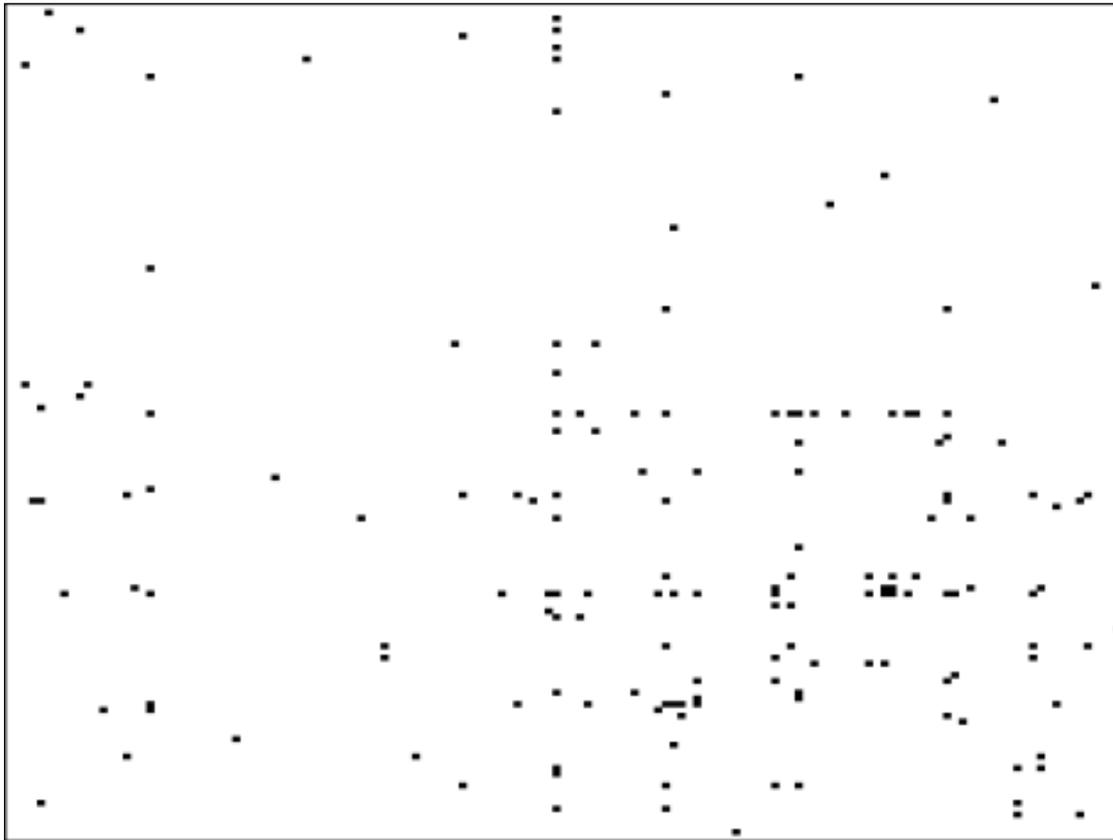


Abbildung A-10: Fall 3; 01/ - 06/2008

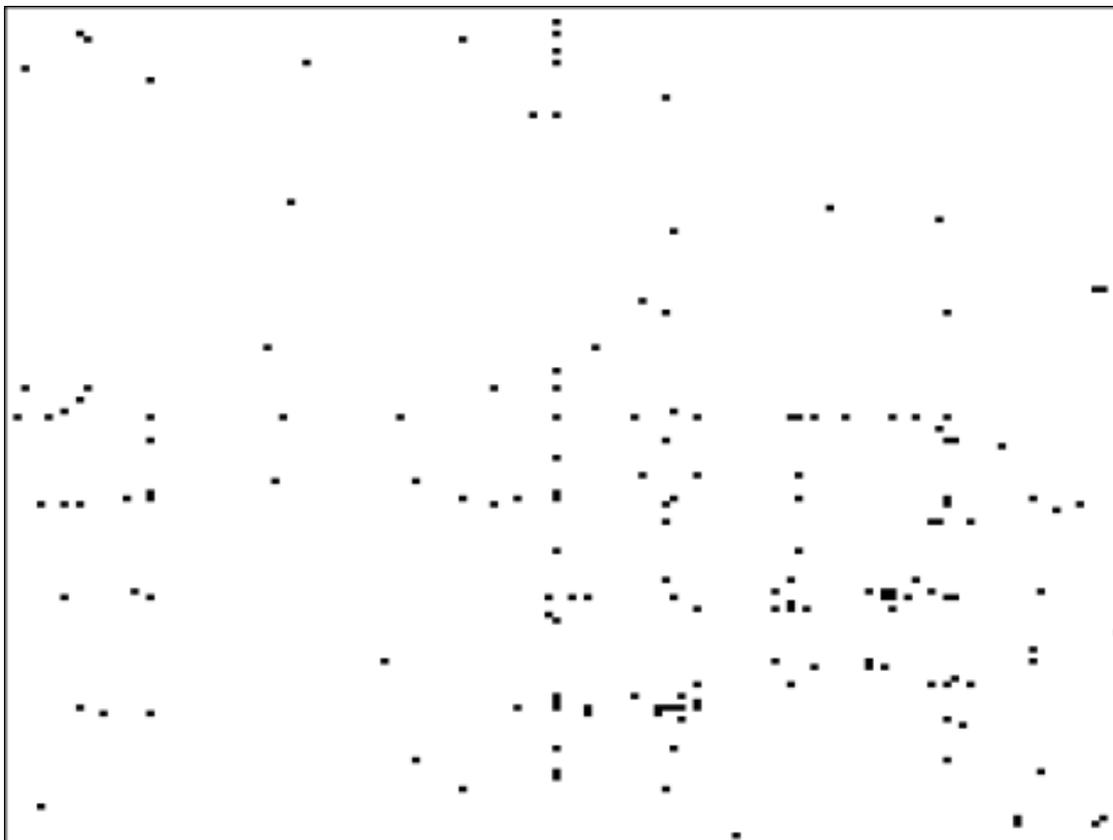


Abbildung A-11: Fall 3; 07/ - 12/2008

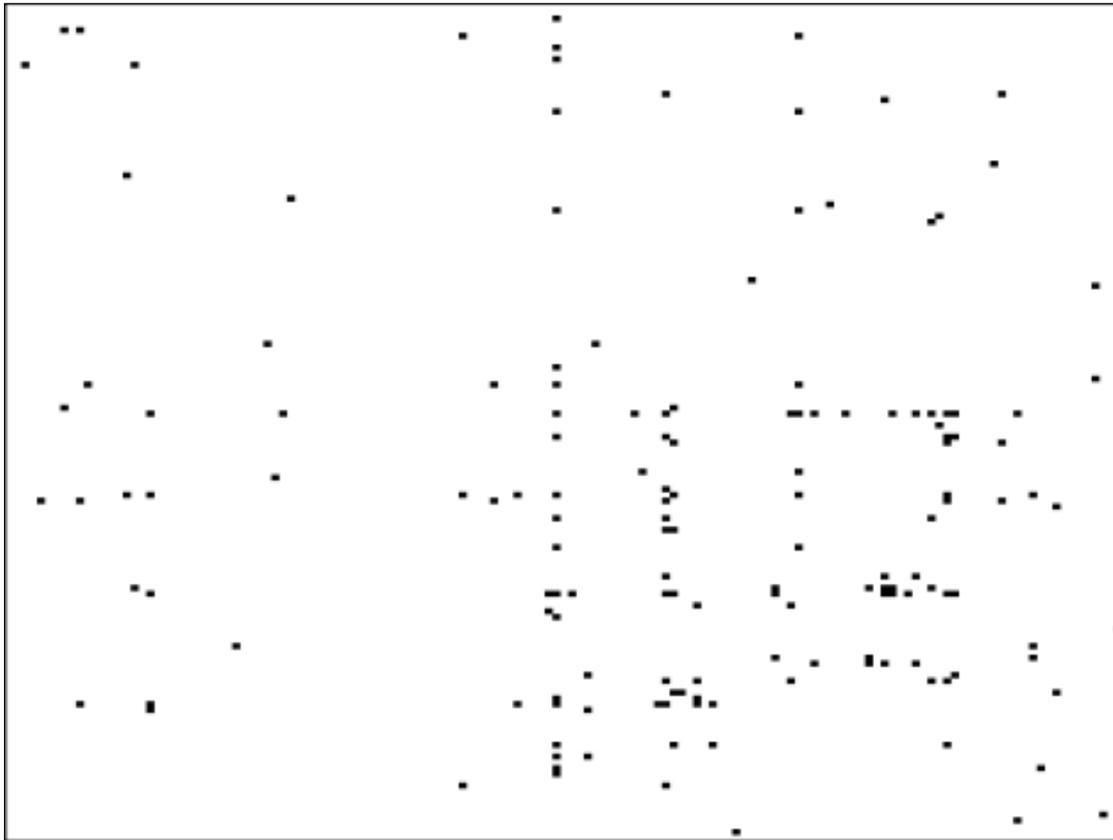


Abbildung A-12: Fall 3; 01/ - 06/2009

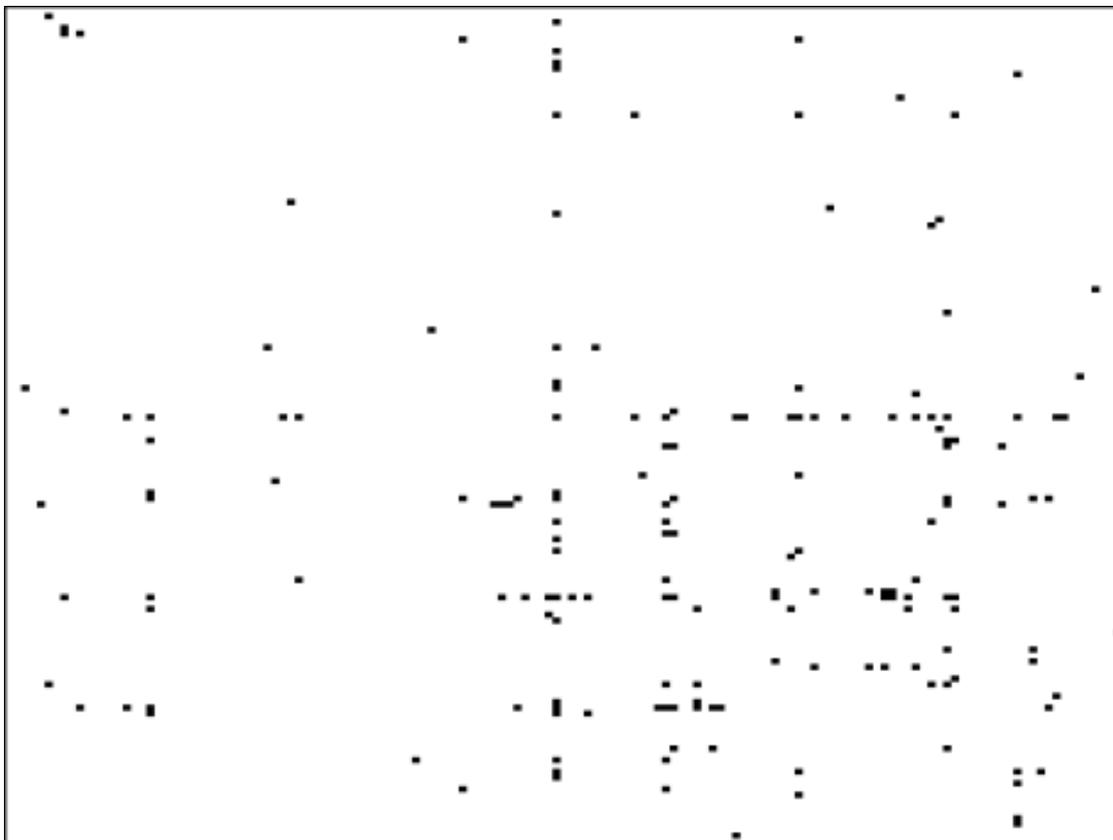


Abbildung A-13: Fall 3; 07/ - 12/2009

## A2 Arbeitsinhaltsschwerpunkte im Zeitverlauf

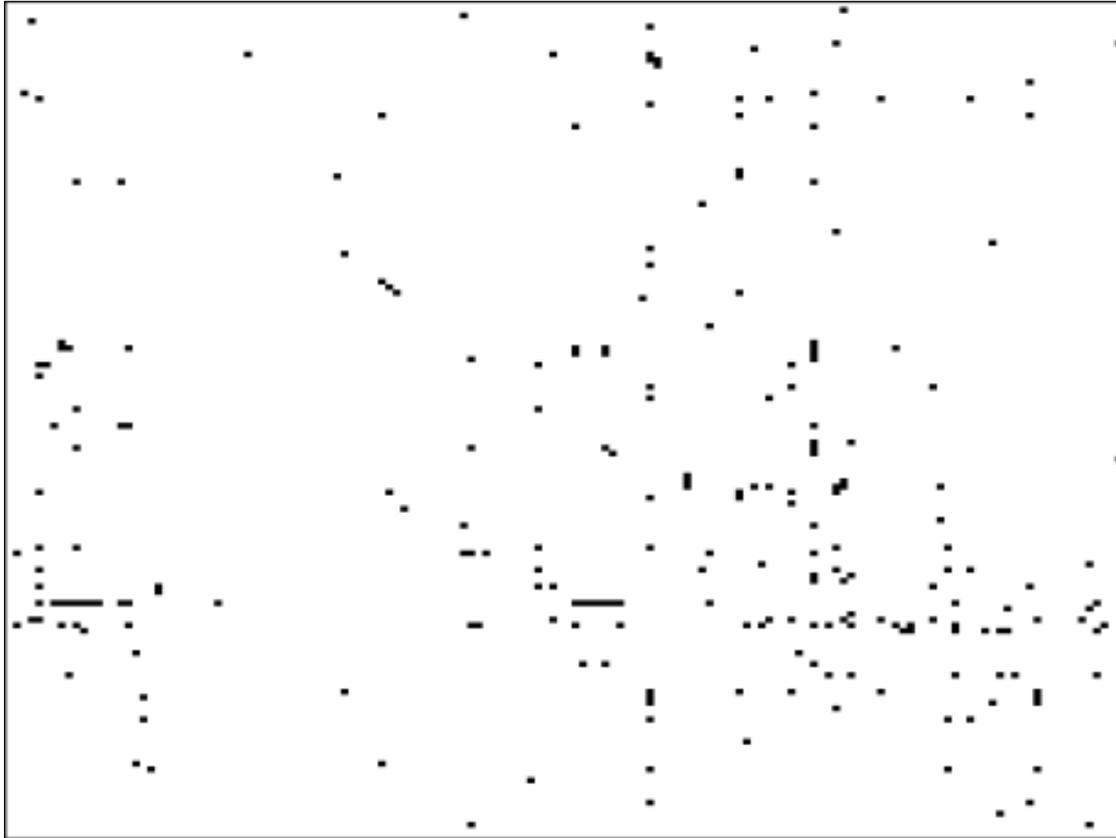


Abbildung A-14: Fall 1; 01/ - 06/2008

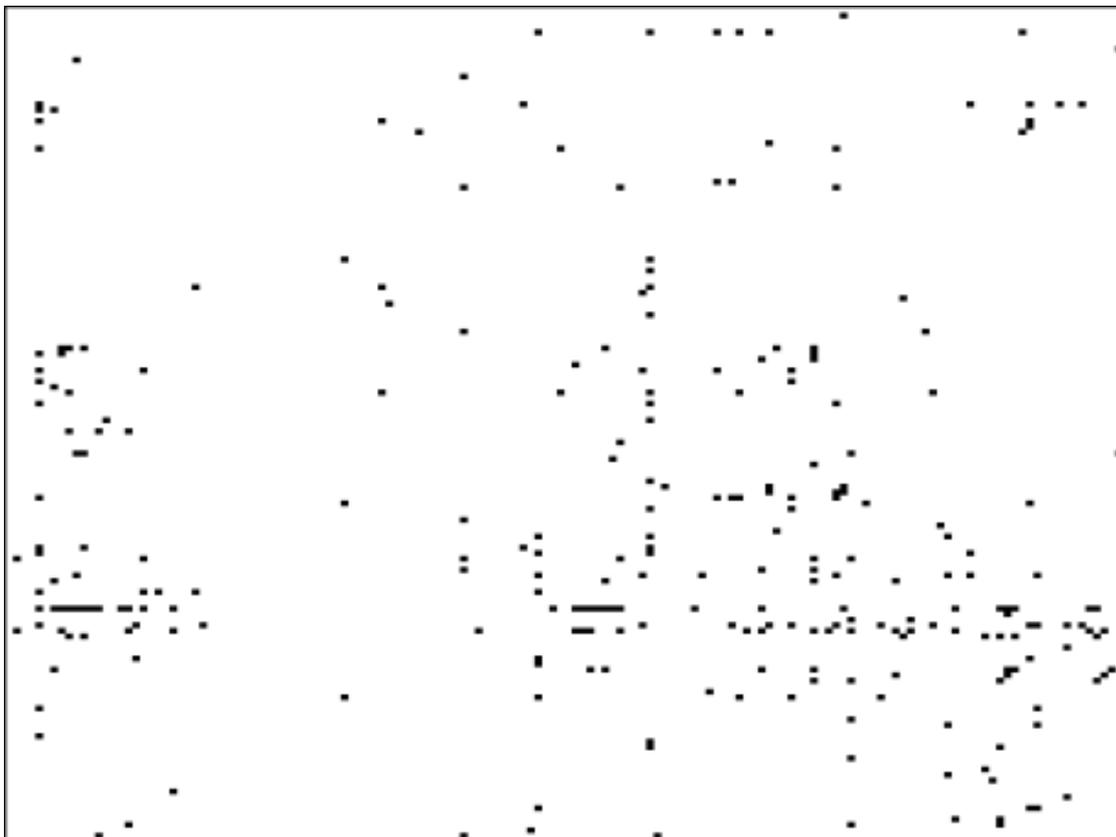


Abbildung A-15: Fall 1; 07/ - 12/2008

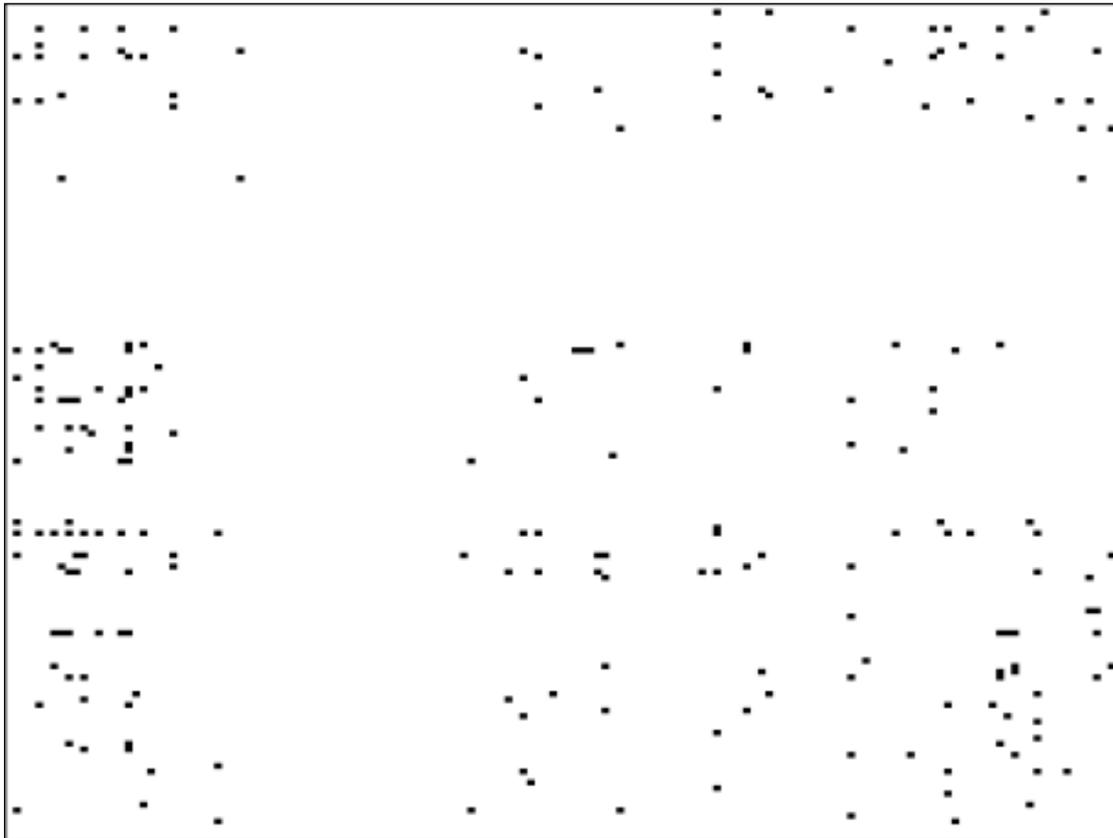


Abbildung A-16: Fall 1; 01/ - 06/2009

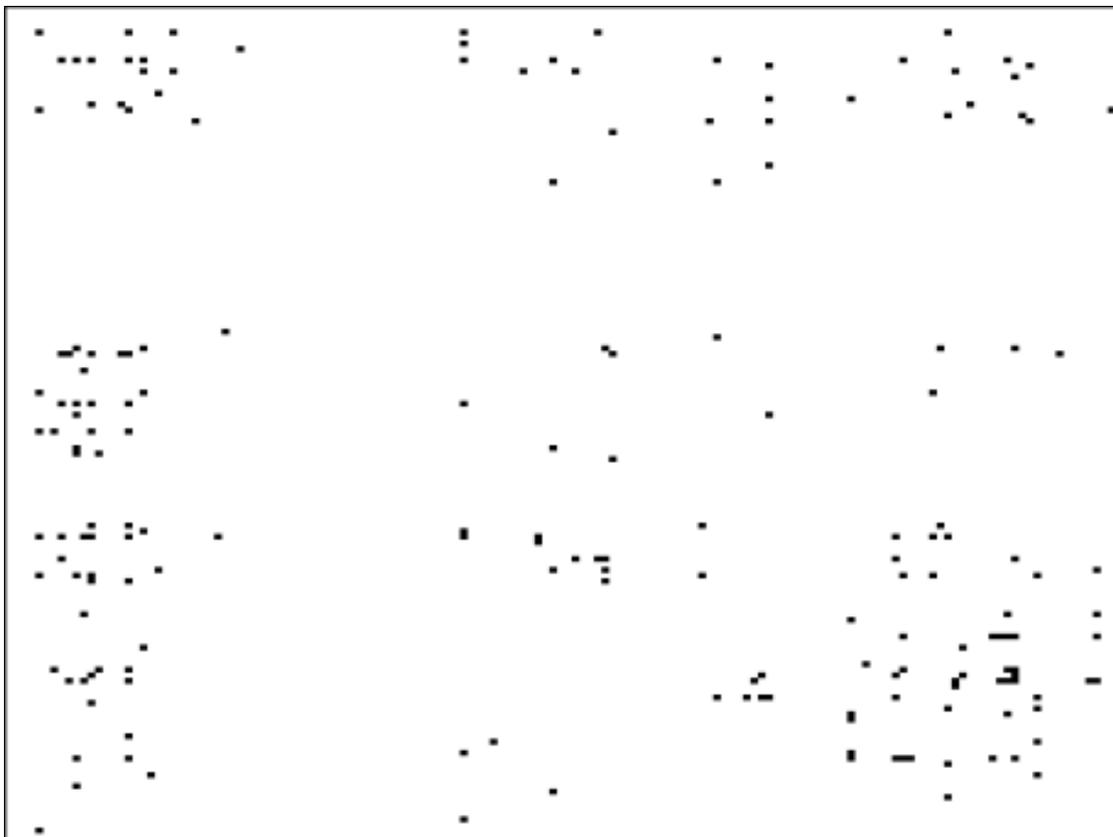


Abbildung A-17: Fall 1; 07/ - 12/2009



Abbildung A-18: Fall 2; 01/ - 06/2008

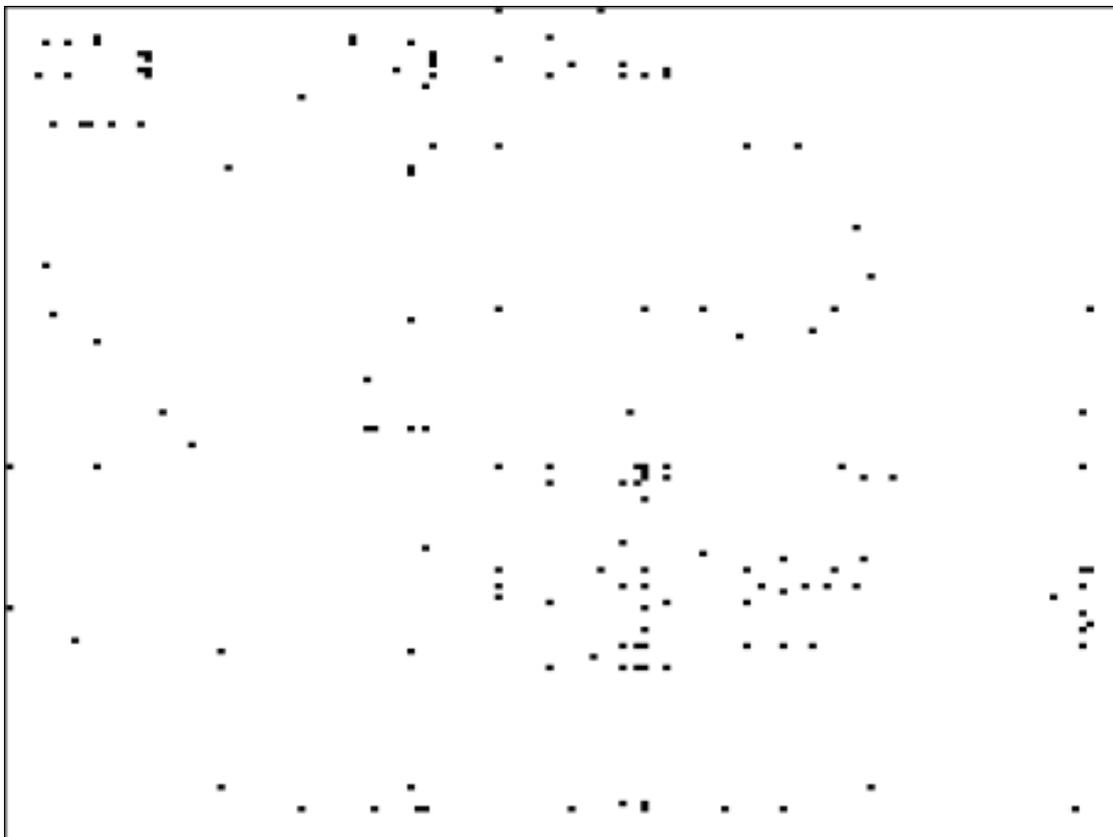


Abbildung A-19: Fall 2; 07/ - 12/2008

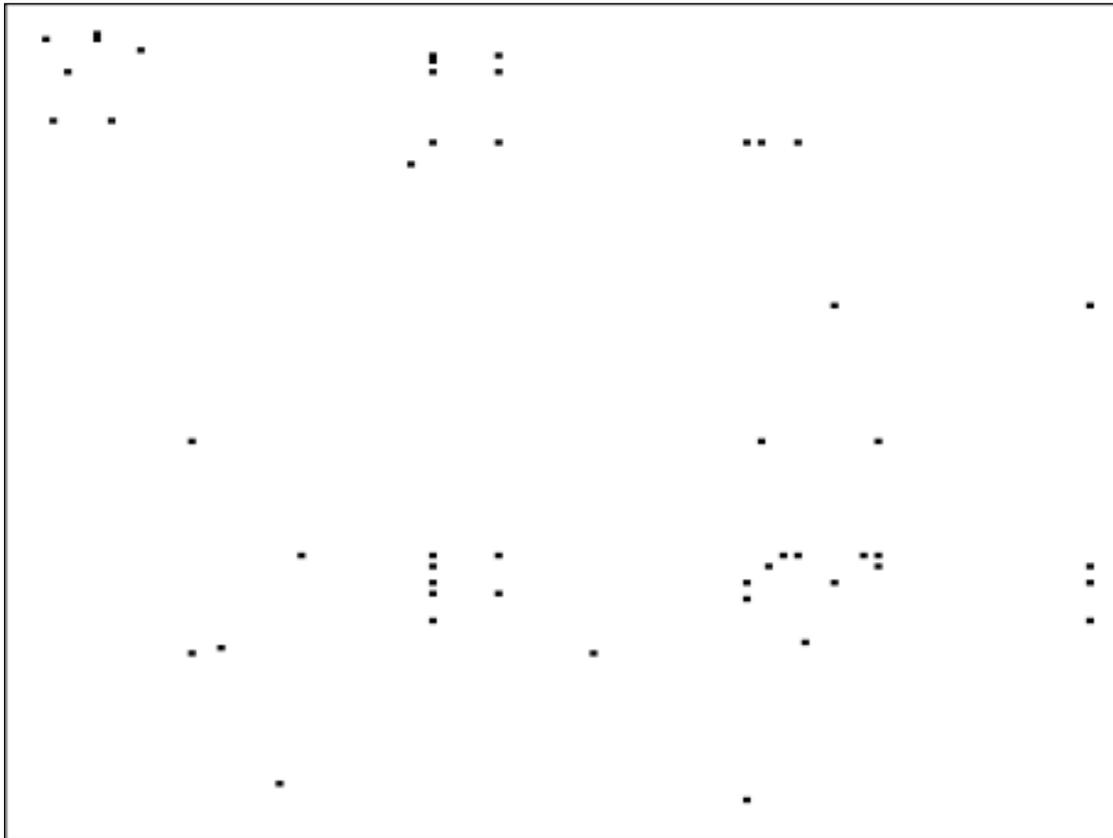


Abbildung A-20: Fall 2; 01/ - 06/2009



Abbildung A-21: Fall 2; 07/ - 12/2009

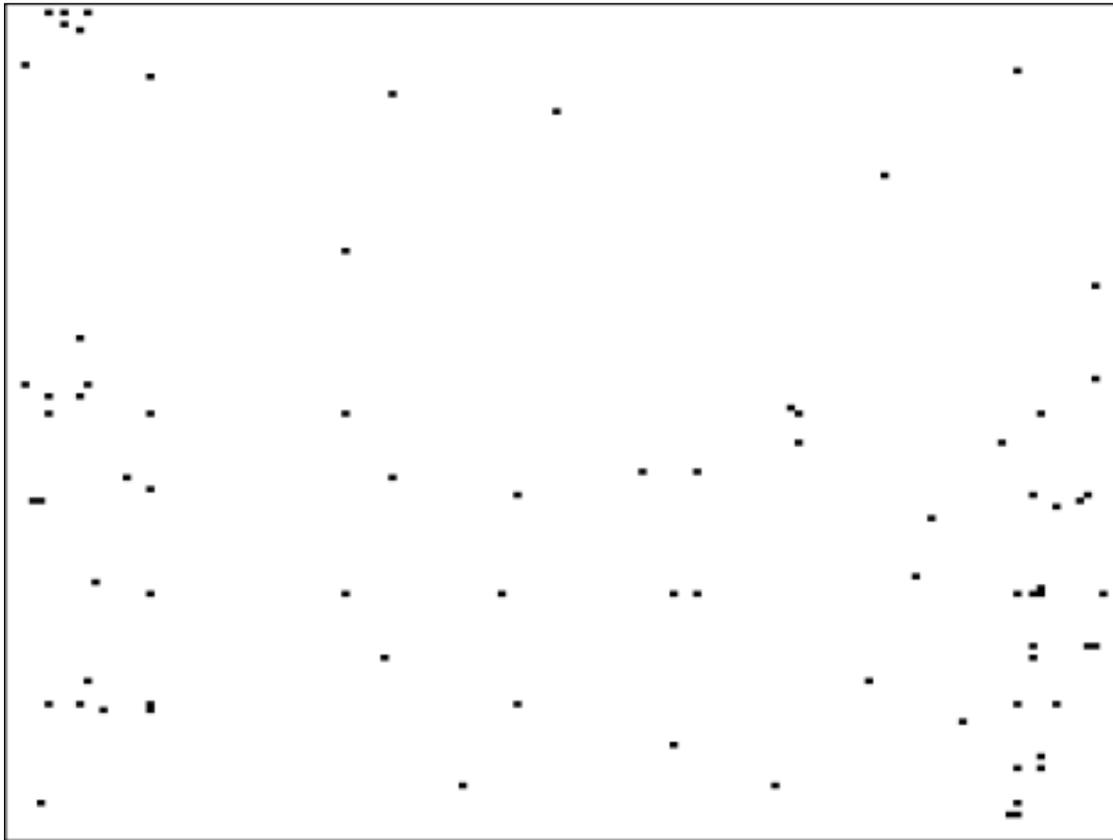


Abbildung A-22: Fall 3; 01/ - 06/2008

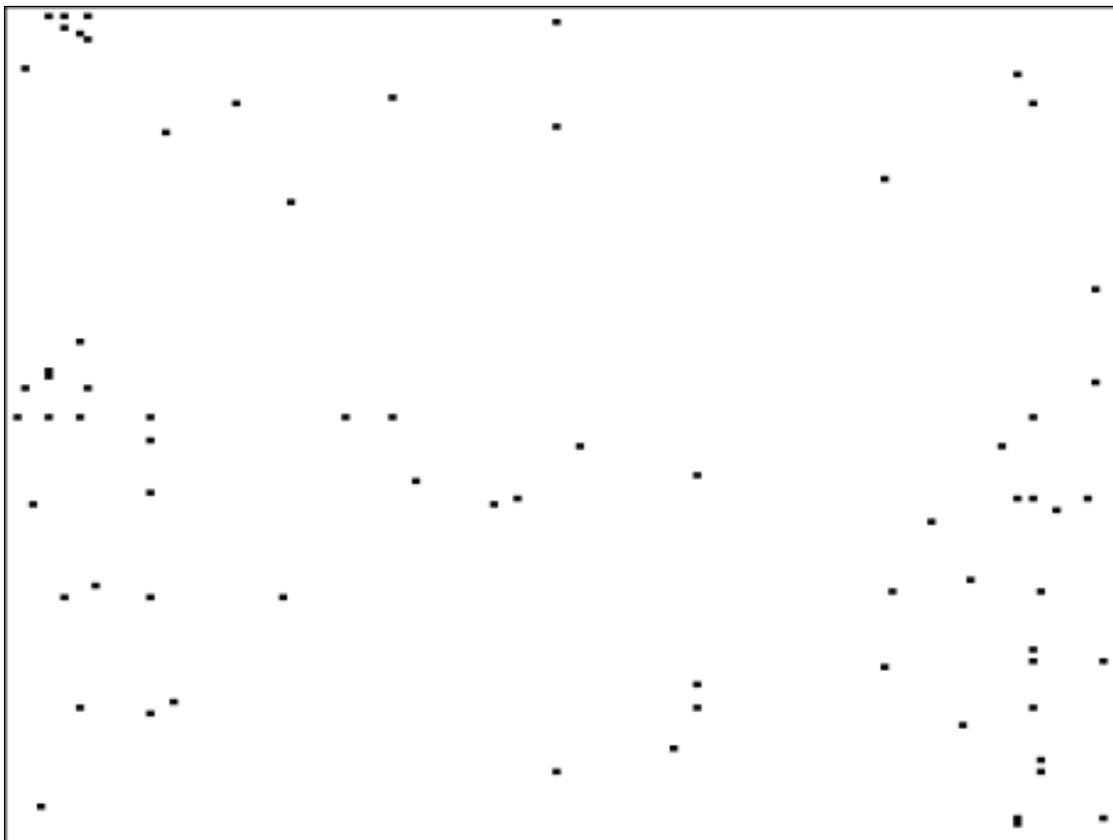


Abbildung A-23: Fall 3; 07/ - 12/2008

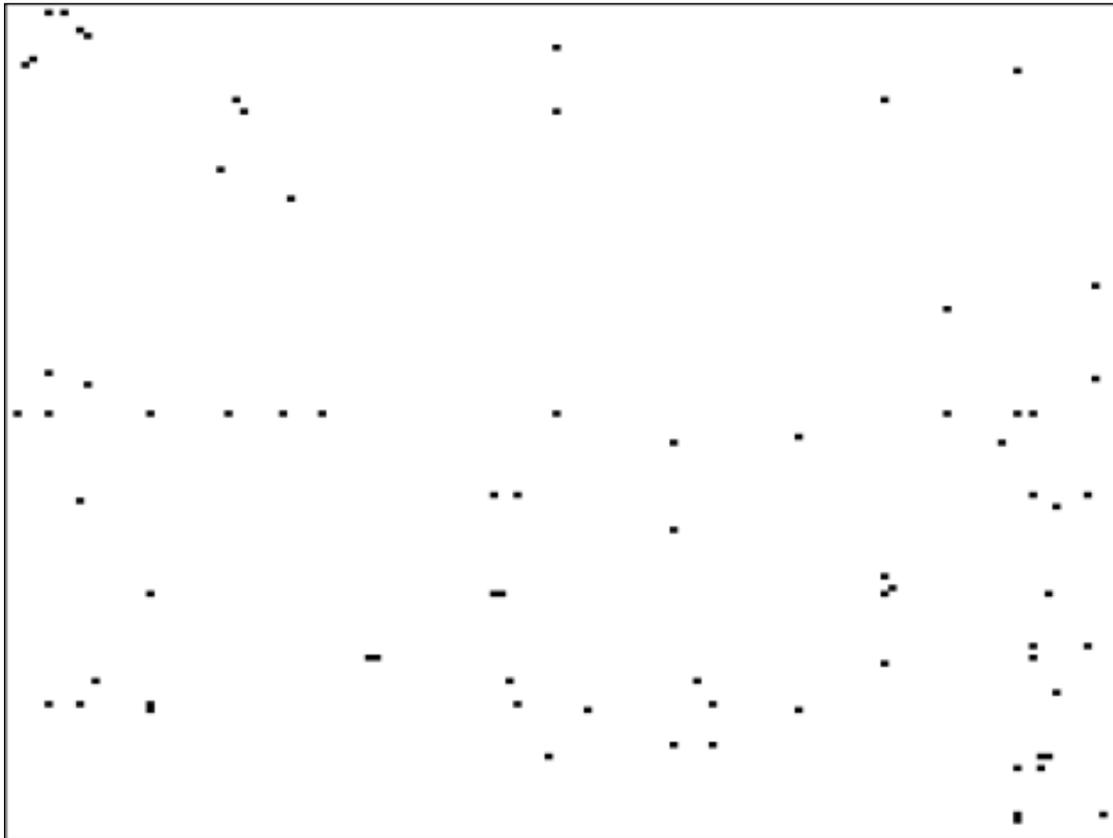


Abbildung A-22: Fall 3; 01/ - 06/2009

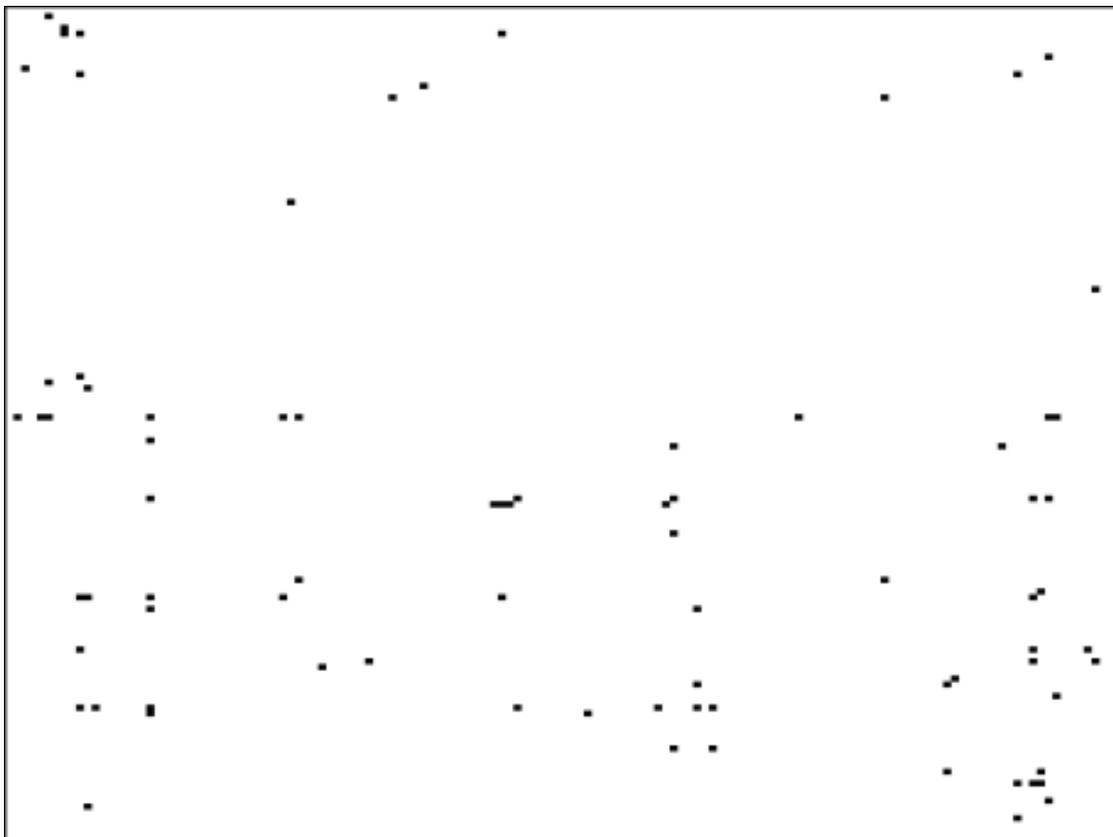


Abbildung A-23: Fall 3; 07/ - 12/2009