

Einsatz von RFID zur Optimierung dezentraler Materialfluss-Steuerung

Ein Informationssystem zur Flexibilisierung der
Reihenfolgeplanung in Kanban

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Würde eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften

der Wirtschafts- und Verhaltenswissenschaftlichen Fakultät

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

vorgelegt von

Titus Faupel

aus

Ratzeburg

Freiburg 2009

Erstgutachter: Prof. Dr. Günter Müller

Zweitgutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernd Schauenberg

Dekan: Prof. Dr. Dieter Tscheulin

Tag des Promotionsbeschlusses: 15. Mai 2009

Die Gutachter wurden durch die Fakultät bestimmt.

Geleitwort

Der Einfluss von Informationstechnologien auf die Organisation kommerzieller Prozesse ist Teil des Wirtschaftslebens geworden. So ermöglicht es Informationstechnologie, bisher gültige Restriktionen des betrieblichen Handels zu entschärfen (bspw. Restriktionen bezüglich Raum und Zeit), wodurch sich veränderte organisatorische und prozesstechnische Gestaltungsoptionen eröffnen. Eine IT-Innovation, welche eine neue Runde in diesem Wettlauf einläuten kann, stellt die Radiofrequenz-Identifikations-Technologie (RFID) dar. So verspricht die Einbettung von RFID-Transpondern in die physikalische Umgebung eine allgegenwärtige und realzeitliche Datenerfassung, wodurch die Lücke zwischen physikalischer Umgebung und deren informatischem Abbild geschlossen werden kann. Im betrieblichen Kontext sind somit Leistungssteigerungen zum einen durch die Reduktion manueller Arbeit (automatisierte Informationssammlung) und zum anderen durch die Ausnutzung zusätzlicher bzw. qualitativ besserer Informationen über die physikalische Umwelt (verbesserte Informationsqualität) denkbar.

Doch obwohl die theoretischen Potentiale von RFID so folgerichtig argumentiert werden können, zeigt die betriebliche Praxis, dass die erhofften Leistungssteigerungen all zu oft ausbleiben. Dies kann dadurch erklärt werden, dass RFID oft noch als reine Automatisierungstechnologie verstanden wird. In seiner Arbeit löst sich Herr Faupel von diesem häufig wenig erfolgreichen Ansatz und fokussiert auf den Entwurf eines Informationssystems, mit Hilfe dessen die durch RFID mögliche erweiterte Informationsbasis weitgehend ausgenutzt werden kann. Dabei untersucht er der Optimierung betrieblicher Prozesse mittels RFID an dem konkreten Beispiel von Mehrprodukt Kanban-Systemen.

Die Arbeit richtet sich aufgrund der fundierten theoretischen Auseinandersetzung mit der RFID-Technologie sowie der Betrachtung eines praxisorientierten Anwendungsfalls gleichermaßen an Wissenschaft und Praxis und stellt einen beachtenswerten Beitrag zur Frage der Ausnutzung der wirtschaftlichen Potenzialen von RFID dar. Es ist daher zu hoffen, dass die Arbeit die verdiente Aufnahme in die Wissenschaft und die betriebswirtschaftliche Praxis findet.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Wintersemester 2008/09 von der Wirtschafts- und Verhaltenswissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität als Dissertation angenommen. Die Arbeit stellt das Ergebnis meiner Untersuchungen zu den ökonomischen Potentialen der RFID-Technologie im Rahmen dezentraler Materialfluss-Steuerungssysteme dar und bildet den Abschluss meiner Promotion am Institut für Informatik und Gesellschaft. Auf meinem Weg erfuhr ich die Unterstützung zahlreicher Wegbegleiter, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bei einigen möchte ich mich dafür besonders bedanken:

Mein akademischen Lehrer und Doktorvater Prof. Dr. Günter Müller gilt mein besonderer Dank für die fachliche und persönliche Unterstützung in jeder Phase meiner Tätigkeit am Institut für Informatik und Gesellschaft. Seine offene und zu jeder Zeit konstruktive Kritik haben das Gelingen dieser Arbeit wesentlich gefördert. Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Bernd Schauenberg möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens danken. Dem Land Baden-Württemberg, das meine Forschung durch ein Stipendium unterstützt hat, bin ich ebenso zum Dank verpflichtet.

Einen wesentlichen Einfluss auf meine Arbeit haben meine Kollegen der Abteilung Telematik gehabt. Insbesondere den Herrn Dr. Jens Strüker und Daniel Gille möchte ich danken. Mit ihnen sind viele Gedanken gemeinsam entwickelt und publiziert worden. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Dr. Oliver Prokein und Herrn Dr. Stefan Sackmann, die ich als Diskussionspartner und Ratgeber überaus schätzen gelernt habe. Herrn Lutz Lowis danke ich für die wertvolle und selbstlose Unterstützung bei der Implementierung des Algorithmuses.

Meinen aufrichtigen Dank möchte ich darüber hinaus meinen Eltern, Brigitte und Dr. Günter Faupel, sowie meinen Geschwister, Elisa und Benjamin, aussprechen, welche mich während meiner gesamten Ausbildung jederzeit uneingeschränkt Unterstützt haben.

Titus Faupel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Techniknutzung in Organisationen.....	1
1.1 Betriebswirtschaftliche Potentiale von RFID	1
1.2 Fallstudie: Mehrprodukt Kanban-Systeme	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
2 Empirische Studie zum betrieblichen Einsatz von RFID.....	8
2.1 Datenbasis der Untersuchung	8
2.2 Anwendungsfelder der RFID-Technologie.....	10
2.3 Betriebliche Leistungssteigerungen und erfolgsrelevante Faktoren	12
2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorgehensmodell zur Bearbeitung der Fallstudie.....	18
3 Anforderungsanalyse: Eigenschaften und Planungsprobleme der variantenreichen Produktion nach Kanban.....	21
3.1 Grundprinzipien und Potentiale der Materialfluss-Steuerung nach Kanban.....	21
3.1.1 Grundprinzipien von Kanban	21
3.1.2 Betriebswirtschaftliche Wirkung von Kanban.....	24
3.2 Charakteristika und Bedeutung der Variantenfertigung	28
3.2.1 Eigenschaften der Variantenfertigung	28
3.2.2 Betriebswirtschaftliche Bewertung der Variantenfertigung	29
3.2.3 Bedeutung der Variantenfertigung	32
3.3 Planungsprobleme in variantenreichen, Kanban-basierten Fertigungssystemen	35
3.3.1 Merkmale des Fertigungssystems.....	35
3.3.2 Beschreibung der Planungsprobleme	39

4	Verfeinerung der Anforderungen an das Informationssystem: Reihenfolgeplanung	45
4.1	Komplexität der Reihenfolgeplanung	45
4.1.1	Spezifikation der Problemvorgaben	45
4.1.2	Zielgrößen der Reihenfolgeplanung	47
4.1.3	Reihenfolgeplanung als kombinatorisches Optimierungsproblem	51
4.2	Verfahren der Reihenfolgeplanung	56
4.2.1	Exakte Verfahren	57
4.2.2	Heuristiken	59
4.2.3	Meta-Heuristiken	62
4.2.4	Bewertung der Verfahren	64
4.3	Flexibilitätsbedarf der Reihenfolgeplanung	68
4.3.1	Flexibilitätsverständnis	68
4.3.2	Flexibilitätsbedarf	71
5	Modellierung des RFID-gestützten Informationssystems	75
5.1	Ein Kennzahlenmodell für die Reihenfolgeplanung	75
5.1.1	Konzeptioneller Rahmen	75
5.1.1.1	Organisatorische Koordinationsflexibilität	76
5.1.1.2	Dispositive Koordinationsflexibilität	78
5.1.2	Aufbau des Kennzahlenmodells	81
5.1.3	Entwicklung von Kennzahlen	85
5.1.4	Ermittlung der Gewichtungsfaktoren	94
5.2	Informationstechnische Infrastruktur	96
5.2.1	Informationsfluss und Aufbau	96
5.2.2	Auswahl des RFID-Systems	101
6	Evaluation	107
6.1	Zum Einsatz von Simulationen als Methode der Evaluation	107
6.2	Das Simulationsexperiment	108
6.2.1	Modellannahmen, Referenzszenarien und Bewertungsgrößen	108
6.2.2	Ablauf der Simulation	111
6.2.3	Simulationsergebnisse	113
6.2.3.1	Ergebnisse Szenario I	113
6.2.3.2	Ergebnisse Szenario II	116
6.2.3.3	Ergebnisse Szenario III	119
6.2.3.4	Ergebnisse Szenario IV	122
6.2.4	Bewertung	125
7	Einsatzhindernisse von RFID-gestützten Informationssystemen	129
7.1	Integrationshürden	130

7.2	Kosten-Nutzen Hürden	132
7.3	Qualitätshürden.....	134
7.4	Mitarbeiterbezogene und rechtliche Hürden.....	136
7.5	Bewertung.....	138
8	Ausblick	140

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Neue Möglichkeiten der Informatisierung durch RFID.....	2
Abbildung 2-1: Einsatz der RFID-Technologie bei den befragten Unternehmen.....	10
Abbildung 2-2 : Realisierung angestrebter monetärer und nicht-montärer Ziele des RFID-Einsatzes	13
Abbildung 2-3: Realisierung der Performancesteigernden Effekt von RFID	14
Abbildung 2-4: Fragestellung der Regressionsanalyse	15
Abbildung 3-1: Das Kanban-Regelkreissystem	23
Abbildung 3-2: Betriebliche Leistungssteigerungen durch die Einführung von Kanban.....	27
Abbildung 3-3: Ausgewählte Varianten der Mercedes C-Klasse 2008.....	33
Abbildung 3-4: Zukünftige Entwicklung der Variantenzahl bei Automobilzulieferern in Deutschland (Planungshorizont 10 Jahre)	34
Abbildung 3-5: Ausbringungsbezogene Merkmale der variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung.....	36
Abbildung 3-6: Einsatzbezogene Merkmale der variantenreichen, Kanban-basierten Fertigung	37
Abbildung 3-7: Prozessorientierte Merkmale der variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung	39
Abbildung 4-1: Flexibilisierungsdimensionen	69
Abbildung 5-1: Zielsystem der Produktionslogistik	76
Abbildung 5-2: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung I (Aufbau)	82
Abbildung 5-3: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung II (Zielsystem der Logistik).....	83
Abbildung 5-4: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung III (Gewichtungsfaktoren)	84
Abbildung 5-5: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung IV (entwickelte Kennzahlen).....	86
Abbildung 5-6: AHP-Skala	95
Abbildung 5-7: Mediatorbasierter Steuerungsansatz	97
Abbildung 5-8: Informationsfluss und Aufbau des Systems.....	99
Abbildung 6-1:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario I(a)).....	114
Abbildung 6-2:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario I(b)).....	115
Abbildung 6-3:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario II(a)).....	117
Abbildung 6-4:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario II(b))	118
Abbildung 6-5:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario III(a))	120
Abbildung 6-6:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario III(b))	121
Abbildung 6-7:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario IV(a))	123
Abbildung 6-8:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario IV(b)).....	124
Abbildung 7-1: Hürden beim Einsatz der RFID-Technologie in Deutschland	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Parameter der Umfrage.....	9
Tabelle 2-2: Anwendungsfelder der RFID-Technologie.....	11
Tabelle 2-3: Einfluss der Effekte auf die realisierten Zielerreichung	16
Tabelle 4-1: Potentielle Charakteristika von Reihenfolgeproblemen.....	46
Tabelle 4-2: Anzahl der Lösungsmöglichkeiten des symmetrischen Traveling Salesman Problem in Abhängigkeit der Anzahl der zu besuchenden Orte.....	55
Tabelle 5-1: Leistungsmerkmale passiver RFID-Systeme	105
Tabelle 6-1: Parameter der Simulation (Produktvarianten).....	109

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic-Hierarchy-Process
BVL	Bundesvereinigung der Logistik
EAN	International Article Number (früher European Article Number)
EDI	Electronic Data Interchange
EPC	Electronic Product Code
GALBP	General Assembly Line Balancing
GLN	Global Location Number
HF	High Frequency (Kurzwellen)
ITU	International Telecommunication Union
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LED	Light Emitting Diode
LF	Low Frequency (Langwellen)
MAS	Multiagentensysteme
ONS	Object Name Service
RFID	Radio Frequency Identification
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
SHF	Super High Frequency (Zentimeterwellen)
SMD	Surface-mounted device
UHF	Ultra High Frequency (Mikrowellen)
UPC	Universal Product Code
URL	Uniform Resource Locator
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Techniknutzung in Organisationen

1.1 Betriebswirtschaftliche Potentiale von RFID

Basierend auf der Möglichkeit einer draht- und sichtkontaktlosen Kommunikation, gestattet die Radiofrequenz-Identifikations-Technologie (RFID)¹ eine automatisierte Erfassung objektbezogener Daten in Echtzeit (Lyytinen & You 2002, S. 63). Die Fähigkeit der Echtzeit-Abbildung eröffnet im betrieblichen Kontext das Potenzial, die Lücke zwischen physikalischer Umgebung und deren informatischem Abbild weiter zu schließen (Abbau von Medienbrüchen) (Fleisch & Dierkes 2003, S. 611; Müller et al. 2003, S. 172). Abbildung 1-1 verdeutlicht diesen Trend auf Basis einer Kategorisierung verschiedener Formen der Informationserfassung, die durch Verknüpfung der physikalischen mit der informatischen Welt ermöglicht werden, an Hand der Dimensionen „Häufigkeit der Datenerfassung“ und „Menge der erfassten Objekte“. Letztendlich wird es durch den Einsatz von RFID möglich, dass Informationssysteme über ein stets aktuelles und hinsichtlich betriebswirtschaftlicher Entscheidungsgrößen vollständiges Realitätsmodell der Umgebung verfügen („permanente Vollerfassung“).

¹ RFID ermöglicht es, mittels spezieller Lesegeräte Daten von mit Antennen ausgestatteten Mikrochips (Transponder) auszulesen. RFID-Transponder bestehen im einfachsten Fall aus einem miniaturisierten Prozessor und einer angegliederten Antenne, über die eine draht- und sichtkontaktlose Kommunikation möglich wird (durch Nutzung des elektromagnetischen Feldes des Lesegeräts). Internationale Aufmerksamkeit hat RFID etwa durch den Extra Future Store der Metro Group erfahren. In dieser experimentellen Einkaufsstätte wurde, neben dem Einsatz von RFID zur Optimierung logistischer Prozesse, auch eine Verbesserung und Individualisierung der Kundenkommunikation mit Hilfe von RFID erprobt (Strüker 2005, S. 86).

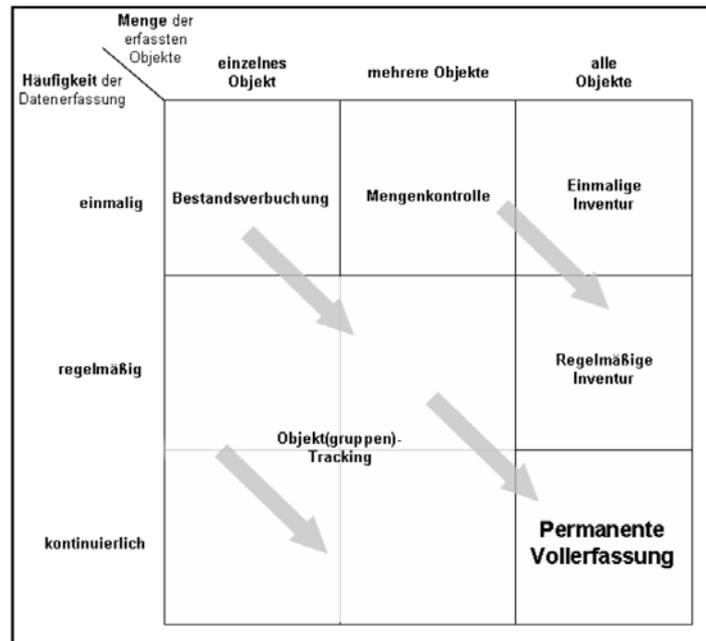


Abbildung 1-1: Neue Möglichkeiten der Informatisierung durch RFID
(Quelle: In Anlehnung an (Gille 2007, S. 30))

Durch den Abbau von Medienbrüchen sind neben Kostenersparnissen bei der Informationserfassung ebenso Verbesserungen der Informationsqualität erreichbar² (Tellkamp 2006, S. 57). Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz von RFID eine allgegenwärtige Informationsverarbeitung und Kommunikationsfähigkeit physikalischer Objekte. Gegenstände werden mit Hilfe von RFID in die Lage versetzt, Daten zu speichern, zu sammeln³ und zu kommunizieren. Dadurch erhalten diese eine erweiterte Funktionalität und somit eine neue, zusätzliche Qualität (Mattern 2005, S. 63).

In Anlehnung an MOONEY ET AL. und TELLKAMP können die betrieblichswirtschaftlichen Potentiale von RFID verschiedenen sich gegenseitig nicht ausschließenden Kategorien (Effekten) zugeordnet werden (Mooney, Gurbaxani & Kraemer 1996, S. 68; Tellkamp 2006, S. 57):

1. *Automatisierte Informationsbeschaffung (Automatisierung):* Durch eine automatisierte Informationssammlung kann händische Informationserfassung ersetzt werden. Beispielsweise kann ein RFID-System am Wareneingang die Notwendigkeit

² Die Verbesserung der Informationsqualität kann sich auf die Korrektheit, Vollständigkeit, Aktualität oder Objektivität der Informationen beziehen (Tellkamp 2006, S. 58).

³ Das Sammeln von Informationen (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit usw.) ist nur durch die Kombination mit Sensortechnologien möglich.

der Registrierung eingehender Waren durch einen Mitarbeiter ersetzen. Somit können etwa Personalkosten eingespart werden. Das Ausmaß der Kosteneinsparungen ist dabei insbesondere von der Häufigkeit der erforderlichen Datenerfassung abhängig (Laubacher et al. 2006, S. 2; Subirana et al. 2003, S. 6).

2. *Verbesserte Informationsqualität (Informatisierung)*: Der Einsatz von RFID ermöglicht es, zusätzliche bzw. qualitativ bessere Informationen über die physikalische Umwelt zu sammeln. Die Verbesserung der Informationsqualität kann sich auf die Korrektheit, Vollständigkeit, Aktualität oder Objektivität der Informationen beziehen (Tellkamp 2006, S. 58). Suboptimale Koordinationsentscheidungen aufgrund schlechter Informationslage (z.B. aufgrund menschlicher Fehler bei der Informationserfassung) können somit vermieden werden. Beispielsweise kann durch eine fehlerfreie Bestanderfassung eine optimale Nachbestellung von Vorprodukten sichergestellt und somit eine Verbesserung der Liefertreue erreicht werden. Darüber hinaus können auch Kosten aufgrund unvollständiger bzw. fehlerhafter Kundenlieferungen vermieden werden (bspw. Vermeidung von Retouren) (Hardgrave, Waller & Miller 2005).
3. *Veränderte oder neue Prozesse (Transformation)*: Auf Grund gesunkener Informationskosten und der verbesserten Informationslage wird es möglich, bestehende Prozesse zu verändern und somit effizienter und/oder effektiver zu gestalten (Malone 1987, S. 1317). Beispielsweise kann eine exakte und zeitnahe Erfassung des Kundenbedarfs zu einer Vorteilhaftigkeit einer Just-in-Time-Produktion führen und somit eine Reduzierung der Bestände und eine Verringerung der Durchlaufzeiten erreicht werden. Neben der Veränderung von Prozessen ermöglicht die verbesserte Informationslage durch RFID die Einführung völlig neuer Produkte und Dienstleistungen (bspw. Angebot von Tracking & Tracing-Dienste für Kunden).

Mittlerweile konnte im Rahmen einiger Fallstudien der betriebliche Erfolg eines RFID-Einsatzes aufgezeigt werden. So wurden beispielsweise Verringerungen von Stockouts⁴ um 16 % bei Wal-Mart (Thiesse & Fleisch 2007, S. 71) sowie Einsparungen von Lagerkosten beim Management von Standardbehältern bei Volkswagen in Höhe von 67 % (Strassner 2005, S. 153) nachgewiesen. Bisherige Untersuchungen deuten aber auch darauf hin, dass

⁴ Als Stockout (Regallücke) wird im Einzelhandel ein Regalplatz bezeichnet, der nicht mehr durch den vorgesehenen Artikel gefüllt ist.

eine Ausnutzung der wirtschaftlichen Potentiale der Technologie in der Regel erst erreicht werden kann, sobald es gelingt, die durch RFID möglichen, zusätzlichen bzw. qualitativ besseren Informationen über die physikalische Umwelt auszunutzen (Informatisierung). Die Fallstudien zeigen, dass die Beschränkung von RFID auf eine reine Automatisierungstechnologie in der Regel nicht zu betrieblichen Leistungssteigerung führt (Dittmann 2006, S. 57; Tellkamp 2006, S. 76). Bei der Planung und Durchführung von RFID-Projekten ist demnach der Entwurf von Informationssystemen zur zweckmäßigen Verarbeitung der neuen Informationsbasis als erfolgskritische Aufgabe zu sehen.

1.2 Fallstudie: Mehrprodukt Kanban-Systeme

In der vorliegenden Arbeit werden die Potentiale der RFID-Technologie zur Optimierung betrieblicher Leistungsprozesse am Beispiel von Mehrprodukt Kanban-Systemen untersucht⁵.

Die dezentrale Materialfluss-Steuerung nach Kanban erfreut sich aufgrund ihrer Effizienz sowie ihrer Einfachheit einer weiten Verbreitung⁶. Es zeigt sich aber, dass die Übertragung der ursprünglich für die Einprodukt-Fertigung ausgelegten Methode auf den realitätsnäheren Mehrproduktfall, im Rahmen dessen eine Produktionsstelle mehrere direkt nachgelagerte Produktionsstellen beliefert, nach wie vor ein nur suboptimal gelöstes Problem darstellt (Petersen 2004, S. 243). So sind insbesondere die bisherigen Möglichkeiten zur Planung der Bearbeitungsreihenfolge konkurrierender Aufträge (Reihenfolgeplanung) als problematisch zu bewerten. Aufgrund der NP-schwere⁷ des Reihenfolgenproblems ist dies grundsätzlich mit einer erheblichen Komplexität verbunden. Insbesondere aber in Kan-

⁵ So verwundert es, dass RFID bisher nur in sehr begrenztem Umfang zur Unterstützung des in der industriellen Fertigung vielfach eingesetzten Materialfluss-Steuerungsmechanismus Kanban genutzt wird. Zwar existieren erste Ansätze, in denen RFID im Rahmen von Kanban-Systemen in nahe liegender Weise eingesetzt wird, diese verfolgen allerdings lediglich das Ziel, die bisherige händische Informationserfassung (bspw. das Auslesen der Kanban-Karte mit einem Barcode-Lesegerät) mittels RFID zu automatisieren (vgl. beispielsweise den in Kapitel 5.2.1 dargestellten Anwendungsfall der Robert Bosch GmbH). Nicht berücksichtigt werden bislang die neuen Möglichkeiten der Informatisierung. Vor dem Hintergrund der bisherigen Untersuchungen (Dittmann 2006, S. 57; Tellkamp 2006, S. 76) hinsichtlich der Ausnutzung der Nutzenpotentiale von RFID erscheint dieses Vorgehen zu kurz gegriffen. Es ist nicht davon auszugehen, dass auf diese Weise die Potentiale der Technologie ausgeschöpft werden können.

⁶ Vgl. bspw. (Lack 1996, S. 2775; Wildemann 2007, S. 15).

⁷ Zur Klasse der NP-schweren werden solche Probleme gezählt, für die bisher kein Algorithmus bekannt ist, der auch das am schwierigsten zu lösende Problem desselben Typen mit polynomialem Aufwand löst. Die Probleme der Klasse NP gelten für praktische Zwecke als nicht lösbar, da der Aufwand zu ihrer Berechnung mit wachsender Problemgröße mehr als polynomial ansteigt (Domschke & Drexl 2007, S. 127).

ban-Systemen ist die Reihenfolgeplanung von hoher Bedeutung, da in Kanban gemäß dem Just-in-Time Prinzip nur produziert wird, wenn ein konkreter Bedarf vorliegt und somit die Entscheidung bezüglich der Bearbeitungsreihenfolge häufig auch determiniert, ob die Produktion einer nachgelagerten Fertigungsstufe unterbrochen werden muss. Aktuelle Verfahren der Reihenfolgeplanung erlauben allerdings eine nur sehr unflexible Entscheidungsfindung, was eine adäquate Anpassung an die sich heute häufig ändernde Marktbedingung verhindert. Dies bezieht sich auf zwei Kritikpunkte: Erstens ermöglichen bisherige Verfahren in der Regel nur eine Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung einer einzigen Zielgröße. In der betrieblichen Praxis müssen jedoch mehrere Zielgrößen gleichzeitig berücksichtigt werden, die teilweise in einem konkurrierenden Verhältnis zueinander stehen. Aufgrund der vorherrschenden Zielkomplexität existiert keine „ideale“ Lösung, welche für alle Zielgrößen gleichermaßen optimal ist. Vielmehr sollte aus der aktuellen Marktsituation heraus bzw. der Unternehmensstrategie folgend die Bedeutung der einzelnen Ziele flexibel gewichtet werden. Zweitens weist der Großteil der bisherigen Verfahren einen erheblichen Rechenaufwand auf (bspw. Branch & Bound Verfahren), welcher zu einer Verzögerung der Ausführung operativer Tätigkeiten führt. Insbesondere für den Einsatz in Kanban-basierten Produktionssystemen ist diese Trägheit der Entscheidungsfindung ein bedeutendes Hindernis, da in solchen Systemen aufgrund des geringen Bestandsgrades und der sehr späten Beauftragung zur Nachproduktion eine schnelle Reaktionszeit gefordert wird.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines neuen RFID-gestützten Informationssystems, welches eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung in Kanban erlaubt. Mit Hilfe des Systems soll eine gezielte und variable Beeinflussung der Reihenfolgeplanung hinsichtlich mehrerer betriebswirtschaftlich relevanter Zielgrößen ermöglicht werden. Dabei soll sichergestellt werden, dass die Entscheidungen bezüglich des Reihenfolgeplans ohne bedeutenden Zeitverlust getroffen werden können und somit eine zeitnahe Anpassung an eine veränderte Produktionssituation möglich ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Ausgangspunkt der Arbeit stellt eine branchenübergreifende Umfrage zum aktuellen Einsatz der RFID-Technologie unter 114 Anwender dar (Kapitel 2). Ziel dieser Untersuchung ist die empirische Überprüfung der gegenwärtigen Eignung von RFID für die Optimierung logistischer Prozesse sowie die Ableitung der erfolgsrelevanten Faktoren eines RFID-Einsatzes. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Untersuchung schließt Kapitel 2 mit ei-

nem Vorgehensmodell für die weitere Bearbeitung der Fallstudie. In Anlehnung an die Vorgehensmodelle der Systementwicklung werden drei Phasen unterschieden: Anforderungsanalyse (Kapitel 3 und 4), Modellierung des Systems (Kapitel 5) und Evaluierung (Kapitel 6).

- Kapitel 3 und 4 beschäftigen sich mit der Ermittlung der *Anforderungen* der betrachteten Fallstudie an das zu entwickelnde RFID-gestützte Informationssystem:
 - Im Mittelpunkt von Kapitel 3 steht die Analyse des betrachteten Geschäftsprozesses. Dabei erfolgt eine ausführliche Untersuchung der Merkmale der variantenreichen Fertigung nach Kanban. Darauf aufbauend werden die wesentlichen Planungsprobleme abgeleitet.
 - Im Rahmen von Kapitel 4 erfolgt eine Verfeinerung der Anforderungsanalyse im Hinblick auf das in dieser Arbeit zu behandelnde Teilproblem des betrachteten Fertigungssystems. Es werden die Problemvorgaben der Reihenfolgenplanung spezifiziert, sowie die Komplexität des Optimierungsproblems aufgezeigt. Die daran anschließende Analyse aktueller Verfahren der Reihenfolgenplanung zeigt auf, dass bisher eine nur sehr unflexible Entscheidungsfindung möglich ist. Die Flexibilisierung der Reihenfolgenplanung stellt die wesentliche (Qualitäts-) Anforderung an das zu entwickelnde System dar. Diese Anforderung wird in Kapitel 4.3 ausführlich erläutert.
- In Kapitel 5 werden die im vorangegangenen Schritt in abstrakter Form dargestellten Anforderungen in einen konkreten Lösungsansatz überführt (*Modellierung des Systems*). Das vorgeschlagene RFID-gestützte Informationssystem soll insbesondere eine flexible Steuerung hinsichtlich der verschiedenen und zum Teil gegenläufigen logistischen Zielgrößen erlauben. Dabei soll es ermöglicht werden, dass die Entscheidungen bezüglich des Reihenfolgeplans ohne bedeutenden Zeitverlust getroffen werden können, um eine zeitnahe Anpassung an eine veränderte Produktionssituation zu erlauben. Der Entwurf des hierfür vorgeschlagenen Verfahrens steht im Mittelpunkt von Kapitel 5.1. Kapitel 5.2 beschreibt daran anschließend die zur Anwendung des Verfahrens notwendige informationstechnische Infrastruktur.
- In Kapitel 6 erfolgt die *Evaluation* des entwickelten System hinsichtlich seiner Funktionalitäten sowie den betriebswirtschaftlichen Wirkungen. Dafür wird, aufbauend auf einer prototypischen Implementierung, ein Simulationsexperiment

durchgeführt. Nachdem im Rahmen von Kapitel 6.1 zunächst der Einsatz von Simulationen als Methode der Evaluation diskutiert wird, erfolgt in Kapitel 6.2 das Simulationsexperiment. Die Ergebnisse des Experimentes werden abschließend bewertet.

Schließlich werden in Kapitel 7 die Einsatzhindernisse von RFID mit Hilfe einer empirischen Studie analysiert und diese im Hinblick auf das entwickelte System diskutiert. Dabei werden vier Gruppen von Einsatzhindernisse betrachtet: Integrationshürden, Kosten-Nutzen Hürden, Qualitätshürden sowie mitarbeiterbezogenen und rechtliche Hürden.

Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen schließt die Arbeit mit der Ableitung offener Forschungsfragen. Es werden sowohl fortführende Fragestellungen im Bezug auf die betrachtete Fallstudie als auch für das übergeordneten Forschungsgebiet, die Geschäftsprozessoptimierung mittels RFID, aufgezeigt.

2 Empirische Studie zum betrieblichen Einsatz von RFID

Während die Potentiale der RFID-Technologie mittlerweile in einer Reihe von theoretischen Arbeiten diskutiert wurden⁸, basieren empirische Untersuchungen über den betrieblichen Einsatz von RFID bisweilen überwiegend auf der Analyse einzelner Anwendungsfälle⁹, wie beispielsweise der Einsatz von RFID zur Vermeidung von Out-of-Stock Situationen bei einem Einzelhändler (Hardgrave, Waller & Miller 2005) oder zur Realisierung von Personaleinsparungen im Lager eines Papierherstellers (Karagiannaki, Mourtos & Pramatarı 2007)¹⁰. Die Ableitung von branchen- und anwendungsübergreifenden Aussagen auf Basis solcher Einzelfallstudien ist mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Gegenstand von Kapitel 2 ist daher eine branchenübergreifende empirische Studie über den betriebswirtschaftlichen Erfolg sowie die Nutzungsformen der RFID-Technologie unter 114 Anwendern. Ziel dieser Untersuchung ist die Überprüfung der gegenwärtigen Eignung von RFID für die Optimierung logistischer Prozesse sowie der Herleitung der erfolgsrelevanten Faktoren eines RFID-Einsatzes. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Untersuchung schließt das Kapitel mit einem Vorgehensmodell für die weitere Bearbeitung der Fallstudie.

2.1 Datenbasis der Untersuchung

Die Analyse basiert auf Daten einer branchenübergreifenden Umfrage zum Einsatz der RFID-Technologie in deutschen Unternehmen¹¹. Der zugrundeliegende Fragebogen wurde aufbauend auf einer quantitativen Studie (Strüker & Gille 2006) entwickelt und mit Hilfe mehrerer Pretests unter RFID-Anwendern auf Verständlichkeit und Praxisrelevanz getestet und angepasst. Die Beantwortung der Fragebögen erfolgte zwischen Anfang April 2007

⁸ Vgl. bspw. (Fleisch, Christ & Dierkes 2005, S. 3; Mattern 2005, S. 39).

⁹ Vgl. bspw. (Hardgrave, Waller & Miller 2005; Karagiannaki, Mourtos & Pramatarı 2007).

¹⁰ Vgl. bspw. auch (Gaukler & Hausmann 2008, S. 1083; Laubacher, Kothari, Malone & Subirana 2006; Strassner 2005, S. 153; Subirana, Eckes, Herman, Sarma & Barrett 2003, S. 6).

¹¹ Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse findet sich auch in (Faupel, Strüker & Gille 2008; Strüker, Gille & Faupel 2008).

und Anfang August 2007. Für die Zusammenstellung der Stichprobe wurden Unternehmen kontaktiert, von denen bekannt war, dass diese die RFID-Technologie nutzen. Zusätzlich wurden Teilnahmeaufrufe in mehreren praxisnahen Fachzeitschriften und Online-Publikationen veröffentlicht (bspw. VDI nachrichten, impulse newsletter, RFID im Blick etc.) und eine Auswahl von Unternehmen aus der Hoppenstedt Firmendatenbank mittels E-Mail angeschrieben. Insgesamt konnten so 260 Unternehmen in die Studie einbezogen werden. Von diesen teilnehmenden Unternehmen wurden 114 als RFID-Anwender identifiziert. Als RFID-Anwender werden dabei solche Unternehmen bezeichnet, die RFID-Technologie entweder im Rahmen eines Prototyps, in einem Pilotprojekt oder im regulären Betrieb einsetzen. Von den 114 betrachteten RFID-Anwendern¹² nutzen 15 % RFID im Rahmen eines Prototypen, 32 % in einem Pilotprojekt und 54 % im regulären Betrieb (vgl. Tabelle 2-1 für die grundlegenden Parameter der Umfrage).

Forschungsansatz	Explorative Studie Quantitative Umfrage
Methode der Datenerhebung	Online Fragebogen
Umfragezeit	1. April - 1. August 2007
Selektion der Stichproben	Kombination von zufällig und gezielt ausgewählten Unternehmen
Zielgruppe	CEOs, CIOs, Leiter der Logistik
Stichprobengröße	N= 260 n= 114 (RFID-Anwender)

Tabelle 2-1: Parameter der Umfrage

Die Auswertung aktueller Literatur und Fallstudien zeigt, dass die Branchen verarbeitendes Gewerbe, Logistik und Dienstleistungen sowie der Handel momentan den größten Einsatz der RFID-Technologie aufweisen (Hardgrave, Waller & Miller 2005; Holmqvist & Steffansson 2006; Laubacher, Kothari, Malone & Subirana 2006; Loebbecke 2007; Subirana, Eckes, Herman, Sarma & Barrett 2003; Wamba, Lefebvre & Lefebvre 2006). Dies spiegelt sich in der betrachteten Zufallsstichprobe wider. So sind 43,0 % (Basis: 114) der Logistik- und Dienstleistungsbranche, 35,1 % dem verarbeitendem Gewerbe und 10,5 % der Han-

¹² Die Anzahl von 114 befragten Unternehmen, die die RFID-Technologie einsetzen, ist als beträchtlich einzuschätzen. Eine hinsichtlich Größenklassen und Branchen repräsentative Befragung von 506 Unternehmen im Jahr 2005 ergab, dass zu dieser Zeit lediglich 17 Unternehmen überhaupt in die RFID-Technologie investiert hatten (Sackmann & Strüker 2005, S. 16). Auch kann die Gesellschaft EPCglobal, die die globale Verbreitung der mit Abstand prominentesten RFID-Industriestandards verfolgt, Anfang Oktober 2007 erst 100 Vollmitglieder in Deutschland zählen.

delsbranche zuzuordnen. Lediglich 11,4 % der Unternehmen ist keiner dieser drei Branchen zuzuordnen. Darüber hinaus verteilt sich die Stichprobe zu 37,5 % auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und zu 62,5 % auf Großunternehmen¹³ (Basis 104). Von den betrachteten Unternehmen setzen bereits 38,8 % (Basis 260) die RFID-Technologie ein und weitere 17,3 % planen dies in den nächsten zwei Jahren (Abbildung 2-1). Von den Unternehmen, die einen RFID-Einsatz bereits realisiert haben, plant die überwiegende Mehrheit (76,2 %) ihre Aktivitäten auszuweiten und lediglich 2,0 % plant den RFID-Einsatz wieder einzustellen. Dies kann als Zeichen für den Erfolg des bisherigen Einsatzes von RFID angesehen werden.

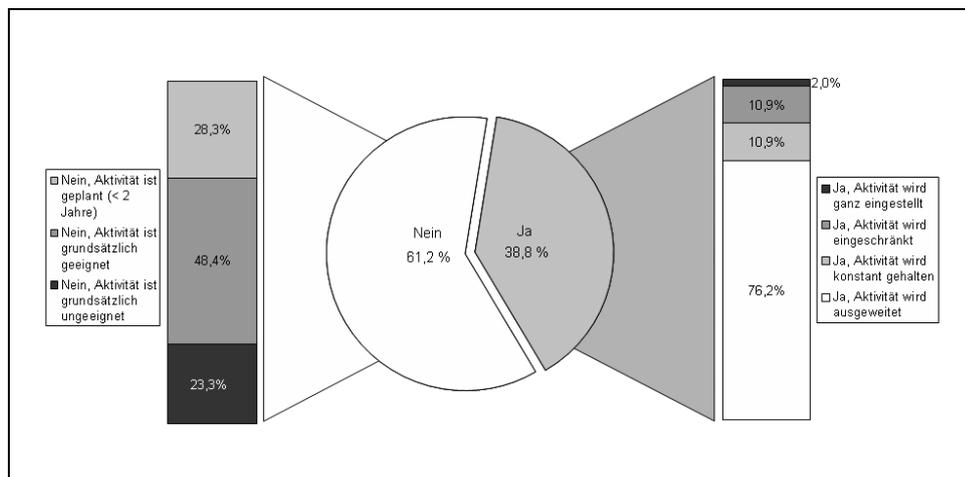


Abbildung 2-1: Einsatz der RFID-Technologie bei den befragten Unternehmen (Basis 260)

2.2 Anwendungsfelder der RFID-Technologie

Die Vielzahl möglicher Anwendungen, für die RFID-Technologie genutzt werden kann, wurde in einem Referenzmodell von der EU-Koordinierungsgruppe „*CE RFID*“ erarbeitet¹⁴ und im Rahmen der Umfrage empirisch evaluiert. Auf oberster Ebene wird dabei zwischen dem RFID-Einsatz mit Objekt- und Personenbezug unterschieden (Objekt- vs. personenbezogenes Tagging). Im Rahmen dieser Arbeit ist im Besonderen der Bereich „objektbezogenes Tagging“ von Interesse, weshalb dieser detailliert erfasst wurde. Hier wird

¹³ Die Abgrenzung zwischen KMU und Großunternehmen wurde entsprechend der im Amtsblatt L 124 vom 20.5.2003 der Europäischen Kommission festgelegten Mitarbeiterzahlen und finanziellen Schwellenwerten zur Definition der Unternehmensklassen vorgenommen.

¹⁴ Vgl. <http://www.rfid-in-action.eu>.

gemäß CE RFID wiederum zwischen den Unterbereichen „Logistik“, „Produktion“, „Überwachung und Wartung“ sowie „Produktsicherheit, -Qualität und -Informationen“ unterschieden, innerhalb derer die einzelnen Anwendungen, z.B. Inventarisierung, angesiedelt sind. Es zeigt sich, dass insbesondere die unternehmensinterne Logistik, der Diebstahlschutz, die Inventarisierung, die Automatisierung und Prozesskontrolle sowie die Zugangskontrolle zu den oft realisierten Anwendungen zählen (vgl. Tabelle 2-2). Vergleicht man den Anteil der Unternehmen, die eine Anwendung in den Unterbereichen realisiert haben, stellt man fest, dass die meisten Anwendungen derzeit in der Logistik (71,9 %) zu finden sind.

Anwendungsfeld		Anwendungen	Einsatz
Objektbezogenes Tagging	Logistik (71,9%)	Unternehmensinterne Logistik	57,0%
		Closed-Loop Logistik	44,7%
		Fertigungslogistik	15,8%
		Unternehmensübergreifende Logistik	23,7%
	Produktion, Überwachung & Wartung (50,9%)	Inventarisierung	42,1%
		Automatisierung & Prozesskontrolle	35,1%
		Wartung	29,1%
		Facility Management	13,2%
	Produktsicherheit, -qualität und -informationen (55,3%)	Diebstahlschutz	48,4%
		Fälschungsschutz	20,0%
		Warenverfügbarkeit	21,9%
		Produktzustandsinformationen	8,8%
		Produktinformationen für Kunden	26,3%
Personenbezogenes Tagging	Zugangskontrolle und Tracking/Tracing von Individuen		56,1%
	Kundenkarten, Mitgliedsausweise und Bezahlung		24,6%
	Gesundheitswesen (eHealth)		11,4%
	Sport, Freizeit und Haushalt		21,1%
	Öffentlicher Dienst		14,0%

Tabelle 2-2: Anwendungsfelder der RFID-Technologie

(Basis 114, Mehrfachantworten möglich)

2.3 Betriebliche Leistungssteigerungen und erfolgsrelevante Faktoren

Des Weiteren wird analysiert, in wie weit die betrachteten Unternehmen ihre mit einem RFID-Einsatz angestrebten Ziele erreichen konnten. Dafür wurden auf Grundlage von Expertengesprächen und einer ausführlichen Literaturrecherche¹⁵ 14 monetäre und nicht-monetäre Verbesserungsziele ausgewählt, welche eine Konsequenz aus einem RFID Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen sein können. Die Befragten hatten diese Ziele auf einer Fünfer-Skala von 1= „vollständig“ bis 5= „überhaupt nicht“ dahingehend zu bewerten, in welchem Umfang sie diese tatsächlich erreichen konnten. Festzustellen ist, dass ein bemerkenswert hoher Anteil der Unternehmen ihre angestrebten Optimierungsziele erreichen konnten: Im Durchschnitt konnten knapp 50 % der betrachteten Unternehmen ihre angestrebten Prozessverbesserungen bereits realisieren (vgl. Abbildung 2-2). Dabei zeigt sich, dass die Erreichung der einzelnen Ziele weitgehend unabhängig von der Branchenzugehörigkeit ist. So sind keine statistisch signifikanten Zusammenhänge (Signifikanzniveau 5%) zwischen den Zielerreichungen und der Branchenzugehörigkeit (Kruskal-Wallis-Test¹⁶) feststellbar.

¹⁵ Vgl. bspw. (Dighero et al. 2005, S. 247; Strassner 2005, S. 153; Tellkamp 2006, S. 76). Expertengespräche wurden u.a. mit der Metro AG, SICK AG, SAP AG durchgeführt.

¹⁶ Reduktion von Produktionsstillständen (n=16, $\chi^2=3.17$, sig.=17.2%); Verbesserung von Qualitätskontrollen (n=32, $\chi^2=0.12$, sig.=73.6%); Reduktion der Durchlaufzeit (n=31, $\chi^2=0.42$, sig.=80.8%); Reduktion der Inventurkosten (n=19, $\chi^2=3.29$, sig.=19.3%); Reduktion der Bestände (n=31, $\chi^2=4.55$, sig.=10.3%); Verbesserung der Liefertreue (n=29, $\chi^2=0.54$, sig.=76.2%); Vermeidung von Retouren (n=16, $\chi^2=4.13$, sig.=12.7%); Verbesserung der Lieferbereitschaft (n=31, $\chi^2=2.87$, sig.=23.8%); Vermeidung von Nachbearbeitungen (n=14, $\chi^2=2.90$, sig.=8.8%); Reduktion von Diebstählen (n=26, $\chi^2=1.09$, sig.=58.1%); Reduktion von Lieferengpässen (n=20, $\chi^2=2.60$, sig.=27.2%); Vermeidung von Anpassungen nach Auslieferung (n=15, $\chi^2=2.08$, sig.=35.3%); Reduktion von Materialverschwendung (n=8, $\chi^2=2.28$, sig.=13.1%).

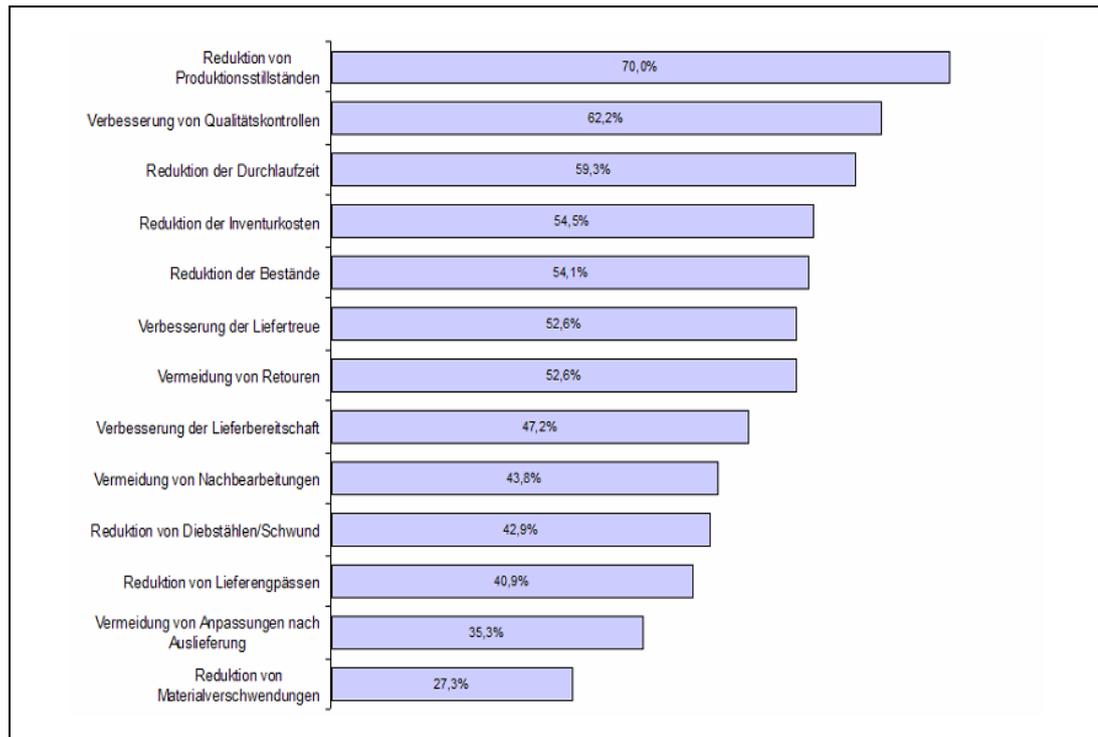


Abbildung 2-2 : Realisierung angestrebter monetärer und nicht-monetärer Ziele des RFID-Einsatzes

(Nur Unternehmen, die jeweiliges Ziel auch verfolgt haben; Summe vollständig und größtenteils erreicht; Basis: 54-20)

In einem nächsten Schritt wird empirisch überprüft, ob und in welchem Ausmaß die Erreichung von Nutzensteigerungen, d.h. die Verbesserung monetärer als auch nicht-monetärer Leistungsmerkmale von Geschäftsprozessen, mit den drei möglichen nutzensteigernden Effekten (Automatisierung, Informatisierung, Transformation) erklärt werden kann¹⁷. So geben einige Fallstudien (Dittmann 2006, S. 57; Tellkamp 2006, S. 76)¹⁸ Hinweise darauf, dass der betriebliche Einsatz von RFID erst zu betrieblichen Leistungssteigerungen beitragen kann, sobald die durch RFID möglichen, zusätzlichen bzw. qualitativ besseren Informationen über die physikalische Umwelt ausgenutzt werden können (Informatisierung). Branchenübergreifende, empirisch gesicherte Befunde liegen hierfür bisher aber nicht vor.

Abbildung 2-3 zeigt, dass abweichend von der häufig dargelegten Argumentation (vgl. bspw. (Laubacher, Kothari, Malone & Subirana 2006)), wonach die „Informatisierung“ und die „Transformation“ aufgrund höherer Investitionskosten seltener verwirklicht wer-

¹⁷ Die folgende Analyse basiert ausschließlich auf Daten der 114 RFID-Anwender, da nur von ihnen verlässliche Aussagen bezüglich der erreichten Performancesteigernden Wirkung von RFID zu erwarten sind.

¹⁸ Vgl. dazu auch die vielbeachteten Studien von BRYNJOLFSSON (Brynjolfsson 2003; Brynjolfsson & Hitt 2000, S. 23) hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Investitionen in Informationstechnologien und Produktivitätssteigerungen, welche zu ähnlich Ergebnissen gelangen.

den, in den betrachteten Unternehmen alle drei Effekte relativ häufig realisiert wurden. Mit 87,7 % (Basis 107) stellt die Reduktion manueller Tätigkeit aktuell den am häufigsten umgesetzten Effekt dar. Die Nutzung besserer Informationen über betriebliche Ressourcen und die Möglichkeit einer Veränderung von Prozessen bzw. eine Verwirklichung neuer Prozesse wurden bisher bei 72,1 % bzw. 64,8 % der Unternehmen realisiert (Basis 105). Zu beachten ist hierbei allerdings, dass sich die möglichen Effekte der RFID-Technologie nicht gegenseitig ausschließen. So zeigt sich, dass 95,6 % (Basis 45) der Unternehmen, die RFID für eine Transformation von Prozessen einsetzen, gleichzeitig auch die Möglichkeit der Reduktion manueller Arbeit nutzen und 86,4 % (Basis 44) profitieren zusätzlich von besseren Informationen über betriebliche Ressourcen.

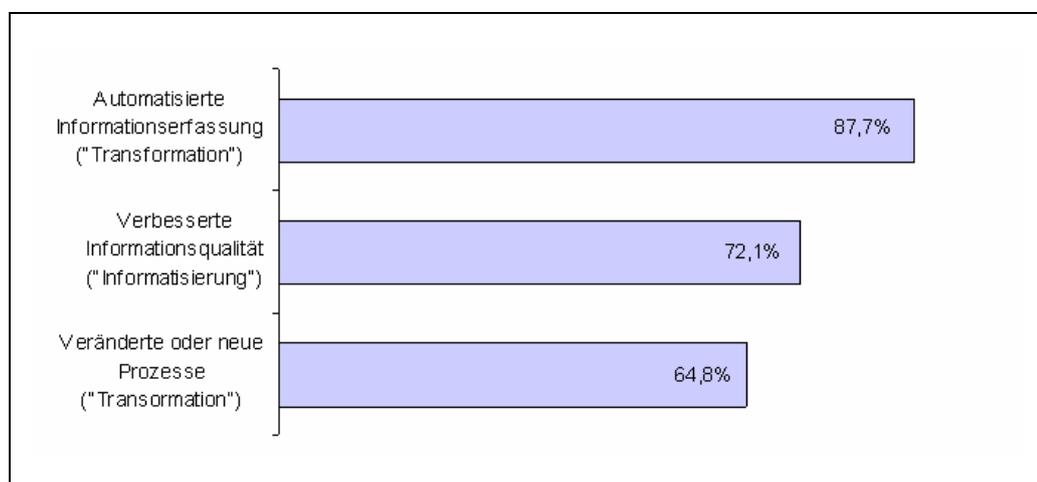


Abbildung 2-3: Realisierung der Performancesteigernden Effekt von RFID
(Basis 107-105)

Um den Zusammenhang zwischen den drei nutzensteigernden Effekten (Automatisierung, Informatisierung, Transformation) und der betrieblichen Zielerreichung zu analysieren, wurden zunächst fünf Optimierungsziele ausgewählt. Die Auswahl der Optimierungsziele erfolgte dabei nach zwei Kriterien: Zum einen wurden solche Ziele ausgewählt, auf die alle drei Effekte einen potentiellen Einfluss ausüben können, zum anderen muss sichergestellt sein, dass die Ziele in einer statistisch ausreichend hohen Anzahl von den Unternehmen angestrebt wurden.¹⁹ Für die Überprüfung des Einflusses der drei Effekte wurden somit die Ziele „Reduktion der Inventurkosten“, „Verbesserung von Qualitätskontrollen“, „Verbesserung der Liefertreue“ sowie die „Reduktion der Durchlaufzeit und der Produktionsstill-

¹⁹ Eine direkte Befragung der Unternehmen bezüglich der Optimierung von Kanban durch RFID scheiterte an der bisher geringen Umsetzung in der betrieblichen Praxis.

stände“ ausgewählt. Die Analyse der Einflüsse der drei Effekte auf die Zielerreichung erfolgt unter Zuhilfenahme einer Regressionsanalyse. Dabei wird ein linearer Zusammenhang zwischen den drei Effekten und der Zielerreichung unterstellt (lineare, multiple Regression). Im Rahmen der Regressionsanalyse wird versucht, die Erreichung der fünf ausgewählten Ziele mit der Realisierung der Effekte zu erklären (Abbildung 2-4).

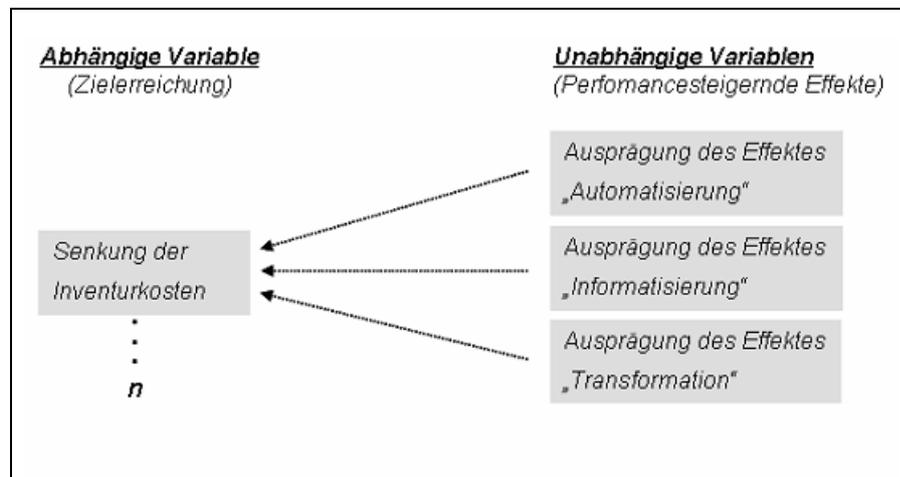


Abbildung 2-4: Fragestellung der Regressionsanalyse

Der Grad der Zielerreichung (Y_{Ziel_i}) geht somit als abhängige Variable (Regressand) in das Regressionsmodell ein, während die Ausprägungen der Effekte (X_{Auto} , X_{Info} , X_{Trans}) als unabhängige Variablen (Regressoren) einbezogen werden²⁰. Als Schätzmethode der Regressionsanalyse kommt die Methode der kleinsten Quadrate (Backhaus et al. 2000, S. 15; Cohen et al. 2003, S. 42) zum Einsatz. Die dafür notwendigen Prämissen wurden überprüft und können als hinreichend erfüllt beurteilt werden²¹. Das zu überprüfende Regressionsmodell ergibt sich wie folgt:

²⁰ Die Ermittlung der Ausprägungen der Effekte erfolgt mit Hilfe einer Viererskala („Trifft voll zu“ bis „Trifft nicht zu“). Es wird davon ausgegangen, dass die Abstände der Merkmalsausprägungen gleich groß sind und somit intervallskalierte Daten vorliegen. Dies gilt ebenso für die Variable „Zielerreichung“. Bezüglich der Verwendung von ordinalskalierten Daten anstelle von intervallskalierten Daten für eine Regressionsanalyse, stellen (Jaccard & Choi 1996) fest: „...for many statistical tests, rather severe departures (from intervalness) do not seem to affect Type I and Type II errors dramatically.“

²¹ So zeigt der Variance Inflation Factor, dass bei keiner der Regressionen eine zu starke lineare Abhängigkeit zwischen den unabhängigen Variablen vorliegt (keine Multikollinearität). Der Durbin-Watson-Test zeigt darüber hinaus, dass die Annahme der Unkorreliertheit der Residuen für alle Regressionen erfüllt ist (keine Autokorrelation). Lediglich die Überprüfung der Homoskedazdizitätsannahme mit Hilfe eines modifizierten White-Test zeigt, dass diese Annahme für die Regressionen mit den Zielgrößen „Reduktion der Inventurkosten“ und „Reduktion der Durchlaufzeit“ nicht erfüllt ist. Das Nichtvorliegen von Homoskedastizität führt zu einer Ineffizienz der Methode der Kleinsten Quadrate. Das Gesamtmodell wird aber weiterhin korrekt geschätzt. Allerdings kann es zu Verzerrungen der Regressionskoeffizienten kommen (Backhaus, Erichson, Plinke & Weiber 2000, S. 38).

$$Y_{\text{Ziel}_i} = b_0 + b_1 X_{\text{Auto}} + b_2 X_{\text{Info}} + b_3 X_{\text{Trans}}$$

mit

Y_{Ziel_i} = Grad der Zielerreichung für das jeweilige Ziel (i)

X_{Auto} = Ausprägung des nutzensteigernden Effekt „Automatisierung“

X_{Info} = Ausprägung des nutzensteigernden Effekt „Informatisierung“

X_{Trans} = Ausprägung des nutzensteigernden Effekt „Transformation“

b_0 = Konstantes Glied

$b_{1,2,3}$ = Regressionskoeffizient des jeweiligen Regressors

Die Ergebnisse der einzelnen Regressionen sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Zu erklärende Variable:	Gesamtmodell		Erklärende Variablen:								Basis
			Reduktion manueller Tätigkeit (X_{Auto})		Besser Informationen über betriebliche Ressourcen (X_{Info})		Veränderte oder neue Prozesse (X_{Trans})		Konstante (b_0)		
	korr. R ²	Sig.	b_1	Sig.	b_2	Sig.	b_3	Sig.	b_0	Sig.	
Inventurkosten	21,0%	0,00**	-0,18	0,74	0,78	0,04**	0,82	0,03**	7,85	0,00	48
Qualitätskontrolle	48,7%	0,00**	0,03	0,93	1,90	0,00**	0,02	0,94	10,39	0,00	47
Liefertreue	15,8%	0,01**	0,40	0,39	0,41	0,25	0,77	0,03**	8,17	0,00	48
Durchlaufzeit	32,2%	0,00**	0,69	0,10	0,98	0,00**	0,24	0,43	10,70	0,00	52
Produktionsstillstände	28,1%	0,00**	0,40	0,42	1,33	0,00**	0,03	0,94	7,98	0,00	50

Tabelle 2-3: Einfluss der Effekte auf die realisierten Zielerreichung

(** Signifikant zum 5 %-Niveau von Null verschieden)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erreichung der Ziele mit den Ausprägungen der Effekte erklärt werden können (vgl. Tabelle 2-1, Spalte „Gesamtmodell“). So wird der Zusammenhang für alle fünf untersuchten Ziele als signifikant (Signifikanzniveau: 5 %) bewertet. Das Bestimmtheitsmaß (korrigiertes R²) liegt dabei zwischen 21,0 % und 48,7 %. Ein Einfluss der drei Effekte ist somit eindeutig nachweisbar, allerdings existieren weitere, in dem Modell nicht berücksichtigte Faktoren, die die Zielerreichung beeinflussen. Dabei kann es sich etwa um unternehmensspezifische Faktoren (Unternehmensgröße, Qualifikation der Mitarbeiter, Automatisierungsgrad vor der Einführung etc.) handeln.

Bei der Betrachtung des Einflusses der einzelnen Regressoren²² wird deutlich, dass für die Reduktion manueller Arbeit für keines der untersuchten Ziele ein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden kann. Für eine Verbesserung von Qualitätskontrollen stellt die durch RFID mögliche Informatisierung den einzigen signifikanten Einflussfaktor dar (beispielsweise die Einführung einer kontinuierlichen anstelle einer einmaligen Temperaturüberwachung von Lebensmitteln). Diese Verbesserungen werden aktuell ohne eine Veränderung des Prozesses der Qualitätskontrolle erreicht. Bei der Verbesserung der Liefertreue entfaltet RFID einen Performancesteigernden Effekt dagegen ausschließlich durch eine Veränderung der Prozesse. So wird es beispielsweise möglich, den Prozess des Bestandsmanagement durch eine automatisierte Nachbestellung bei Zulieferern zu erweitern. Dies kann zur Vermeidung von Lieferengpässen aufgrund nicht vorrätiger Waren führen und somit die Liefertreue erhöhen. Die Reduktion der Durchlaufzeit wird wiederum ausschließlich durch die Möglichkeit besserer Informationen erreicht. So können etwa Echtzeitinformationen über die Fortschritte einer Produktionsstufe zu einer zeitgenauen Umrüstung nachgelagerter Produktionsstufen führen und somit Liegezeiten verringert werden. Für den Ersatz händischer Arbeit (bspw. Vermeidung zeitlicher Verzögerungen aufgrund händischer Informationserfassung) kann ebenso kein signifikanter Einfluss auf die Reduktion der Durchlaufzeit nachgewiesen werden, wie für die Möglichkeit einer Prozessveränderung (bspw. die Einführung einer Just-in-Time-Produktion). Für die Reduktion von Produktionsstillständen, welche eine Ursache für hohe Durchlaufzeiten darstellen können, ergeben sich annähernd analoge Befunde.

Die Ergebnisse zeigen, dass für eine nutzensteigernde Wirkung eine reine Automatisierung nicht ausreichend ist. So ermöglicht beispielsweise nicht die Substitution menschlicher Arbeitskraft als zeitlicher Engpassfaktor eine Verbesserung der Qualitätskontrolle, sondern erst die Beseitigung einer unzureichenden Informationsqualität, welche unter anderem auf menschliche Fehler bei der Informationserfassung zurückgeführt werden kann. Für eine Verbesserung der Liefertreue ist hingegen eine Prozessanpassung als ergänzende Investitionen zum Technologieeinsatz notwendig. Eine Beschränkung auf die „Automatisierung“, d.h. die Reduktion manueller Arbeit, ist somit für Unternehmen nicht empfehlenswert. Von Investitionen, die ausschließlich darauf abzielen, eine automatisierte Informationsbeschaf-

²² Eine Interpretation der Konstanten kann nicht vorgenommen werden, da die Konstante nur sinnvoll interpretiert werden kann, wenn die Daten zuvor zentriert wurden, d.h. der Mittelwert von jeder unabhängigen Variable abgezogen wurde. Auf eine solche Zentrierung wurde verzichtet, da es nicht von Interesse ist, zu welchem Grad Ziele erreicht wurde, wenn keiner der drei Effekte realisiert wurde.

fung mit Hilfe eines RFID-Einsatzes zu ermöglichen, ist abzuraten. Die RFID-Technologie entfaltet ihre nutzensteigernde Wirkung erst, sobald auch die verbesserte Informationsqualität genutzt wird bzw. darüber hinaus auch eine Anpassung von Prozessen erfolgt²³.

2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorgehensmodell zur Bearbeitung der Fallstudie

Aus der vorgestellten empirischen Analyse können zusammenfassend zwei für die weitere Bearbeitung der Fallstudie wesentliche Ergebnisse abgeleitet werden: Zum einen kann aus dem bisherigen betrieblichen Einsatz auf eine gute Eignung von RFID für die Optimierung logistischer Prozesse geschlossen werden. So konnten im Durchschnitt knapp 50 % der betrachteten Unternehmen ihre angestrebten Prozessverbesserungen bereits realisieren. Ein für IT-Projekte bemerkenswert hoher Anteil²⁴. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Optimierung der Logistik, welche auch in dieser Arbeit im Mittelpunkt steht, die derzeit am häufigsten genutzte Anwendung darstellt. 71,9 % der Anwender nutzen RFID zu diesem Zweck. Der Einsatz von RFID zur Optimierung Kanban-basierter Materialfluss-Steuerungssystemen, welcher im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht, kann demnach als aussichtsreich beurteilt werden.

Zweitens zeigte sich, dass eine alleinige Beschränkung auf die „Automatisierung“, d.h. die Reduktion manueller Arbeit ohne die gleichzeitige Verarbeitung besserer bzw. neuer Informationen oder einer Anpassung der Prozesse, nicht systematisch zu einer Nutzensteigerung beiträgt. Diesen Befund gilt es bei der Entwicklung einer RFID-Anwendung zu berücksichtigen. Um die Produktivitätspotenzial von RFID ausnutzen zu können, ist bei der Planung und Durchführung von RFID-Projekten demnach der Entwurf von Informationssystemen zur zweckmäßigen Verarbeitung der neuen Informationsbasis von besonderer Bedeutung. Kern der nachfolgenden Kapitel ist daher die Entwicklung eines solchen Informationssystems für die betrachtete Fallstudie. In Anlehnung an die Vorgehensmodelle

²³ Ein Vergleich mit der Einführung des UPC- (Universal Product Code) und des EAN- (International Article Number, ursprünglich European Article Number) Codes in den 1970er Jahren zeigt, dass sich bei dieser Auto-Identifizierungstechnologie ebenfalls die größten Performancesteigernden Wirkungen nicht im Bereich der reinen Substitution händischer Prozesse ergaben (Garg, Jones & Sheedy 1999).

²⁴ Nach einer von (Nelson 2007) angegebenen Studie der Standish Group, die in diesem Zusammenhang häufig zitiert wird, scheitern durchschnittlich zwei von drei IT-Projekten.

der Systementwicklung (vgl. bspw. (Balzert 1998, S. 97; Ferstl & Sinz 2008, S. 476; Hansen & Neumann 2001, S. 245)) wird dafür wie folgt vorgegangen:

- a) *Anforderungsanalyse (Kapitel 3 und 4)*: Zunächst ist es notwendig, die Anforderungen des betrachteten Geschäftsprozesses bzw. der zu optimierenden Aufgabe an das zu entwickelnde System zu ermitteln. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass die meisten gescheiterten Projekte der Systementwicklung auf Fehler in der Anforderungsspezifikation zurückzuführen sind. Dementsprechend sollte diesem Schritt eine große Aufmerksamkeit gewidmet werden (Hansen & Neumann 2001, S. 247). In Kapitel 3 werden daher zunächst die Eigenschaften der variantenreichen, kanban-basierten Fertigungen beschrieben sowie die darin vorherrschenden Planungsprobleme abgeleitet. Im Rahmen von Kapitel 4 erfolgt eine Verfeinerung der Anforderungsanalyse im Hinblick auf das in dieser Arbeit zu behandelnde Teilproblem (Reihenfolgenplanung) des betrachteten Fertigungssystems. Dabei werden sowohl die von dem System zu erfüllenden Funktionen dargestellt (funktionalen Anforderungen), als auch die geforderten Qualitätsattribute (Qualitätsanforderungen) abgeleitet.
- b) *Modellierung des Systems (Kapitel 5)*: Der nächste Schritt stellt der Entwurf des Systems dar. Ziel dieser Phase ist es, die in im vorangegangenen Schritt noch abstrakter Form dargestellten Anforderungen in einen konkreten Lösungsansatz zu überführen. Wesentliche Aufgaben stellen dabei insbesondere der Entwurf des Algorithmuses, die Entwicklung der Systemarchitektur, die Definition der Systemkomponenten sowie die Festlegung der Abhängigkeiten dar. Zu beachten ist, dass um von den Anforderungen zu einem realen System zu gelangen eine Abstraktion des betrachteten Realitätsausschnittes notwendig ist (Modellbildung), da der Entwurf softwareintensiver Systeme in der Regel von einer großen Komplexität gekennzeichnet ist und daher eine Komplexitätsreduktion erforderlich wird (Hansen 1996, S. 250).
- c) *Evaluierung (Kapitel 6)*: Letztendlich ist es notwendig, das entwickelte System hinsichtlich seiner Funktionalitäten sowie den betriebswirtschaftlichen Wirkungen hin zu evaluieren. Dafür bedarf es zunächst einer Implementierung, d. h. der Erstellung eines Programms mit Hilfe einer Programmiersprache. Aufbauend auf einer solchen prototypischen Implementierung wird im Rahmen dieser Arbeit ein Simu-

lationsexperiment durchgeführt, mit Hilfe dessen die Evaluierung des Systems erfolgt.

3 Anforderungsanalyse: Eigenschaften und Planungsprobleme der variantenreichen Produktion nach Kanban

Im Mittelpunkt von Kapitel 3 steht die Beschreibung und Analyse der betrachteten Fallstudie. Es werden die Eigenschaften der variantenreichen, Kanban-basierten Fertigung beschrieben sowie die darin vorherrschenden Planungsprobleme abgeleitet. Dabei wird in Kapitel 3.1 zunächst das Grundkonzept von Kanban erläutert sowie dessen betriebswirtschaftliche Potentiale aufgezeigt. Um den heutigen Anforderungen moderner Produktionssysteme zu genügen, muss die ursprünglich für die Einprodukt-Fertigung ausgelegte Materialfluss-Steuerungsmethode häufig auf eine Variantenfertigung übertragen werden (Mehrprodukt-Kanban Systeme). Die Charakteristika und die Bedeutung der Variantenfertigung wird in Kapitel 3.2 vorgestellt. In Kapitel 3.3 werden die bis dahin separat dargestellten Konzepte der Kanban-Fertigung und der Variantenfertigung zusammengeführt: Es werden die Merkmale einer Kanban-basierten, variantenreichen Fertigung veranschaulicht, um darauf aufbauend die wesentlichen Planungsprobleme solcher Fertigungssysteme abzuleiten.

3.1 Grundprinzipien und Potentiale der Materialfluss-Steuerung nach Kanban

3.1.1 Grundprinzipien von Kanban

Kanban (jap. „Kan“ (nachsehen) und „Ban“ (Tafel, Brett))²⁵ ist ein von Toyota entwickeltes Konzept zur Planung und Steuerung des Materialflusses²⁶ in der Produktion (Monde 1988, S. 22; Ohno 1986, S. 3). Kanban-Systeme zeichnen sich durch eine dezentrale Koor-

²⁵ In der deutschen betriebswirtschaftlichen Literatur sind Kanban-Systeme insbesondere von Horst Wildemann (vgl. bspw. (Wildemann 1980; Wildemann 1993; Wildemann 2007) analysiert worden.

²⁶ Im Rahmen der Materialflusssteuerung wird die zeitliche und sachliche Struktur der Beschaffung, Fertigung und des Transportes der im Unternehmen eingesetzten Materialarten festgelegt.

dination des Materialflusses und der Realisierung des Just-in-Time Konzeptes aus. Ermöglicht wird dies durch die Umsetzung des so genannten Pull-Prinzips (Hol-Prinzip), im Rahmen dessen eine Fertigungsstelle die zur Auftragsbearbeitung erforderliche Vormaterialmenge selbstständig anfordert bzw. abholt. Die Produktion einer Fertigungsstufe erfolgt ausschließlich auf Basis des Verbrauchs der nachgelagerten Stufen.

Während die Zentralinstanz lediglich für die Auftragsimpulse in der Endfertigung sorgen muss, wird die Bestandsverantwortung an die Mitarbeiter der Produktion delegiert. Im Falle einer (internen oder externen) Kundenbestellung lösen die Mitarbeiter, durch die Entnahme des entsprechenden Produktes aus dem Ausgangslager, den Impuls zur Nachproduktion aus. Vorrangige Steuerungselement und elementarer Informationsträger sind dabei die Kanban-Karten²⁷, welche an die jeweils vorgelagerte Produktionsstufe weitergegeben werden. Diese Karten enthalten die für die Produktion relevanten Daten (i.d.R. Artikelnummern, Angaben über Art und Menge, Bezeichnungen der Fertigungs- und Verbrauchsstelle). Die an einer Produktionsstufe eintreffenden Karten werden ihrer Artikelnummer entsprechend in die freien Felder einer so genannten Kanban-Tafel abgelegt und gemäß ihres Eintreffens der Reihenfolge nach abgearbeitet (First-come-first-served Prinzip). Durch die dezentrale Weitergabe der Karten pflanzt sich der Impuls zur Auftragsbearbeitung, dem physischen Materialfluss entgegengerichtet durch das Fertigungssystem weiter. Abbildung 3-1 verdeutlicht das Grundprinzip von Kanban (Hansmann 2006, S. 378; Lack 1996, S. 2775; Wildemann 2007, S. 15).

²⁷ Häufig unterscheidet man zwischen zwei Arten von Kanban-Karten: Produktionskanbans, welche den Reproduktionsauftrag auslösen und Transportkanbans zur Identifikation von Materialien im Pufferlager und in weiterverarbeitenden Stellen. Zum Einsatz von Produktions- und Transportkanbans in Ein oder Zwei-Karten Kanban Systemen vgl. (Lack 1996, S. 2778).

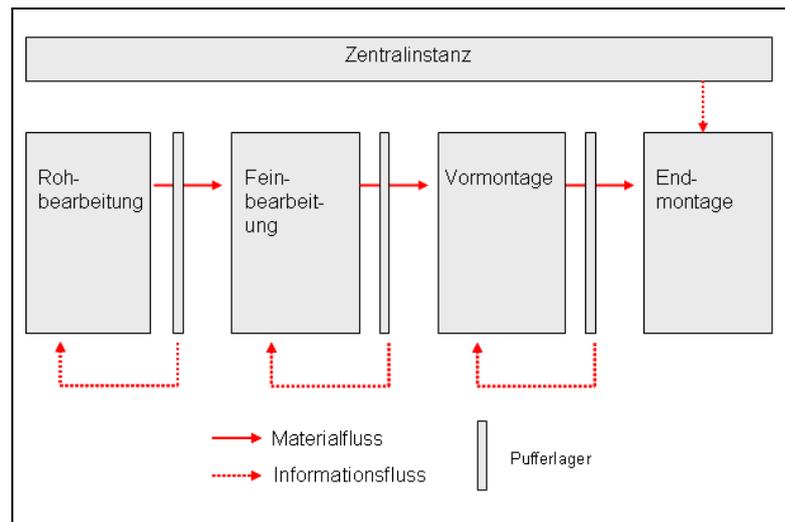


Abbildung 3-1: Das Kanban-Regelkreissystem

Quelle: in Anlehnung an (Wildemann 2007, S. 15)

Die erweiterten Möglichkeiten neuer elektronischer Medien wie bspw. des Internets führten zur Weiterentwicklungen des traditionellen Kanban, indem die händische Übermittlung der Kanban-Karten durch eine elektronische Übermittlung des Auftragsimpulses ersetzt wurde (E-Kanban). Diese neuen „Transportlösungen“ für die Information ermöglichen den Einsatz von Kanban auch zwischen Unternehmen bzw. zwischen verteilten Standorten eines Unternehmens. Im weiteren Sinne spricht man daher auch von Kanban-Systemen, wenn auf den physischen Informationsträger „Karte“ zugunsten einer elektronischen Datenübermittlung verzichtet wird und man sich lediglich auf die zugrundeliegende Semantik der Steuerungsform beschränkt (Lack 1996, S. 2778). Ein Beispiel für den erfolgreichen Einsatz von E-Kanban über eine große räumliche Distanz findet sich im Daimler-Werk in Sindelfingen, in dem die Bestellung von Sitzleder bis hin zum Erzeuger in Südafrika auf diese Weise gesteuert wird (Logistik heute 2001, S. 51).

Obwohl Kanban einen sehr einfach zu realisierenden Materialflusssteuerungsmechanismus darstellt, der heutzutage bei einer Reihe von Unternehmen erfolgreich eingesetzt wird, ist das Prinzip nicht für alle Produkte, Fertigungsverfahren und Organisationsformen geeignet. Als bedeutsame Einsatzvoraussetzungen können genannt werden (Fandel & Francois 1989, S. 531; Hansmann 2006, S. 380; Lermen 1992; Takeda 2006, S. 195):

- *Fertigungsstruktur:* Eine Vorinformation der vorgelagerten Produktionsstufen über Zeitpunkt, Art und Volumen eines Reproduktionsauftrages erfolgt in Kanban in der Regel nicht. Um trotz der späten Beauftragung zur Nachproduktion noch rechtzeitig liefern zu können, müssen die Wiederbeschaffungszeiten jeder Produktionsstufe relativ gering sein. Zur Erhöhung der Reaktionsfähigkeit sind daher kurze Durch-

laufzeiten und niedrige Rüstzeiten für Kanban dienlich. Darüber hinaus Bedarf es in Kanban eines hohen Qualitätsniveaus der Produkte sowie einer geringen Maschinenausfallhäufigkeit, da aufgrund der geringen Lagerbestände eine Kompensation nur schwer möglich ist.

- *Bedarfsstruktur:* Der Produktionsprozess sollte einen möglichst gleichmäßigen Bedarfsverlauf aufweisen, da durch das Pull-Prinzip und die dezentrale Produktionssteuerung Nachfrageveränderungen in den verschiedenen Produktionsstufen erst zeitversetzt sichtbar werden. Kleine Schwankungen können durch Erhöhung bzw. Verringerung der Zirkulationsfrequenz der Karten in den Regelkreisen aufgefangen werden. Größere Schwankungen führen zu erratischen Änderungen der Größe der Pufferlager.
- *Organisationsform der Produktion:* Die Produktion pro Zeiteinheit sollte über alle Produktionsstufen weitgehend synchronisiert werden, um die einzelnen Regelkreise gut aufeinander abstimmen zu können. Dafür bietet sich am ehesten eine Fließ- oder Reihenfertigung (Flussprinzip) an, während eine Werkstattfertigung, insbesondere bei heterogenen Kleinserien, ein Kanban-System vor erhebliche Schwierigkeiten stellt.
- *Produktstruktur:* Bezüglich der Produktstruktur sind ähnliche Betriebsmittel und Arbeitsgänge bei möglichst vielen Produkten vorteilhaft, da so hohe Rüstzeiten vermieden werden können und dadurch die Wiederbeschaffungszeit jeder Produktionsstufe lediglich geringen Schwankungen unterliegt. Daraus folgt der von einigen Autoren (bspw. (Lack 1996, S. 2781)) vertretene Standpunkt, dass Kanban bei einer Variantenfertigung nicht wirtschaftlich einsetzbar sei. Das spezielle Problem der Variantenfertigung mit Kanban ist Kern dieser Arbeit und wird in den nachfolgenden Kapitel 2.2. und 2.3 ausführlich erläutert. Darüber hinaus eignet sich Kanban vornehmlich für die Fertigung von Großserien, da dort die Rationalisierungspotentiale durch die Einsparung von (zentralen) Steuerungsaufgaben am größten sind.

3.1.2 Betriebswirtschaftliche Wirkung von Kanban

Kanban wird mittlerweile von einer Reihe von produzierender Unternehmen genutzt und gilt als eines der wichtigsten Instrumente zur Realisierung des Just-in-Time Konzeptes (Hansmann 2006, S. 378; Soom 1986, S. 446). Insbesondere in der Automotive Branche

erlangte Kanban eine bedeutende Rolle. Die betriebswirtschaftliche Wirkung von Kanban schlägt sich vorwiegend in fünf Leistungsmerkmalen nieder (vgl. (Gstettner 1998, S. 11; Koether 2004, S. 110; Lack 1996, S. 2775; Wildemann 2007, S. 170):

1. In Kanban-Systemen wird ausschließlich produziert, wenn auch ein Kundenauftrag vorliegt (Just-in Time Produktion). Somit führt Kanban zu einer *Reduzierung der Bestände* und dadurch zu einer Einsparung von Kapitalbindungskosten. Einen Lagerbestand von null, wie es häufig als Idealfall einer Just-in-Time Produktion unterstellt wird, ist allerdings nicht zu erreichen, da in Kanban-Systemen immer ein vorher definierter Mindestbestand (Sicherheitsbestand) im Pufferlager vorgehalten wird. Erst bei Unterschreiten dieses Mindestbestandes erfolgt der Impuls zur Nachproduktion. Die Höhe des erforderlichen Sicherheitsbestands hängt insbesondere von den Schwankungen der Bedarfsrate während der Wiederbeschaffungszeit, der maximal positiven Terminabweichung, der maximal negativen Mengenabweichung sowie des geforderten Servicesgrades ab (Lödding 2005, S. 202). Neben dem unmittelbaren Kosteneffekt durch die Reduzierung der Bestände, existiert noch der mittelbare Effekt einer Einsparung von Lagerfläche²⁸ (Reduzierung der Zinsen auf Gebäude und Flächen, kalkulatorische Abschreibungen etc.).
2. Ein weiteres Nutzenpotential stellt die *Reduzierung der Durchlaufzeit* dar. Dies wird insbesondere durch die für die Durchlaufzeit relevante Reduzierung der Liegezeiten erreicht, welche aus der schnellen Reaktion auf einen entstehenden Bedarf und der Reduzierung der Bestände resultiert. In vielen Fällen wird eine Reduzierung der Durchlaufzeiten auch durch die Schaffung der für Kanban notwendigen Voraussetzungen möglich. So findet bei der Einführung von Kanban zur Erreichung einer hohen Reaktionsfähigkeit häufig eine Optimierung der Rüstzeiten statt, was wiederum in einer Reduzierung der Durchlaufzeiten resultiert.
3. Eine *Verbesserung der Lieferfähigkeit* kann durch Kanban dadurch erreicht werden, dass aufgrund der ausschließlich auftragsbezogenen Fertigung keine Produktionskapazitäten für aktuell nicht benötigte Produkte blockiert werden. Darüber hinaus führt eine Reduzierung der Durchlaufzeiten zu einer beschleunigten Auftragsbearbeitung und somit zu einer Verbesserung der Lieferfähigkeit.

²⁸ Tatsächlich war die Raumknappheit in Japan und die damit verbunden hohen Kosten von Lagerflächen ein bedeutender Grund für die Entwicklung des Kanban-Prinzips (Lack 1996, S. 2776).

4. Des Weiteren kann durch die enge Kopplung der Produktionsprozesse eine *Verbesserung der Qualität* erreicht werden. Da Vorprodukte sehr zeitnah nach ihrer Produktion weiterverwendet werden, werden entstandene Qualitätsmängel frühzeitig und direkt beim Verursacher erkannt. Somit kann die Qualitätssicherung direkt an der Quelle betrieben werden, was hohe Nacharbeitungskosten vermeidet. Bei einer frühzeitigen Fehlererkennung bei der verursachenden Fertigungsstelle entstehen relativ geringe Kosten für das Nacharbeiten. Mit zunehmendem Fortschritt erhöhen sich diese Kosten immer stärker²⁹. Zusätzlich zu den eigentlichen Nacharbeitungskosten entstehen Kosten für Umplanungen, Transport und zusätzliche Kontrollen.
5. Durch die Delegation der Bestandverantwortung an die Mitarbeiter der Produktion sorgt Kanban letztendlich für einen *geringeren Steuerungsaufwand* als bei zentralisierten Planungssystemen. Wird der gesamte Materialfluss von einer Zentralinstanz synchronisiert, wie es in der Regel in MRP-Konzepten (MRP II: Material Resource Plannig; MRP I: Material Requirement Planning) üblich ist, kommt es aufgrund der höheren Komplexität durch die Berücksichtigung der Vielzahl an Informationen, zu höheren Kosten der Entscheidungsfindung. Darüber hinaus kommt es zu erhöhten Kosten aufgrund „schlechter“ Information. Schlechte Informationen entstehen zum einen dadurch, dass die dezentral anfallenden Informationen aufgrund der anfallenden Informationsfülle häufig komprimiert werden müssen. Durch die Informationskompression kommt es zum Informationsverlust. Außerdem steigt bei einer zentralen Sammlung sämtlicher Informationen die Wahrscheinlichkeit von Kommunikationsfehlern. Auf Grund der dadurch entstehenden nicht vollständigen Informationsbasis, können dann häufig nur suboptimale Entscheidungen getroffen werden. Zudem kann es, aufgrund von Verzögerung bei der Kommunikation der Informationen zu Opportunitätskosten kommen. Der Vorteil des geringeren Steuerungsaufwand fällt insbesondere bei einer sehr großen Anzahl zu koordinierender Teilen ins Gewicht, was Kanban insbesondere für die Massenfertigung vorteilhaft macht.

Das Ausmaß der beschriebenen Leistungssteigerungen wurde in einer Studie der TCW Unternehmensberatung untersucht (vgl. Abbildung 3-2). Insgesamt zeigt sich, dass Kanban

²⁹ Sollte der Fehler erst beim Kunden festgestellt werden, würden diese Kosten noch einmal um ein vielfaches steigen. Des Weiteren kommt die Unzufriedenheit des Kunden und damit eventuelle Umsatzverluste hinzu.

den stärksten positiven Einfluss auf die Bestandshöhe sowie die Durchlaufzeiten aufweist. Zu erkennen ist, dass die Streuung der erreichten Leistungssteigerungen zwischen den Unternehmen zum Teil sehr groß ist, was durch die bessere Realisierung der Anwendungsvoraussetzungen bei den erfolgreicherer Unternehmen erklärt wird (Wildemann 2007, S. 170).

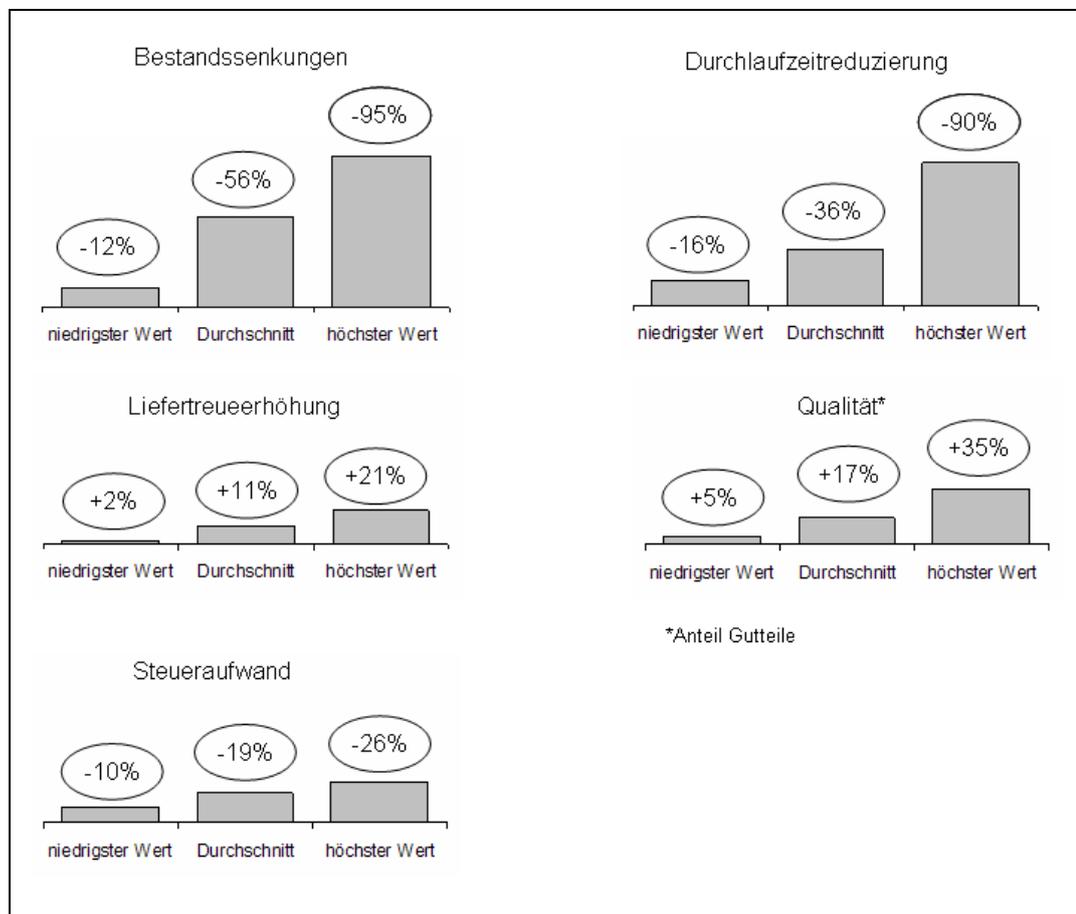


Abbildung 3-2: Betriebliche Leistungssteigerungen durch die Einführung von Kanban
Quelle: (Wildemann 2007, S. 171)

In einer Studie des Fraunhofer Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung unter 1305 Unternehmen konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass Unternehmen, die zu einer Produktionssteuerung nach Kanban übergegangen sind, eine um 19 % höhere Wertschöpfung pro Mitarbeiter aufweisen (Lay, Dreher & Kinkel 1996, S. 4)³⁰.

³⁰ Weitere Beispiel für die durch Einführung von Kanban erreichbaren betriebswirtschaftlichen Leistungssteigerungen finden sich etwa in (Laksham 2006; Purdum 2007, S. 21).

3.2 Charakteristika und Bedeutung der Variantenfertigung

Obwohl Kanban ursprünglich für die Einprodukt-Fertigung ausgelegt wurde, wird das Prinzip mittlerweile häufig in Mehrprodukt-Systemen eingesetzt. Dies ergibt sich insbesondere aus der für eine Reihe von Unternehmen vorteilhafteren Variantenfließfertigung, welche im Folgenden dargestellt wird.

3.2.1 Eigenschaften der Variantenfertigung

Der Begriff „Produktvariante“ bezeichnet Artikel, die in verschiedenen Ausprägungen oder Dimensionen wie beispielsweise Größen, Farben, Längen produziert werden können. Produktvarianten werden aus Produkttypen oder Produktfamilien abgeleitet und stellen ähnliche Erzeugnisse desselben Grundtyps dar. Ausgehend von einer Grundauführung werden bei einer Variantenfertigung einzelne Merkmale identifiziert und für jedes Merkmal die mögliche Ausprägung festgelegt, welche die unterschiedlichen Varianten konstituieren. Zur weiteren Charakterisierung der variantenreichen Fertigung und um den Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit weiter einzuengen, wird im Folgenden auf die outputorientierten sowie die prozessorientierten Eigenschaften von Varianten eingegangen (Boysen 2005, S. 10).

Um eine exakte Definition aus Sicht der Produktion zu erreichen, müssen drei Bestandteile von Varianten spezifiziert werden (*outputorientierte Eigenschaften*). Zum einen ist das Objekt zu spezifizieren, zu dem eine Variante in komparativem Verhältnis steht. Als komparatives Objekt wird dabei die Grundausrüstung eines Produktes verstanden. Varianten sind beispielsweise Automobile der gleichen Modellreihe mit unterschiedlichen Ausprägungen (etwa unterschiedliche Motorisierungen). Des Weiteren ist die Eigenschaft des Objektes, an der sich die unterschiedliche Ausprägung festmacht, zu spezifizieren. Veränderliche Eigenschaften eines einteiligen Produktes sind Form, Farbe, Material oder Funktion. Im Rahmen von mehrteiligen Produkten kann zusätzlich noch die Kombination unterschiedlicher Baugruppen oder Einzelteile variiert werden (Rosenberg 1996, Sp. 2119). Letztendlich muss das Ausmaß der Abweichungen zur Grundausrüstung bestimmt werden. Einerseits muss mindestens eine Merkmalsausprägung des Vergleichsobjekt unterschiedlich sein, um von einer Variante sprechen zu können (Lingnau 1994, S. 24). Andererseits

sind die Unterschiede in den Merkmalsausprägungen auch nach oben begrenzt. Ein Mindestmaß an Ähnlichkeit zwischen den Varianten und damit auch zwischen den Arbeitsgängen, deren Reihenfolgebeziehung untereinander und den benötigten Betriebsmitteln muss gegeben sein. Wie groß diese Ähnlichkeit sein muss, um noch von Varianten sprechen zu können bleibt in der Literatur unbeantwortet. In Anlehnung an BOYSEN wird für diese Arbeit eine Variante definiert als Produkt, dessen Merkmalsausprägungen im Vergleich zur Grundauführung so spezifiziert sind, dass - trotz der Unterschiedlichkeit - die verschiedenen Produkte auf einer Fertigungslinie produziert werden können (Boysen 2005, S. 12). In der Praxis werden dafür flexible Fertigungslinien eingesetzt (Günther & Tempelmeier 2005, S. 239).

Aus prozessorientierter Sicht können Varianten, welche auf einer Fertigungslinie produziert werden, anhand des Ausmaßes der notwendigen Umrüstvorgänge unterschieden werden (*prozessorientierten Eigenschaften*) (Boysen 2005; Reidel 2006, S. 11; Wild 1972, S. 46). Im Rahmen der so genannten Multi-Model-Production sind bei einem Wechsel von einer Produktvariante zur anderen Umstellungsarbeiten notwendig. Diese Umstellungsarbeiten werden als Umrüsten bezeichnet. In manchen Fällen gelingt es, dass keine bzw. vernachlässigbare Umrüstvorgänge bei einem Variantenwechsel notwendig sind (Mixed-Model Production). Ein solches Produktionssystem erlaubt die wahlfreie Reihenfolge unterschiedlicher Varianten mit der Losgröße eins. Da die Mixed-Model-Production ein Spezialfall der Mehrprodukt-Fertigung darstellt und in der Regel lediglich bei sehr geringen Variationen der Merkmalsausprägungen möglich ist, werden in dieser Arbeit Mehrprodukt-Fertigungssysteme mit nicht vernachlässigbaren Umrüstvorgängen betrachtet (*Multi-Model-Production*).

3.2.2 Betriebswirtschaftliche Bewertung der Variantenfertigung

Hauptvorteil der Variantenfertigung gegenüber einer Einproduktfertigung ist die Möglichkeit, im Rahmen der Einschränkung auf Varianten, die Endprodukte an die Kundenwünsche anzupassen³¹. War man in früheren Zeiten stark darauf fokussiert, Skaleneffekte zu generieren, so wird heute vorwiegend die Erarbeitung einer differenzierten Nutzenposition angestrebt. Dem Sättigungseffekt bezüglich produzierter Güter in den Industrienationen

³¹ Darüber hinaus kann die Erweiterung des Leistungsspektrums der ausführenden Arbeiter zu einer höheren Mitarbeiterzufriedenheit führen (Boysen 2005, S. 20).

folgt der Trend zu einer Individualisierung der Produkte (Rathnow 1993, S. 16; Reichwald & Piller 2002, S. 361). Der Versuch, die Vorteile der Massenproduktion mit denen der Individualisierung zu verbinden, erfolgte in den letzten Jahren insbesondere durch Umsetzung des Produktionskonzepts Mass Customization³² (dt.: kundenindividuelle Massenproduktion (Piller 2006, S. 2006; Pine, Victor & Boynton 1993, S. 108)), wodurch die Variantenfertigung stark an Bedeutung gewonnen hat. Mass Customization verbindet die (gegenständlichen) Begriffe „Mass Production“ und „Customization“ und kann definiert werden als *„producing goods and services to meet individual customer’s needs with near mass production efficiency“* (Tseng & Jiao 2001, S. 684). Zielabsatzmarkt ist somit der Massenmarkt. Dabei soll allerdings, durch Variation von aus Kundensicht entscheidender Merkmale eines Produkts, eine Individualisierung erreicht werden. Die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Variation von Merkmalen eines Produkts lässt sich mit der Konsumtheorie von LANCASTER erläutern. Danach richten sich die Präferenzen eines Nachfragers nicht auf ein Produkt als solches, sondern auf eine Kombination von Eigenschaften, die in den nachgefragten Gütern verkörpert sind (Lancaster 1991, S. 45). Im Rahmen des Mass Customization werden die Eigenschaften des Produktes, welche die Präferenz des Abnehmers bestimmen, entsprechend dessen Präferenzstruktur verändert. Hieraus ergibt sich eine höhere Attraktivität der Produkte und somit die Bereitschaft der Abnehmer, einen Aufschlag zu zahlen, da diese für sie einen höheren Wert besitzen³³. Dabei sollen die Produkte langfristig zu Preisen angeboten werden, die der Zahlungsbereitschaft von Käufern vergleichbarer, in Massenfertigung hergestellter, Produkte entsprechen. Der Individualisierung soll allerdings kein Wechsel des Marktsegments in Richtung höherwertigerer „Luxussegmente“ folgen, wie dies bei einer klassischen Einzelfertigung aufgrund der hohen fertigungsbedingten Zuschläge der Fall ist (Reichwald & Piller 2002, S. 362). Für die Realisierung des Mass Customization bietet sich somit insbesondere die Variantenfertigung an, im Rahmen derer verschiedene Varianten auf einer Fertigungslinie produziert werden können (vgl. 3.2.1).

³² Zum ersten Mal wurde Mass Customization 1993 von Pine in einer Forschungsarbeit am MIT ausführlich untersucht. In der Praxis sind die ersten Ansätze des Mass Customization in der zweiten Hälfte 1990er Jahre zu beobachten (Piller 2006, 158; Pine, Victor & Boynton 1993, S. 108).

³³ Die Variation umfasst dabei häufig die Beseitigung von grundlegenden Kaufhindernissen, sog. Knock-out-Faktoren (Rathnow 1993, S. 13). Ein Knock-out-Faktor liegt beispielsweise vor, wenn ein Hersteller ausschließlich sehr große Abnahmemengen anbietet (bspw. eine Tonne Salz), dann ist etwa das Segment „Privathaushalte“ ex ante ausgeschlossen.

Die durch Variantenfertigung mögliche bessere Anpassung an die Kundenwünsche verursacht jedoch gegenüber der Einproduktfertigung auch einen zusätzlichen Aufwand. Dabei sind insbesondere folgende kostenwirksame Faktoren zu beachten (Boysen 2005, S.19; Rathnow 1993, S. 20; Scholl 1999, S.77):

- Um verschiedene Varianten auf einer Fertigungslinie produzieren zu können, müssen Investitionen in flexible Fertigungslinien getätigt werden. So müssen beispielsweise teure Universalmaschinen oder Maschinen zum Werkzeugwechsel eingesetzt werden.
- Die kundenindividuellen Varianten erhöhen die Anzahl der verwendeten Teile in der Produktion und reduzieren die Größe der Fertigungslose, so dass die Komplexität des Fertigungssystems ansteigt, da die unterschiedlichen Varianten auf Endprodukt- und Bauteilebene koordiniert werden müssen (bspw. Rüstzeitoptimierung). Die ansteigende Komplexität erschwert die Planungs- und Optimierungsvorgänge. Je mehr Varianten zu steuern sind, umso komplexer gestaltet sich die Aufgabe der Fertigungssteuerung.
- Die Arbeitsteilung und Spezialisierung ist weniger ausgeprägt, da mehr Varietät im Produktionsprozess auftritt. Dadurch kommt es zu höheren Ausbildungskosten und weniger Lerneffekten, was sich in höheren Produktionskosten pro Stück niederschlägt.
- Aufgrund der Varietät der zu beschaffenden Bauteile sinkt gegenüber den Lieferanten die Marktmacht im Vergleich zu den größeren und homogeneren Beschaffungsmengen einer Einproduktfertigung.
- Durch notwendige Umstellarbeiten (Rüstkosten) der Fertigungssysteme bei Veränderung der zu produzierenden Variante kann es zu zusätzlichen Kosten in Form von Rüstkosten kommen. Durch die Notwendigkeit von Umstellarbeiten kommt es in der Regel auch zu einer Steigerung der Qualitätskosten, da es nach einer Umstellung üblicherweise zunächst zu erhöhten Fehlerquoten kommt.

Grundsätzlich ist eine variantenreiche Fertigung dann ökonomisch sinnvoll, wenn (im Vergleich zur Einprodukt-Fertigung) durch die Erhöhung der akquisitorischen Kraft als Folge der Ausbringung kundenindividueller Varianten die erhöhten Investitions-, Produktions- und Beschaffungskosten kompensiert werden können (Boysen 2005, S. 21). Eine

Voraussage bezüglich der optimalen Variantenanzahl³⁴ gestaltet sich allerdings als schwierig, da die optimale Variantenanzahl oftmals erst in der Produktionsphase zu erkennen ist. Viele Einflüsse wie beispielsweise der gegenseitige Kannibalisierungseffekt der Varianten oder die Schwierigkeit, neue Technologien zu handhaben, sind in der Phase der Projektdefinition und im Entwicklungsprozess kaum vorhersehbar (Maune 2002, S.35).

3.2.3 Bedeutung der Variantenfertigung

Die zunehmende Bedeutung der Variantenvielfalt als Folge des Mass Customization kann exemplarisch am Beispiel der Automobilproduktion veranschaulicht werden. Während das Ford Modell T zu den Anfängen der Automobilindustrie nur in einer einzigen Variante angeboten wurde³⁵, konnte beispielsweise der Audi 80 im Jahr 1982 bereits in 243 Modelvarianten erworben werden. Diese Entwicklung hat sich in den letzten Jahren noch einmal deutlich beschleunigt. RÖDER & TIBKEN zeigen, dass die Mercedes C-Klasse heute in theoretisch 2^{27} Varianten angeboten wird. Abbildung 3-3 verdeutlicht beispielhaft ausgewählte Merkmale und Ausprägungen der Mercedes C-Klasse. Schon an den wenigen dargestellten Merkmalen wird ersichtlich, dass die Vielzahl der möglichen Varianten außerordentlich groß ist (Röder & Tibken 2006, S. 1010)³⁶.

³⁴ Versuche eines Modells zur Bestimmung der optimalen Variantenanzahl finden sich beispielsweise bei (Adam & Johannwille 1998, S. 5; Bartuschat 1995, S. 21; Rathnow 1993).

³⁵ Aus dieser Zeit stammt auch der berühmte Ausspruch von Henry Ford: „Give the customer any color they want, so long it is black“.

³⁶ Zu unterscheiden sind sogenannte Mussvarianten, welche die Auswahl einer Option erzwingen (bspw. Motor) und Kannvarianten (bspw. Schiebedach), im Rahmen derer auch die Nicht-Auswahl eine Option darstellt. Wird davon ausgegangen, dass alle Optionen miteinander kombiniert werden können, kann die Anzahl der möglichen Varianten mittels folgender Formel berechnet werden (Boysen 2005, S. 13; Freye 1997, S. 35):

$$V = \prod_{m \in M} x_m \cdot \prod_{k \in K} (y_k + 1)$$

(mit V=Anzahl der möglichen Varianten, M= Menge der Mussvarianten, K=Menge der Kannvarianten, x_m = Anzahl der unterschiedlichen Optionen bzgl. der Mussvarianten m, y_k = Anzahl der unterschiedlichen Optionen bzgl. der Kannvarianten k).

Merkmal	Ausprägung
Motor	Diesel, Direkteinspritzung <ul style="list-style-type: none"> • 4-Zylinder 6-Gang, mechanisch • 6-Zylinder 6-Gang, mechanisch • 6-Zylinder 7G-TRONIC Benziner <ul style="list-style-type: none"> • 4-Zylinder 6-Gang, mechanisch • 6-Zylinder 6-Gang, mechanisch • 6-Zylinder 7G-TRONIC • 8-Zylinder AMG SPEEDSHIFT PLUS 7G-TRONIC
Sitze	<ul style="list-style-type: none"> • Standart • Fondsitze mit integrierten Kindersitzen und einer Seitenkopfstütze • Vordersitz links, Lenksäule u. Aussenspiegel elektrisch einstellbar • Vordersitz rechts elektrisch verstellbar mit Memory • Multikontursitze vorne links und rechts • Kindersitzerkennung im Beifahrersitz • Sitzheizung Vordersitze
Polsterung	<ul style="list-style-type: none"> • Stoff »Brighton« (Standart) • Ledernachbildung ARTICO • Leder • Leder Nappa
Schiebedach	<ul style="list-style-type: none"> • ohne • Panorama-Schiebedach • Schiebe-Hebe-Dach in Glasausführung
⋮	⋮

Abbildung 3-3: Ausgewählte Varianten der Mercedes C-Klasse 2008

Eine von MAUNE durchgeführte empirische Befragung unter 126 Automobilzulieferern in Deutschland zeigt, dass der Trend zur Variantenvielfalt weiter anhalten wird (Maune 2002, S. 58). Im Rahmen der Umfrage gaben 57 % der befragten Unternehmen an, dass die von ihnen angebotene Variantenanzahl in den nächsten zehn Jahren weiter steigen wird (vgl. Abbildung 3-4). Dieser Trend zeigte sich über die Unternehmensgrößen hinweg als relativ stabil.

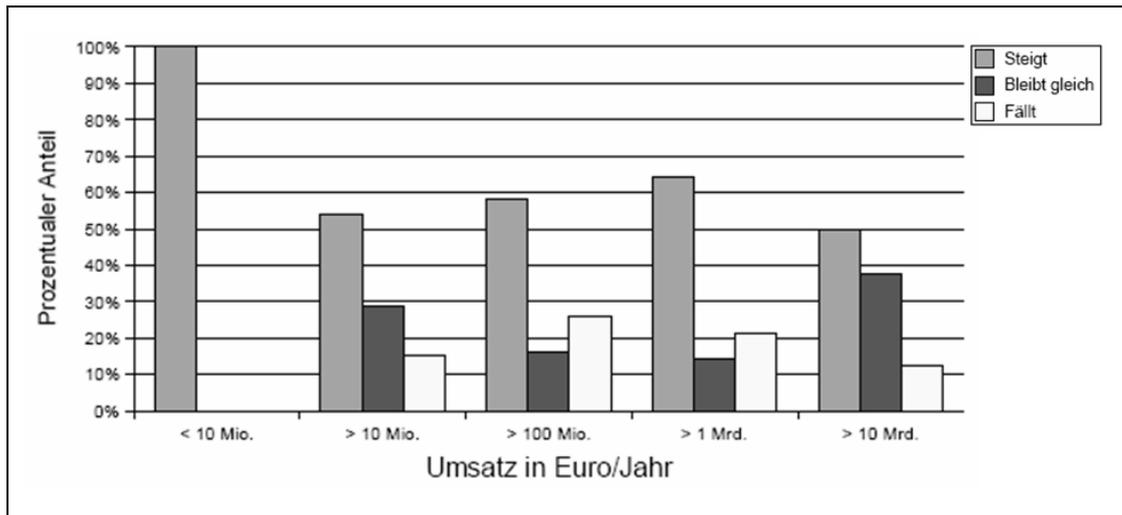


Abbildung 3-4: Zukünftige Entwicklung der Variantenanzahl bei Automobilzulieferern in Deutschland (Planungshorizont 10 Jahre)³⁷

(Quelle: (Maune 2002, S. 62))

Trotz der steigenden Variantenzahl und der damit einhergehenden zunehmenden Komplexität in den Unternehmen, wurde in der empirischen Untersuchung weitergehend aufgezeigt, dass diesem Problem insgesamt gesehen keine hohe Aufmerksamkeit geschenkt wird. Nur knapp die Hälfte der Unternehmen betrachtet die durch Varianten entstehende Komplexität genau bis sehr genau (Maune 2002, S. 63).

Die Ausführung in Kapitel 3.2 haben die Vorteilhaftigkeit und die praktische Relevanz einer Variantenfertigung aufgezeigt. Der Trend hin zu einer Variantenfertigung verändert auch die Anforderungen an Kanban-Systemen. Die im Rahmen eines Mehrprodukt-Kanban Systems entstehenden Planungsprobleme werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

³⁷ Aufgrund der geringen Beteiligung von Firmen mit weniger als 10 Mio. Euro Jahresumsatz kann der Wert von 100% als nicht signifikant angesehen werden.

3.3 Planungsprobleme in variantenreichen, Kanban-basierten Fertigungssystemen

3.3.1 Merkmale des Fertigungssystems

Als Grundlage zur Ableitung der wesentlichen Planungsprobleme werden im Folgenden zunächst die Merkmale einer variantenreichen, Kanban-basierten Fertigung genauer beschrieben. Zur Charakterisierung der in solchen Systemen vorherrschenden Produktionssituation kann zwischen ausbringungsbezogenen, einsatzbezogenen sowie prozessbezogenen Merkmalen unterschieden werden³⁸ (Boysen 2005, S. 14; Dyckhoff 2003, S. 355; Günther & Tempelmeier 2005, S. 10).

Ausbringungsbezogene Merkmale beschreiben einerseits die aus dem Produktionsprozess resultierenden Objekte (Output oder Ausbringung) und andererseits die den Verfügungsbe- reich des Systems nach außen verlassenden bzw. dem am Ende der Produktionsperiode für nachfolgende Aktivitäten zur Verfügung stehenden Objekte (Systemoutput oder Austrag) (Dyckhoff 2003, S. 356). Bei ausbringungsbezogenen Merkmalen handelt es sich insbesondere um die Anzahl der Erzeugnisse, die Auflagengröße sowie die Beziehung zum Absatzmarkt. Nach der Anzahl der hergestellten und auf dem Absatzmarkt angebotenen Produktarten unterscheidet man Einprodukt- und Mehrprodukt-Produktionssysteme. Die Variantenfertigung bedingt zwangsläufig den Mehrproduktfall für das betrachtete Fertigungssystem. Die Auflagengröße bezeichnet die Anzahl der nach Vorbereitung der Produktionsanlage ununterbrochen hergestellten Erzeugniseinheiten. Zu unterscheiden sind hierbei Massen-, Sorten-, Serien- und Einzelproduktion. Die Massenproduktion charakterisiert sich durch die ständige, zeitlich nicht begrenzte Produktion eines Gutes in großen Mengen. Einen Spezialfall der Massenproduktion stellt die Sortenproduktion dar, im Rahmen derer mehrere Varianten eines Grundtyps auf denselben Produktionsanlagen zeitlich hintereinander hergestellt werden. Während der Sortenproduktion ein einheitliches Ausgangsmaterial zur Fertigung der jeweiligen Sorten auf einer Fertigungsmaschine zugrunde liegt, basiert die Serienproduktion auf fertigungstechnischen Besonderheiten der einzelnen Produktvarianten mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien. In beiden Fällen müssen in der

³⁸ Dabei werden im folgenden nicht alle in der Literatur aufgeführten Merkmale beschrieben, sondern nur diejenigen, die für die Ableitung der Planungsprobleme von Relevanz sind.

Regel bei Sorten- bzw. Serienwechsel die Produktionsanlagen auf den neuen Output umgestellt werden. Der Umstellungsaufwand gestaltet sich bei einer Serienproduktion allerdings deutlich aufwändiger. Im Rahmen der Einzelproduktion werden individuelle Produkte hergestellt, die in der Regel auf einem speziellen Kundenauftrag basieren. Nach der Beziehung der Produktion zum Absatzmarkt kann zwischen Kunden- und Marktproduktion unterschieden werden. Bei der Kundenproduktion liegt zu Produktionsbeginn ein Kundenauftrag vor, der die herzustellenden Produkte art- und mengenmäßig spezifiziert sowie den konkreten Liefertermin festlegt. Dagegen erfolgt die Marktproduktion im Hinblick auf einen anonymen Markt (d.h. es wird auf Lager produziert). Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, stellt Kanban eine Form der Kundenproduktion dar. Abbildung 3-5 fasst die ausbringungsbezogenen Merkmale zusammen. Die für eine variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung relevanten Merkmalsausprägungen sind dabei fett hinterlegt.

Ausbringungsbezogene Merkmale	Ausprägung			
Anzahl der Erzeugnisse	Einproduktproduktion		Mehrproduktproduktion	
Auflagengröße	Massenproduktion	Sortenproduktion	Serienproduktion	Einzelproduktion
Beziehung zum Absatzmarkt	Kundenproduktion		Marktproduktion	

Abbildung 3-5: Ausbringungsbezogene Merkmale der variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung

Einsatzbezogene Merkmale sind zum einen dem System zu Beginn oder während des ablaufenden Prozesses von außen zugeführte materielle oder immaterielle Objekte (Systeminput oder Eintrag) und zum anderen die während des Produktionsprozesses zugeführten Objekte (Prozessinput oder Einsatz) (Dyckhoff 2003, S. 356). Darunter fallen insbesondere die Merkmale Beschaffungsprinzip, Anzahl der eingehenden Bauteile sowie Intensität des Produktionsfaktoreinsatzes. Das Beschaffungsprinzip kann in Vorratshaltung, Einzelbeschaffung und Just-in-Time Beschaffung unterteilt werden. Bei Umsetzung der Vorratshaltung wird ein zeitlich aufgeschobener Bedarf angehäuft, was einen hohen Lagerbestand zur Folge hat. Die Einzelbeschaffung eignet sich für Objekte, die nur in geringen Mengen, zu nicht vorhersehbaren Zeiten, benötigt werden (beispielsweise exotische Büromaterialien oder Computer). Häufig werden dabei die Objekte erst bei Auftragseingang beschafft. Im Rahmen der Just-in-Time Beschaffung (Absatz- bzw. fertigungssynchrone Beschaffung),

welche in Kanban-basierten Fertigungssystemen genutzt wird, werden die Objekte ebenfalls erst bei Bedarf direkt geliefert. Dabei wird der Bedarf allerdings mit einem gewissen Vorlauf an den Zulieferer zurückgemeldet. Der Zulieferer muss sich verpflichten, innerhalb dieser Vorlaufzeit zu liefern.³⁹ Die Anzahl eingehender Bauteile kann in einteilige oder mehrteilige Bauteile unterschieden werden. Die Ausbringung von Varianten bedingt in der Regel, dass mehrere Bauteile bzw. Optionen eingehen müssen, um das Grundmodell an die Kundenwünsche anpassen zu können. Letztendlich kann als einsatzbezogenes Merkmal von Produktionsprozessen die Intensität des Produktionsfaktoreinsatzes beschrieben werden. Dabei wird zwischen einer materialintensiven (bspw. Mineralölverarbeitung), anlageintensiven (bspw. Einsatz von Robotertechnologie in der Automobileproduktion), arbeitsintensiven (bspw. kunsthandwerkliche Produktion) sowie informationsintensiven (bspw. im Verlagswesen) Produktion unterschieden. Da die Variantenfertigung flexible Fertigungslinien benötigt, welche durch hohe Kosten gekennzeichnet sind (bspw. auf Grund teurer Universalmaschinen), kann der betrachtete Produktionsprozess als anlagenintensiv charakterisiert werden. Abbildung 3-6 fasst die einsatzbezogenen Merkmale zusammen. Die für eine variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung relevanten Merkmalsausprägungen sind wieder fett markiert.

Einsatzbezogene Merkmale	Ausprägung			
	Beschaffungsprinzip	Vorratshaltung	Einzelbeschaffung	Just-in-Time Beschaffung
Anzahl der eingehenden Bauteile	einteilig		mehrtellig	
Intensität des Produktionsfaktoreinsatzes	material-intensiven	arbeits-intensiven	informations-intensiven	anlage-intensiven

Abbildung 3-6: Einsatzbezogene Merkmale der variantenreichen, Kanban-basierten Fertigung

Prozessorientierte Merkmale sind den Produktionsprozess beeinflussende Eigenschaften, die einerseits als interne Stellgrößen instrumentalisiert werden können oder andererseits als Umfeldparameter (betriebliche Nebenbedingungen) exogen determiniert sind (Dyckhoff 2003, S. 56). Darunter fallen insbesondere die Ausprägung der Organisationsform, die

³⁹ Dabei ist es unerheblich, ob die Objekte tatsächlich extern von einem Zulieferer beschafft oder in einer vorgelagerten Produktionsstufe eigengefertigt werden.

Kontinuität des Materialflusses sowie die Anzahl der Produktionsstufen. Prinzipiell lassen sich verschiedene Organisationsformen in der Produktion entweder dem Funktionsprinzip oder dem Flussprinzip zuordnen. Im Rahmen des Funktionsprinzips werden Arbeitssysteme, die gleichartige Funktionen (Arbeitsgänge) durchführen können, räumlich in einer Werkstatt zusammengefasst (Werkstattproduktion). Der Materialfluss orientiert sich dabei an der räumlichen Verteilung der Werkstätten. Demgegenüber orientiert sich die Anordnung der Arbeitssysteme bei Umsetzung des Flussprinzips, welches als Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz von Kanban gilt (Takeda 2006, S. 195), an den Arbeitsplänen der zu bearbeitenden Erzeugnisse. Gemäß dem vom Herstellungsprozess erforderlichen Materialfluss werden die Arbeitssysteme hintereinander geordnet⁴⁰. Im Rahmen des Merkmals „Kontinuität des Materialflusses“ wird unterschieden, ob die Objekte während des Produktionsprozesses sofort (kontinuierliche Produktion) oder in bestimmten zeitlichen Abständen (d.h. eine gewisse Menge wird an einer Fertigungsstufe gesammelt) zum nächsten Arbeitssystem weitertransportiert werden (diskontinuierliche Produktion). Gemeinhin wird eine kontinuierliche Produktion als besonders geeignet für die Produktion nach Kanban angesehen (Dickmann 2007, S. 186). Letztendlich wird zwischen einstufigen und mehrstufigen Produktionssystemen unterschieden. Grundsätzlich ist eine variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung sowohl für einstufige als auch für mehrstufige Systeme geeignet. Allerdings ergeben sich die betriebswirtschaftlichen Vorteile von Kanban im Besonderen bei der Anwendung auf mehrstufige Produktionssysteme. Abbildung 3-7 fasst die prozessorientierten Merkmale zusammen.

⁴⁰ Das Flussprinzip kann in unterschiedlichen Ausprägungen angewendet werden. Häufig wird dabei zwischen Fertigungssystemen ohne und mit zeitlicher Koppelung unterschieden. Bei der Realisierung des Flussprinzips ohne zeitliche Koppelung (bspw. Reihenfertigung) erfolgt die Weitergabe der Werkstücke erst nach Beendigung der Bearbeitung bzw. bei Bedarf. Um Wartezeiten zu vermeiden werden dabei zumeist Pufferlager errichtet. Bei Realisierung des Flussprinzips mit zeitlicher Koppelung sind die Leistungsdurchschnitte der Betriebsmittel aufeinander abgestimmt. Dieser Fall kann durch eine vorgegebene Geschwindigkeit der Produktionsschritte eingehalten werden (Zwangslauffertigung) oder künstlich hergestellt werden, in dem etwa eine maximale Bearbeitungszeit festgelegt wird, nach dessen Ablauf das Werkstück an die nachfolgende Fertigungsstufe weitergeben werden muss (Fließfertigung) (Boysen 2005, S. 6).

Prozessbezogene Merkmale	Ausprägung	
Ausprägung der Organisationsform	Funktionsprinzip	Flussprinzip
Kontinuität des Materialflusses	diskontinuierliche Produktion	kontinuierliche Produktion
Anzahl der Produktionsstufen	einstufig	mehrstufig

Abbildung 3-7: Prozessorientierte Merkmale der variantenreiche, Kanban-basierte Fertigung

3.3.2 Beschreibung der Planungsprobleme

Aufbauend auf dem Verständnis der Merkmale einer variantenreichen, Kanban-basierten Fertigung wird im Folgenden auf die beim Einsatz solcher Systeme entstehenden Planungsprobleme eingegangen. Aufgrund der hohen Komplexität solcher Fertigungssysteme ist dabei eine simultane Systemgestaltung mit allen Elementen und ihren Relationen nicht angebracht (Adam 1996, S. 310; Pfohl 1977, S. 160). Vielmehr ist eine Zerlegung in einzelne (durchaus von einander abhängige) Planungsaufgaben zweckmäßig. Im Rahmen des betrachteten Produktionssystems kann etwa zwischen der Konfiguration des Fließsystems, der (Produktions-) Programmplanung und der Reihenfolgeplanung unterschieden werden⁴¹. Diese Zerlegung trägt den unterschiedlichen Fristigkeiten der Planungsprobleme Rechnung. So benötigt die Planung des Fließsystems (bspw. Maschinenkauf) einen langen zeitlichen Vorlauf vor Produktionsbeginn. Dementsprechend kann dabei auch nur auf Daten mit einem langen Prognosehorizont und entsprechenden Unsicherheiten zurückgegriffen werden. Die Erstellung des operativen Programmplanes (bspw. Menge der zu fertigenden Produktvarianten) erfolgt dagegen in der Regel im Rahmen einer mittelfristig antizipierten Kundennachfrage. Somit kann etwa die Menge der benötigten Werkstoffe mit deutlich

⁴¹ Einige Autoren betrachten die Planung des Produktes selbst (d.h. Wahl des Grundproduktes, Wahl des Absatzmarktes, Anzahl der Varianten etc.) ebenfalls als Planungsaufgabe bei der Errichtung eines Fertigungssystems. Eine Übersicht über dieses Planungsproblem findet sich in (Ramdas 2003, S. 79). Darüber hinaus wird die Losgrößenplanung häufig als zusätzlich eigenständiger Planungsschritt betrachtet. Die Losgrößenplanung ist ein eigenständiger Planungsschritt vor allem bei Werkstattproduktion. Bei Sortenproduktion ist sie allerdings nur integriert mit einer Planung der Belegungsreihenfolge unter den betrachteten Produkten möglich. Da im Rahmen dieser Arbeit das Problem der Reihenfolgenplanung im Vordergrund steht und sich gezeigt hat, dass schon eine isolierte Betrachtung der Reihenfolgenplanung zu erheblichen Schwierigkeiten führt (Freye 1997, S. 68), wird die Losgröße nicht einzeln, sondern als integraler Bestandteil der Reihenfolgenplanung betrachtet. Zur Losgrößenbestimmung vgl. bspw. (Dyckhoff 2003, S. 314).

größerer Sicherheit prognostiziert werden. Schließlich erfolgt die Planung der Reihenfolge der Auftragsbearbeitung auf Grundlage der aktuell vorliegenden (Varianten-) Nachfrage (Boysen 2005, S. 22; Kistner & Switalski 1989, S. 202). Die einzelnen Planungsprobleme werden im Folgenden näher erläutert.

a. Konfiguration des Fließsystems

Im Rahmen der Konfiguration des Fließsystems werden die für das Variantenprogramm benötigten Arbeitsschritte abgeleitet und einzelnen Arbeitsstationen zugeordnet. Diese Planungsaufgabe wird notwendig, wenn sich die Produktionsaufgabe substantiell ändert (entweder aufgrund der Neueinrichtung eines Fließsystems oder der Umstellung des Variantenprogramms). Planungsschritte der Konfiguration des Fließsystems sind typischerweise die Arbeitsanalyse sowie die Abstimmung der Arbeitsstationen (Boysen 2005, S. 53; Günther & Tempelmeier 2005, S. 90; Kuhn 1998, S. 7).

Zu Beginn der Konfigurationsplanung wird die Produktionsaufgabe soweit in Einzelteile (Arbeitsschritte) zerlegt, bis diese sich aus ökonomischen oder technischen Gründen nicht weiter teilen lassen (*Arbeitsanalyse*). Für jeden Arbeitsschritt wird daran anschließend die Durchführungszeit⁴² sowie die Vorgänger-Nachfolgerbeziehung ermittelt. Das Ergebnis der Arbeitsanalyse ist ein so genannter Vorranggraph (Dangelmaier 2007, S. 361), in dem die Reihenfolgebeziehungen sowie die Durchführungszeiten für jeden Vorgang definiert sind⁴³. Dieser Vorranggraph stellt das Inputdatum für die Abstimmung der Arbeitsstationen dar.

Den wichtigsten Schritt der Konfigurationsplanung stellt die *Abstimmung der Arbeitsstationen* dar. Dabei werden die Arbeitsschritte einzelnen Arbeitsstationen zugeordnet und somit auch die Betriebsmittel- und Arbeitskräfteausstattung der Stationen festgelegt. Je nach zeitlicher Koppelung zwischen den einzelnen Arbeitsstationen wird im Rahmen dieses Planungsschrittes zwischen Systemen mit getaktetem und nicht getaktetem Materialfluss unterschieden (Günther & Tempelmeier 2005, S. 91). In Systemen mit getaktetem Materialfluss ist die Geschwindigkeit der Produktionsschritte im Vorhinein vorgegeben. Der

⁴² Die Durchführungszeiten werden durch direktes Messen der Bearbeitungsdauer oder durch „Verfahren der vorbestimmten Zeit“ ermittelt (Heinz 1996; Zäpfle 1989, S. 214).

⁴³ Sollten unterschiedliche Varianten abweichende (aber ähnliche) Vorranggraphen aufweisen, wird in der Regel ein gemeinsamer Vorranggraph, ein sogenannter Mischgraph entwickelt. (Bukchin & Rabinowitch 2006, S. 417; van Zante-de Fokkert & de Kok 1997, S. 399).

Transport der Werkstücke erfolgt dabei in der Regel mittels Fließbändern, weshalb dieser Planungsschritt häufig auch als Fließbandabstimmung bezeichnet wird. Da im Rahmen von Systemen mit getaktetem Materialfluss Kanban allerdings nicht sinnvoll einsetzbar ist, wird im Folgenden nur auf Systeme mit nicht getaktetem Materialfluss eingegangen⁴⁴. Die Abstimmung der Arbeitsstationen bei nicht getaktetem Materialfluss wird auch als Leistungsanalyse bezeichnet. Solche Fließsysteme sind in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass die Bearbeitungszeiten an den einzelnen Stationen einerseits zwischen unterschiedlichen Varianten abweichen und andererseits zufälligen Schwankungen unterliegen (bspw. bei Maschinenausfall, Werkzeugbruch etc.). Damit ein derartiges Fließsystem effizient genutzt werden kann, müssen zwischen den Bearbeitungsstationen Pufferlager eingerichtet werden. Neben der Zuteilung der Arbeitsschritte zu einzelnen Stationen (und somit auch die Bestimmung der Anzahl der Stationen) stellt die Bestimmung der Puffergröße das wesentliche Optimierungsproblem der Leistungsanalyse dar. Je kleiner das Pufferlager zwischen zwei Stationen ist, desto eher kann es zu Situationen kommen, in denen eine nachfolgende Station auf Materialien warten muss (sogenanntes starving) oder ein bearbeitetes Werkstück nicht an den nachfolgenden Puffer weitergegeben werden kann (sogenanntes blocking). Andererseits führt ein großes Pufferlager zu hohen Lagerhaltungskosten (bspw. Zinsen auf Gebäude und Flächen, kalkulatorische Abschreibungen etc.). Im Rahmen von Kanban Systemen erfolgt die Dimensionierung der Pufferlager über die Festlegung der Anzahl der zwischen zwei benachbarten Fertigungsstufen zirkulierenden Kanban- Karten⁴⁵. So führt eine hohe Anzahl von Karten zu einem hohen Lagerbestand, da jede Karte auch einen Materialbestand (i.d.R. in Form von genormten Materialbehältnissen) repräsentiert⁴⁶. Jede einzelne Karte stellt gebundenes Material dar, welches Kosten in Form von Lagerhaltung und Transport erzeugt. Die Optimierung der Anzahl der Karten stellt somit eines der

⁴⁴ Das Problem der Fließbandabstimmung besteht darin, die Arbeitsschritte so zu Arbeitsstationen zusammenzufassen, dass diese möglichst zeitlich aufeinander abgestimmt sind. Dabei ist zu entscheiden, wie viele Arbeitsstationen benötigt werden und in welcher Weise die einzelnen Arbeitsschritte den Stationen zugeordnet werden sollen. Als Ergebnis der Fließbandfertigung werden für eine Anzahl an Stationen die Menge der zugewiesenen Arbeitsschritte definiert. Ausgangspunkt stellt dabei in der Regel eine gewünschte Bearbeitungszeit (Taktzeit) pro Station dar. Die Grundversion der Fließbandabstimmung wird als simple assembly line balancing problem (SALBP) bezeichnet (Baybars 1986, S. 909). Modelle und Lösungsverfahren für SALBP finden sich beispielsweise in (Erel & Sarin 1998, S. 414). Aufgrund der restriktiven Annahmen, welche in der Praxis kaum vorzufinden sind, wurde SALBP mehrfach erweitert (general assembly line balancing, GALBP). Unter der Menge an betrachteten Erweiterungen finden sich etwa reihenfolgenabhängige Bearbeitungszeiten, parallele Stationen sowie eine u-förmige Anordnung der Arbeitsstationen. Eine Übersicht über GALBP findet sich in (Becker & Scholl 2006, S. 694).

⁴⁵ Allgemeine Modelle und Lösungsverfahren zur Leistungsanalyse bei nicht getaktetem Materialfluss finden sich bspw. in (Conway et al. 1988, S. 229; Günther & Tempelmeier 2005, S. 96).

⁴⁶ Selbstverständlich wird der Lagerbestand auch durch die Dimensionierung der Behältnisse festgelegt. Vgl. dazu. (Dickmann 2007, S. 220).

wichtigsten und auch in einer Fülle von wissenschaftlichen Arbeiten untersuchten Probleme von Kanban-Systemen dar⁴⁷. Als Lösungsvorschläge für dieses Problem existieren mathematische Optimierungsansätze (Bitran & Chang 1987, S. 427; Brad & Golany 1991, S. 881), Heuristiken und Simulationsmodelle (Zäpfle & Hödlmoser 1992, S. 437) sowie Faustregeln wie beispielsweise die so genannte „Toyota Formel“ (Monden 1983, S. 22). Die Anzahl der Karten ist zwar durchaus auch kurz- bis mittelfristig variierbar, wird allerdings durch die (langfristig) Planung des Fließsystems (bspw. Größe der zur Verfügung stehenden Lagerfläche) determiniert.

b. Programmplanung

Im Rahmen der operativen (Produktions-) Programmplanung⁴⁸ werden auf Grundlage einer antizipierten Kundenachfrage Menge und Zeit der in der nächsten Periode zu produzierenden Erzeugnisse festgelegt. Dieses Problem stellt sich vor allem bei einer Sorten- bzw. Serienproduktion sowie einer auftragsbezogenen Einzelproduktion, da hier die Nachfrage in der Regel starken zeitlichen Schwankungen unterworfen ist; während bei einer Massenproduktion eine hohe und gleichmäßige Nachfrage vorliegt. Die wesentlichen Planungsaufgaben stellen dabei die aggregierte Gesamtplanung und die kapazitierte Hauptproduktionsprogrammplanung dar (Günther & Tempelmeier 2005, S. 142).

Die *aggregierte Gesamtplanung* (auch Beschäftigungsglättung) hat die Aufgabe, unterschiedliche Kapazitätsbeanspruchungen der Produktionsstätten bzw. größerer Betriebseinheiten für einen mittelfristigen Zeitraum auszugleichen und mit der Entwicklung der Nachfrage abzustimmen. Dazu zählt insbesondere die vorausschauende Einplanung interner Kapazitäten wie beispielsweise die Zuteilung der Mitarbeiter zu Produktionsstätten deren Output unterschiedlichen saisonalen Nachfrageschwankungen unterliegen. Der Planungshorizont umfasst dabei in der Regel ein bis zwei Jahre. Als Ergebnis der aggregierten Gesamtplanung erhält man produktionsstättenbezogene Fertigungsvorgaben für Produkttypen. Darüber hinaus wird eine Vorausschau der zu erwartenden Transportströme möglich, was eine Planung der bereitzustellenden logistischen Kapazitäten erlaubt. Zur Lösung des Ent-

⁴⁷ Eine Übersicht findet sich beispielsweise in (Lack 1996, S. 2782).

⁴⁸ In der Literatur wird im Rahmen der Produktionsprogrammplanung häufig auch die langfristige Planung des Produktfeldes (im Rahmen einer Variantenfertigung bedeutet dies die Wahl des Grundmodelles) bzw. die Bestimmung des Absatzmarktes sowie die Wahl des Variantenprogrammes betrachtet (Boysen 2005, S. 153). Diese werden im Rahmen dieser Arbeit aber nicht weiter betrachtet, da die Gestaltung eines Fertigungssystem im Vordergrund steht. Das Variantenprogramm geht dabei als festes Datum ein.

scheidungsproblems sind verschiedene quantitative Modelle entwickelt worden, wobei grundsätzlich auf lineare Optimierungsmodelle⁴⁹ zurückgegriffen werden kann (Günther & Tempelmeier 2005, S. 154; Tempelmeier 2001, S. 4)

Die *kapazitierte Hauptproduktionsprogrammplanung* (kurzfristige Produktionsprogrammplanung) legt fest, welche konkreten Endproduktmengen in den einzelnen Perioden des unmittelbar bevorstehenden Planungszeitraums produziert werden sollen. Da im Rahmen einer Kundenproduktion erst produziert wird, wenn ein konkreter Auftrag vorliegt, stellt sich grundsätzlich zunächst die Frage über Annahme oder Ablehnung eines Auftrages. Entscheidungsrelevante Einflussgrößen stellen dabei, neben den typischen finanzwirtschaftlichen Größen (bspw. positiver Deckungsbeitrag), die Kapazitätsbeanspruchungen dar. Potentielle Engpässe sollten erkannt werden und entsprechend in die Entscheidungsfindung eingehen. Abgesehen von einer Auftragsablehnung besteht dabei die Möglichkeit von kurzfristigen Kapazitätsanpassungen (bspw. Inanspruchnahme von Überstunden). Bei Auftragsannahme stellt sich anschließend das Planungsproblem der Lieferterminvereinbarung. Die Lieferterminvereinbarung stellt dabei eine zeitraumbezogene und keine zeitpunktbezogene Entscheidung dar. Ziel dabei ist eine zeitliche Glättung der Auftragslage, um eine konstante Kapazitätsauslastung zu erreichen und Überlastungen zu vermeiden. Durch die Glättung der Auftragslage soll zudem ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf für notwendige Bauteile erreicht werden, was als eine Grundvoraussetzung für die Just-in-Time Produktion angesehen wird (Boysen 2005, S. 154). Ebenso wie bei der aggregierten Gesamtplanung kann das Problem der kapazitierten Hauptproduktionsprogrammplanung recht gut mit Hilfe linearer Optimierungsmodell gelöst werden (Stadtler 1998, S. 169; Tempelmeier 2001, S. 4). Wesentliches Problem stellt in beiden Fällen in der Regel die Prognose der zukünftigen Entwicklung der Nachfrage dar (Günther & Tempelmeier 2005, S. 144).

c. Reihenfolgeplanung

Die Programmplanung entscheidet über die Zusammensetzung des Produktionsprogramms innerhalb eines Zeitraums. Diese legt allerdings keinen exakten Fertigungszeitpunkt fest. Das ist Aufgabe der Reihenfolgeplanung (auch Ablaufplanung), welche die vom Produktionsprogramm zu fertigenden Aufträge (Art und Menge der Varianten) empfängt und bestimmt, welcher Auftrag in der Warteschlange eines Arbeitssystems als nächstes bearbeitet

⁴⁹ Zur linearen Optimierung vgl. bspw. (Domschke & Drexl 2007, S. 13; Neumann & Morlock 1993, S. 35).

werden soll. Vor allem, wenn in der vorgelagerten Planungsphase die Kapazitätsbeschränkungen der Ressourcen nur unzureichend berücksichtigt worden sind bzw. diese aufgrund der Komplexität und Dynamik der Umweltbedingungen nur schwer einzuplanen sind (bspw. aufgrund einer stark schwankenden Nachfrage), kommt es regelmäßig vor, dass mehrere Aufträge dieselben Arbeitssysteme zur gleichen Zeit beanspruchen und somit eine Warteschlange entsteht. Insbesondere bei steigender Variantenanzahl erscheint das Problem der Reihenfolgeplanung an Gewicht zu gewinnen. Wie bereits dargestellt, wird die Mercedes C-Klasse in 2^{27} Varianten angeboten (Röder & Tibken 2006, S. 1010). In dieser Größenordnung erscheint es unmöglich, den Bedarf der einzelnen Varianten valide zu prognostizieren.

Durch die Festlegung der Bearbeitungsreihenfolge und der Bearbeitungstermine für definierte Produktionsaufträge auf den einzelnen Produktionsstufen wird im Rahmen der Reihenfolgeplanung der kurzfristige Ablauf des Produktionsprozesses unter Berücksichtigung vorgegebener Zielvorgaben erstellt (Adam 1990, S. 725). Dieser Planungsschritt umfasst somit das Problem der Reihenfolgebestimmung sowie darauf aufbauend die Terminplanung vorgegebener Produktionsaufträge (Maschinenbelegungsplan) (Freye 1997, S. 66). Neben der eigentlichen Planerstellung beinhaltet die Reihenfolgeplanung aufgrund der Dynamik realer Produktionsumgebungen auch Plankorrekturen, d.h. die Anpassung bestehender Ablaufpläne an Änderungen im Umfeld der Produktion (Geiger 2005, S.20; Sauer 1993, S. 7).

Die Reihenfolgeplanung, auf welche die vorliegende Arbeit fokussiert, stellt insbesondere bei der Lösung praxisrelevanter Größenordnungen ein Problem mit erheblicher Komplexität dar. So wurde nachgewiesen, dass der überwiegende Teil der Reihenfolgeprobleme der Klasse der NP-schweren Probleme zuzuordnen ist⁵⁰ (Freye 1997, S. 68; Garey & Johnson 2003, S. 236).

⁵⁰ Vgl. dazu insbesondere Kapitel 4.1.3.

4 Verfeinerung der Anforderungen an das Informationssystem: Reihenfolgeplanung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Eigenschaften sowie die Planungsprobleme der variantenreichen Produktion nach Kanban dargestellt wurden, erfolgt in Kapitel 4 eine Fokussierung auf das in dieser Arbeit betrachtete Teilproblem: die Reihenfolgeplanung. Ziel des Kapitels ist es, die Anforderungen an das zu entwickelnde System zu detaillieren. Im Rahmen von Kapitel 4.1 werden zunächst die Problemvorgaben spezifiziert sowie die Komplexität des Optimierungsproblems aufgezeigt. Zur Lösung des Reihenfolgeproblems wurde eine Reihe von Verfahren vorgeschlagen, welche in Kapitel 4.2 vorgestellt und hinsichtlich ihrer praktischen Nutzbarkeit analysiert werden. Dabei wird insbesondere aufgezeigt, dass bisherige Verfahren eine nur sehr unflexible Entscheidungsfindung ermöglichen. Dies bezieht sich sowohl auf die Trägheit bei der Ermittlung des Reihenfolgeplans als auch auf die Unfähigkeit, mehrere betriebswirtschaftlich relevante Zielgrößen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen bzw. deren Bedeutung bei der Entscheidungsfindung den aktuellen Anforderungen anzupassen. Die Flexibilisierung der Reihenfolgenplanung stellt die wesentliche (Qualitäts-) Anforderung an das zu entwickelnde System dar. Diese Anforderung wird in Kapitel 4.3 ausführlich erläutert.

4.1 Komplexität der Reihenfolgeplanung

4.1.1 Spezifikation der Problemvorgaben

Wesentlich für das Reihenfolgeproblem ist das Vorliegen einer Menge an Fertigungsstufen $FS = \{FS_1, FS_2, \dots, FS_m\}$, die zur Bearbeitung einer Menge an Fertigungsaufträgen $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ benötigt werden. Jeder Auftrag A_a besteht aus einer Menge an Operationen $\{O_{a1}, O_{a2}, \dots, O_{aoo}\}$, wobei jede Operation O_{ak} auf einer Fertigungsstufe $FS_i \in FS$ zu bearbeiten ist und eine positive Bearbeitungszeit p_{ak} aufweist. Die Operationen sind je nach Problemstellung nach gegebenen technologischen Bearbeitungsreihenfolgen geordnet (so genannten Präzedenzbeziehungen). Der Reihenfolgeplan ist dann als eine konkrete Festlegung der Startzeitpunkt t_{ak} aller Operationen O_{ak} unter Berücksichtigung einer

Menge an Nebenbedingungen zu verstehen. Unter der Annahme einer nicht unterbrechbaren Bearbeitung ergibt sich dann ein Endzeitpunkt der Operation O_{ak} von $C_{ak} = t_{ak} + p_{jk}$ sowie ein Fertigstellungszeitpunkt C_a des kompletten Auftrages A_a von $C_j = \max\{C_{a1}, C_{a2}, \dots, C_{a\alpha_a}\}$ (Conway, Maxwell & Miller 1967; Geiger 2005, S. 9).

Je nach konkreter Situation existieren weitere Charakteristika des Planungsproblems, welche durch die Eigenschaften der Fertigungsstufe sowie der Aufträge beschrieben werden können. Tabelle 4-1 fasst die wesentlichen Ausprägungen zusammen (Blazewicz et al. 2001, S. 68; Geiger 2005, S. 23; Rinnooy Kan 1976, S. 19).

<i>Eigenschaften der Fertigungsstufe (α)</i>	<i>Eigenschaften der Aufträge (β)</i>
<ul style="list-style-type: none"> - $\alpha = 1$ Problemstellung mit genau einer Fertigungsstufe. - $\alpha = Pm$ Es existieren m identische, parallele Fertigungsstufe. - $\alpha = Qm$ Die Problemstellung weist m parallele Fertigungsstufen FS_i mit unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten auf. - $\alpha = Rm$ Es sind m parallele Fertigungsstufen vorhanden, wobei die Arbeitsgeschwindigkeit der Fertigungsstufen von dem zu bearbeitenden Auftrag A_a abhängt. - $\alpha = Fm$ Alle Aufträge weisen eine identische Maschinenreihenfolge auf. D.h alle Aufträge müssen bspw. zunächst auf FS_1 dann FS_2 etc. bearbeitet werden. Diese Situation charakterisiert typischerweise eine Fließfertigung und wird als Flow Shop Problem bezeichnet⁵¹. - $\alpha = Jm$ Die Maschinenfolge der Operationen der Aufträge unterscheidet sich, wie es für die Werkstattfertigung typisch ist. (Job Shop Problem) - $\alpha = Om$ Die Bearbeitungsreihenfolge der Operationen der Aufträge auf den Fertigungsstufen ist keinen Restriktionen unterlegen (Open Shop Problem). 	<ul style="list-style-type: none"> - $\beta = r_a$ Für jeden Auftrag A_a ist ein Freigabezeitpunkt (r_a) vorhanden, der den frühestmöglichen Zeitpunkt der Bearbeitung definiert. - $\beta = d_a$ Die Aufträge weisen einen festen Fertigstellungstermin (d_a) auf - $\beta = s_{iak}$ Die Problemstellung weist reihenfolgeabhängige Rüstzeiten bzw. Rüstkosten S_{ijk} bei Umstellung einer Fertigungsstufe von Auftrag A_a nach A_k auf. - $\beta = prmp$ Die Bearbeitung einzelner Operationen kann unterbrochen werden und zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden. - $\beta = prec$ Zwischen den einzelnen Aufträgen bestehen Präzedenzbeziehungen, sodass die Bearbeitung eines Auftrages erst nach Abschluss anderer Aufträge abgeschlossen werden kann - $\beta = nwt$ Zwischen den Fertigungsstufen existiert kein Puffer, sodass die Bearbeitung der Aufträge nach der Fertigstellung auf einer Fertigungsstufe unverzüglich auf der nachfolgenden Stufe fortgesetzt werden muss.

Tabelle 4-1: Potentielle Charakteristika von Reihenfolgeproblemen

⁵¹ Einen Spezialfall stellt das Permutations Flow Shop Problem dar, bei dem zusätzlich davon ausgegangen wird, dass die Bearbeitung bezüglich der Warteschlange vor den Maschinen gemäß dem First-First-Out Prinzip erfolgt.

Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben ist das betrachtete Fertigungssystem dem Flussprinzip zuzuordnen. Es wird daher davon ausgegangen, dass alle Aufträge eine identische Maschinenreihenfolge aufweisen. Folglich ist das untersuchte Reihenfolgeproblem (Tabelle 4-1 folgend) der Gruppe der Flow Shop Probleme ($\alpha = F_m$) zugehörig. Aufgrund der Betrachtung einer Multi-Model-Production (vgl. Kapitel 3.2.1) handelt es sich darüber hinaus um eine Problemstellung mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten ($\beta = s_{ijk}$). Zusätzlich wird, wie für eine Kundenproduktion üblich, von festen Fertigstellungstermin ($\beta = d_j$) ausgegangen.

Reihenfolgeprobleme können weitergehend in statische oder dynamische sowie deterministisch oder stochastisch unterteilt werden (Petri 2007, S. 6). Liegen alle in der Planung zu berücksichtigenden Aufträge zum Planungszeitpunkt vor, so handelt es sich um ein statisches Problem. Treffen im Zeitablauf weitere zu berücksichtigende Aufträge ein, so ist das Problem dynamisch. Als deterministisch wird ein Problem bezeichnet, wenn zum Planungszeitpunkt alle entscheidungsrelevanten Informationen (Bearbeitungszeiten, Liefertermine usw.) über die Aufträge bekannt sind. Ist zum Planungszeitpunkt mindestens ein Datum nicht bekannt oder noch unsicher, so ist das Problem stochastisch. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einem dynamischen, deterministischen Reihenfolgeproblem ausgegangen.⁵²

4.1.2 Zielgrößen der Reihenfolgeplanung

Die Lösung der Reihenfolgeplanung hat sich grundsätzlich an dem erwerbswirtschaftlichen Prinzip zu orientieren (Gutenberg 1979, S. 464). Dabei weist die Reihenfolgeentscheidung allerdings (kurzfristig) keinen Einfluss auf die Erlöse auf, da diese durch die vorgelagerte Produktionsprogrammplanung vorgegeben sind (Seelbach 1975, S. 32). Folglich verbleibt als Ziel die Minimierung der entscheidungsrelevanten Kosten (bspw. Lager-, Rüst- sowie Terminabweichungskosten)⁵³ (Petri 2007, S. 10). Die am häufigsten vorgeschlagenen Ziel-

⁵² Die Verfügbarkeit aller entscheidungsrelevanter Informationen soll insbesondere durch den Einsatz der RFID-Technologie gewährleistet werden (vgl. Kapitel 5.2).

⁵³ Da die Erfassung der entscheidungsrelevanten Kosten häufig mit großen Schwierigkeiten behaftet ist, werden die monetären Formalziele in der Praxis häufig durch Zielsubstitute ersetzt. Dabei handelt es sich in der Regel um vergleichsweise leicht quantifizierbare Zeitgrößen (Albers 1991, S. 18).

größen der Reihenfolgeplanung werden im Folgenden kurz vorgestellt (Geiger 2005, S. 25; Petri 2007, S. 10; Zäpfle 1996, S. 204)

Eine viel beachtete Zielgröße stellt die *Einhaltung der Liefertermine* dar. Kosten, die angesichts verspäteter Auftragsfertigstellung auftreten, können etwa aufgrund von Konventionalstrafen oder Warterabatten entstehen (Blohm et al. 1988, S. 273; Seelbach 1975, S. 37). Darüber hinaus können entgangene Folgeaufträge als Kosten der Nicht-Einhaltung des Liefertermins angesehen werden. Während Konventionalstrafen und Warterabatte sehr leicht zu quantifizieren sind, können die Kosten aufgrund entgangener Folgeaufträge nicht ohne weiteres bestimmt werden. Im Wesentlichen werden für die Einhaltung der Liefertermine folgende Zielgrößen angewendet (Geiger 2005, S. 28; Petri 2007, S. 14):

Summe der Terminüberschreitungen (T_{sum}):

$$T_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \max \{0; C_a - d_a\} \rightarrow \text{Min!}$$

Mittlere Terminüberschreitung (T_{mid}):

$$T_{\text{mid}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \max \{0; C_a - d_a\} \rightarrow \text{Min!}$$

Maximale Terminüberschreitung (T_{max}):

$$T_{\text{max}} = \max_{n=1(1)N} \{0; C_a - d_a\} \rightarrow \text{Min!}$$

Anzahl der terminüberschreitenden Aufträge (N_T):

$$N_T = \left| \{n \mid (C_a - d_a) > 0; n = 1(1)N\} \right| \rightarrow \text{Min!}$$

Neben Verspätungen können auch verfrühte Fertigstellungen Kosten verursachen, falls die Aufträge nicht sofort nach ihrer Fertigstellung ausgeliefert werden können und gelagert werden müssen (Pinedo 2002, S. 18).

Ein weiteres häufig beschriebenes Ziel der Reihenfolgeplanung ist die *Maximierung der Maschinen- bzw. Fertigungsstufenauslastung*, womit eine Minimierung der Leerzeitkosten angestrebt wird. Die Auslastung errechnet sich grundsätzlich als Quotient der Summe der Bearbeitungszeiten und der Zeit, welche der Fertigungsstufen zur Verfügung stehen. Die Betrachtung der Maschinenauslastung als Zielgröße der Reihenfolgeplanung wird häufig kritisch gesehen, da durch die Programmplanung die Maschinenauslastungen in vielen

Fällen nicht mehr beeinflussbar sind. Dennoch kann es sinnvoll sein, die Leerzeiten als Zielgrößen heranzuziehen, da somit ein zu großzügiger Umgang mit den Kapazitäten vermieden werden kann. Dies wiederum verhindert, dass Aufträge in der Zukunft aus Kapazitätsmangel abgelehnt werden müssen (Petri 2007, S. 16). Eine praktikable Möglichkeit der Messung der Maschinenauslastung besteht darin, lediglich die Auslastung AL_i der Fertigungsstufe FS_i bis zur Beendigung des letzten Arbeitsschrittes zu betrachten und danach anfallende Leerzeiten bis zur Abarbeitung des gesamten Arbeitsbestandes nicht zu berücksichtigen. Als Ziel ergibt sich dann: $AL_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^m AL_i \rightarrow \text{Max!}$.⁵⁴

Des Weiteren stellt die *Minimierung der Lagerkosten* eine bedeutende Zielgröße der Reihenfolgeplanung dar. Die Lagerkosten setzen sich aus den Kapitalbindungskosten und den Lagerraumkosten zusammen.⁵⁵ Da die Lagerraumkosten in der Regel langfristig determiniert sind, werden im Rahmen der Reihenfolgeplanung im Wesentlichen die Kapitalbindungskosten als Zielgröße genutzt. Als Kapitalbindungskosten werden die Zinsen auf das Kapital verstanden, welche in den Aufträgen des Produktionsprogramms gebunden sind. Das gebundene Kapital ist wiederum abhängig von der wertmäßigen Höhe des Auftragsbestandes, dem Kapitalkostensatz sowie der Kapitalbindungsdauer (Petri 2007, S. 12). Im Rahmen der Reihenfolgeplanung wird häufig die Minimierung der Wartezeiten und somit der Kapitalbindungsdauer als Zielgröße herangezogen.⁵⁶ Die Wartezeit eines Auftrags n (W_n) ergibt sich dabei als die Summe seiner Wartezeiten vor den einzelnen Maschinen W_{nm} . Als Zielfunktion (W_{sum}) für alle N Aufträge ergibt sich damit:

$$W_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^N W_n = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm} \rightarrow \text{Min!}$$

Alternativ zur Minimierung der Durchlaufzeit wird auch die Minimierung der Zykluszeiten, das heißt, die Zeitspanne bis zur Fertigstellung des gesamten Auftragsbestandes, herangezogen. Bei konstanten Bearbeitungszeiten sind diese Zielsetzungen identisch (Geiger 2005, S. 26).

⁵⁴ Häufig wird zur Messung der Maschinenauslastung auch die gesamte Zykluszeit, das heißt die Zeitspanne bis zur Fertigstellung des gesamten Auftragsbestandes, herangezogen. Dies ist aber nur bei einem statischen Problem mit gegebenem Auftragsbestand und konstanten Bearbeitungskosten möglich (Geiger 2005, S. 27).

⁵⁵ Darüber hinaus entstehen weitere Lagerhaltungskosten, wie beispielsweise Personalkosten.

⁵⁶ Die Ermittlung des korrekten Kapitalkostensatzes und der Kostensätze je Zeiteinheit für die einzelnen Aufträge stellt darüber hinaus ein nicht unbedeutendes Problem dar (vgl. dazu bspw. (Seelbach 1975, S. 34).

In Produktionssystemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten wird ferner eine *Minimierung der Rüstkosten* angestrebt. Rüstzeiten stellen Stillstandzeiten dar, in denen die Investitionen (also die Maschinen) brach liegen und führen folglich zu Opportunitätskosten. Darüber hinaus können rüstabhängige Kosten, wie beispielsweise das zum Einrichten der Anlage benötigte Personal, entstehen. Die Zielfunktion besteht dann aus der Summe der anfallenden Rüstkosten. In vielen Fällen wird alternativ die Summe der anfallenden Rüstzeiten minimiert.

Die beschriebenen Größen stellen jede für sich wichtige Ziele der Reihenfolgeplanung dar. Allerdings ist eine separate Betrachtung zur Lösung des Planungsproblems nicht ausreichend, da sich die Ziele zum Teil *konfliktionär zueinander* verhalten, d.h. die Optimierung einer Zielgröße führt zwangsläufig zu einer Verschlechterung einer anderen Zielgröße. Dieses Problem wurde erstmals von GUTENBERG unter dem Begriff „Dilemma der Arbeitsablaufplanung“ beschrieben. Gutenberg zeigte dabei den Konflikt zwischen dem Ziel der Minimierung der Wartezeiten der Aufträge und dem Ziel der Minimierung der Leerzeiten der Maschinen auf (Gutenberg 1979, S. 216). Mehrere Arbeiten haben dieses Problem erweitert. So beschreibt SCHWEITZER ein Polylemma der Ziele Minimierung der Lagerlagerkosten, Minimierung der Terminüberschreitungen, Minimierung der Durchlaufzeiten, Minimierung der Wartezeiten und Minimierung der Gesamtvorbereitungszeiten (Schweitzer 1967, S. 291). MENSCH hingegen beschreibt ein Trilemma bestehend aus den Zielen Minimierung der Wartezeiten, Minimierung der Leerzeiten sowie Minimierung der Rüstzeiten (Mensch 1972, S. 82). Ungeachtet der exakten Beziehungen der Ziele untereinander bleibt festzuhalten, dass prinzipiell nicht nur ein Ziel, dessen Wert es zu minimieren oder zu maximieren gilt, betrachtet werden sollte, sondern vielmehr alle (für ein Unternehmen relevanten) Teilziele gleichzeitig berücksichtigt werden müssen. Die Gegenläufigkeit der (vielfältigen) Zielgrößen stellt die Reihenfolgeplanung vor ein erhebliches Optimierungsproblem⁵⁷. Allerdings führt auch schon die Betrachtung von lediglich einer Zielgröße zu einem bedeutenden Planungsproblem, da das Reihenfolgeproblem der Klasse der kombinatorischen Optimierungsprobleme zuzuordnen ist.

⁵⁷ Vergleiche hierzu insbesondere die Ausführungen in Kapitel 4.3.2

4.1.3 Reihenfolgeplanung als kombinatorisches Optimierungsproblem

Das wesentliche Problem der Reihenfolgeplanung ergibt sich aus der Tatsache, dass mit zunehmender Größe der Probleminstanz, der Lösungsraum (d.h. die Anzahl der möglichen Reihenfolgen) exponentiell ansteigt. Die Anzahl der gültigen Reihenfolgen für eine Menge an Varianten (v) und einem Bedarf pro Variante d_v kann durch folgende Formel ermittelt werden (Boysen 2005, S. 244; Koether 1986, S. 28):

$$R_g = \frac{\left(\sum_{v=1}^v d_v \right)!}{\prod_{v=1}^v (d_v!)}$$

Obwohl damit nur eine einzige Fertigungsstufe betrachtet wird, kann an dieser Stelle schon die hohe Komplexität des Planungsproblems deutlich gemacht werden. Bereits bei lediglich drei Varianten und einem jeweiligen Bedarf von drei Mengeneinheiten ergeben sich 1680 Kombinationsmöglichkeiten. Erhöht man den jeweiligen Bedarf auf vier Mengeneinheiten ergeben sich schon 34650 Möglichkeiten. In Anbetracht dieser Größenordnungen - auch schon bei sehr niedrigen Werten der Inputvariablen - und der exponentiellen Steigerung des Lösungsraums stellt sich die Frage, ob für das Reihenfolgeproblem überhaupt ein exaktes Verfahren entwickelt werden kann, mit dem Probleme in praxisrelevanten Größenordnungen in vertretbarer Rechenzeit gelöst werden können. Im Folgenden soll daher das Optimierungsproblem genauer betrachtet werden.

Generell gehören Reihenfolgeprobleme zu der Klasse der *kombinatorischen Optimierungsprobleme*. Allgemein wird unter einem Optimierungsproblem eine Aufgabe verstanden, bei der Entscheidungsvariablen so festzulegen sind, dass unter Berücksichtigung der Restriktionen des Problems eine Zielfunktion über dem zulässigen Bereich des Lösungsraums maximiert oder minimiert wird (Garey & Johnson 2003, S. 4). Ein kombinatorisches Optimierungsproblem liegt vor, wenn ein Problem diskrete Entscheidungsvariablen enthält und dessen Lösung sich als eine Menge oder Sequenz von ganzen Zahlen oder anderen diskreten Objekten darstellen lässt (Reeves 1993, S. 2). Kombinatorische Optimierungsprobleme tauchen relativ häufig in der Praxis auf, sind aber wesentlich schwieriger lösbar, als Modelle mit kontinuierlichen Variablen (Domschke & Drexl 2007, S. 8). So stellen etwa die Ermittlung der kürzesten Rundtour (das Handlungsreisendenproblem), die Be-

rechnung eines Baums kleinsten Gewichts in einem Graphen (bspw. für einen Kommunikationsaufbau) oder die Optimierung der Lagerhaltung einer Firma kombinatorische Optimierungsprobleme dar⁵⁸. Bei der Betrachtung solcher Optimierungsprobleme und den zugehörigen Lösungsverfahren (Algorithmen) kommt dem Rechenaufwand, der zur Lösung des Problems benötigt wird, eine besondere Bedeutung zu. Der Rechenaufwand⁵⁹ beschreibt dabei den Rechenzeitverbrauch eines Algorithmus der zur Lösung eines Problems benötigt wird. Der Rechenzeitverbrauch wird in der Regel durch Abzählen der erforderlichen Elementarschritte (bspw. eine Addition oder ein Vergleich von zwei Zahlen) ermittelt. Dabei wird der Rechenaufwand bestimmt, der im ungünstigsten Fall zur Lösung eines Problems notwendig ist. Gesucht wird demnach immer die obere Schranke für die Anzahl an Operationen, die ein Algorithmus benötigt, um für irgendeine Ausprägung des Problems den zugehörigen Output zu ermitteln (Feldmann 1999, S. 22). Die wichtigste Unterscheidung bezüglich des Rechenaufwandes stellen Probleme mit polynomialer Komplexität und nicht-polynomialer Komplexität dar (Domschke & Drexl 2007, S. 126). Wächst der Rechenaufwand zur Problemlösung bei ansteigender Größe des Planungsproblems maximal polynomial, so wird das zugrunde liegende Problem als polynomial beschränkt bezeichnet (polynomiale Komplexität). Existiert ein polynomial begrenzter Algorithmus, wird das Problem auch als leicht im Sinne der Komplexitätstheorie bezeichnet. Probleme mit nicht-polynomialer Komplexität werden in einer höheren Ordnung beschrieben, häufig in einer exponentiellen. In der Komplexitätstheorie (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 52; Garey & Johnson 2003, 187; Papadimitriou & Steiglitz 1982, S. 156) hat man für einzelne Problemtypen untersucht, welchen Rechenaufwand sie im ungünstigsten Fall verursachen und im Wesentlichen zwei Klassen von Optimierungsproblemen unterteilt (Domschke & Drexl 2007, S. 127):

1. Zur Klasse *P* gehören Probleme, die mit polynomialem Aufwand gelöst werden können. Für solche Probleme existieren Algorithmen, die die Lösungen effizient oder doch mit vertretbarem zeitlichen Aufwand berechnen. Probleme der Klasse *P* bilden die Grenze des algorithmisch sinnvollerweise Machbaren⁶⁰.

⁵⁸ Weitere Beispiele für betriebswirtschaftlich relevante Problemstellungen, die einem kombinatorischen Optimierungsproblem entsprechen, finden sich etwa in (Bjorndal et al. 1995, S. 275; Papadimitriou & Steiglitz 1987, S. 434).

⁵⁹ Anstelle von Rechenaufwand wird häufig auch von Komplexität gesprochen.

⁶⁰ Zur Klasse *P* gehören beispielsweise Kürzeste-Wege- und lineare Zuordnungsproblem (Domschke & Drexl 2007, S. 127).

2. Zur *Klasse der NP-schweren* werden solche Probleme gezählt, für die bisher kein Algorithmus bekannt ist, der auch das am schwierigsten zu lösende Problem desselben Typen mit polynomialem Aufwand löst. Die Probleme der Klasse NP gelten für praktische Zwecke als nicht lösbar, da der Aufwand zu ihrer Berechnung mit wachsender Problemgröße mehr als polynomial ansteigt.

Nahezu alle betrachteten Reihenfolgeprobleme fallen in die Klasse der NP-schweren Probleme, was zur Folge hat, dass der Einsatz eines exakten Lösungsverfahrens praktisch auszuschließen ist⁶¹. Auf einen formalen Beweis der Zugehörigkeit der Reihenfolgeprobleme zur Klasse NP-schwer wird an dieser Stelle verzichtet und auf die angegeben Literatur verwiesen (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 267; Freye 1997, S. 68; Garey & Johnson 2003, S. 236; McMullen, Tarasewich & Frazier 2000, S. 2653). Um die mit der Betrachtung eines kombinatorischen (np-schweren) Optimierungsproblems auftretende Schwierigkeiten zu veranschaulichen, soll stattdessen im Folgenden auf eines der bekanntesten dieser Probleme kurz eingegangen werden: das Traveling Salesman Problem.

Das *Traveling Salesman Problem* (auch Handlungsreisende-, Boten- oder Rundreisenproblem) Problem beschreibt einen Handlungsreisenden, der eine Anzahl von Orten zu besuchen hat und sich zu Beginn seiner Reise in einem dieser Orte aufhält. Die Entfernung zwischen sämtlichen Orten ist ihm als geographische Distanz ebenso bekannt wie Reisekosten oder Reisezeiten. Seine Aufgabe ist es, jede Stadt genau einmal zu besuchen und am Schluss wieder zu seinem Ausgangspunkt zurückzukehren. Dabei soll der Handlungsreisende durch die Wahl der Reihenfolge des Besuchs der Orte entweder die zurückgelegte Strecke, die entstehenden Reisekosten oder die benötigte Reisezeit minimieren (Schmitting 2000, S. 1; Spresser 1989, S. 827). Die Bedeutung des Traveling Salesman Problem resultiert nicht aus der direkten Anwendung auf Probleme von Handlungsreisenden, sondern aus der Übertragbarkeit auf eine Reihe von weiteren Optimierungsproblemen. So kann eine Äquivalenz zum Reihenfolgeproblem hergestellt werden, indem beispielsweise Orte durch Aufträge, Rundreisen durch Fertigungsfolgen und Entfernungen zwischen den Orten durch Rüstkosten ersetzt (Hansmann 2006, S. 366). Grundsätzlich wird bei der Betrachtung des Traveling Salesman Problem zwischen asymmetrischen und symmetrischen Problemen

⁶¹ Es ist ein einziger Algorithmus bekannt, mit Hilfe dessen ein sehr spezielles Reihenfolgeproblem in polynomer Zeit gelöst werden kann (Johnson Algorithmus). Mithilfe des Johnson-Algorithmus ist es möglich, eine hinsichtlich der Zykluszeit optimale Reihenfolge von Aufträgen, die jeweils auf genau zwei Fertigungsstufe nacheinander bearbeitet werden sollen, zu ermitteln (Vgl. Kapitel 4.2.1).

unterschieden. Bei den asymmetrischen Problemen können die Kanten (d.h. die Entfernungen zwischen den Orten) in Hin- und Rückrichtung unterschiedliche Länge haben. In solchen Fällen stellt die Richtung mit der zwei Orte verbunden werden, eine entscheidungsrelevante Größe dar. Bei symmetrischen Problemen dagegen sind alle Kantenlängen zwischen zwei Knotenpaaren in beide Richtungen identisch. Jede Tour zwischen zwei Orten hat dann dieselbe Länge. Die Symmetrie halbiert somit die Anzahl der möglichen Touren. Ein Traveling Salesman Problem zwischen realen Städten kann asymmetrisch oder symmetrisch sein, je nachdem, ob beispielsweise durch Baustellen oder Einbahnstraßen der Weg in eine Richtung länger dauert als in die andere. Obwohl es für das Traveling Salesman Problem (wie für alle kombinatorischen Optimierungsprobleme) abzählbar viele mögliche Lösungen gibt, ist eine vollständige Enumeration auf Grund der kombinatorischen Explosion praktisch nicht möglich. Bei der einfachsten Variante, dem symmetrischen Traveling Salesman Problem mit n Städten, können $(n-1)!/2$ verschiedene Rundreisen generiert werden. Somit ergeben sich bereits bei 15 Orten 43.589.145.600 möglich Rundreisen. Erhöht man die Anzahl der Orte auf 18 sind es über 177 Billionen Möglichkeiten. Tabelle 4-2 verdeutlicht den exponentiellen Zusammenhang zwischen Anzahl der zu besuchenden Orte und Größe des Lösungsraums. Wie schnell die Rechenzeit mit wachsender Anzahl von Orten wächst zeigt das folgende Beispiel: Hätte man einen Rechner, der für ein Problem mit 100 Orten eine vollständige Enumeration in einer Minute durchführen könnte, so bräuchte derselbe Rechner zur Lösung des Problems mit 101 Orten bereits 100 Minuten, bei 102 Orten länger als sieben Tage und bei 103 Orten fast zwei Jahre (Feldmann 1999, S. 15). Daran wird deutlich, dass ein exakter Algorithmus zur Lösung des Traveling Salesman Problem sehr schnell die Grenzen des technisch möglich überschreitet.

Anzahl zu besuchender Orte (bzw. zu bearbeitender Aufträge)	Anzahl der Lösungsmöglichkeiten
10	181.440
11	1.814.400
12	19.958.400
13	239.500.800
14	3.113.510.400
15	43.589.145.600
16	653.837.184.000
17	10.461.394.944.000
18	177.843.714.048.000
19	3.201.186.852.864.000
20	60.822.550.204.416.000
21	1.216.451.004.088.320.000
22	25.545.471.085.854.700.000
23	562.000.363.888.804.000.000
24	12.926.008.369.442.500.000.000
25	310.224.200.866.620.000.000.000

Tabelle 4-2: Anzahl der Lösungsmöglichkeiten des symmetrischen Traveling Salesman Problem in Abhängigkeit der Anzahl der zu besuchenden Orte.

(Bemerkung: Zur Äquivalenz zum Reihenfolgeproblem vgl. (Hansmann 2006, S. 366) sowie S. 32).

Die NP-schwere des asymmetrischen und des symmetrischen Traveling Salesman Problem wurde in eine Reihe von Arbeiten nachgewiesen (Johnson & Papadimitriou 1985, S. 37; Karp 1972, S. 85; Laporte 1992, S. 231). Es ist somit äußerst unwahrscheinlich, dass jemals ein polynomial beschränkter Algorithmus zur Lösung dieses Problems gefunden werden kann. Alle bekannten Algorithmen, die das Problem exakt lösen, erfordern eine exponentielle Rechenzeit in Bezug auf die Problemgröße, was zur Folge hat, dass mit den heute in Unternehmen verfügbaren Rechnerkapazitäten eine exakte Lösung des Optimierungsproblems nicht mit vertretbarem zeitlichem Aufwand zu gewährleisten bzw. lediglich für sehr kleine (praxisferne) Probleme sinnvollerweise machbar ist. Zwar ist davon auszugehen, dass sich durch die Fortschritte in der Informationsverarbeitungskapazität (beispielsweise durch die Entwicklungen im Bereich der Multicore-Prozessoren und die damit verbundenen Möglichkeit der Parallelisierung der Optimierungsrechnung) die Grenze von in annehmbarer Zeit zu bearbeitenden Optimierungsproblemen in Zukunft verschieben wird⁶², aktuell ist eine exakte Lösung solcher Optimierungsproblem in der betrieblichen Praxis allerdings nicht realistisch (Grötschel 2007, S. 109).

⁶² Aktuell sind Mehrkernprozessoren mit maximal sechs Hauptprozessoren für den Massenmarkt erhältlich. Bei einer Parallelisierung der Optimierungsrechnung, ist bei Einsatz eines Sechskernprozessors im besten Fall eine Beschleunigung um Faktor 6 erreichbar (Intel 2008).

Das Beispiel des Traveling Salesman Problem (bzw. die aufgezeigte Übertragung dieses Problems auf die Reihenfolgeplanung) zeigt, dass eine exakte Lösung des betrachteten Reihenfolgeproblems aktuell praktisch auszuschließen ist. Dabei ist zu beachten, dass im Rahmen des Traveling Salesman Problem lediglich eine einzige Zielgröße (Minimierung der zurückgelegten Strecke) betrachtet wird. Das Optimierungsproblem verschärft sich noch einmal um ein vielfaches, sollten mehrere Zielgrößen gleichzeitig in die Entscheidung mit einbezogen werden, wie es für die Reihenfolgeplanung aus betriebswirtschaftlicher Sicht notwendig ist (vgl. 4.1.2. und 4.3.2). Eines der am häufigsten untersuchte Reihenfolgeprobleme mit mehreren Zielgrößen stellt das so genannte „*single-machine early/tardy Problem*“ (Ow & Morton 1989, S. 177) dar, im Rahmen dessen eine Reihe von Aufträgen so auf eine Maschine eingeplant werden soll, dass die auftretenden Kosten der vorzeitigen Fertigstellung (early costs; bspw. Lagerkosten) sowie die Kosten der verspäteten Fertigstellung (tardy costs; bspw. Konventionalstrafen) möglichst minimal sind. Eine Zielsetzung, die insbesondere für die Just-in-Time Produktion von großer Bedeutung ist. Obwohl dieses Problem auf den ersten Blick recht einfach erscheint, wurde dessen NP-schwere in zahlreichen Arbeiten nachgewiesen (Hendel, Runge & Sourd 2008, S. 2; Ow 1984).

Die überwiegende Anzahl von praktisch vorkommenden Reihenfolgeproblemen ist durch ein simultanes Vorkommen multipler Zielsetzungen gekennzeichnet (multikriterielle Probleme). Dabei stehen die unterschiedlichen Zielsetzungen in der Regel konfliktionär zueinander, dass heißt eine Verbesserung hinsichtlich einer Zielsetzung ist mit der Verschlechterung eines anderen Kriteriums verbunden⁶³. Für solche multikriterielle Probleme existieren keine „ideale“ Alternativen, welche für alle Zielgrößen gleichermaßen optimal sind. Vielmehr steht die Ermittlung einer Lösung im subjektiven Kontext des Entscheidungsträgers bzw. einer Menge an Entscheidungsträgern (Geiger 2005, S. 7).

4.2 Verfahren der Reihenfolgeplanung

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Reihenfolgeplanung ein Optimierungsproblem von außerordentlicher Komplexität darstellt. Zur Lösung des Reihenfolgeproblems wurde eine

⁶³ Bspw. würde die Verringerung der „tardy costs“ durch den Aufbau eines großen Sicherheitsbestandes eine Erhöhung der „early costs“ durch größere Lagerhaltungskosten nach sich ziehen.

Reihe von Verfahren vorgeschlagen, welche sich in exakte, heuristische und metaheuristische Methoden unterscheiden lassen können (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 39). Die Prinzipien der verschiedenen Lösungsmethoden werden im Folgenden vorgestellt, sowie eine Bewertung hinsichtlich der praktischen Nutzbarkeit vorgenommen.

4.2.1 Exakte Verfahren

Exakte Verfahren liefern in endlich vielen Schritten eine optimale Lösung. Darunter fällt naturgemäß die *Vollenumeration*. Dabei werden sämtliche zulässigen Lösungsmöglichkeiten berechnet und die beste Lösung ausgewählt. Der Enumerationsprozess wird dabei im Allgemeinen sequentiell organisiert, d.h. es wird eine Reihenfolge voll aufgebaut und dann wieder schrittweise abgebaut und zu einer neuen Folge komplimentiert. Bei jeder ermittelten Reihenfolge muss dabei der Wert der betrachteten Zielgröße (bspw. Rüstzeiten) ermittelt werden (Müller-Merbach 1970, S. 26). Es ist offensichtlich, dass das Verfahren der Vollenumeration lediglich für sehr kleine Probleme anwendbar ist, da der Rechenaufwand bei größeren Problemen unverhältnismäßig stark ansteigt (vgl. Kapitel 4.1.3). Bei den meisten Reihenfolgeproblemen ist aber während der Enumerationsprozess bereits erkennbar, dass einige Reihenfolgen nicht optimal sein können. Diese müssen dann auch nicht weiter betrachtet werden. Verfahren, die frühzeitig nicht optimale Reihenfolgen eliminieren, werden verkürzte Enumerationsverfahren genannt. Darunter fallen insbesondere Verfahren der dynamischen Optimierung sowie Branch & Bound Verfahren. Das Grundprinzip der *dynamischen Optimierung* kann wie folgt beschrieben werden: Ausgehend von allen möglichen Ausgangszuständen (d.h. Anzahl der Aufträge die zuerst bearbeitet werden können) werden die möglichen Zustandsübergänge ermittelt (d.h. nächster Auftrag in der Reihenfolge). Betrachtet werden dann nur noch die möglichen Kombinationen, welche für den gegebenen Zielwert minimal bzw. maximal sind. Dieses Vorgehen wird für jede Stufe wiederholt, bis die höchste Stufe erreicht wird. Eine detaillierte Beschreibung der dynamischen Optimierung sowie Anwendungsbeispiele finden sich etwa in (Domschke & Drexl 2007, S. 159; Schneeweiß 1974). Während Verfahren der dynamischen Optimierung durch ein paralleles Vorgehen gekennzeichnet sind (d.h. mögliche Lösungen werden parallel zueinander aufgebaut), arbeiten Branch & Bound (Verzweigung und Schranke) Verfahren sowohl sequentiell als auch parallel. Diese Verfahren haben im Bereich des Operations Research eine große Bedeutung erlangt, weshalb diese im Folgenden detaillierter dargestellt werden. Grundsätzlich bestehen *Branch & Bound Verfahren* (Domschke, Scholl &

Vofß 1997, S. 41; Feldmann 1999, S. 34; Müller-Merbach 1970, S. 29) aus zwei Schritten. Der erste Schritt besteht aus der so genannten Verzweigung (branch). Dabei wird das vorliegende Problem in zwei oder mehr Teilprobleme aufgeteilt, so dass jedes Teilproblem weniger zulässige Lösungen besitzt als das Ausgangsproblem, gleichzeitig aber eine Lösung für das jeweilige Teilproblem auch eine zulässige Lösung für das Ausgangsproblem darstellt (bspw. feste Zuweisung eines Auftrages zu einer Fertigungsstufe). Nach welchen Regeln die Teilprobleme gebildet werden, variiert sehr stark je nach vorliegendem Anwendungsgebiet⁶⁴. Grundsätzlich könnte so das Problem solange aufgeteilt werden, bis sämtliche mögliche Fälle erfasst sind und ein vollständiger Entscheidungsbaum aufgebaut wurde (Feldmann 1999, S. 35). Dieses Vorgehen würde einer Vollenumeration entsprechen. Um dies zu vermeiden wird im zweiten Schritt (bound) versucht, bestimmte Teilprobleme auszuschließen, um so den Rechenaufwand zu begrenzen. Dies erreicht der Algorithmus durch Berechnung und Vergleich zweier Schranken (obere und unterer Schranke). Jede zulässige Lösung der Zielfunktion stellt eine obere Schranke dar. Als aktuelle oberer Schranke wird jeweils die im Verlauf des Verfahrens erhaltene beste Lösung bezeichnet. Gegebenenfalls müssen geeignete heuristische Verfahren angewendet werden um die obere Schranke zu ermitteln. Die untere Schranke erhält man durch Relaxation, d.h. Lockerung oder Eliminierung einer oder mehrerer Nebenbedingungen des betrachteten Problems und der Lösung des relaxierten Problems. Sind die beiden Schranken ermittelt, können durch einen Vergleich bestimmte Teilprobleme frühzeitig ausgeschlossen werden. Ist die obere Schranke kleiner als die untere Schranke des betrachteten Teilproblems, so braucht das Teilproblem nicht weiter betrachtet zu werden. Im Rahmen der Reihenfolgeplanung kann eine untere Schranke beispielsweise dadurch ermittelt werden, dass die Kapazitätsbeschränkung einer Maschine nicht beachtet wird. Ist der dann ermittelte Wert der Zielfunktion (bspw. Durchlaufzeit) trotz Relaxation schon schlechter als ein Wert einer bisher nicht relaxierten Lösung, so braucht dieses Teilproblem nicht weiter betrachtet werden. Die beiden Schritte (bound und branch) werden so lange durchgeführt, bis die einzelnen Teilprobleme entweder eliminiert oder vollständig berechnet wurden. Dabei wird die obere Schranke ständig aktualisiert. Die zuletzt verbliebene obere Schranke stellt die optimale Lösung dar

⁶⁴ Die drei häufigsten Verfahren sind: Die Tiefensuche: Dabei wird von den noch nicht bearbeiteten Teilproblemen das gewählt, welches als letztes eingefügt wurde (Last In – First Out). Die Breitensuche: Dabei wird von den noch nicht bearbeiteten Teilproblemen das gewählt, welches als erstes in den Baum eingefügt wurde (First In – First Out). Die Bestensuche: Dabei wird von den noch nicht bearbeiteten Teilproblemen das gewählt, welches die beste untere Schranke vorweist (Domschke, Scholl & Vob 1997, S. 41).

(Feldmann 1999, S. 35). Obwohl Branch & Bound Verfahren im Gebiet des Operation-Research eine hohe Bedeutung erlangt haben, muss angemerkt werden, dass bei praktischer Anwendung sehr viele (Teil-) Probleme gespeichert, verwaltet und gelöst werden müssen. Insbesondere bei Reihenfolgeproblemen mit vielen Variablen und Nebenbedingungen führt dies zu einem sehr hohen Rechen- und Speicheraufwand, was dieses Verfahren insbesondere für Probleme, bei denen eine schnelle Reaktionszeit gefordert ist unpraktikabel macht.

Die beschriebenen Verfahren der exakten Lösung der Reihenfolgeplanung haben alle den Nachteil, dass aufgrund der NP-Schwere des Problems ein betrieblicher Einsatz praktisch ausgeschlossen werden kann. Es ist ein einziger Algorithmus bekannt, mit Hilfe dessen ein spezielles Reihenfolgeproblem in polynomer Zeit gelöst werden kann: der *Johnson Algorithmus*. Mithilfe des Johnson-Algorithmus (French 1982, S. 71; Johnson 1954, S. 61) ist es möglich, eine hinsichtlich der Zykluszeit optimale Reihenfolge von Aufträgen, die jeweils auf genau zwei Fertigungsstufe nacheinander bearbeitet werden sollen, zu ermitteln. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Bearbeitungszeiten der Aufträge bekannt sind und keine Rüstzeiten anfallen. Der grundsätzliche Ablauf des Algorithmus kann wie folgt beschrieben werden: Zunächst werden aus der Gruppe der zu bearbeitenden Aufträge zwei Untergruppen gebildet. Gruppe eins beinhaltet alle Aufträge, deren Bearbeitungszeit auf der ersten Fertigungsstufe kleiner oder gleich groß ist wie auf der zweiten Fertigungsstufe. Gruppe zwei beinhaltet alle Aufträge, deren Bearbeitungszeit auf der zweiten Fertigungsstufe größer ist als auf der ersten. Daran anschließend werden die Aufträge der ersten Gruppe nach aufsteigender Bearbeitungszeit auf Fertigungsstufe eins sortiert. Die Aufträge in Gruppe zwei werden nach absteigender Bearbeitungszeit auf Fertigungsstufe zwei sortiert. Die Verkettung der beiden Reihenfolgen (zunächst Gruppe eins) stellt dann die optimale Lösung dar. Es sei darauf hingewiesen, dass der Algorithmus lediglich unter den beschriebenen (restriktiven) Annahmen eine optimale Lösung für die Zykluszeit liefert.

4.2.2 Heuristiken

Im weitesten Sinne wird unter dem Begriff Heuristik eine Problemlösungsstrategie verstanden, die unter einem reduziertem Rechenaufwand Lösungen ohne Optimalitätsgarantie erzeugt (Geiger 2005, S. 48). Dabei zeichnen sich heuristische Verfahren durch drei konstituierende Merkmale aus (Streim 1975, S. 151). Erstens betrachten heuristische Verfahren lediglich eine Teilmenge der potentiellen Lösungen. Zweitens verwenden Heuristiken

nichtwillkürliche Entscheidungsoperatoren, die problemspezifische Eigenschaften ausnutzen und drittens liegt für solche Verfahren kein Konvergenzbeweis vor, sodass das Auffinden einer optimalen Lösung nicht garantiert werden kann. Neben diesen konstituierenden Merkmalen werden in der Literatur Heuristiken mit zusätzlichen akzessorischen Eigenschaften beschrieben. Darunter fällt die Verwendung von methodenimmanenten wie auch künstlichen Abbruchkriterien, die eine Termination der Berechnung bewirken. Darüber hinaus stellen Heuristiken häufig Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung, die einen Eingriff in den Ablauf der Berechnung ermöglichen. Letztendlich sind Heuristiken in der Lage, eine große Klasse an Probleminstanzen innerhalb einer Problemklasse zu lösen (Universalität innerhalb einer Problemklasse) (Geiger 2005, S. 49; Streim 1975, S. 151). Die für die Reihenfolgeplanung am häufigsten vorgeschlagenen Heuristiken können in Eröffnungsverfahren und Iterationsverfahren unterschieden werden⁶⁵ (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 44; Müller-Merbach 1970, S. 34).

Eröffnungsverfahren ermitteln - ohne Umwege über eine andere Lösung - eine einzige zulässige Lösung auf direktem Weg. Im Rahmen der Reihenfolgeplanung handelt es sich dabei in der Regel um Prioritätsregelverfahren, bei denen aus der Menge der noch einzuplanenden Aufträge (bzw. Varianten) derjenige gewählt wird, welcher einer bestimmten Prioritätsregel am besten genügt.⁶⁶ Die einfachste und in der Praxis häufig angewendete Prioritätsregel stellt das First-come-First-served Prinzip dar. Hierbei wird der Auftrag als nächstes bearbeitet, welcher sich am längsten in der Warteschleife befindet. Daneben existieren eine Reihe weiterer einfacher Prioritätsregeln (wie bspw. die „Shortest Operation Time“ Regel, nach der die Aufträge nach wachsenden Bearbeitungszeiten sortiert werden oder die „Earliest Due Date-Regel“, nach der die Aufträge nach wachsenden gewünschten Fertigstellungstermin sortiert werden). Einige etwas weitergehende Ansätze zur Anwendung von Prioritätsregeln sind nachfolgend dargestellt (Boysen 2005, S. 245; Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 269):⁶⁷

⁶⁵ Daneben zählen zu den für die Reihenfolgenplanung geeigneten Heuristiken auch unvollständig ausgeführte exakte Verfahren (i.d.R. unvollständige Branch and Bound Verfahren) und relaxationsbasierte Verfahren ((Domschke, Scholl & Vob 1997, S. 44).

⁶⁶ Prioritätsregelverfahren werden häufig auch als Greedy-Algorithmen (Gierige Algorithmen) bezeichnet. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie schrittweise denjenigen Folgezustand auswählen, der zum Zeitpunkt der Wahl den größten Gewinn bzw. das beste Ergebnis verspricht.

⁶⁷ Eine Übersicht findet sich auch in (Koether 1986, S. 245).

- Wähle alternierend aus den verbleibenden Varianten diejenige mit der größten bzw. kleinsten Bearbeitungszeit (Decker 1993, S. 66).
- Wähle die Variante, deren Bearbeitungszeit an der Fertigungsstation die Abweichung von der durchschnittlichen Bearbeitungszeit am wenigsten erhöht (Sumichrast, Russel & Taylor 1992, S. 199).
- Wähle die Variante, die zur minimalen Erhöhung der Arbeitskosten führt. Dabei werden auf jeder Fertigungsstufe die Leerzeiten nach Bearbeitung einer Variante mit einem Lohnsatz für reguläre Arbeit und Springereinsatzzeiten mit einem entsprechenden Springerlohnsatz bewertet (Thomopoulos 1967, B59).
- Wähle die Variante, die die geringsten Arbeitskosten auf der betrachteten Fertigungsstufe sowie auf den nachfolgenden Fertigungsstufen bis zu einem vorzuziehenden „Vorausschauhorizont“ verursacht (Ziegler 1990, S. 206).
- Wähle die Variante aus, die den geringsten Zuwachs der Leerzeiten verursacht. Gibt es mehrere solcher Varianten, wähle diejenige, mit der geringsten Summe der Springereinsatzzeiten (Wester & Kilbridge 1964, S. 147).

Eine Verbesserung der durch ein Eröffnungsverfahren ermittelten Lösung kann durch *Iterationsverfahren* erreicht werden. Diese greifen eine bereits berechnete Lösung auf und versuchen, diese hinsichtlich einer Bewertungsfunktion zu verbessern. Die Verfahren beruhen auf der sukzessiven Generierung der benachbarten Lösungen, um so schrittweise zu einer besseren Lösung zu kommen. Iterationsverfahren starten mit initialen Lösungen, die in der Regel mit Eröffnungsverfahren ermittelt werden, und versuchen, ausgewählte Lösungen schrittweise zu verbessern. Operatoren, die zur Erzeugung benachbarter Pläne bzw. zur Verbesserung der Startlösung verwendet werden, sind beispielsweise die Vertauschung von Aufträgen, die zeitliche Verschiebung von Operationen oder die Verwendung alternativer Ressourcen. Abbruchbedingungen sind das Erreichen einer Zeitschranke oder ausbleibende Verbesserungen (Dorn 1995, S. 20). Im Rahmen von „reinen“ Iterationsverfahren darf bei jeder Iteration nur zu einer besseren Lösung übergegangen werden. Sobald keine Verbesserung mehr möglich ist, gilt das Verfahren als beendet. Die gefundene Lösung stellt dann auch nur ein lokales Optimum dar, welches deutlich vom globalen Optimum abweichen kann. Um ein solches lokales Optimum wieder verlassen zu können, wurden so genannte lokale Suchverfahren entwickelt, im Rahmen derer bei einer Iteration auch eine Verschlechterung des Zielfunktionswertes erlaubt ist (Vgl. Kapitel 4.2.3). Für eine

ausführliche Darstellung der Iterationsverfahren vergleiche etwa (Domschke & Drexl 2007, S. 146; Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 46). Beispiele für die Anwendung von Iterationsverfahren für die Reihenfolgeplanung finden sich in (Okamura & Yamashina 1979, S. 233; Ziegler 1990, S. 227).

4.2.3 Meta-Heuristiken

Wesentliches Merkmal von Meta-Heuristiken ist deren grundsätzliche Problemunabhängigkeit. So kann das jeweilige Grundprinzip zur Steuerung der Lösungsfindung auf eine Vielzahl von Problemen angewendet werden. Meta-Heuristiken stellen Operatoren bereit, die untergeordnete Heuristiken ausführen und den operativen Ablauf dieser organisieren (Geiger 2005, S. 51). Bedeutende Verfahren dieser Klasse sind insbesondere das Simulated Annealing, das Threshold Accepting und das Tabu Search.

Die Grundidee des *Simulated Annealing* (Simulierte Abkühlung) geht auf einen physikalischen Abkühlungsvorgang in der Thermodynamik zurück. Dabei orientiert man sich an dem Prozess der Härtung von Metallen, im Rahmen dessen feste Körper über den Umweg der Erhitzung (temporäre Verschlechterung) in einen festen (energieärmeren) Zustand überführt werden (Cerny 1985, S. 41; Kirkpatrick, Gelatt & Vecchi 1983, S. 671). Ausgehend von einer zulässigen Startlösung (ermittelt bspw. mit Hilfe eines Eröffnungsverfahrens) wird bei Anwendung des Simulated Annealing eine zufällige Variation der Startlösung erzeugt. Besitzt diese Variation einen besseren Zielfunktionswert als die Startlösung, so wird der Suchprozess mit der Variation fortgesetzt. Besitzt die Variation einen schlechteren Zielfunktionswert so wird dieser Übergang nicht grundsätzlich abgelehnt. Vielmehr wird diese (temporäre) Verschlechterung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit⁶⁸ akzeptiert. Die Parameter zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit (Höhe der in Kauf zu nehmenden Verschlechterung und ein sogenannter Temperaturparameter) wird zu Beginn des Verfahrens so gewählt, dass durchaus auch Verschlechterung möglich sind. Der Temperaturparameter (eine Analogie zu der Temperatur in physikalischen Systemen) wird im Laufe des Verfahrens sukzessive gesenkt, was zur Folge hat, dass am Ende nur noch Verbesserungen erlaubt sind. Das Verfahren wird abgebrochen, wenn ein bestimmter Wert der Verbesserung des Zielfunktionswertes nicht mehr überschritten wird (i.d.R. 1 %) oder eine

⁶⁸ Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich durch die Dichtefunktion der Boltzmann-Verteilung.

vorgegeben Zeitschranke erreicht wird. Die Effizienz und die Güte des Verfahrens wird im Wesentlichen durch die Vorgabe der beiden Parametern bestimmt. Eine günstige Parameterkombination zu finden gilt allerdings als sehr schwierig und aufwändig (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 48).

Das *Threshold Accepting* (Dueck & Scheuer 1990, S. 161) stellt eine vereinfachte Variante des Simulated Annealing dar. Während im Rahmen des Simulated Annealing zur Ermittlung der Akzeptanzwahrscheinlichkeit eine Exponentialfunktion herangezogen wird, wird hierbei eine Threshold-Funktion (Schwellen-Funktion) genutzt, nach der deterministisch über die Akzeptanz einer Verschlechterung entschieden wird. Von einem Threshold-Startwert (Schwellenwert) ausgehend, wird der Wert in diskreten Schritten reduziert. Wenn die Differenz zwischen der Ausgangslösung und einer neuen Variation den Schwellenwert nicht überschreitet, wird der Übergang akzeptiert. Der Schwellenwert wird in einer Anzahl vorgegebener Schritte bis auf Null reduziert, sodass keine Verschlechterung des Zielfunktionswertes mehr akzeptiert wird. Das Verfahren wird abgebrochen wenn keine bzw. nur noch sehr geringe Ergebnisverbesserungen beobachtbar sind oder ein Stopp-Schwellenwert erreicht wird. Die Vorteile dieses Verfahrens gegenüber dem Simulated Annealing liegen in der rechentechnischen Vereinfachung, wodurch bei gleicher Rechenzeit, mehr Iterationen durchgeführt werden können (Feldmann 1999, S. 139).

Ausgehend von einer Startlösung werden beim *Tabu Search* (Glover 1989a, S. 190; Glover 1989b, S. 4) sämtliche Nachbarschaftslösungen (bspw. durch Vertauschen der in einer Reihenfolgen direkt nacheinander eingeplanten Aufträge) ermittelt und deren Zielfunktionswerte mit dem der Startlösung verglichen. Unter allen zulässigen Nachbarschaftslösungen wird dann diejenige mit dem besten Zielfunktionswert ausgewählt und als Ausgangspunkt für die nächste Iteration verwendet. Der Übergang zu einer neuen Lösung wird auch im Falle einer Verschlechterung akzeptiert. Dabei wird nach dem Prinzip des steepest descent/mildest ascent vorgegangen, das heißt es wird immer versucht, eine größtmögliche Verbesserung bzw., sofern keine bessere Nachbarschaftslösung existiert, eine geringstmögliche Verschlechterung zu erreichen. Eine Verschlechterung wird somit nicht zufällig – wie es bei den bisher vorgestellten Meta-Heuristiken der Fall ist - akzeptiert, sondern nur dann, falls keine Verbesserungsmöglichkeit existiert. Um zu verhindern, dass im Falle einer Verschlechterung in der nächsten Iteration nicht sofort wieder auf die zuvor ermittelte Lösung zurückgekehrt wird, werden derartige Lösungen verboten („tabu“ gesetzt). Dafür müssen so genannte Tabulisten geführt werden, in denen sämtliche verbote-

nen Lösungen verwaltet werden. Ein bedeutender Parameter bei der Anwendung des tabu search Verfahrens stellt die Entscheidung hinsichtlich der Auswahl der tabu zu setzenden Lösungen und der Dauer ihres Tabustatus dar. Hiefür werden verschiedene Varianten vorgeschlagen, welche im Wesentlichen versuchen zu garantieren, dass vielversprechende Lösungen nicht verboten werden⁶⁹. Nach Eintritt des Abbruchkriteriums (i.d.R. eine vorgegebene Anzahl an Iterationen), wird die Lösung mit dem besten Zielfunktionswert ausgewählt (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 49).

4.2.4 Bewertung der Verfahren

Die exakten Verfahren der Reihenfolgeplanung liefern in endlichen Rechenschritten eine optimale Lösung. Allerdings lassen sich mit Hilfe dieser Verfahren lediglich sehr einfache, praxisferne Varianten des Reihenfolgeproblems effizient lösen, da das Problem NP-vollständig ist und somit der Aufwand der exakten Verfahren exponentiell mit der Problemgröße zunimmt. KURBEL beschreibt diese Problematik mit folgenden Worten: „*In einer gewissen Nostalgie ziehen sich auch heute noch Algorithmen durch die Lehrbücher, die bestenfalls bei Minibetrieben funktionieren können. Ein krasses Beispiel ist der vielzitierte Johnson-Algorithmus, der in der Lage ist, das Problem von n Aufträgen, die auf 2 Maschinen (in Worten: zwei!) oder anderen Kapazitätseinheiten in gleicher Reihenfolge zu durchlaufen haben, einer optimalen Lösung zuführt*“ (Kurbel 2003, S. 166). Dieser grundsätzlichen Einschränkung unterliegen auch die Branch & Bound Verfahren. Diese sind zwar in der Lage den Aufwand einer Vollenumeration durch die Bildung von Teilproblemen zu reduzieren, nichtsdestotrotz, müssen bei praktischen Reihenfolgeproblemen sehr viele Teilprobleme gespeichert, verwaltet und gelöst werden, was die Anwendung dieses Verfahrens bei Reihenfolgeproblemen mit vielen Variablen und Nebenbedingungen aufgrund des sehr hohen Rechen- und Speicheraufwand unpraktikabel macht. So kommen verschiedene Untersuchungen zu dem Schluss, dass Branch & Bound Verfahren aufgrund der langen Berechnungsdauer in der Praxis zu einer nicht tolerierbaren Verzögerung der Ausführung führen (Bard, Shtub & Joshi 1994, S. 2431; Scholl 1999, S. 282; Spahn et al. 2006, S. 6)⁷⁰. Ergeben sich während der Ausführung Veränderungen (bspw. ein weiterer Auftrag in

⁶⁹ Im Wesentlichen wird zwischen statisch-starren, statisch-flexiblen sowie dynamischen Tabulisten unterschieden (Domschke, Scholl & Vob 1997, S. 50).

⁷⁰ So kann die Berechnung von Problemen in der Größenordnung von 20 Aufträgen schon mehrere Minuten dauern. (Spahn, Berbner, Heckmann & Ralf Steinmetz 2006, S. 6)

der Warteschlange), so erfordert dies zudem eine Neuberechnung des optimalen Ausführungsplans, was jeweils eine zusätzliche deutliche Verzögerung der Ausführung bedeuten würde. Darüber hinaus können die exakten Verfahren lediglich optimale Lösungen hinsichtlich einer einzigen Zielgröße gewährleisten. Aufgrund der Vielzahl von betriebswirtschaftlich relevanten Zielgrößen, die zum Teil auch noch konfliktionär zueinander stehen, erscheint dies für die Praxis nicht ausreichend. Letztendlich kann konstatiert werden, dass die exakten Verfahren zwar aus theoretischer Sicht interessant erscheinen, eine praktische Anwendung für die Reihenfolgeplanung allerdings auszuschließen ist (Boysen 2005, S. 247; Stosik 2005, S. 80).

Der Vorteil von Heuristiken liegt in der Einfachheit und dem damit verbundenen geringeren Rechenaufwand. Wesentlicher Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie Lösungen ohne Optimalitätsgarantie liefern. Tatsächlich können die Lösungen sogar deutlich vom Optimum abweichen. Aufgrund der einfachen Implementierung und Anwendung finden Heuristiken aber in der betrieblichen Praxis einen breiten Einsatz. Dabei ist zu beobachten, dass den Prioritätsregelverfahren gegenüber den leistungsfähigeren Iterationsverfahren der Vorzug gegeben wird (Feldmann 1999, S. 2); diese lassen sich insbesondere in dynamisch, stochastischen Umgebungen gut einsetzen, da sie den geringsten Rechenaufwand benötigen und somit auch die geringste Reaktionszeit auf ein sich änderndes Umfeld aufweisen. Der geringe Rechenaufwand ermöglicht darüber hinaus eine dezentrale Anwendung, da auf den ausführenden Ebenen häufig nur sehr beschränkte Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen (Kistner & Steven 2001, S. 125; Stosik 2005, S. 88). Neben der einfachen Implementierung wird die Qualität der Prioritätsregeln durch die Lösungsgüte determiniert. Die Lösungsgüte von einfachen Prioritätsregeln wurde in verschiedenen Arbeiten mit Hilfe von Simulationsstudien⁷¹ empirisch ermittelt (Conway, Maxwell & Miller 1967; Haupt & Schillinger 1993, S. 611). So wurde beispielsweise gezeigt, dass die Prioritätsregel „kürzeste Operationszeit“ gute Ergebnisse hinsichtlich der Durchlaufzeit und der Kapazitätsauslastung erzielt. Nachteilig wirkt sich diese Prioritätsregel allerdings auf die durchschnittlichen Terminabweichungen aus, da Aufträge mit einer langen Operationszeit systematisch benachteiligt werden, was zu erheblichen Terminabweichungen für diese Auf-

⁷¹ Simulationsmodelle stellen ein dynamisches Experiment dar, in dem eine Vielzahl von virtuellen Aufträgen durch ein virtuelles Fertigungssystem mittels einer bestimmten Prioritätsregel abgearbeitet wird. Die einzulastenden Aufträge können zufallsabhängig bezüglich Ankunftszeit, Liefertermin, Arbeitsplan und/oder Bearbeitungszeit der Operation sein. Durch die Ermittlung statistischer Daten wie bspw. der mittleren Durchlaufzeit oder der Terminabweichung können Tendenzaussagen über die Wirkungsweisen verschiedener Prioritätsregeln abgeleitet werden (Stosik 2005, S. 89).

träge führen kann. Das Ziel einer geringen Terminabweichung wird dagegen von der Schlupfzeitregel⁷² bzw. einer Regel, die die Liefertermine der Aufträge berücksichtigt, sehr gut erreicht. Für die Durchlaufzeit ergeben sich bei Anwendung solcher Regeln dagegen nur mäßige Ergebnisse (Stosik 2005, S. 89). An diesem Beispiel wird ein wesentliches Problem der Prioritätsregeln erkennbar: Auch diese berücksichtigen lediglich ein einzige Zielgröße und nehmen damit eine Verschlechterung einer anderen Zielgröße in Kauf.

Die Metaheuristiken zeichnen sich gegenüber den Heuristiken in zwei Punkten aus. Zum einen sind sie problemunabhängig formuliert und somit universell einsetzbar. Zum anderen kann durch den Einsatz von Metaheuristiken verhindert werden, dass die Suche nach einer guten Lösung zu früh gestoppt wird. Heuristiken geben sich häufig mit der ersten besten Lösung zufrieden (lokales Optimum). Metaheuristiken hingegen bewegen sich sehr viel dynamischer durch den Lösungsraum und können dadurch lokale Optima überwinden. Aus diesen prinzipiellen Vorteilen ergeben sich allerdings auch Schwächen, die einem betrieblichen Einsatz von Metaheuristiken entgegenstehen: Erstens müssen, aufgrund der Universalität dieser Verfahren, vor der Anwendung auf ein praktisches Problem in der Regel eine Reihe von Parameter ermittelt werden (bspw. beim Simulated Annealing der Temperaturparameter und der Wahrscheinlichkeitsbereich). Ob der Einsatz einer Metaheuristik erfolgreich ist oder nicht, wird wesentlich durch die Parameterkombination bestimmt. Eine günstige Parameterkombination zu finden gilt aber als sehr schwierig und aufwändig (Domschke, Scholl & Voß 1997, S. 48). Zweitens erhöht sich, auf Grund der Tatsache, dass Metaheuristiken versuchen lokale Optima zu überwinden und nach einem globalen Optimum zu suchen, der Rechenaufwand zur Lösungsfindung deutlich. Insbesondere in einem dynamischen Umfeld ergeben sich somit häufig lange Berechnungszeiten, was zu Verzögerungen im operativen Ablauf führen kann. Darüber hinaus eignen sich die Metaheuristiken aufgrund des hohen Rechenaufwandes in der Regel nicht für einen dezentralen Einsatz. Des Weiteren ermöglichen die meisten Metaheuristiken auch lediglich eine Reihenfolgeplanung auf Grundlage einer einzigen Zielgröße. Zwar existieren in diesem Bereich Ansätze, welche den Versuch einer Mehrziele-Optimierung vornehmen (bspw. das Multi Objective Simulated Annealing (Ulungu et al. 1999, S. 221), der Strength Pareto Evolutionary Algorithm (Zitzler 1999, S. 32) oder das mehrzielorientierte Performance-basierte Simula-

⁷² Schlupfzeit bezeichnet die Restzeit eines Auftrags (Schlupf). Dies ist die Zeitspanne vom aktuellen Bearbeitungszeitpunkt bis zum Sollendtermin, abzüglich der restlichen Bearbeitungszeiten. Die Schlupfzeitregel priorisiert den Auftrag vor einem Arbeitsplatz, der einschließlich aller Bearbeitungszeiten der folgenden Arbeitsplätze den geringsten Schlupf zum Fertigstellungstermin hat.

ted Annealing (Stosik 2005, S. 177)), allerdings sind diese Verfahren alle mit einem sehr großen Aufwand verbunden. So werden in der Regel mehrere Iterationen durchgeführt, in denen jede Lösung mit allen anderen verglichen werden muss (um bspw. den Euklidischen Abstand zu ermitteln). Dieser große Aufwand für die Bestimmung des Reihenfolgeplans verhindert einen praktischen Einsatz dieser Verfahren.

Zusammenfassend können bei den dargestellten Verfahren zwei wesentliche Kritikpunkte herausgehoben werden. Erstens ergibt sich für den Großteil der Verfahren für Probleme in praxisrelevanten Größen ein nicht unerheblicher Rechenaufwand. Dies bedeutet eine Verzögerung der Ausführung operativer Tätigkeiten und verhindert eine schnelle Reaktionsfähigkeit auf Umweltveränderungen (Picot, Reichwald & Wigand 2003, S. 4.). Insbesondere für den Einsatz in Kanban-basierten Produktionssysteme stellt sich diese Trägheit der Entscheidungsfindung als ein bedeutendes Hindernisse dar, da in solchen Systemen aufgrund des geringen Sicherheitsbestandes und der späten Beauftragung zur Nachproduktion eine schnelle Reaktionszeit gefordert wird. Darüber hinaus benötigen Verfahren wie beispielsweise das Branch & Bound hohe Rechenkapazitäten, die dezentral (wie es für den Einsatz in Kanban notwendig wäre) in der Regel nicht vorliegen. Das Verfahren, welches das Problem der Trägheit der Entscheidungsfindung am besten löst, stellen Prioritätsregeln dar. Zweitens lösen die meisten der bisherigen Verfahren das Reihenfolgeproblem nur unter Berücksichtigung einer Zielsetzung. In der Realität müssen in der Regel jedoch mehrere Zielsetzungen gleichzeitig berücksichtigt werden, die teilweise in konkurrierenden Verhältnissen zueinander stehen. Die Bedeutung der unterschiedlichen Zielsetzungen (bspw. kurze Lieferzeiten vs. geringe Lagerkosten) können zwischen Unternehmen sehr unterschiedlich sein. Darüber hinaus kann es erforderlich sein, die Gewichtung der einzelnen Ziele je nach Marktsituation anzupassen. Die wenigen Verfahren welche eine Mehrziele-Optimierung bereitstellen, weisen einerseits einen sehr großen Aufwand für die Bestimmung des Reihenfolgeplans auf, was deren praktischen Einsatz verhindern und andererseits bietet keines dieser Verfahren, die Möglichkeit die Zielsetzungen flexibel an sich verändernde Umweltbedingungen anzupassen.

Bisherige Verfahren sind insgesamt durch eine Unflexibilität der Entscheidungsfindung geprägt. Unflexibel bezieht sich in diesem Zusammenhang sowohl auf Trägheit bei der Ermittlung des Reihenfolgeplanes als auch auf die Unfähigkeit mehrere betriebswirtschaftlich relevante Zielgrößen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen bzw. deren Bedeutung bei der Entscheidungsfindung den aktuellen Anforderungen anzupassen. Insbesondere

auf Grund der in den letzten Jahren stark gestiegenen Marktdynamik ist aber eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung notwendig. Auf diese Forderung wird im Folgenden eingegangen.

4.3 Flexibilitätsbedarf der Reihenfolgeplanung

4.3.1 Flexibilitätsverständnis

Der Begriff Flexibilität wird vielfältig und oft unscharf verwendet. Zumeist wird Flexibilität im Zusammenhang mit langfristig wirksamen, strategischen Entscheidungen diskutiert, während eine betriebswirtschaftliche Untersuchung der Flexibilität operativer Entscheidungen (insbesondere in Produktionsprozessen) häufig unbeachtet bleibt (Kaluza 1994, S. 62; Zelewski 1998, S. 235).

Grundsätzlich bezeichnet Flexibilität die Fähigkeit, sich auf geänderte Anforderungen und Gegebenheiten einer Umwelt anpassen zu können. Nach Meffert können die in Unternehmen möglichen Flexibilisierungspotentiale in Build-in-Flexibilität sowie Handlungsflexibilität unterschieden werden (Meffert 1985, S. 121). Die Build-in-Flexibilität zielt darauf ab, durch Maßnahmen der Risikovorsorge den negativen Einfluss durch Umweltentwicklungen auf den Unternehmenserfolg möglichst gering zu halten. Durch eine Steuerung der Unternehmensaktivitäten auf unterschiedlichen Märkten und/oder einer Risikoabwälzung auf Marktpartner wird dabei versucht, den Unternehmenserfolg gegenüber negativen Umwelteinflüssen resistent zu machen. Ein typisches Beispiel für solche Maßnahmen stellen die in der 1970er Jahren populären Diversifikationsstrategien⁷³ dar. Die Handlungsflexibilität zielt darauf ab, die Reaktionskapazitäten von Unternehmen zu erhöhen, in dem Freiheitsgrade geschaffen werden, im Rahmen derer auf (nicht vorhersehbare) Umweltveränderungen reagiert werden kann. Build-in-Flexibilität beschreibt somit eine langfristige, eher defensive Absicherung, während die Handlungsflexibilität eine kurzfristige, auf den operativen Ablauf gerichtete Reaktionsfähigkeit ermöglicht (Meffert 1985, S. 124). Auf-

⁷³ Unter Diversifikation versteht man die Verteilung von Risiken auf mehrere Risikoträger mit einer möglichst geringen Korrelation. Dies wird durch eine Ausweitung des Sortiments erreicht und bezieht sich auf neue Produkte für neue Märkte (Steinmann & Schreyögg 2005, S. 236).

grund der Betrachtung operativer Geschäftstätigkeiten liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Handlungsflexibilität (Abbildung 4-1).

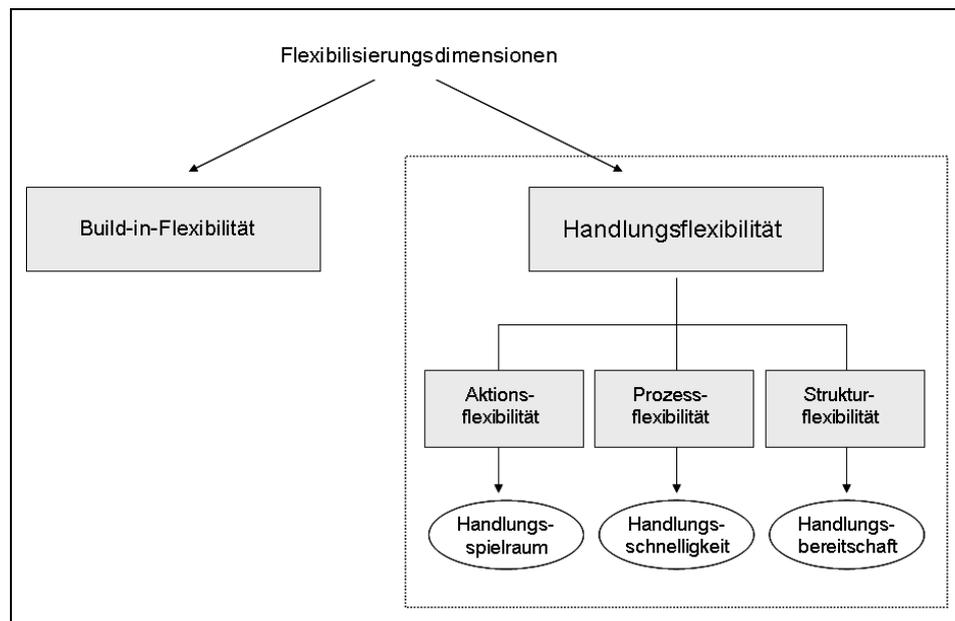


Abbildung 4-1: Flexibilisierungsdimensionen

Quelle: in Anlehnung an (Meffert 1985, S. 125)

Handlungsflexibilität differenziert sich in drei Formen von Flexibilität (Meffert 1985, S. 125). Die Aktionsflexibilität zielt auf die Menge der Handlungsspielräume ab, die den ausführenden Einheiten bei der Erfüllung einer Aufgabe gewährt werden. Ziel der Aktionsflexibilität ist es, durch die Gewährung von Freiheitsgraden an die ausführenden Einheiten eine möglichst gute Anpassung an unvorhersehbaren Umweltveränderungen zu erreichen. Die Handlungsgeschwindigkeit eines Unternehmens wird durch die Prozessflexibilität bestimmt. Hierbei ist es Ziel, eine möglichst hohe Reaktionsgeschwindigkeit auf unvorhergesehene Änderungen zu erreichen⁷⁴. Die Voraussetzung für die beiden vorgenannten Flexibilitätsformen stellt die Bereitschaft zum Wandel dar (Strukturflexibilität). Nur wenn Personal und Management auch gewillt sind Veränderungen zu akzeptieren, ist die Realisierung einer hohen Aktions- und Prozessflexibilität denkbar.

Aus *produktionswirtschaftlicher Sicht* kann Flexibilität als die Fähigkeit eines Produktionssystems zur Anpassung an variierende Produktionssituationen verstanden werden (Günther & Tempelmeier 2005, S. 3; Zelewski 1998, S. 235). Die Produktsituation be-

⁷⁴ Zielkonflikte können sich ergeben, wenn die Schnelligkeit der Entscheidung einen Verlust der Qualität der Entscheidung nach sich zieht (Burmans 2005, S. 33; Kaluza 1995, S. 8).

schreibt die zeitpunktbezogene Gesamtheit der Ausprägungen aller realen Einflussgrößen, die sich auf die Ausführung von Produktionsprozessen in einem Produktionssystem auswirken können. Einflussgrößen können zu dem jeweils betrachteten Produktionssystem gehören oder aus dessen Produktionsumwelt (Umsystem) stammen. Flexibilität beschreibt somit sowohl die Anpassungsfähigkeit an Variationen in der Produktionsumwelt – wie beispielsweise der Ausfall eines Materiallieferanten oder unvorhersehbare Nachfrageschwankungen – als auch die Fähigkeit, sich an Situationsveränderungen innerhalb eines Produktionssystems – wie etwa Maschinenausfälle oder Veränderungen der Arbeitsintensität an einer Bearbeitungsstation – anzupassen (Zelewski 1998, S. 236).

Das Konzept der Handlungsflexibilität zielt aus produktionswirtschaftlicher Sicht auf eine Flexibilisierung der operativen (kurzfristigen) Koordination von Produktionsprozessen ab⁷⁵. In Anlehnung an ZELEWSKI (Zelewski 1998, S. 235) verbleiben zwei Aspekte, die Flexibilität im Rahmen dieser Arbeit determinieren.⁷⁶ Die *organisatorische Koordinationsflexibilität* (Koordinationsflexibilität 1. Art) beschreibt den effektiven Entscheidungsspielraum, der für die kurzfristige Prozesskoordination zur Verfügung steht (Aktionsflexibilität). Demnach ist ein Koordinationskonzept für jeweils gleiche zugrunde liegenden Produktionssystemen umso flexibler, je größer die effektiven Spielräume für Koordinierungsentscheidungen zur Anpassung an variierende Produktionssituationen ausfallen. Die Größe von Entscheidungsspielräumen kann dabei jedoch nicht durch skalare Anzahlen von Entscheidungsalternativen gemessen werden. Eine solche Flexibilitätskennzahl hätte zwar den Vorzug, die Flexibilität eines Produktionssystems auf einfache Weise aggregiert und transparent zusammenfassen zu können. Allerdings kann nicht zwangsläufig gefolgert werden, dass ein Entscheidungsspielraum mit einer größeren Anzahl von Entscheidungsalternativen gegenüber einem Referenzspielraum wirtschaftlich vorteilhaft ist. Vielmehr kommt es aus wirtschaftlicher Perspektive auf die ökonomische Bewertung derjenigen Konsequenzen an, die mit den Entscheidungsalternativen verknüpft sind. Den zweiten Aspekt stellt die *dispositive Koordinierungsflexibilität* (Koordinationsflexibilität 2. Art) dar (Zelewski 1998, S. 239). Dieser bezieht sich auf den Zeitpunkt zur Anpassung an eine veränderte Produktionssituation (Handlungsflexibilität). Dabei sind drei Zeitpunkte von Interesse. Erstens der

⁷⁵ Das zugrundeliegende (reale) Produktionssystem, wird somit als fest vorgegeben betrachtet. Dies bedeutet, dass die Aspekte der Entwicklungsflexibilität ausgeklammert werden. Die Entwicklungsflexibilität beschreibt die Anpassungsfähigkeit an variierende Produktsituationen durch strukturelle Veränderungen der betroffenen realen Produktionssysteme (Zelewski 1998, S. 237).

⁷⁶ Der Aspekt der Strukturflexibilität wird dabei ebenso ausgeblendet.

Zeitpunkte in dem erstmals das subjektive Wissen vorliegt, dass ein Anpassungsbedarf aufgrund einer Situationsveränderung im Produktionssystem besteht und dieser Bedarf durch die betrachtete Anpassungshandlung grundsätzlich erfüllt werden kann (Bedarfszeitpunkt). Zweitens der Zeitpunkt, in dem es frühestens möglich ist, mit dem Ausführen der Anpassungshandlung im Produktionssystem zu beginnen (frühester Ausführungszeitpunkt) und letztendlich der Zeitpunkt, in dem über das Ausführen oder Nichtausführen der Anpassungshandlung als Entscheidungsalternative innerhalb des zugehörigen Dispositionssystems beschlossen wird (Entscheidungszeitpunkt). Unter der Prämisse, dass zusätzliche Informationen niemals zu einer Verschlechterung von Entscheidungen führen, bewirkt eine Verschiebung des Entscheidungszeitpunktes bis zum frühestmöglichen Ausführungszeitpunkt eine Steigerung der Qualität der Entscheidungen. Aus diesem Grund sollte ein Koordinierungskonzept eine Entscheidung über eine Anpassungshandlung mindestens so lange in die Zukunft verschieben, bis im zugrunde liegenden Produktionssystem mit der Ausführung dieser Handlung frühestens begonnen werden kann (Verbot vorzeitiger Potentialvernichtung). Dementsprechend gilt nach dem Aspekt der dispositiven Koordinierungsflexibilität ein Koordinierungskonzept als umso flexibler, je kleiner der Abstand des Entscheidungszeitpunkts, in dem über das Ausführen oder Nichtausführen einer Anpassungshandlung im realen Produktionssystem beschlossen wird, von demjenigen Zeitpunkt ist, in dem mit der Handlungsausführung im Produktionssystem frühestens begonnen werden kann, sofern der Entscheidungszeitpunkt nicht zeitlich nach dem frühesten Ausführungszeitpunkt liegt (Zelewski 1998, S. 239).

4.3.2 Flexibilitätsbedarf

Der hohe Stellenwert einer flexiblen Entscheidungsfindung für den Unternehmenserfolg wird heute kaum noch in Frage gestellt⁷⁷ (Picot, Reichwald & Wigand 2003, S. 4; Scholz-Reiter et al. 2005, S. 166). Insbesondere in der Automobilindustrie wurde die Notwendigkeit einer Flexibilisierung der Produktionsprozesse (bspw. durch kapazitiver Anpassungsmaßnahmen) erkannt (Holweg & Frits 2004; Schild & Busmann 2007, S. 74; Sesterhenn 2003; Westkämper, Kirchner & Winkler 2003, S. 254). Der Flexibilitätsbedarf begründet sich dabei maßgeblich auf die zu beobachtende, zunehmende Dynamisierung der Märkte.

⁷⁷ Flexibilität darf allerdings nicht mit ad-hoc Management und Improvisation gleichgesetzt werden, sondern sollte stets in eine integrative und strategische Unternehmensplanung mit einbezogen werden (Meffert 1985, S. 37).

Dynamisierung beschreibt dabei die fortschreitende und sich immer schneller vollziehende Veränderung der Marktbedingungen. In diesem Zusammenhang spricht man auch von einer hohen externen dynamischen Komplexität, welche aufgrund ständiger Veränderungen der Parameter, die von außen auf ein System wirken determiniert wird (Scholz-Reiter et al. 2006, S. 11). Um sich einer von struktureller und/oder dynamischer Komplexität geprägten Umwelt anpassen zu können, muss ein System über ein Flexibilitätspotential verfügen damit es adäquat auf die sich stetig ändernden und diversen Umweltbedingungen reagieren kann (Brehm 2003, S. 87; Sanchez 1995). Während zu Zeiten des Taylorismus, aufgrund der geringen Umweltdynamik, eine Optimallösung für ein Planungsproblem einmalig bestimmt und langfristig aufrecht erhalten werden konnte, ist dies heute aufgrund des ständigen Marktwandels nur noch sehr selten möglich. Es existieren nur noch sehr wenige langfristig stabile Verhältnisse. Vor diesem Hintergrund kann eine einmalig gefundene Lösung kaum langfristig aufrecht erhalten werden, da es häufig zu unvorhersehbaren Datenänderungen kommen kann, auf die ein Unternehmen schnell reagieren muss (Adam 1998, S. 33). Ein Beispiel für die steigende Dynamisierung stellt der Trend zu unvorhersehbaren Nachfrageschwankungen dar⁷⁸. So wurde in der, von der Bundesvereinigung der Logistik (BVL), durchgeführten Studie „Trends and Strategies in Logistics - Agenda for Logistics Management in 2010“ (Straube et al. 2006) festgestellt, dass 68 % der untersuchten Unternehmen aus dem verarbeitenden Gewerbe mit einer stark ansteigenden Volatilität der Nachfrage in den letzten fünf Jahren konfrontiert waren. Aus dem Bereich logistische Dienstleistungen gaben sogar 94 % der Unternehmen an, steigenden Nachfrageschwankungen ausgesetzt zu sein. Um in einem solchen Umfeld wettbewerbsfähig zu sein, bedarf es der Fähigkeit von kurzfristigen Anpassungen. Dementsprechend sehen die in der Untersuchung aufgenommenen Unternehmen auch eine Flexibilisierung der Strukturen als bedeutendstes Instrument zur Beherrschung der Dynamisierung der Nachfrage an⁷⁹. Knapp 60 % der Unternehmen gaben an, Bemühung in diese Richtung unternommen zu haben. Neben einer hohen externen dynamischen Komplexität kann ein Flexibilitätsbedarf ebenso aufgrund von häufigen Veränderungen innerhalb des Systems (interne dynamische Komplexität), wie beispielsweise Störungen und Ausfälle von Maschinen, entstehen.

⁷⁸ Weitere Beispiele für aktuelle Veränderung der Marktbedingungen stellen Wandel von Verkäufer- zu Käufermärkten (Freitag, Herzog & Scholz-Reiter 2004, S. 23) mit der daraus resultierenden Kundenorientierung als entscheidendem Wettbewerbsfaktor sowie die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen (Strassner 2005, S. 75), welche eine hohe Änderungsdynamik von Produktionsprogrammen zur Folge hat, dar.

⁷⁹ Als zweitwichtigstes Instrument sehen die Unternehmen eine intensivere unternehmensübergreifende Kooperation (Straube, Pfohl, Günthner & Dangelmaier 2006).

Bezogen auf die Reihenfolgeplanung in dem betrachteten Produktionssystem ergibt sich vor dem Hintergrund der Dynamisierung des Marktumfeldes ein Flexibilisierungsbedarf insbesondere aus zwei Gründen:

Zum einen ergibt sich ein Bedarf nach einer organisatorischen Koordinationsflexibilität aufgrund der Zielkomplexität. Wie bereits erwähnt, existieren für die Reihenfolgeplanung mehrere, zum Teil konfliktionär zueinander stehende Zielgrößen, welche bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden sollten. Für solche multikriteriellen Probleme existiert keine „ideale“ Lösung, welche für alle Zielgrößen gleichermaßen optimal sind. Vielmehr sollte aus der aktuellen Marktsituation heraus beurteilt werden, welchem Ziel, welche Bedeutung zu kommt (Adam 1998, S. 33). In einem sich häufig ändernden Marktumfeld ergibt sich darüber hinaus die Notwendigkeit, die Bedeutung der Zielgrößen häufig anzupassen. Ein Beispiel für eine solche Veränderung, die einen Anpassungsbedarf der Bedeutung der Zielgrößen nach sich zieht, stellt der Wandel von Verkäufer- zu Käufermärkten (Freitag, Herzog & Scholz-Reiter 2004, S. 23) dar. Korrelierte in Verkäufermärkten eine hohe Kapazitätsauslastung noch mit hohen Gewinnen, können heute insbesondere durch eine konkurrenzüberlegende Qualität der angebotenen Leistung (wie bspw. kurze Lieferzeiten und hohe Termintreue) strategische Wettbewerbsvorteile erreicht werden. Während der Wandel von Verkäufer- zu Käufermärkten einen eher langfristigen Veränderungstrend darstellt, können auch Situationen vorherrschen, die temporär begrenzte Anpassungen der Bedeutung der Zielgrößen notwendig machen. So kann es beispielsweise in Zeiten einer konjunkturellen Stärke und der damit einhergehenden steigenden Nachfrage aus gewinnorientierter Sicht sinnvoll sein, dem Ziel „niedrige Herstellkosten“ ein höheres Gewicht beizumessen, als dem einer „hohen Termintreue“. Abgesehen vom aktuellen Marktumfeld folgt die Entscheidung über die Gewichtung der Zielgrößen immer auch der spezifischen Unternehmensstrategie. Während für manche Unternehmen eine hohe Qualität der Leistung im Vordergrund steht und dafür (zwangsläufig) relativ hohe Kosten in Kauf genommen werden, verfolgen andere Unternehmen eher die Strategie einer Kostenführerschaft.

Zum anderen ergibt sich ein Bedarf nach einer dispositiven Koordinierungsflexibilität aufgrund der geringen Lagerbestände in Kanban-basierten Systemen. Kanban folgt dem Just-in-Time Prinzip, d.h. es wird nur produziert, wenn ein konkreter Bedarf vorliegt. Dabei erfolgt keine Vorinformation der vorgelagerten Produktionsstufen über Zeitpunkt, Art und Volumen eines Reproduktionsauftrages. Um trotz der späten Beauftragung zur Nachproduktion rechtzeitig liefern zu können ist eine schnelle Reaktionsfähigkeit notwendig, wel-

che auch durch schnelle Entscheidungen bezüglich der Reihenfolgeplanung determiniert wird. Dies ist umso erfolgskritischer, je größer die unvorhersehbaren Nachfrageschwankungen sind. Aufgrund der Notwendigkeit einer schnellen Entscheidungsfindung ist die Anwendung von komplexen und langwierigen Verfahren zur Reihenfolgebildung (wie bspw. das Branch & Bound Verfahren) nicht zweckmäßig. Erforderlich sind vielmehr Verfahren, die zu keinen bzw. nur zu sehr geringen Verzögerungen der Ausführung der operativen Tätigkeiten führt. Eine notwendige Voraussetzung für eine hohe dispositive Koordinationsflexibilität stellt die Fähigkeit des Erkennens eines Anpassungsbedarfs dar, das heißt Situationsveränderungen (bspw. neuer Auftrag in der Warteschlange) müssen bestenfalls in Echtzeit erkannt und in die Entscheidungsfindung einbezogen werden.

Da bisherige Verfahren für die Reihenfolgeplanung die geforderte Flexibilität der Entscheidungsfindung nicht mitbringen, soll nun in Kapitel 4 ein neues Verfahren entwickelt werden, welches sich durch eine hohe dispositive sowie organisatorische Koordinationsflexibilität auszeichnet.

5 Modellierung des RFID-gestützten Informationssystems

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt wurde, erlauben aktuelle Verfahren der Reihenfolgeplanung eine nur sehr unflexible Entscheidungsfindung, welche eine adäquate Anpassung an die sich heute häufig ändernde Marktbedingung verhindert. Ziel von Kapitel 5 ist daher die Entwicklung eines RFID-gestützten Informationssystems, mit Hilfe dessen eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung möglich wird. Dabei soll insbesondere eine flexible Steuerung hinsichtlich der verschiedenen und zum Teil gegenläufigen logistischen Zielgrößen möglich werden. Je nach Unternehmensstrategie und aktuellem Umweltzustand soll eine Beeinflussung des Reihenfolgeplans möglich werden. Der Entwurf des hierfür vorgeschlagenen Verfahrens steht im Mittelpunkt von Kapitel 5.1. Es wird ein Kennzahlenmodell entwickelt, mit Hilfe dessen die Bedeutung einzelner Produktionsaufträge für die betriebliche Zielerreichung abgebildet werden kann. Darauf aufbauend wird es möglich einen Reihenfolgenplan zu erstellen. Kapitel 5.2 beschreibt daran anschließend die zur Anwendung des Verfahrens notwendige informationstechnische Infrastruktur. Neben der Darstellung des Informationsflusses und des Aufbaus des Systems, wird dabei insbesondere auf das für das Verfahren notwendige RFID-System eingegangen. Die RFID-Technologie dient dem System als „Informationsbeschaffer“. Durch die Ausstattung von Kanban-Karten mit RFID-Transpondern sollen die dezentralen Einheiten mit den notwendigen Informationen versorgt werden.

5.1 Ein Kennzahlenmodell für die Reihenfolgeplanung

5.1.1 Konzeptioneller Rahmen

Der konzeptionelle Rahmen des Modells wird aufbauend auf dem im Kapitel 4.3.1 abgeleiteten Flexibilitätsverständnis entwickelt. Um eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung zu ermöglichen, sind danach zwei Aspekte von Relevanz: Die organisatorische sowie die dispositive Koordinationsflexibilität.

5.1.1.1 Organisatorische Koordinationsflexibilität

Die organisatorische Koordinationsflexibilität (Koordinationsflexibilität 1. Art) beschreibt die Größe der effektiven Entscheidungsspielräume, welche zur Anpassung an variierende Produktionssituationen zur Verfügung stehen (Zelewski 1998, S. 235). Um dies zu erreichen, soll es der Modell ermöglichen, Entscheidungen bezüglich der Reihenfolgebildung auf Grundlage mehrerer (teilweise gegensätzlicher) Zielgrößen zu treffen und nicht wie bisher üblich lediglich im Hinblick auf eine einzige Zielgröße. Somit soll dem beschriebenen „Dilemma der Ablaufplanung“ (vgl. Kapitel 3.1.2) Rechnung getragen werden. Darüber hinaus soll es der Mechanismus erlauben, den unterschiedlichen Zielgrößen (je nach aktuellem Bedarf) verschiedene Bedeutung zukommen zu lassen.

Zur Ableitung der für die Koordinationsentscheidung bedeutenden Zielgrößen wird auf das so genannte „Zielsystem der Produktionslogistik“ zurückgegriffen (VDI 2004, S. 6; Wiendahl 2007, S. 252). Danach lassen sich zwei Oberziele logistischer Systeme unterscheiden. Zum einen die Logistikleistung, welche sich aus den Zielen „hohe Liefertreue“ und „kurze Lieferzeit“ zusammensetzt und zum andere die Logistikkosten, welche sich aus den Zielen niedriger Herstellkosten und niedrige Lager- und Kapitalbindungskosten zusammensetzt (Abbildung 5-1).

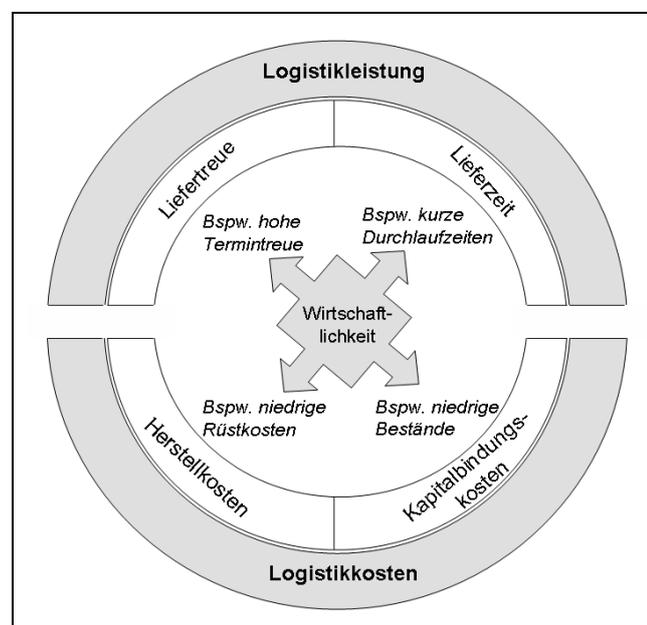


Abbildung 5-1: Zielsystem der Produktionslogistik

Quelle: In Anlehnung an (Wiendahl 2007, S. 252)

Zwischen den Zielen liegen sowohl vertikale als auch horizontale Zielbeziehungen vor. Bei vertikalen Zielbeziehungen handelt es sich um eine Ober-Unterziele- bzw. eine Mittel-

Zweck-Beziehung. Die Verfolgung eines Unterzieles wirkt sich positiv auf das eigentlich verfolgte Oberziel aus. So bewirken beispielsweise sinkende Rüstkosten, dass die Herstellkosten und somit auch die Logistikkosten insgesamt sinken. Das dargestellte Zielsystem beschreibt eine Ober-Unterziele-Beziehung bis auf die zweite Ebene (bspw. Liefertreue und Lieferzeit als Unterziel der Logistikleistung). Unter den jeweiligen Zielen der zweiten Ebene können sich allerdings, je nach betrachtetem Geschäftsprozess, noch eine Vielzahl weiterer Zielgrößen verbergen. Das Zielsystem stellt damit nur einen konzeptionellen Rahmen zur Verfügung, welcher der Entwicklung eines geschäftsprozessspezifischen Zielsystems dienen kann. Die horizontale Zielbeziehung beschreibt das Verhältnis der Ziele auf gleicher Ebene. Grundsätzlich lassen sich dabei drei Zielbeziehungen unterscheiden (Dinkelbach 1982, S. 158; Petri 2007, S. 18)⁸⁰:

- Komplementäre Ziele: Zwei Ziele sind zueinander komplementär, wenn bei einer Verbesserung des Zielfunktionswertes des einen Ziels auch der Zielfunktionswert des anderen Ziels verbessert wird. Die individuell optimalen Lösungen der Ziele stimmen überein⁸¹.
- Konkurrierende Ziele: Zwei Ziele sind zueinander konkurrierend, wenn eine Verbesserung des Zielfunktionswertes des einen Ziels eine Verschlechterung des anderen Zielfunktionswertes zur Folge hat. Die individuell optimalen Lösungen der Ziele stimmen nicht überein⁸².
- Unabhängige Ziele: Zwei Ziele sind unabhängig voneinander, wenn zwischen der Entwicklung der Zielfunktionswerte der Ziele kein Zusammenhang besteht.⁸³

Die Oberziele Logistikleistung und Logistikkosten stehen größtenteils in einem konkurrierenden Verhältnis zueinander. So führt etwa eine Verringerung der Bestände und somit die Verringerung der Logistikkosten in der Regel zu einer Verschlechterung der Termintreue (bspw. auf Grund häufigeren Produktionsengpässen) und somit zu einer Verschlechterung

⁸⁰ Manche Autoren unterscheiden darüber hinaus noch eine Zielantinomie. Eine Zielantinomie liegt vor, wenn zwei Ziele in extremer Konkurrenz zueinander stehen, d.h. bei Erreichen des einen Ziels ist es unmöglich, dass andere Ziel zu erreichen. Das Vorliegen einer Zielantinomie erscheint allerdings für das vorliegende Reihenfolgenproblem eher unwahrscheinlich.

⁸¹ Diese Ziele werden auch als kumulative Ziele oder gleichgerichtete Ziele bezeichnet.

⁸² Statt konkurrierend werden auch die Begriffe konfliktionär oder gegenläufig verwendet.

⁸³ Statt unabhängig werden auch die Begriffe neutral oder indifferent verwendet.

der Logistikleistung. Die verschiedenen Unterziele eines Oberziels können dagegen komplementär, konkurrierend oder unabhängig voneinander sein.⁸⁴

Mit Hilfe des Zielsystems werden die für die Reihenfolgeplanung bedeutenden Zielgrößen abgeleitet. Über *Gewichtungsfaktoren*, welche die für ein spezifisches Unternehmen unterschiedlichen Bedeutungen der verschiedenen Ziele repräsentieren, soll darüber hinaus eine gezielte und variable Beeinflussung des Koordinationsergebnisses möglich werden. Dadurch kann eine Bewertung der einzelnen Ziele hinsichtlich ihrer Wichtigkeit erfolgen. Während das Zielsystem unternehmensunabhängige Kriterien (Zielwerte) für die Reihenfolgeplanung beschreibt, stellt die Bestimmung der Gewichtungen der einzelnen Ziele eine unternehmensspezifische Aufgabe dar. Je nach Unternehmensstrategie und aktuellem Umweltzustand können die Gewichtungen angepasst werden.

5.1.1.2 Dispositive Koordinationsflexibilität

Unter der dispositiven Koordinationsflexibilität (Koordinationsflexibilität 2. Art) wird die Fähigkeit verstanden, Anpassungen an eine veränderte Produktionssituation möglichst ohne Zeitverzug vorzunehmen (Zelewski 1998, S. 239). Um eine dispositive Koordinationsflexibilität hinsichtlich der Reihenfolgebildung zu erreichen, werden konzeptionell zwei Ansätze verfolgt: Zum einen wird eine Dezentralisierung der Entscheidungen angestrebt und zum anderen soll der rechentechnische Aufwand so gering wie möglich gehalten werden.

*Dezentralisierung*⁸⁵ bezieht sich im Rahmen dieser Arbeit auf die Ebene der Fabrik-, Fertigungs- und Arbeitsorganisation und stellt Maßnahmen dar, operative Kontrolle, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten aus der Hierarchie bzw. den indirekten Abteilungen und Stäben nach „unten“, zu den ausführenden operativen Einheiten zu verlagern (Bahnmüller & Fisecker 2003, S. 20; Faust 1994, S. 12). Dieser Definition folgend, sollen die Entscheidungen bezüglich der Reihenfolgebildung lokal von den betreffenden Fertigungsstufen

⁸⁴ Art und Stärke des Zusammenhanges der Unterziele sind zum einen von der konkreten Ausgestaltung sämtlicher Unterziele und zum anderen von unternehmensspezifischen Faktoren abhängig.

⁸⁵ Generell kann der Begriff Dezentralisierung im organisationstheoretischen Kontext nach (Simon 1954, S. 1) mit folgender Umschreibung umrissen werden: „Eine Organisation ist in dem Maße zentralisiert, in dem Entscheidungen auf relativ hohen Ebenen der Hierarchie gefällt werden; sie ist in dem Maße dezentralisiert, in dem Entscheidungen vom Top-Management auf untere Ebenen delegiert werden“. Dezentralisierung wird im Rahmen dieser Arbeit als eine operative Dezentralisierung begriffen. Für eine detaillierte Beschreibung und Abgrenzung zur strategischen Dezentralisierung vgl. bspw. (Faust 1994, S. 24).

getroffen werden, ohne dass eine übergeordnete Instanz in den Entscheidungsprozess direkt eingreift.⁸⁶ Die im Rahmen einer Dezentralität gewährte Entscheidungsautonomie der ausführenden Einheiten ermöglicht Entscheidungen direkt am Ort der Problementstehung zu treffen. Dadurch können lange Kommunikations- und Weisungswege vermieden werden. Der Zeitpunkt der Wahrnehmung von Anpassungsnotwendigkeiten liegt somit früher als in zentral organisierten Strukturen. Dadurch wird eine Früherkennung von Anpassungsbedarfen gestärkt. Entscheidungswege werden kürzer und eine schnellere Reaktion auf (kurzfristig) veränderte Umweltanforderungen möglich (Göbel 1998, S. 218; Hülsmann & Wycisk 2006, S. 335; Mullins 2005, S. 608)⁸⁷. Für die Umsetzung eines dezentralen Systems ist die Ausstattung der ausführenden Einheiten mit einer entsprechenden Informationsbasis, auf Grundlage derer Entscheidungen getroffen werden können, zwingende Voraussetzung. Als „Informationsbeschaffer“ wird die RFID-Technologie eingesetzt. Durch die Ausstattung der Kanban-Karten mit RFID-Transpondern, sollen die dezentralen Einheiten mit den notwendigen Informationen (vgl. Kapitel 4.2.5.1) versorgt werden. Die mit RFID ausgestatteten Kanban-Karten ermöglichen eine automatisierte Informationssammlung, wodurch die ausführende Einheiten von der Aufgabe der Informationsbeschaffung befreit werden und somit die Informationsbeschaffungskosten gesenkt werden können. Neben der kostengünstigeren Informationserfassung wird es möglich, Informationen über den aktuellen Umweltzustand (bspw. neuer Auftrag in der Warteschlange) in Echtzeit zu erfassen, wodurch Anpassungsbedarfe schneller aufgedeckt werden und dadurch das Flexibilisierungspotential weiter gesteigert werden kann. Eine detaillierte Beschreibung des Informationsflusses und des Aufbaus des Systems erfolgt in Kapitel 5.2.1.

Bei der Gestaltung eines dezentralen Systems ist ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt zu beachten. So ist eine vollständige Dezentralisierung von Entscheidungen für ein Unternehmen kaum realisierbar. Ein solcher Prozess wäre in seinem Ergebnis und seinen Rückwirkungen für Unternehmen nicht ausreichend beherrschbar und stellt dann auch keine Option für den betrieblichen Einsatz dar⁸⁸. Damit eine Dezentralisierung eine Option für

⁸⁶ Das Prinzip der Dezentralität ist für Kanban üblich (vgl. Kapitel 3.1.1) und soll auch weiterhin aufrecht erhalten werden.

⁸⁷ Darüberhinaus ermöglicht eine Dezentralisierung von Entscheidungen, durch die Vermeidung langer Kommunikationswege, geringere Informations- und Entscheidungskosten sowie, durch die Vermeidung einer zentralen Instanz, welche sämtliche Informationen sammeln und auswerten muss, eine höhere Robustheit gegenüber Ausfällen (Vermeidung eines Single Point of Failure) (Müller-Schloer, von der Malsburg & Würtz 2004, S. 332).

⁸⁸ (Müller-Schloer, von der Malsburg & Würtz 2004) beschreiben diese Problematik in Zusammenhang mit einer Selbstorganisation von Informationssystemen wie folgt: „Der Vision von sich selbst organisierenden Prozessen, die

den betrieblichen Einsatz darstellt, muss sichergestellt werden, dass das Ergebnis der dezentralen Entscheidungen als wünschenswerte Ausprägung im Hinblick auf die Unternehmensziele angesehen werden kann. Daher muss eine betriebliche Dezentralisierung immer mit Elementen einer zentralen Steuerung kombiniert werden. In diesem Zusammenhang wird auch von der Notwendigkeit eines „*autonomen zielorientierten Verhalten*“ (Windt 2006, S. 285) gesprochen. Zielorientierung bedeutet einen Endpunkt eines Ereignisses, der erreicht werden soll, zu definieren und ist gewissermaßen Voraussetzung für das Treffen von Entscheidungen. Die Festlegung von Unternehmenszielen erfolgt im Rahmen der strategischen Unternehmensführung und ist damit in der Regel in den oberen internen und externen Willensbildungszentren eines Unternehmens angesiedelt. Diese Ziele bilden den Rahmen für die dezentralen Entscheidungen. Eine der wesentlichen Aufgaben bei der Gestaltung betrieblicher dezentraler Systeme ist es, ein Mindestmaß an zentraler Steuerung, d.h. eine einheitliche Richtung oder Orientierung für das Unternehmen, vorzugeben und gleichzeitig genügend Freiraum zur Ausgestaltung bzw. Konkretisierung dieser Vorgaben durch die dezentralen Einheiten zu ermöglichen (Grapp et al. 2005, S. 52; Knyphausen 1991, S. 47).

Zur Erreichung einer dispositiven Koordinationsflexibilität soll des Weiteren der *rechen-technische Aufwand* zur Ermittlung des Reihenfolgeplans möglichst gering gehalten werden. Ein geringer Rechenaufwand stellt ferner eine Voraussetzung für die Umsetzung von dezentralen Entscheidungen dar, da auf den ausführenden Ebenen häufig nur sehr beschränkte Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen (Kistner & Steven 2001, S. 125; Stosik 2005, S. 88). Um den rechentechnischen Aufwand möglichst gering zu halten, wird eine sogenannte „Greedy-Strategie“ verfolgt (Feldmann 1999, S. 1; Papadimitriou & Steiglitz 1982, S. 278). Eine Greedy (dt.: gefräßig)-Strategie erzeugt eine Lösung, indem sie im nächsten Entscheidungsschritt immer die Lösung wählt, die eine Zielfunktion am stärksten verbessert, ohne jemals einen Rückschritt vorzunehmen. Dabei stützt man sich nicht auf eine gespeicherte vollständige bzw. annähernd vollständige Menge von Teillösungen und baut aus diesen eine nächstgrößere Teillösung (wie bspw. bei Branch & Bound Verfahren), sondern trifft Entscheidungen ausschließlich auf Grundlage von lokalen Informationen. Vereinfacht gesprochen, bearbeiten Greedy-Verfahren immer als nächstes den noch nicht

ohne zentrale Planung und Überwachung zu einem wünschenswerten Ergebnis gelangen, steht der Albtraum eines autonomen Systems gegenüber, welches unkontrolliert seinen eigenen „Willen“ durchsetzt“.

erledigten attraktivsten (größten, kleinsten, teuersten, billigsten etc.) Teil des Problems, ohne Rücksicht auf den möglichen weiteren Lösungsverlauf.⁸⁹ Der Vorteil dieser Verfahren liegt in ihrem geringen organisatorischen und rechentechnischen Aufwand.⁹⁰ Es wird somit bewusst auf die Anwendung spezieller, eventuell leistungsfähigeren, Heuristiken verzichtet und ein Ansatz verfolgt, der in kurzer Zeit und ohne großen rechentechnischen Aufwand zu einer Lösung kommt.

5.1.2 Aufbau des Kennzahlenmodells

Um eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung zu erreichen, wird im Folgenden ein Kennzahlenmodell entwickelt, mit Hilfe dessen die Bedeutung eines speziellen Auftrages für die betriebliche Zielerreichung abgebildet werden soll. Dabei wird für jeden Auftrag eine (Ober-) Kennzahl ermittelt, welche sich aus einer Vielzahl verschiedener untergeordneter Kennzahlen zusammensetzt. Während die unterordneten Kennzahlen spezielle Zielgrößen der Logistik repräsentieren, bildet die Oberkennzahl die Gesamtbedeutung des jeweiligen Auftrages für den Prozess ab. Durch einen Vergleich der Oberkennzahlen der einzelnen Aufträge in einer Warteschlange wird eine Priorisierung und somit ein Reihenfolgeplan möglich. Während Kennzahlensysteme größtenteils als Hilfsmittel des Controllings eingesetzt werden, wird ein solches System im Rahmen dieser Arbeit als Koordinationsinstrument für die Reihenfolge der Auftragsabwicklung vorgeschlagen⁹¹.

Unter Kennzahlen werden Zahlen verstanden, die quantitativ erfassbare Sachverhalte in konzentrierter Form erfassen (Horváth 2003, S. 567; Reichmann 2001, S. 19). Ein Kennzahlensystem beschreibt einen Zusammenhang von quantitativen Variablen, wobei die einzelnen Kennzahlen in einer sachlich sinnvollen Beziehung zueinander stehen, einander ergänzen oder erklären und insgesamt auf ein gemeinsames übergeordnetes Ziel ausgerichtet sind. Das Ziel eines Kennzahlensystems ist es, möglichst vollständig über einen Sachverhalt zu informieren. Die Beziehungen der Kennzahlen untereinander können systematisch-mathematischer oder empirischer Natur sein. Für den Zweck der Bestimmung der Priorität eines Auftrages wird ein systematisch-mathematischer Ansatz verfolgt. Es wird

⁸⁹ Ziegenbalg beschreibt Greddy-Verfahren als „... kein filligranes aber dennoch höchst wirkungsvolles und sehr preiswertes` Instrument des Problemlösens“ (Ziegenbalg, Ziegenbalg & Ziegenbalg 2007, S. 105).

⁹⁰ Von den in Kapitel 4.2 vorgestellten Verfahren verfolgen die Prioritätsregeln eine Greddy-Strategie.

⁹¹ Zum Einsatz von Kennzahlensystemen als Hilfsmittel des Controlling vgl. bspw. (Horváth 2003, S. 567).

dementsprechend ein auf ein Oberziel (Priorisierung der Aufträge) ausgerichtetes System von Kennzahlen entwickelt, welches deduktiv aufgebaut ist und, wenn alle Verknüpfungen in quantifizierenden Relationen aufgezeigt werden, zu einem mathematisch aufgebauten Kennzahlensystem wird (Reichmann 2001, S. 23). Abbildung 5-2 stellt den grundsätzlichen Aufbau des Kennzahlenmodells dar. Mit Hilfe eines solchen Systems können eine Vielzahl von Kennzahlen, welche ihrerseits eine spezifische Zielgröße repräsentieren, kombiniert werden. Für jeden Auftrag wird eine Gesamt-Reihenfolgekennzahl (KZA_{Gesamt}) ermittelt, mit Hilfe derer eine Rangreihe zur Priorisierung gebildet wird (Faupel & Sackmann 2007, S. 33).

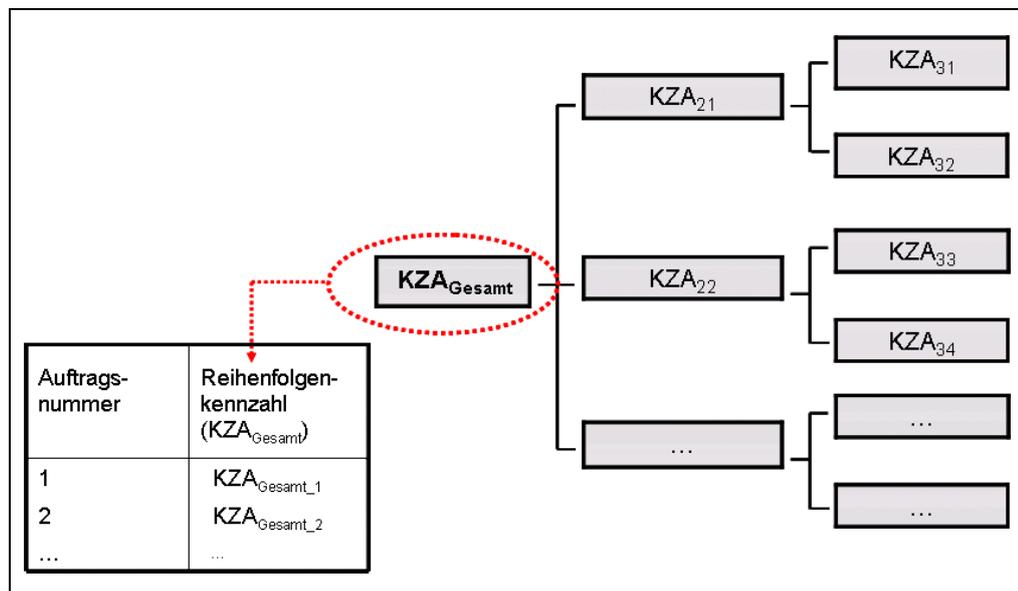


Abbildung 5-2: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung I (Aufbau)

(KZA=Kennzahl)

Abbildung 5-2 ist zu entnehmen, dass die Unterziele als Mittel zur Bestimmung des Oberziels angesehen werden und selbst wiederum Oberziele für nachgelagerte Ebenen darstellen können (Zielhierarchie). Im Rahmen einer solchen Zielhierarchie wird versucht, die Einzelziele nach ihrem Mittelcharakter zu ordnen. Aufbauend auf der Grundlage einer Zweck-Mittel-Beziehung müssen die Ziele (Wirkungen) mit Mitteln (Ursachen) verbunden werden, wobei die Mittel einer Ebene wiederum ein Ursachen-Wirkungs-Komplex zu einer weiteren, untergeordneten Ebene darstellen können. Der Vorgang der Aufspaltung wird solange fortgesetzt, bis eine unmittelbare Operationalisierung der Mittel möglich ist. Wie in Abbildung 5-2 dargestellt, werden Einzelziele häufig nicht ausschließlich durch ein einzelnes Mittel konkretisiert, sondern eine mehrfache Aufspaltung der Zweck-Mittel-Relation vorgenommen, so dass einem Ziel mehrere Mittel zugeordnet werden (Reichmann

2001, S. 51). Zur Erstellung eines solchen Kennzahlenmodells bedarf es einer Ziel-Mittel-Hypothese⁹². Für das Kennzahlenmodell wird dafür das, in Abschnitt 5.1.1.1 beschriebene, „Zielsystem der Produktionslogistik“ (Abbildung 5-1) genutzt. Das „Zielsystem der Produktionslogistik“ wird zur Strukturierung des Kennzahlenmodells angewendet, um somit sicherzustellen, dass die Reihenfolgekennzahl (KZA_{Gesamt}) auf Grundlage mehrerer, für logistische Prozesse relevanter Zielgrößen berechnet wird. Somit kann eine Ober-Unterziel-Beziehung (bzw. Ziel-Mittel-Beziehung) bis auf die zweite Ebene abgeleitet werden. Die nun auf der untersten Ebene angesiedelten Ziele sind bisher allerdings noch nicht operationalisierbar, sondern stellen lediglich einen konzeptionellen Rahmen zur Verfügung. Die Entwicklung von unmittelbar operationalisierbaren Kennzahlen erfolgt in Abschnitt 5.1.3. Abbildung 5-3 verdeutlicht das nun weiter konkretisierte Kennzahlenmodell.

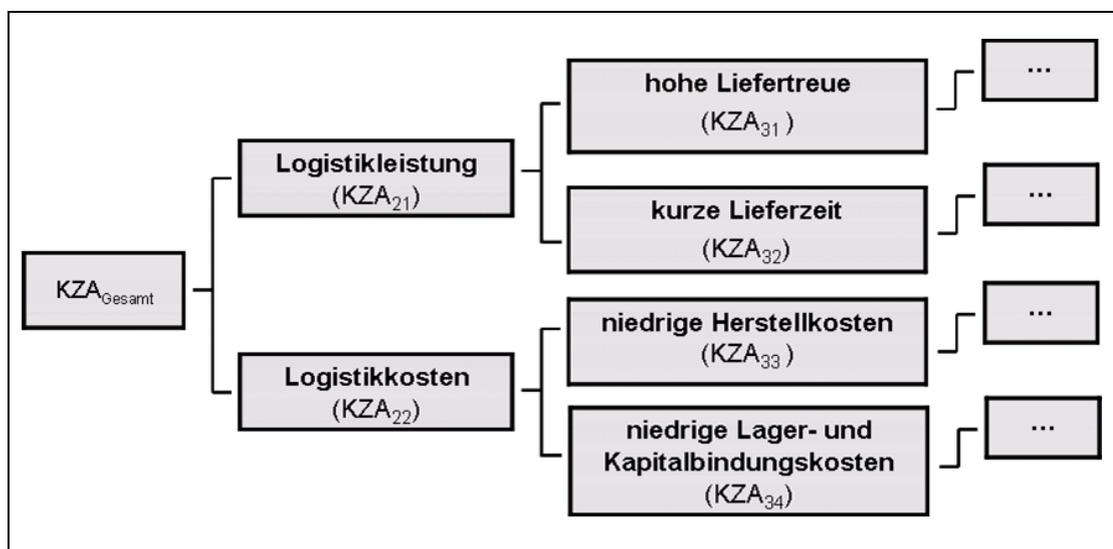


Abbildung 5-3: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung II (Zielsystem der Logistik)
(KZA=Kennzahl)

Mit Hilfe des „Zielsystem der Produktionslogistik“ wurde das Kennzahlenmodell strukturiert um damit sicherzustellen, dass die wesentlichen Zielgrößen bei der Reihenfolgeplanung berücksichtigt werden. In einem nächsten Schritt werden Gewichtungsfaktoren für jede einzelne Zielgröße eingeführt. Hiermit soll eine gezielte Beeinflussung des Koordinationsergebnisses möglich werden. Der Reihenfolgeplan ist dann nicht mehr ausschließlich vom aktuellen Produktionsumfeld abhängig, sondern wird auch von den unternehmensspezifischen Präferenzen bezüglich der Bedeutung der einzelnen Zielgrößen bestimmt. Über

⁹² Eine Darstellung des grundsätzlichen Vorgehens zur Generierung solcher Zweck-Mittel Hypothesen findet sich bspw. in (Reichmann 2001, S. 52).

die Gewichtungsfaktoren wird ein Rahmen festgelegt, innerhalb dessen die Entscheidungen dezentral getroffen werden können. In diesem Sinne stellen die Gewichtungsfaktoren ein Element der zentralen Steuerung dar und tragen somit auch der geforderten Kombination von zentraler Steuerung und dezentralen Entscheidungen Rechnung.

Die übergeordnete Reihenfolgekennzahl (KZA_{Gesamt}) bekommt immer den Wert eins zugewiesen. Die Gewichtungsfaktoren der darunterliegenden Ebenen werden so auf die einzelnen Zielgrößen verteilt, dass die Summe für jede Ebene eins ergibt. Für jede Zielgröße muss dabei ein Gewichtungsfaktor festgelegt werden. Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren ist eine unternehmensspezifische Aufgabe und von der jeweiligen Unternehmensstrategie und/oder dem aktuellen Marktumfeld abhängig. So würde beispielsweise die Strategie „Kostenführerschaft“ eine hohe Gewichtung der Zielgröße „Logistikkosten“ und dementsprechend eine niedrige Gewichtung der Zielgröße „Logistikleistung“ nach sich ziehen. In einem Marktumfeld mit einer aktuellen Auftragslage unter den Produktionskapazitäten wäre dagegen eine hohe Gewichtung der Zielgröße „Logistikleistung“ ökonomisch sinnvoll. Die Gewichtungsfaktoren können jederzeit den aktuellen Bedingungen angepasst werden. Die Festlegung der Unternehmensstrategie sowie die Reaktion auf ein veränderndes Marktumfeld erfolgt im Rahmen der strategischen Unternehmensführung und ist in der Regel in den oberen internen und externen Willensbildungszentren eines Unternehmens angesiedelt. Abbildung 5-4 fasst das Kennzahlenmodell inklusive der eingeführten Gewichtungsfaktoren noch einmal zusammen.

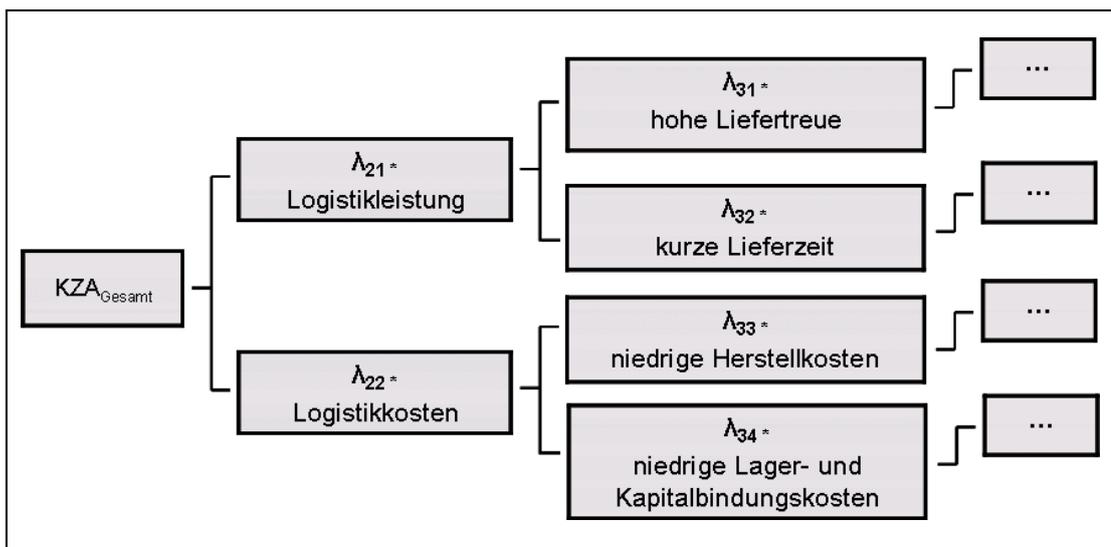


Abbildung 5-4: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung III (Gewichtungsfaktoren)

(λ = Gewichtungsfaktoren, KZA=Kennzahl)

Das Kennzahlenmodell ist nun konzeptionell beschrieben und stellt in dieser Form ein unternehmensunabhängiges System für die Reihenfolgeplanung dar. Die Zielfunktion zur Bestimmung der Gesamt-Reihenfolgekennzahlen (KZA_{Gesamt}) für einen Auftrag ergibt sich wie folgt:

$$KZA_{\text{Gesamt}_i, j} = \lambda_{31}KZA_{31} + \lambda_{32}KZA_{32} + \lambda_{33}KZA_{33} + \lambda_{34}KZA_{34}$$

mit:

$KZA_{\text{Gesamt}_i, j}$ = Gesamt-Reihenfolgekennzahlen für den Auftrag n an der Fertigungsstufe j

λ_m = Gewichtungsfaktor für Zielgröße m

KZA_m = Kennzahlen für Zielgröße m

Die Zielgrößen sind in der beschriebenen Form allerdings noch nicht operationalisierbar. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Zielgrößen der zweiten Ebene nicht durch ausschließlich eine einzige untergeordnete Zielgröße beschrieben werden können, sondern durch mehrere Zielgrößen konkretisiert werden müssen. Im nachfolgenden Kapitel werden Kennzahlen entwickelt welche die Zielgrößen der zweiten Ebene beschreiben und auf Grundlage von dezentral (an der jeweiligen Fertigungsstufe) vorliegenden Daten⁹³ erhoben werden können.

5.1.3 Entwicklung von Kennzahlen

Für jede der vier Zielgrößen auf der zweiten Ebene des Kennzahlenmodells werden im Folgenden operationalisierbare Kennzahlen entwickelt. Die Entwicklung der Kennzahlen unterliegt vier Anforderungen. Erstens müssen die Kennzahlen immer relativ zu einer Bezugsgröße gesetzt werden, um diese dimensionslos zu gestalten und somit verknüpfbar zu machen. Zweitens wird der Wertebereich der Kennzahlen so normiert, dass er zwischen Null und Eins liegt, wobei ein höherer Wert eine höhere Priorität darstellt. Drittens sollen die Kennzahlen dezentral von der betreffenden Produktionsstufe ermittelt werden können. Für die Ermittlung der Kennzahlen können daher ausschließlich solche Informationen genutzt werden, welche auch lokal bei der entsprechenden Produktionsstufe vorliegen. Es werden keine Informationen von vor- oder nachgelagerten Produktionsstufen genutzt.

⁹³ Für die Informationsbeschaffung soll dabei die RFID-Technologie eingesetzt werden (Vgl. Kapitel 5.2).

Viertens müssen nach der Berechnung der Einzelkennzahlen die Werte jeder Kennzahl auf den Wertebereich von der kleinsten bis zur größten berechneten Kennzahl normiert werden, um die Vergleichbarkeit der einzelnen Kennzahlen sicherzustellen. Auf diese Weise wird erreicht, dass alle Kennzahlen immer den Bereich zwischen Null und Eins ausschöpfen. Die Kennzahlen lassen sich darüber hinaus in statische und dynamische Kennzahlen unterscheiden. Im Gegensatz zu dynamischen, ist der Rangwert von statischen Kennzahlen unabhängig vom momentanen Systemzustand (bspw. unabhängig von einem neuen Auftrag in der Warteschlange). Für eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung sind die dynamischen Kennzahlen von besonderer Relevanz, da nur diese eine Anpassung an ein sich änderndes Produktionsumfeld erlauben.

Nachfolgend werden für jedes der vier Teilziele jeweils zwei Kennzahlen entwickelt.⁹⁴ Die hier dargestellten Kennzahlen bzw. die dahinterliegenden Zielgrößen haben sich nach einer intensiven Literaturrecherche (vgl. bspw. (Corsten 2007, S. 41; Kurbel 2003, S. 19; Wiendahl 2007, S. 252)) sowie nach einer Reihe von Experteninterviews⁹⁵ als bedeutend für die Reihenfolgeplanung herauskristallisiert. Bevor die Kennzahlen im Detail beschrieben werden, gibt Abbildung 5-5 eine Übersicht über die entwickelten Kennzahlen.

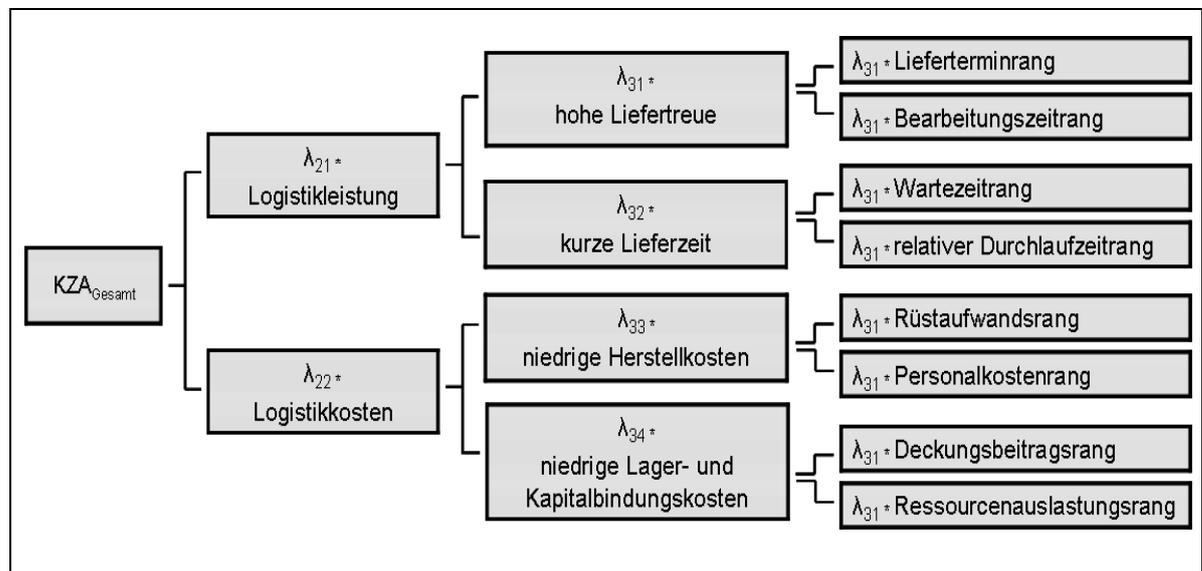


Abbildung 5-5: Kennzahlenmodell zur Reihenfolgebestimmung IV (entwickelte Kennzahlen)

(λ = Gewichtungsfaktoren)

⁹⁴ Zu beachten ist, dass sowohl die Anzahl als auch die Art der Kennzahl nicht als Allgemeingültig angesehen werden kann.

⁹⁵ Experteninterviews wurden beispielsweise mit Vertretern der Pepperl + Fuchs GmbH, Sick GmbH, SAP AG, Bosch GmbH, Airbus S. A. S. sowie der Deutsche Lufthansa AG durchgeführt.

Kennzahlen zum Bereich Logistikleistung

Für die Zielgröße „hohe Liefertreue“ müssen solche Kennzahlen entwickelt werden, welche die vom Kunden wahrgenommene termin- und mengengerechte Erfüllung der geordneten Bedarfe repräsentieren. Insbesondere bei einer auftragsbezogenen Produktion mit einer geringen Bestandshaltung sollte dieser Zielgröße eine besondere Aufmerksamkeit zukommen, da geringe Bestände in der Regel mit einer Verringerung der Termineinhaltung korreliert (Nyhuis & Wiendahl 2003, S. 12).

Zur Erreichung einer hohen Liefertreue wird zunächst die Kennzahl „Lieferterminrang (LTR)“ entwickelt. Die Kennzahl gibt Auskunft über die bis zum vereinbarten Liefertermin verbleibende Zeit. Je kleiner die Differenz zwischen Liefertermin und aktuellem Termin, desto kritischer sind Zeitverzögerungen in der Auftragsbearbeitung. Dementsprechend muss einem Auftrag mit einer geringen Differenz zum vereinbarten Liefertermin ein hoher Wert zugewiesen werden, während sich für Aufträge mit einer großen Differenz niedrige Werte ergeben müssen. Die Kennzahl wird wie folgt definiert:

$$LTR_{i,j} = \frac{BZ_{i,j} + RZ_{V_i,j}}{LT_i - AZ}$$

mit:

$LTR_{i,j}$ = Lieferterminrang für den Auftrag i an der Fertigungsstufe j

$BZ_{i,j}$ = Bearbeitungszeit des Auftrags i an der Fertigungsstufe j

$RZ_{V_i,j}$ = Rüstzeit bei Wechsel auf die Produktvariante V_i des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

LT_i = Vereinbarter Liefertermin des Auftrags i

AZ = Aktuelle Zeit

Die Kennzahl kann allerdings nur nach der dargestellten Formel berechnet werden, sofern der geplante Liefertermin noch erfüllbar ist. Sollte der geplante Liefertermin vor der aktuellen Uhrzeit liegen bzw. der Liefertermin bei Berücksichtigung der Bearbeitungszeit nicht mehr eingehalten werden können, wird die Kennzahl gleich Eins (maximaler Wert) gesetzt. Beim Lieferterminrang handelt es sich um eine dynamische Kennzahl, da sich der zunächst zugewiesene Rangwert eines Auftrages beim Eintreffen eines neuen Auftrags ändern kann.

Des Weiteren wird die Kennzahl „*Bearbeitungszeitrang (BZR)*“ entwickelt. Mit Hilfe dieser Kennzahl, sollen Aufträge mit einer kürzeren Bearbeitungszeit denjenigen Aufträgen mit längeren Bearbeitungszeiten vorgezogen werden. Eine solche Kennzahl kann in Produktionssituationen, in denen auf Grund der Auftragslage eine termingerechte Fertigstellung aller eingeplanten Aufträge von vornherein ausgeschlossen werden kann (bspw. bei einer Übernachfrage in einer bestimmten Periode), einen wichtigen Beitrag für die Termintreue leisten⁹⁶. Durch die Priorisierung von Aufträgen mit einer kurzen Bearbeitungszeit kann prinzipiell erreicht werden, dass in einer noch zur Verfügung stehenden Arbeitsperiode möglichst viele Aufträge bearbeitet und somit auch termingerecht fertig gestellt werden können. Bei der Kennzahl „*Bearbeitungszeitrang (BZR)*“ handelt es sich ebenfalls um eine dynamische Kennzahl, da sich der zunächst zugewiesene Rangwert eines Auftrages beim Eintreffen eines neuen Auftrags ändern kann. Die Kennzahl wird wie folgt definiert:

$$BZR_{i,j} = 1 - \frac{BZ_{i,j} + RZ_{V_i,j}}{(BZ_{n,j} + RZ_{V_n,j})_{Max}}$$

mit:

$BZR_{i,j}$ = Bearbeitungszeitrang des Auftrags i an der Fertigungsstufe j

$BZ_{i,j}$ = Bearbeitungszeit der Auftrags i an der Fertigungsstufe j

$RZ_{V_i,j}$ = Rüstzeit bei Wechsel auf die Produktvariante V_i des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

$BZ_{n,j}$ = Längste Bearbeitungszeit eines Auftrages n in der Warteschlange an der Fertigungsstufe j

$RZ_{V_n,j}$ = Rüstzeit bei Wechsel auf die Produktvariante des Auftrages n an der Fertigungsstufe j

Die Lieferzeit beschreibt die Zeitspanne vom Eingang eines Auftrags beim Lieferanten bis zum Eingang der Ware beim Empfänger. In die Kategorie „*kurze Lieferzeit*“ fallen somit insbesondere solche Kennzahlen, welche eine möglichst geringe Durchlaufzeit herbeiführen. Auf Grund der angestrebten dezentralen Lösung wird die Lieferzeit in dieser Arbeit als die Zeitspanne vom Eingang eines Auftrags bei einer Fertigungsstufe bis zum Eingang der Ware bei ihrer nachgelagerten Fertigungsstufe (Auftraggeber) definiert.

⁹⁶ Eine eher pessimistische Auffassung einer solchen Regel bezüglich der Liefertreue findet sich etwa in (Stosik 2005, S. 89).

Zur Erreichung einer kurzen Lieferzeit wird zunächst die Kennzahl „Wartezeitrang (WTZ)“ entwickelt. Nach dieser First-come-First-Served Regel bekommen die Aufträge, ihrem Eintreffens an der Bedienstation nach, absteigende Kennzahlen zugewiesen. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz des First-come-First-Served Prinzip im Bezug auf die Durchlaufzeit recht gute Ergebnisse liefert. Insbesondere ermöglicht dieses Vorgehen eine relativ konstante Durchlaufzeit, da die einzelnen Aufträge vor jeder Bearbeitungsstufe gleichmäßig abgearbeitet werden (Adam 1998, S. 568). Die Kennzahl WTZ ist eine statische Kennzahl, da der nach dieser Kennzahl einmal zugewiesene Rangwert im Zeitablauf unverändert bleibt. Die Kennzahl wird wie folgt definiert:

$$WTZ_{i,j} = \frac{AKZ_{i,j} - AZ}{(AKZ_{n,j} - AZ)_{Max}}$$

mit:

$WTZ_{i,j}$ = Wartezeitrang des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

$AKZ_{i,j}$ = Ankunftszeit des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

AZ = Aktuelle Zeit

$AKZ_{n,j}$ = Wartezeit des am längsten wartenden Fertigungsauftrags n an der Fertigungsstufe j

Arbeitsgänge eines Auftrages mit einer, im Verhältnis zur Gesamtdurchlaufzeit, langen Durchlaufzeit stellen aus Ressourcensicht potentielle Durchlaufzeitengpässe dar. Maßnahmen zur Reduzierung der Durchlaufzeit greifen idealerweise an diesen Arbeitsgängen an (etwa durch eine Reduzierung der Liegezeiten) (Wachsmann 2006, S. 71). Zur Reduzierung der Durchlaufzeiten an diesen, für die Lieferzeit kritischen Arbeitsgängen, wird die Kennzahl „*relativer Durchlaufzeitrang (RDZ)*“ definiert. Danach werden denjenigen Aufträgen in der Warteschlange hohe Kennzahlen und somit auch hohe Prioritäten zugewiesen, für welche der bevorstehende Arbeitsgang eine hohe Bedeutung für die Gesamtdurchlaufzeit aufweist. Hat der bevorstehende Arbeitsgang einen großen Durchlaufzeitanteil, so wird für diesen Auftrag ein hoher Kennzahlenwert berechnet. Die Kennzahl RDZ stellt eine dynamische Kennzahl dar. Die Kennzahl wird wie folgt definiert⁹⁷:

⁹⁷ Zu beachten ist, dass die Bearbeitungszeit eines Auftrages sich grundsätzlich aus der Rüstzeit sowie der eigentlichen Bearbeitungszeit zusammensetzt. Da die Gesamt-Rüstzeit zum Zeitpunkt der Berechnung des relativen Bearbeitungszeitranges allerdings noch nicht feststeht (diese werden im Wesentlichen durch die Reihenfolgenplanung bestimmt) wird die Rüstzeit im Rahmen dieser Kennzahl vernachlässigt.

$$RDZ_i = \frac{\frac{BZ_{i,j}}{BZ_{i,Gesamt}}}{\left(\frac{BZ_{n,j}}{BZ_{n,Gesamt}} \right)_{\text{Max}}}$$

mit:

- $RDZ_{i,j}$ = relativer Durchlaufzeitrang des Auftrages i an der Fertigungsstufe j
- $BZ_{i,j}$ = Bearbeitungszeit des Auftrages i an der Fertigungsstufe j
- $BZ_{i,Gesamt}$ = Gesamte Bearbeitungszeit des Auftrages i
- $BZ_{n,j}$ = Längste Bearbeitungszeit in der Warteschlange eines Auftrages n an der Fertigungsstufe j
- $BZ_{n,Gesamt}$ = Gesamte Bearbeitungszeit des Auftrages n

Kennzahlen zum Bereich Logistikkosten

Für die Zielgröße „*niedrige Herstellkosten*“ sind solche Kennzahlen von Relevanz, welche Herstellkosten repräsentieren, die durch die Reihenfolge der Auftragsabwicklung beeinflusst werden.

Eine der bedeutsamsten logistischen Maßnahmen zur Sicherstellung niedriger Herstellkosten stellt die Optimierung des Rüstaufwandes dar (Dyckhoff 2003, S. 316). Je nach Produktvariante sind gegebenenfalls unterschiedliche Anforderungen einer nachgelagerten Stufe an einer Fertigungsstufe zu erfüllen. Bei einem Variantenwechsel ergibt sich damit ein reihenfolgeabhängiger Umrüstungsaufwand entsprechend der geänderten Anforderungen. Für eine effiziente Produktion, ist darauf zu achten, dass die Umrüstkosten insgesamt möglichst gering sind. Ein Beispiel für die Bedeutung einer Rüstzeitoptimierung findet sich im Bereich der Elektronikfertigung. Die in diesem Bereich eingesetzten SMD-Bestückungssysteme für oberflächenmontierbare Bauteile (englisch surface-mounted device, SMD) verarbeiten in der Regel eine Vielzahl unterschiedlicher SMD-Gehäuseformen. Die, insbesondere bei mittelständischen Betrieben, üblichen Kleinserien bzw. kundenauftragsorientierte Produktion und die damit verbundenen kleinen Losgrößen und häufigen Auftragswechsel, führen dazu, dass die SMD-Bestückungen auf Grund von Umrüstungsarbeiten bis zu 40 % der Betriebszeit stillstehen (Böhnlein 2002, S. 47). Dies stellt einen bedeutenden Engpass in der Elektronikfertigung dar und führt zu der Notwendigkeit einer Rüstzeitoptimierung. Um eine Verringerung der Umrüstzeiten zu erreichen, wird die

Kennzahl „*Rüstaufwandsrang (RAR)*“ definiert. Danach wird Aufträgen mit geringen Umrüstzeiten ein hoher Kennzahlwert zugewiesen. Bei der Kennzahl RAR handelt es sich um eine dynamische Kennzahl, da die Werte vom aktuellen Zustand der Fertigungsstufe abhängig sind (insbesondere von der gerade bearbeiteten Produktvariante)⁹⁸. Die Kennzahl wird wie folgt definiert:

$$RAR_{i,j} = 1 - \frac{RZ_{V_i,j}}{BZ_{i,j} + RZ_{V_i,j}}$$

mit:

$RAR_{i,j}$ = Rüstaufwandsrang des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

$RZ_{V_i,j}$ = Rüstzeit bei Wechsel auf die Produktvariante V_i des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

$BZ_{i,j}$ = Bearbeitungszeit des Auftrags i an der Fertigungsstufe j

Darüber hinaus wird zur Erreichung niedriger Herstellkosten die Kennzahl „*Personalkostenrang (AWR)*“ definiert, welche die Personalkosten, die bei der Umstellung einer Fertigungsstufe auf eine andere Produktvariante anfallen, beschreibt. Kommt es zu einer hohen Anzahl an Variantenwechseln, so kann es zu erhöhten Personalkosten kommen. Diese können zum einen aufgrund einer vom Arbeitgeber gewährten Zulage für einen Aufgabenwechsel (wie es bspw. bei der Volkswagen AG üblich ist) entstehen. Zum anderen kann es zu erhöhten Kosten aufgrund des üblichen Effizienzverlustes bei häufigem Wechsel der Tätigkeit kommen. So führt ein häufiger Wechsel der Tätigkeiten unter anderem zu einer erhöhten Fehlerquote⁹⁹ (Boysen 2005, S. 19). Dementsprechend soll mit Hilfe der Kennzahl AWR für Aufträge mit geringen Personalkosten bei einem Variantenwechsel ein hoher Wert und für Aufträge mit hohen Personalkosten ein geringen Wert ermittelt werden. Die absoluten Kosten der Wechsel einer Produktvariante werden dabei in das Verhältnis zu den gesamten Bearbeitungskosten gesetzt, um so die Bedeutung dieser Kosten für den entsprechenden Auftrag zu ermitteln. Somit werden solche Aufträge bevorzugt, welche bezüglich der, durch das Arbeitspersonal induzierten, Wechselkosten am effizien-

⁹⁸ Die wesentliche Determinante für die benötigten Rüstzeiten eines Auftrages stellt der aktuell bearbeitete Auftrag dar. Handelt es sich beispielsweise um die selben Varianten eines Produktes, so fallen in der Regel keine Rüstzeiten an.

⁹⁹ Darüber hinaus führt ein häufiger Wechsel der Tätigkeit zu den für eine Variantenfertigung üblichen höheren Ausbildungskosten und zu geringeren Lerneffekten, was zu höheren Produktionskosten pro Stück führt (Boysen 2005, S. 19).

testen bearbeitet werden können. Bei der Kennzahl AWR handelt es sich ebenfalls um eine dynamische Kennzahl. Die Kennzahl wird wie folgt definiert¹⁰⁰:

$$\text{PKR}_{i,j} = 1 - \frac{\text{AK}_{V_i,j}}{\text{BK}_{i,j} - \text{RK}_{V_i,j}}$$

mit:

$\text{PKR}_{i,j}$ = Personalkostenrang des Auftrages i an der Fertigungsstufe j

$\text{AK}_{V_i,j}$ = Personalkosten durch den Wechsel auf die Produktvariante V_i an der Fertigungsstufe j

$\text{RK}_{V_i,j}$ = Rüstkosten durch den Wechsel auf die Produktvariante V_i an der Fertigungsstufe j

$\text{BK}_{i,j}$ = Bearbeitungskosten des Auftrags i an der Fertigungsstufe j

Im Rahmen des Kennzahlenmodells sind in der Kategorie „*niedrige Lager- und Kapitalbindungskosten*“ im Besonderen die Kapitalbindungskosten von Relevanz, da die Reihenfolgeplanung keinen bzw. nur sehr geringen Einfluss auf die Lagerkosten (bspw. Kosten für die Lagergebäude) hat. Kapitalbindungskosten¹⁰¹ sind Kosten für das im Unternehmen investierte Kapital und stellen Opportunitätskosten dar. In der Logistik sind dabei beispielsweise die Kosten für das in Lagerbeständen gebundene Kapital von Interesse. Der Kanban-Methode liegt zwar schon explizit das Ziel eines geringen Bestandgrades und damit auch niedriger Kapitalbindungskosten zugrunde, dennoch können auch in dieser Kategorie reihenfolgeabhängige Verbesserungen erreicht werden.

Zur Erreichung niedriger Kapitalbindungskosten wird zunächst die Kennzahl „*Deckungsbeitragsrang (DBR)*“ definiert. Um hohe Kapitalbindungskosten zu vermeiden sollen bei einem Engpass solche Aufträge bevorzugt werden, welche einen hohen Deckungsbeitrag aufweisen. Im Rahmen der Reihenfolgeplanung kann dafür der relative (engpassspezifische) Deckungsbeitrag (Hoch 2003, S. 65) genutzt werden. Der relative Deckungsbeitrag bezieht den Faktorverbrauch mit ein, der zur Generierung des Deckungsbeitrags benötigt wird. So lässt sich ermitteln, welcher Auftrag den Faktor (die Fertigungsstufe) am effizien-

¹⁰⁰ Die Kennzahl PKR wird nach dem selben Prinzip wie die Kennzahl RAR berechnet, weshalb die Personalwechselkosten im Rahmen der Evaluation (Kapitel 6.1) vernachlässigt werden.

¹⁰¹ Sie berechnen sich grundsätzlich als Produkt aus dem durchschnittlichen Lagerbestandswert und einem kalkulatorischen Zinssatz in Abhängigkeit von den potenziellen anderweitigen Verwendungsmöglichkeiten des gebundenen Kapitals.

testen ausnutzt. Bei der Kennzahl „Bearbeitungszeitrang (BZR)“ handelt es sich um eine dynamische Kennzahl, da sich der zunächst zugewiesene Rangwert eines Auftrages beim Eintreffen eines neuen Auftrags ändern kann. Berechnet wird die Kennzahl wie folgt:¹⁰²

$$\text{DBR}_{i,j} = 1 - \frac{\text{BK}_{i,j}}{\text{DB}_i}$$

mit:

DBR_i = Deckungsbeitragsrang des Auftrags i an der Fertigungsstufe j

DB_i = (prognostizierter) Deckungsbeitrag des Auftrages i

BK_i = Bearbeitungskosten des Auftrags i an Fertigungsstufe j

Darüber hinaus wird in dieser Kategorie die Kennzahl „*Ressourcenauslastungsrang (RLR)*“ definiert. Mit Hilfe dieser Kennzahl sollen Aufträge, welche eine hohe Auslastung der Fertigungsstufe garantieren, priorisiert werden. Die Auslastung kann als Verhältnis aller eingehenden Arbeitsinhalte zur Kapazität der Produktionseinheit berechnet werden. Die Auslastung der Fertigungsstufe durch einen Auftrag kann 100 % sein (in diesem Fall wird die Kennzahl gleich Eins (maximaler Wert) gesetzt). Einzelne Fertigungsstufen sind allerdings häufig wiederum in einzelne Subaufgaben (bspw. einzelnen Arbeitsplätzen in einer Montage) unterteilt (Picker 2007, S. 8), welche wiederum nicht zwangsläufig für jede Produktvariante benötigt werden. Werden einzelne Subaufgaben nicht benötigt, so ist die Fertigungsstufe nicht vollkommen ausgelastet. Das in diesen Subsystemen gebundene Kapital kann in der Regel aber nicht anderweitig verwendet werden (Opportunitätskosten). Um solche Opportunitätskosten in Situationen, in denen nicht alle Aufträge in der betrachteten Periode bearbeitet werden können (Überlast), gering zu halten, werden mit Hilfe der Kennzahl RLR Aufträge mit einer hohen Auslastung bevorzugt. Bei der Kennzahl RLR handelt es sich ebenfalls um eine dynamische Kennzahl. Berechnet wird die Kennzahl wie folgt:

¹⁰² Die Kennzahl wird nur nach der dargestellten Gleichung berechnet, sofern der Deckungsbeitrag größer als die Bearbeitungskosten ist. Andernfalls wird die Kennzahl gleich Null gesetzt (minimaler Wert).

$$\text{RLR}_{i,j} = \frac{\left(\frac{\text{AI}_{i,j}}{\text{AI}_{j\text{Max}}} \right)}{\left(\frac{\text{AI}_n}{\text{AI}_{j\text{Max}}} \right)_{\text{Max}}}$$

mit:

$\text{RLR}_{i,j}$ = Ressourcenauslastungsrang des Auftrags i an der Fertigungsstufe j

$\text{AI}_{i,j}$ = Arbeitsinhalte des an der Fertigungsstufe j eingehenden Auftrags i

$\text{AI}_{j\text{Max}}$ = Maximal mögliche Belastung der Fertigungsstufe j

AI_n = Größte Arbeitsinhalte eines Auftrages n an der Fertigungsstufe j

Nachdem die Kennzahlen beschrieben wurden und das Kennzahlenmodell damit in seiner endgültigen Form vorliegt, wird im nächsten Kapitel darauf eingegangen, wie die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kennzahlen ermittelt werden können.

5.1.4 Ermittlung der Gewichtungsfaktoren

Mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kennzahlen soll eine gezielte und variable Beeinflussung des Koordinationsergebnisses möglich werden. Der Reihenfolgeplan wird neben dem aktuellen Produktionsumfeld infolgedessen auch von den unternehmensspezifischen Präferenzen bezüglich der Bedeutung der einzelnen Zielgrößen bestimmt. Die Bestimmung der Gewichtungen der einzelnen Ziele ist eine unternehmensspezifische Aufgabe. Je nach Unternehmensstrategie und/oder aktuellem Umweltzustand können die Gewichtungen angepasst werden. Zur Unterstützung der Entscheidung und zur Vermeidung einer willkürlichen Ausgestaltung der Gewichtungsfaktoren bietet es sich an, multiattributive Entscheidungsverfahren einzusetzen. Für das entwickelte Kennzahlenmodell kann hierbei insbesondere auf den Analytic-Hierarchy-Process (AHP) zurückgegriffen werden.

Der AHP ist eine Variante der Nutzwertanalyse und bildet ein systematisches Verfahren, um Entscheidungsprozesse zu strukturieren und zu lösen. Das Verfahren wurde in den 1970er Jahren in den USA von Thomas Saaty zur Unterstützung von komplexen Entscheidungsproblemen entwickelt (Saaty 1990, S. 9; Schneeweiß 1991, S. 157; Weber 1995, S. 185). Auf Basis von Gewichtungen der für einen Entscheidungsprozess relevanten Kriterien unterstützt der AHP eine Bewertung einer endlichen Menge von Alternativen. Für das

in dieser Arbeit betrachtete Kennzahlenmodell ist dabei die Ermittlung der Gewichtungen der Kriterien von Interesse. Der AHP bietet sich im Kontext des vorgeschlagenen Modells insbesondere deshalb an, da diese Methode, ebenso wie das beschriebene Kennzahlenmodell, auf einer mehrstufigen Hierarchie von Zielen bzw. Kriterien basiert. Daneben bietet das AHP die Vorteile einer einfachen Anwendung, der Einsatzmöglichkeit für Einzelpersonen oder Gruppen, der Förderung von Kompromissen sowie der hohen Transparenz der Ergebnisse (Rohr 2004, S. 40). Die grundlegende Vorgehensweise bei der Anwendung des AHP zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren kann wie folgt beschrieben werden:

Auf jeder Hierarchieebene werden die Kriterien (im Rahmen des Kennzahlenmodells die Zielgrößen) gemäß allen übergeordneten, relevanten Zielen paarweise verglichen. Die Vergleiche erfolgen in der Regel auf einer 9-Punkte-Skala. Die numerischen Vergleichswerte werden dabei den Entscheidungsträger nicht direkt bereitgestellt. Stattdessen bestimmen diese linguistische Variablen, die auf die 9-Punkte-Skala abgebildet werden. Abbildung 5-6 zeigt die bei der Anwendung des AHP am häufigsten genutzte Skala.¹⁰³

AHP – Skala	
9	absolut dominierend
7	sehr viel größere Bedeutung
5	erheblich größere Bedeutung
3	etwas größere Bedeutung
1	gleiche Bedeutung
1/3	etwas geringere Bedeutung
1/5	erheblich geringere
1/7	sehr viel geringere Bedeutung
1/9	absolut unterlegen

Abbildung 5-6: AHP-Skala

(Quelle: (Rohr 2004, S. 43))

Es werden alle Elemente in einer Hierarchieebene anhand bestimmter qualitativer und/oder quantitativer Merkmale (bspw. die Bedeutung der Zielgröße für die Unternehmensstrategie) durch Prioritätenschätzung miteinander verglichen. Dabei erfolgt die Festlegung der relativen Wichtigkeit eines Kriteriums immer im Vergleich zu einem anderen. Aus den Matrizen der paarweisen Vergleiche werden mittels der Eigenvektormethode (relative)

¹⁰³ Grundsätzlich sind auch andere Skalen möglich. (Weber 1993, S. 88) zeigen allerdings, dass sich bei Verwendung von anderen Skalen die Attributgewichtungen nur unwesentlich gegenüber der 1-9 Skala verändern.

Maße für die Wichtigkeit der Ziele im Hinblick auf die übergeordneten Ziele berechnet. Die Bewertungen der (Zwischen-) Ziele können als Gewichte interpretiert werden. Eine ausführliche Übersicht über das Konzept, Kritik, Implementierungen und Anwendungen findet sich etwa in (Saaty 1993, S. 137; Vargas 1990, S. 2; Zahedi 1986, S. 96).

5.2 Informationstechnische Infrastruktur

5.2.1 Informationsfluss und Aufbau

Nachdem im vorangegangenen Kapitel das Kennzahlenmodell entwickelt wurde, wird im Folgenden auf die zur Nutzung des Modells notwendige informationstechnische Infrastruktur eingegangen. Zunächst wird auf den Aufbau sowie den Informationsfluss des auf RFID-Technologie basierenden Informations- und Kommunikationssystem eingegangen.

Der vorgeschlagene System soll mit Hilfe eines *mediatorbasierten Steuerungsansatzes* (Cutkosky et al. 1993, S. 28; Shen, Norrie & Barthès 2001, S. 134; Wiederhold 1992, S. 38) realisiert werden¹⁰⁴. Die Rolle des Mediators liegt vor allem in der Vermittlung zwischen den dezentralen Einheiten (Aufträge in der Warteschleife sowie jeweilige Fertigungsstufe). Der Mediator stellt eine Systemkomponente dar, welche die eingehenden Informationen sammelt (bspw. die Auftragspezifikationen), auswertet (Erstellung eines Reihenfolgeplans) und letztendlich an die entsprechende Fertigungsstufe weiterleitet. Abbildung 5-7 fasst den grundsätzlichen Aufbau des Mediatoransatzes beispielhaft für eine Stufe eines Fertigungssystems, in dem zwei nachgelagerte Fertigungsstufen auf eine vorgelegte Stufe angewiesen sind, zusammen.

¹⁰⁴ Wiederhold (Wiederhold 1992) stellte 1992 erstmals das Konzept der Mediatoren in Informationssystemen vor: „*Mediation simplifies, abstracts, reduces, merges, and explains data. [...] Mediation covers a wide variety of functions that enhance stored data prior to their use in an application. Mediation makes an interface intelligent by dealing with representation and abstraction problems that you must face when trying to [...] use data and knowledge resources [Wie92a]*”

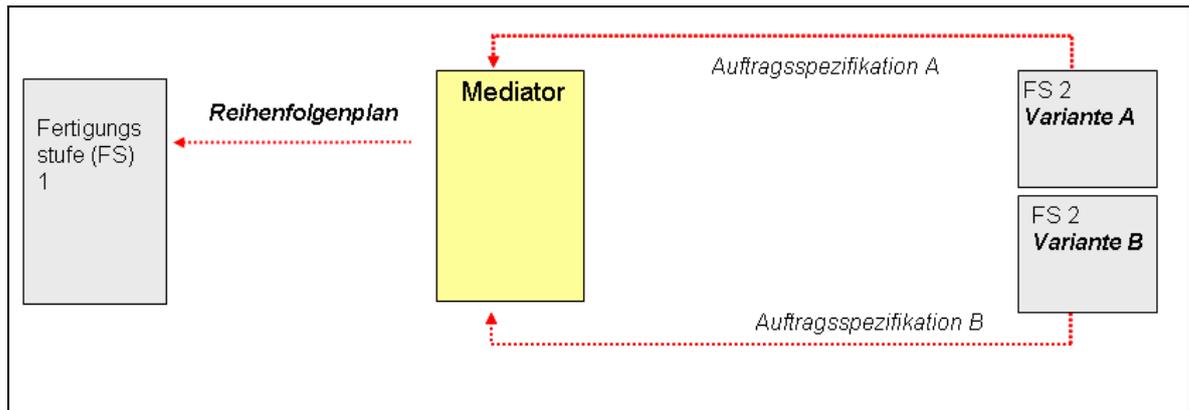


Abbildung 5-7: Mediatorbasierter Steuerungsansatz

Der Mediator sammelt die jeweiligen Informationen über die sich in der Warteschlange befindenden Aufträge und erstellt mit Hilfe des Kennzahlenmodells einen Reihenfolgenplan. Ein solcher mediatorbasierter Ansatz weist insbesondere folgende Vorteile auf¹⁰⁵:

- **Geringer Kommunikationsaufwand:** Durch die Vermittlung zwischen den konkurrierenden Aufträgen einerseits und der Fertigungsstufe andererseits, kann der Kommunikationsaufwand gering gehalten werden. Im Rahmen eines mediatorbasierten Ansatzes benötigen die beteiligten Objekte (Aufträge sowie Fertigungsstufe) ausschließlich eine Kommunikationsbeziehung zu dem Mediator. Im Gegensatz zu einer direkten Kommunikation zwischen den Objekten kann somit die Anzahl der Kommunikationsbeziehungen deutlich reduziert werden.
- **Dynamische Komposition:** Unter dynamischer Komposition wird die Möglichkeit verstanden, neue Aufträge zur Laufzeit in das System einzubinden. Durch die Reduzierung der Kommunikationsbeziehungen (auf faktisch eine einzige pro Auftrag) können neu eintreffende Aufträge ohne bedeutenden Zeitverlust in das System aufgenommen und bei der Reihenfolgeplanung berücksichtigt werden.
- **Skalierbarkeit:** Die Reduzierung der Anzahl der Kommunikationsbeziehungen ermöglicht darüber hinaus eine gute Skalierbarkeit des Systems. Da jeder Auftrag lediglich eine Kommunikationsbeziehung zum Mediator benötigt, wächst die Anzahl der Kommunikationsbeziehungen lediglich 1:1 mit der Anzahl der zu bearbeitenden

¹⁰⁵ Zu den allgemeinen Vorteilen eines Mediators im Rahmen von Informationssystemen vgl. (Schimkat 2003, S. 24).

Aufträge. Es ist somit davon auszugehen, dass das System eine - zumindest bezüglich des Kommunikationsaufwandes - hohe Skalierbarkeit aufweist.

In Kanban-Systemen kann ein solcher Mediator etwa im Rahmen der Kanban-Tafel (Dickmann 2007, S. 11) umgesetzt werden, auf der in traditionellen Kanban-Systemen eintreffende Kanban-Karten ihrer Artikelnummer entsprechend in freie Felder der Tafel abgelegt werden. Eine elektronische Kanban-Tafel, welche die notwendigen Informationen (Liefertermin, Deckungsbeitrag etc.) sammelt, kann als Mediator fungieren und (gemäß dem Kennzahlenmodell) den Reihenfolgeplan der aktuell anstehenden Fertigungsaufträge erstellen und visualisieren. Als Informationsträger sollen dabei RFID-Transponder dienen, welche auf den Kanban-Karten befestigt sind und das Kennzahlenmodell notwendigen Auftragsdaten mitführen. Somit können eine Vielzahl von Informationen auf einer Kanban-Karte hinterlegt werden und den (dezentralen) Fertigungsstufen (bzw. dem Mediator) zur Verfügung gestellt werden. Dementsprechend muss der Mediator (d.h. die elektronische Kanban-Tafel), neben den zur Ausführung des Modells notwendigen Rechenkapazitäten, mit einem RFID-Lesegerät ausgestattet werden. Eine solche elektronische Kanban-Tafel wurde etwa in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekt „Sm@rt Logistics – RFID-gestützte Produktions- und Beschaffungslogistiksysteme für die Automobilbranche“ der RWTH Aachen und der TU Dresden realisiert. Im Rahmen dieses Projektes wurden eine Kanban-Tafel mit RFID-Reader, einer (geringen) Rechenkapazitäten sowie einer Signalisierungseinrichtung für Mitarbeiter (bspw. Lampe, LED, ...) entwickelt. Jede Veränderung im Kanban-System (bspw. Entnahme oder Zuführung einer Kanban-Karte) kann mit Hilfe dieser Tafel automatisch erkannt und den Mitarbeiter über die Signalisierungseinrichtung mitgeteilt werden (Bärwald et al. 2007, S. 32; Schuh 2006, S. 505).¹⁰⁶

Neben den auftragspezifischen Informationen kann der Mediator zusätzlich Informationen über den aktuellen Zustand der entsprechenden Fertigungsstufe sammeln (bspw. aktuell bearbeitete Variante). Die (erweiterten) Auftragsdaten sowie die Informationen über die Fertigungsstufe bilden dann die Informationsbasis für die Ermittlung der Kennzahlen. Abbildung 5-8 fasst den Aufbau und den Informationsfluss der mediatorbasierten, dezentralen Lösung beispielhaft zusammen.

¹⁰⁶ Experimente in dem Projekt ergaben, dass das dort eingesetzte RFID-System eine Leserate von 99,9 % aufweist.

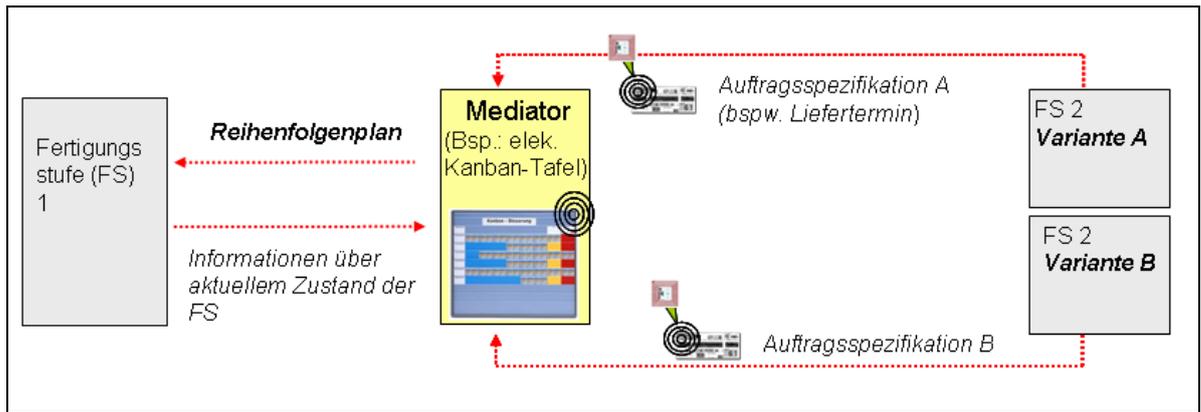


Abbildung 5-8: Informationsfluss und Aufbau des Systems

Ein erstes Beispiel für ein RFID-gestütztes Kanban-System in der industriellen Praxis findet sich bei der Robert Bosch GmbH im Werk Eisenach/Westthüringen. Im Werk Eisenach produziert Bosch insgesamt 18 verschiedene Automobilteile (Beschleunigungssensoren, Drehzahlmesser etc.) an 60 unterschiedlichen Fertigungslinien. Dazu verwendete Bosch ein klassisches Kanban-System, im Rahmen dessen Barcodes auf die Kanban-Karten gedruckt wurden, welche an den entsprechenden Fertigungsstufen eingescannt wurden. Aufgrund der Umstellung der Produktion auf sehr kleine Losgrößen erwies sich dieses barcode-basierte Kanban-System allerdings als sehr kostenintensiv. Bis zu 60 weitere Mitarbeiter hätten die durch die Umstellung der Losgrößen notwendigen 12 Millionen jährlichen zusätzlichen Barcode-Scans durchführen müssen. Um diese Kosten zu vermeiden, stattete Bosch das Kanban-System mit RFID-Technologie aus. Dazu wurden sämtliche Kanban-Karten mit RFID-Transpondern versehen, auf welchen die vormals als Barcode hinterlegten Auftragsdaten (Materialnummer, Fertigungsauftrag und Mengenangabe) gespeichert wurden¹⁰⁷. Bekommt Bosch einen neuen Auftrag, so wird zunächst eine mit RFID ausgestattete Kanban-Karte mit den erforderlichen Daten beschrieben¹⁰⁸. Die Auftragsdaten werden dafür direkt von den Kunden per EDI (Electronic Data Interchange) übermittelt. Die beschriebene Karte wird dann der entsprechenden Fertigungslinie zugeführt und an den einzelnen Fertigungsstufen automatisiert erfasst. Insgesamt werden in dem Werk Eisenach ca. 60.000 RFID-gestützte Kanban-Karten mit bis zu 7.000 verschiedenen Materialnummern sowie 150 RFID-Lesegeräte eingesetzt. Die ökonomischen Vorteile dieser Lösung liegen im Wesentlichen in der Möglichkeit der automatisierten Informationssammlung, wodurch

¹⁰⁷ Die Kanban-Karten sind mit RFID-Transpondern der Firma Texas Instrument ausgerüstet und arbeiten bei einer Frequenz von 13,56 MHz im mittleren Reichweiten-Spektrum.

¹⁰⁸ Dazu wird die Kanban-Karte auf einem RFID-Lesegerät der Firma FEIG Electronic gelegt und beschrieben.

händische Informationserfassung ersetzt werden konnte und damit etwa Personalkosten eingespart sowie Zeiteinsparungen realisiert wurden. Aufgrund der sehr großen Anzahl von Materialanforderungen (ca. 25.000 pro Tag) und der damit einhergehenden großen Anzahl von Leseereignissen (ca. 45.000 pro Tag) erweist sich die kostengünstige Informationserfassung als eine bedeutende, kostensenkende Maßnahme. So kann Bosch nach eigenen Schätzungen insgesamt Einsparungen von über einer Millionen Euro pro Jahr erreichen. Die Amortisationszeit der RFID-Kanban Lösung wird auf unter ein Jahr geschätzt¹⁰⁹.

Während im Rahmen der RFID-Kanban Lösung von Bosch lediglich dieselben Informationen auf einem RFID-Transponder gespeichert werden, wie sie vormals auch mit Hilfe eines Barcodes auf einer Kanban-Karte hinterlegt wurden, werden zur Nutzung des Kennzahlenmodells deutlich mehr Informationen benötigt. Es müssen erstens zusätzliche auftragspezifische Informationen direkt auf die Kanban-Karten gespeichert werden, zweitens Informationen im Mediator gespeichert bzw. vom Mediator in Echtzeit ermittelt werden und drittens aktuelle Informationen über den Zustand der Fertigungsstufen gesammelt werden.

Folgende *auftragsspezifische Daten* müssen auf den Kanban-Karten gespeichert werden:

- Benötigte Variante
- Benötigte Menge
- Vereinbarter Liefertermin eines Auftrages
- (Kalkulierte) Gesamt-Bearbeitungszeit eines Auftrages
- (Kalkulierter) Deckungsbeitrag eines Auftrages

Darüber hinaus wird es notwendig, zusätzliche Informationen dem *Mediator* einer Fertigungsstufe zur Verfügung zu stellen. Dabei ist zwischen statischen und dynamischen Informationen zu unterscheiden. Statische Informationen können im Mediator einmalig gespeichert werden und bleiben über die Zeit unverändert. Dynamische Informationen müssen vom Mediator in Echtzeit ermittelt werden.

¹⁰⁹ Zur Analyse des RFID-Kanban System bei der Robert Bosch GmbH wurde ein Experteninterview mit Dr. Volker Schäffer/ Seeburger AG am 23.05.2008 durchgeführt. Die Seeburger AG agierte als Systemintegrator der RFID-Kanban Lösung. Vgl. dazu auch beispielsweise (Logistik heute 2007, S. 26).

a. Statische Informationen:

- Bearbeitungszeit pro Stück der einzelnen Varianten
- Rüstzeiten zwischen den Varianten
- Personalkosten bei Wechsel zwischen den Varianten
- Bearbeitungskosten pro Stück der einzelnen Varianten
- Notwendige Arbeitsinhalte der einzelnen Varianten

b. Dynamische Informationen:

- Erfassung der Aufträge in der Warteschlange
- Ankunftszeit eines Auftrages
- Uhrzeit
- Wartezeit des am längsten wartenden Auftrages
- Längste Bearbeitungszeit eines Auftrages in der Warteschlange
- Maximale Arbeitsinhalte eines Auftrages in der Warteschlange

Letztendlich werden von der *Fertigungsstufe* Informationen über die aktuell bearbeitete Variante sowie die maximal mögliche Belastung (Anzahl Subsysteme etc.) benötigt.

5.2.2 Auswahl des RFID-Systems

Als „Informationsbeschaffer“ für das Kennzahlenmodell wird die RFID-Technologie eingesetzt. Dabei werden die Kanban-Karten mit RFID-Transpondern ausgestattet. Dies ermöglicht zum einen die Speicherung der zusätzlichen auftragsspezifischen Informationen und zum anderen die Ermittlung der dynamischen Informationen durch den Mediator (bspw. Erfassung der Aufträge in der Warteschlange in Echtzeit)¹¹⁰. Im nachfolgenden Kapitel werden aktuell verfügbare RFID-Technologien untersucht und eine Auswahl hinsichtlich der Nutzung für das vorgeschlagene System vorgenommen.

¹¹⁰ Die Speicherung der statischen Informationen im Mediator stellt keine bedeutende informationstechnische Herausforderung dar.

Mittlerweile existieren eine Reihe verschiedener RFID-Systeme, welche sich in Systemdesign und ihren Leistungsmerkmalen unterscheiden. Für die Auswahl eines RFID-Systems spielen im Besonderen folgende Kriterien eine Rolle (Flörkemeier 2005, S. 87; Hodges & Harrison 2003, S. 8; Strassner 2005, S. 57):

- Design der Datenhaltung
- Energieversorgung
- Notwendige Reichweite
- Vorhandene Umgebungseinflüsse
- Möglichkeit der Pulkerfassung
- Beschreibbarkeit

RFID-Technologie erlaubt grundsätzlich zwei *Designmöglichkeiten der Datenhaltung*: „Data on Network“ und „Data on Tag“. Im Rahmen des „Data on Network“ Prinzips, werden objektbezogene Daten in einer (zentralen) Datenbank abgelegt und über eine eindeutige Identifizierung, welche mit Hilfe eines an einem Objekt befestigten RFID-Transponder erfolgt, referenziert. Diese Variante wurde insbesondere in dem EPC/RFID-Standards verwirklicht (EPCglobal 2003). Kernstück des Standards ist der so genannte Elektronische Produkt-Code (EPC)¹¹¹, der eine weltweit eindeutige Identifikation einzelner Paletten, Kartons, Packstücke, etc. erlaubt. Der EPC wird auf einem RFID-Transponder gespeichert und an einem Objekt angebracht¹¹². Ein so genannter Object Name Service (ONS) ordnet der EPC-Seriennummer eine Internet-Adresse in Form eines Uniform Resource Locator (URL) zu, welcher auf eine Objektbeschreibung des Herstellers verweist. Informationen über Produkte können dann jederzeit über das Internet abgerufen werden (Auto-ID Center 2003). Ein Vorteil des Prinzips „Data on Network“ sind die sehr geringen Anforderungen an die

¹¹¹ EPCglobal ist eine Non-Profit-Organisation, die Standards für die einheitliche Nutzung von RFID entlang der gesamten Versorgungskette über Länder- und Branchengrenzen hinweg entwickelt. Der EPC ist eine Ziffernfolge mit einer Länge von mindestens 64 Bit (EPC-64), 96 Bit (EPC-96) oder größer (je nach eingesetztem Nummernident bis zu 204 Bit). Die derzeit verwendeten Nummernidents basieren auf der von GS1 vergebenen GLN (Global Location Number, dt.: *Internationale Lokationsnummer* (ILN) des Typs 2) und wurden leicht modifiziert in dem EPC abgebildet. (EPCglobal 2003).

¹¹² Aufgrund der geringen zu Verfügung stehenden Speicherkapazität wurde diese Vorgehensweise ebenso bei Barcode-Systemen gewählt. Der Ansatz wird in Barcode-Systemen auch deshalb verfolgt, da sich objektbezogene Daten häufig verändern und eine Aktualisierung des Barcodes zu aufwändig ist. Die Datenänderung wird vorwiegend zentral vorgenommen, da eine Aktualisierung des Barcodes zu aufwändig ist. (Gerhäuser & Pflaum 2004, S. 284; Melski & Schumann 2007, S. 26).

Datenträger. Da lediglich eine Identifikationsnummer auf dem Datenträger gespeichert werden muss, ist die notwendige Speicherkapazität minimal, was die Datenträger relativ billig macht. Dies ist insbesondere an den simplen EPC Class 0 und Class 1 Tags erkennbar, die durch ihre nur einfache Funktionalität als drahtlos auslesbares Nummernschild massenmarktaugliche Preisregionen erreicht haben (Bizer et al. 2006, S. 256). Darüber hinaus weißt das Prinzip „Data on Network“ in der Regel eine fortgeschrittene Standardisierung auf. So sind im EPC Standard die RFID-Transponder, die RFID-Reader, die Middleware und die Luftschnittstelle spezifiziert. Das erleichtert den Einsatz solcher Systeme für Unternehmen und verringert die Kosten des Einsatzes (Diekmann, Melski & Schumann 2007, S. 224). Die Notwendigkeit einer Netzwerkinfrastruktur führt andererseits zu einigen Nachteilen. So sind die Anforderungen an das zugrunde liegende Netzwerk sehr hoch. Beispielsweise müssen Verfügbarkeit als auch Datensicherheit (etwa Sicherstellung der Zugriffsrechte) gewährleistet werden. Des Weiteren führt der hohe Grad der Standardisierung häufig dazu, dass das System lediglich simplifizierte Funktionalitäten aufweist und zusätzliche Potentiale nicht ausgeschöpft werden. Im Hinblick auf die Nutzung im Rahmen des vorgeschlagenen Systems ist zu konstatieren, dass die Variante „Data on Network“ eine Dezentralität von Entscheidungen nur suboptimal unterstützt, da die Informationen nicht dezentral vorliegen sondern erst über die Netzwerkinfrastruktur von einer zentralen Stelle abgeholt bzw. dort verarbeitet werden müssen.

Eine Möglichkeit, objektbezogene Informationen direkt auf dem Datenträger selbst und somit dezentral zu speichern, bietet das Prinzip „Data on Tag“. Somit kann prinzipiell auf eine Netzwerkinfrastruktur verzichtet werden, womit einerseits die Infrastrukturkosten sowie andererseits Kommunikationskosten (Verzögerungen der Informationsbereitstellung aufgrund einer Netzwerküberlastung, höhere Wahrscheinlichkeit von Kommunikationsfehler etc.) gesenkt werden können. Allerdings erfordert das Prinzip „Data on Tag“ eine größere Datenkapazität der Transponder. Aus technischer Sicht ist diese Möglichkeit gegeben. So wurden beispielsweise von EPCglobal¹¹³ neben dem bereits erwähnten EPC Class 0 und Class 1 die Transponderklassen Class 2 standardisiert, die sich insbesondere durch eine deutliche Steigerung der Speicherkapazität der RFID-Transponder auszeichnen

¹¹³ Neben EPCglobal existieren noch weitere Organisationen, die sich mit der Standardisierung von RFID-Systemen beschäftigen (bspw. die International Organization for Standardization (ISO) oder die International Telecommunication Union (ITU). EPCglobal ist allerdings der wohl aktuell wichtigste Akteur für die RFID-Standardisierung (Straube et al. 2007, S. 4).

(Diekmann, Melski & Schumann 2007, S. 224)¹¹⁴. So verfügen heutige Transponder über eine Speicherkapazität von bis zu 1024 Bytes, was ausreichend für den Einsatz im Rahmen des Systems ist. Zu bemerken ist allerdings, dass diese Transponder einen höheren Anschaffungspreis aufweisen, als solche mit nur geringer Speicherkapazität. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass für die Anwendung von RFID für das vorgeschlagene System das Prinzip „Data on Tag“ vorteilhaft ist, da dieses, durch die direkte Bereitstellung der Informationen vor Ort, eine bestmögliche Unterstützung des dezentralen Prozesses bietet. Eine zentrale Informationssammlung wird nicht notwendig. Zu beachten sind dabei allerdings die höheren Kosten der Transponder, welchen allerdings Einsparungen im Bereich der Netzwerkinfrastruktur gegenüberstehen.

Bezüglich der *Energieversorgung* wird zwischen aktiven und passiven RFID-Systemen unterschieden. Aktive Systeme besitzen eine eigene Stromversorgung (Batterie) und sind gegenüber passiven Systemen deutlich leistungsfähiger. So können aktive Transponder bis zu 100 Meter weit senden. Darüber hinaus ist die Beeinträchtigung des Signals durch Umgebungseinflüsse (bspw. Flüssigkeiten, Metall) aufgrund der hohen Sendeleistung relativ gering. Als nachteilig erweisen sich allerdings die Lebensdauer sowie der Anschaffungspreis. So beschränkt sich die Lebensdauer der Batterien im Durchschnitt auf sechs Jahre, wobei sich diese bei wiederholten Senden mit maximaler Leistung noch einmal deutlich reduzieren kann (Strassner 2005, S. 59). Der größte Nachteil ergibt sich aber durch den sehr hohen Anschaffungspreis. Der Preis eines Transponders liegt bei ca. 10-15 €, was eine betriebliche Anwendung lediglich für Spezialfälle (bspw. Tracking von Container auf Schiffen) realistisch macht. Für Anwendungen, bei denen eine Reichweite von bis zu zwei Metern ausreichend ist, stellen passive Transponder mit einem Preis von 0,1 – 0,8 € die deutlich wirtschaftlichere Lösung dar. Da eine sehr geringe Reichweite ausreicht (wenn die mit RFID ausgestatteten Kanban Karten direkt in der elektronischen Kanban-Tafel abgelegt werden, ist eine Reichweite von wenigen Zentimetern ausreichend) ist der Einsatz von passiven Transpondern zu empfehlen. Im Bereich der passiven Systeme existieren mehrere Varianten, wobei die Leistungsmerkmale im Besonderen von der verwendeten Sendefrequenz abhängig sind. Tabelle 5-1 fasst die gängigsten Systeme und ausgewählte Leistungsmerkmale zusammen.

¹¹⁴ Darüberhinaus zeichnen sich diese Transponder durch erweiterte Funktionalitäten (bspw. Integration von Sensortechnologie, Möglichkeit einer mehrfach Beschreibung der Transponder, Tag-to-Tag-Kommunikation) aus.

	Frequenzbereich LF (<i>< 135 MHz</i>)	Frequenzbereich HF (<i>13,56 MHz</i>)	Frequenzbereich UHF (<i>865 - 956 MHz</i>)	Frequenzbereich SHF (<i>2,45 GHz</i>)
Reichweite ¹¹⁵	bis 1,5m	bis 1,2m	bis 3m	bis 2m
Störende Umgebungseinflüsse	- leitfähige Materialien (bspw. Metall)	- leitfähige Materialien (bspw. Metall)	- Abschirmung - Flüssigkeiten - Reflexion	- Abschirmung - Flüssigkeiten - Reflexion
Möglichkeit der Pulkerfassung	von wenigen Systemen unterstützt	bis ca. 70 Tags pro Sekunde	bis ca. 70 Tags pro Sekunde	bis ca. 50 Tags pro Sekunde

Tabelle 5-1: Leistungsmerkmale passiver RFID-Systeme

(Quelle: in Anlehnung an (Lampe, Flörkemeier & Haller 2005, S. 79; Strassner 2005, S. 59)

Die *Reichweite der Datenerfassung* kann hier nur als Richtwert angegeben werden, da diese von den jeweiligen Umgebungseinflüssen (bspw. Feuchtigkeit, Metalle) abhängig ist. Insgesamt stellt die Reichweite aber keine kritische Größe für den Einsatz von RFID im Rahmen des entwickelten Mechanismus dar, da eine Reichweite im Zentimeterbereich ausreicht. Es ist daher davon auszugehen, dass hinsichtlich der Reichweite der Datenerfassung alle dargestellten Systeme die Anforderungen des Mechanismus erfüllen.

Da es sich bei RFID-Transpondern um kostengünstige elektronische Elemente handelt und die passiven Systemen ohne eigene Energieversorgung arbeiten, sind diese relativ anfällig für verschiedene Störungen (bspw. Übertragungsfehlern) bei ungünstigen *Umgebungseinflüssen*. So erweisen sich System welche im LF sowie HF-Bereich arbeiten anfällig gegenüber leitfähigen Materialien (bspw. Metall) in ihrer Umgebung. Werden RFID-Transponder direkt auf eine Metalloberfläche aufgebracht, können sie häufig überhaupt nicht mehr gelesen werden. Bei Flüssigkeiten oder organischen Materialien in der Umgebung kann es ferner zu Absorptionen des magnetischen oder elektromagnetischen Feldes kommen. Während dieses Problem im LF-Bereich keine Rolle spielt und im HF-Bereich nur eine geringe, kommt es im UHF- und SHF-Bereich jedoch zu starken Absorptionen der elektromagnetischen Wellen und damit zu einer bedeutenden Verringerung der Lesereichweite, wenn das Signal organische oder wasserhaltige Materialien durchdringen muss

¹¹⁵ Dabei handelt es sich um eine Richtgröße. Die Reichweite variiert mit den jeweiligen Umgebungseinflüssen (bspw. Feuchtigkeit, Metalle).

(Lampe, Flörkemeier & Haller 2005, S. 82). Eine Auswahl eines RFID-Systems kann somit nur unter Kenntnis der Produktionssituation und der jeweiligen Umgebungseinflüsse geschehen. Da Kanban in der Regel in der industriellen Fertigung eingesetzt wird, im Rahmen derer eine Reihe von leitfähigen Materialien verwendet werden, ist zu vermuten, dass in den meisten Fällen eine UHF bzw. SHF-Lösung geeignet ist.

Die *Möglichkeit der Pulkerfassung* (d.h. die Möglichkeit mehrere Objekte gleichzeitig zu erfassen) wird vom Systemhersteller festgelegt. Allerdings ergeben sich auch systemspezifische Besonderheiten. Während für Systeme, aus dem im HF, UHF oder SHF Bereich die Pulkerfassung in der Regel problemlos realisierbar ist, ist diese Möglichkeit bei Systemen aus dem LF Bereich, aufgrund der hohen Auslesedauer, nur beschränkt gegeben. Da im Rahmen der Reihenfolgeplanung Situationen vorkommen können, in denen mehrere RFID-Transponder gleichzeitig eingelesen werden müssen, empfiehlt es sich somit Systeme einzusetzen, die außerhalb des LF Bereiches arbeiten.

Letztendlich muss die Wahl bezüglich der *Beschreibbarkeit* getroffen werden. Grundsätzlich existieren RFID-Systeme sowohl in einer Nur-Lese-Version (Read-Only) als auch in einer Schreib-Lese-Version (Read/Write). Die Lebensdauer passiver Transponder ist im Read-Only-Modus nahezu unendlich. Bei Schreib-/Leseinsatz existiert eine Grenze von ca. 100.000 Schreibzyklen (VDEB 2006, S. 17). Da auftragsspezifische Informationen (bspw. Liefertermin) benötigt werden, ist es notwendig RFID-Systeme mit der Möglichkeit der Beschreibbarkeit einzusetzen.

Zusammenfassend empfiehlt sich ein RFID-System mit wiederbeschreibbaren, passiven Transpondern. Dabei sollte das Prinzip „Data-onTag“ verwirklicht werden. Bezüglich des Frequenzbereiches können aus rein technischer Sicht sowohl Systeme aus dem HF, UHF oder SHF eingesetzt werden. In der Praxis zeigt sich aber ein klarer Schwerpunkt in der Verwendung von HF und UHF – Lösungen. So wurde im Rahmen der durchgeführten, empirischen Untersuchung festgestellt, dass 42,3 % der RFID-Anwender System aus der HF-Bereich und 43,8 % System aus dem UHF-Bereich einsetzen. Aufgrund der, durch die hohe Nachfrage dieser Systeme, entstehende Angebotssicherheit sowie des zu erwartenden Preisverfalls der Transponder sollte auf solche Lösungen zurückgegriffen werden. Die Wahl zwischen einer HF- oder einer UHF-Lösungen muss dann unter Kenntnis der jeweiligen Umgebungseinflüsse getroffen werden. Aufgrund des intensiven Einsatzes leitfähiger Materialien in der industriellen Fertigung, ist aber davon auszugehen, dass eine UHF-Lösung vorteilhaft ist.

6 Evaluation

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Prüfung des entwickelten Systems hinsichtlich der geforderten Funktionalität sowie der erreichbarer Prozessverbesserungen. Um Beurteilen zu können, ob eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung möglich wird und ob der Mechanismus im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren betriebswirtschaftliche Leistungssteigerungen erlaubt, wird ein Simulationsexperiment durchgeführt. Nachdem Kapitel 6.1 zunächst den Einsatz von Simulationen als Methode der Evaluation diskutiert, wird in Kapitel 6.2. das Simulationsexperiment präsentiert. Die Ergebnisse des Experimentes werden abschließend bewertet.

6.1 Zum Einsatz von Simulationen als Methode der Evaluation

Simulationen stellen ein häufig genutztes Instrument zur Unterstützung der Planung und Inbetriebnahme logistischer Systeme dar¹¹⁶. Eine Simulation kann definiert werden als die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind¹¹⁷ (VDI 1996). Zur Beurteilung, ob eine Simulation sinnvoll einsetzbar ist („Simulationswürdig“ (VDI 1996)), existiert kein exaktes Verfahren. Grundsätzlich ist aber zu prüfen, ob der Einsatz anderer Methoden zweckmäßiger wäre. Für das entwickelte System wären, von den modellbasierten Verfahren, prinzipiell ebenso Experimente am physischen Objekt oder analytische Methoden denkbar¹¹⁸. Ein Experiment am physischen Objekte schließt sich im vorliegenden Fall insbesondere aufgrund der sehr hohen Investitionskosten aus. So müsste, neben dem Aufbau eines (vereinfachten) Produktionssystems, die informationstechnische

¹¹⁶ Eine allgemeine Übersicht zur Anwendung von Simulationen findet sich etwa in (Zeigler, Praehofer & Kim 2000). Anwendungen von Simulationen zur Beurteilung logistischer Systeme finden sich beispielsweise in (Schulz 2002, S. 68; Strasser 2008, S. 105).

¹¹⁷ Ein System ist dadurch gekennzeichnet, dass mehrerer Komponenten miteinander in Beziehung stehen und zu einem gemeinsamen Zweck interagieren (Weber 2007, S. 49).

¹¹⁸ Experimente am realen Objekt schließen sich aus ökonomischen Gründen ebenso aus. Insbesondere bei einer Serien- und Massenfertigungen sind durch den Einsatz des Koordinationsmechanismus erhebliche Veränderungen der ökonomischen Parameter (bspw. Rüstzeiten, Lieferterminverfehlungen) zu erwarten. Experimente im operativen Betrieb, ohne vorherige modellbasierte Untersuchung dieser Veränderung, wären ein unkalkulierbares Risiko.

Infrastruktur beschafft und implementiert werden. Analytische Ansätze versagen oft bei dynamischen und kurzlebigen Prozessen, da häufig mit Mittelwerten gearbeitet wird (Pidd 2004, S. 8). Darüber hinaus sind analytische Verfahren in der Regel nur bei wenig komplexen Systemen unter vertretbaren Kosten, Aufwand und Vereinfachungsgrad möglich (Weber 2007, S. 50). So bemerkt (Page 1991, S. 8), dass Simulationen aufgrund der bei analytischen Verfahren häufig notwendigen, rigiden Anwendungsvoraussetzungen, in der Regel eine höhere Realitätsnähe aufweisen. Aufgrund der Komplexität sowie Dynamik des hier untersuchten Systems ist davon auszugehen, dass analytische Verfahren ungeeignet sind. Es sei darauf hingewiesen, dass auch die Ergebnisse einer Simulation letztendlich lediglich Gültigkeit im Rahmen des zugrunde gelegten (Simulations-) Modells haben. Dieses Modell stellt naturgemäß nur eine Annäherung an die Wirklichkeit dar. Der Abstraktionsgrad und der Idealisierungsgrad des Modells haben einen bedeutenden Einfluss auf die Qualität der Rückschlüsse auf die Wirklichkeit (Weber 2007, S. 49).

6.2 Das Simulationsexperiment

Das im nachfolgenden vorgestellte Simulationsexperiment hat zwei Ziele: Zum einen soll überprüft werden, ob mit Hilfe des entwickelten Systems eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung möglich wird. Zum anderen wird getestet, ob der Mechanismus im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren betriebswirtschaftliche Leistungssteigerungen erlaubt.

6.2.1 Modellannahmen, Referenzszenarien und Bewertungsgrößen

Zur Durchführung einer Simulation ist es zunächst notwendig, ein konzeptionelles Modell des Realsystems zu entwickeln. Dieses *Modell* sollte soweit vereinfacht und abstrahiert sein, dass nur die für die Simulation relevanten Komponenten und Beziehungen existieren (Weber 2007, S. 51). Das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Modell besteht aus einer Fertigungsstufe, welche drei unterschiedliche Produktvarianten produzieren kann. Die betrachtete Fertigungsstufe bedient somit drei nachgelagerte Fertigungsstufen, wobei Situationen betrachtet werden, in denen diese drei Fertigungsstufen um die Nutzung der betrachteten Fertigungsstufe konkurrieren. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fertigungsstufe im betrachteten Zeitraum permanent zur Verfügung steht (kein Geräteausfall). Der Auftragsimpuls der drei nachgelagerten Fertigungsstufen erfolgt darüber hinaus unabhängig von-

einander.¹¹⁹ Des Weiteren wird unterstellt, dass die angeforderte Produktionsmenge pro Auftrag zwischen einer und fünfzig Mengeneinheiten variiert. Die in dem Modell betrachteten Produktvarianten, werden in die Varianten „Standard“, „Premium“ sowie „Premium Plus“ unterschieden. Die Modifizierung eines Produktes in drei Varianten ist eine in der Praxis häufig anzutreffende Form der Produktdifferenzierung mit dem Ziel, verschiedene Marktsegmente zu bedienen (Hwang 2006, S. 155). Die Variante „Standard“ bedient das untere Marktsegment und zeichnet sich durch die geringsten Bearbeitungskosten und Bearbeitungszeiten sowie einer niedrigen Auslastung der Fertigungsstufe aus. Der mögliche Deckungsbeitrag dieser Variante ist ebenso am geringsten¹²⁰. Die Variante „Premium“ weist bezüglich dieser Parameter durchschnittliche Werte aus. Schließlich ist mit der Variante „Premium Plus“ der höchste Deckungsbeitrag sowie die größte Auslastung der Fertigungsstufe zu erreichen. Bearbeitungszeiten- und -kosten fallen dabei am höchsten aus. Die gewählten Parameter für die drei Varianten sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Produktvariante 1 ("Standard"):			Produktvariante 2 ("Premium"):			Produktvariante 3 ("Premium Plus"):		
Deckungsbeitrag:	10	GE/pro Stück	Deckungsbeitrag	20	GE/pro Stück	Deckungsbeitrag:	30	GE/pro Stück
Bearbeitungszeit	2	ZE/pro Stück	Bearbeitungszeit	4	ZE/pro Auftrag	Bearbeitungszeit	6	ZE/pro Auftrag
Ressourcenauslastung	50	%/pro Auftrag	Ressourcenauslastung	80	%/pro Auftrag	Ressourcenauslastung	100	%/pro Auftrag
Gesamtbearbeitungszeit	50	ZE/pro Stück	Gesamtbearbeitungszeit	60	ZE/pro Auftrag	Gesamtbearbeitungszeit	100	Min/pro Stück
Bearbeitungskosten	2	GE/pro Stück	Bearbeitungskosten	4	GE/pro Stück	Bearbeitungskosten	6	ZE/pro Auftrag
Rüstzeit			Rüstzeit			Rüstzeit		
zu Produktvariante 1	0	ZE/pro Auftrag	zu Produktvariante 1	5	ZE/pro Auftrag	zu Produktvariante 1	10	ZE/pro Auftrag
zu Produktvariante 2	5	ZE/pro Auftrag	zu Produktvariante 2	0	ZE/pro Auftrag	zu Produktvariante 2	12	ZE/pro Auftrag
zu Produktvariante 3	10	ZE/pro Auftrag	zu Produktvariante 3	12	ZE/pro Auftrag	zu Produktvariante 3	0	ZE/pro Auftrag
Arbeitssystemwechselkosten:			Arbeitssystemwechselkosten:			Arbeitssystemwechselkosten:		
zu Produktvariante 1	0	GE/pro Auftrag	zu Produktvariante 1	5	GE/pro Auftrag	zu Produktvariante 1	5	GE/pro Auftrag
zu Produktvariante 2	5	GE/pro Auftrag	zu Produktvariante 2	0	GE/pro Auftrag	zu Produktvariante 2	0	GE/pro Auftrag
zu Produktvariante 3	10	GE/pro Auftrag	zu Produktvariante 3	12	GE/pro Auftrag	zu Produktvariante 3	12	GE/pro Auftrag

Tabelle 6-1: Parameter der Simulation (Produktvarianten)

(GE=Geldeinheiten, ZE=Zeiteinheiten)

Für die ökonomische Bewertung werden zwei *Referenzszenarien* betrachtet. Im ersten Referenzszenario erfolgt die Entscheidung bezüglich der Reihenfolge der Auftragsabwicklung mittels der klassischen First-Come-First-Served Methode. Aufgrund der sehr einfachen Umsetzung, stellt diese die aktuell noch gängigste Methode der Reihenfolgebildung

¹¹⁹ Da einzelne Auftragsimpulse durch Kanban-Karten repräsentiert werden, welche keine wesentlichen räumlichen Ressourcen benötigen, wird weiter davon ausgegangen, dass die Kapazität der Warteschlange unbegrenzt ist.

¹²⁰ Es wird somit implizit davon ausgegangen, dass mit dieser Variante der geringste Marktpreis zu erreichen ist.

dar. Zweitens erfolgt die Koordination der Auftragsabwicklung auf Grundlage einer rüst-optimalen Reihenfolge. Verfahren auf Basis einer Rüstzeitoptimierung findet mittlerweile einen verstärkten Einsatz in der Praxis¹²¹. Diesen beiden Referenzszenarien wird das in Kapitel 5 entwickelte System entgegengestellt.

Simulationen stellen ein Experimentierungsverfahren dar, welches unter vorher definierten Parametern eine Lösung liefert. Eine Bewertung dieser Lösung hinsichtlich der ökonomischen Vorteilhaftigkeit stellt eine Simulation nicht zur Verfügung. Dies obliegt der Auswertung und Interpretation des Anwenders. Dafür müssen geeignete Bewertungsgrößen herangezogen bzw. entwickelt werden. Um die Simulationsergebnisse bewerten zu können, werden, aufbauend auf den in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Zielgrößen, sechs Bewertungsgrößen genutzt. Dabei werden drei *Bewertungsgrößen* aus dem Bereich der Logistikkosten und drei aus dem Bereich der Logistikleistung herangezogen:

- Die Bewertungsgröße „Lieferterminverfehlung“ stellt die Summe der Terminüberschreitungen dar. Da lediglich eine Fertigungsstufe betrachtet wird, wird lediglich die Differenzen zwischen geplantem Liefertermin und tatsächlich realisierter Fertigstellung der Aufträge an der betrachteten Fertigungsstufe ermittelt. Diese Zielgröße ist dem Bereich der Logistikleistung zuzuordnen.
- Die Durchlaufzeit ergibt sich für den vorliegenden Fall aus der Zeitspanne vom Eingang eines Auftrags bei der betrachteten Fertigungsstufe bis zur Fertigstellung. Diese Zeitspanne ist abhängig von den jeweiligen Wartezeiten, den Bearbeitungszeiten sowie den Rüstzeiten. Auch die Durchlaufzeit ist der Logistikleistung zugehörig.
- Eine kostenseitige Bewertungsgröße stellt die Rüstzeit dar. Diese ergibt sich aus der Summe aller Rüstzeiten der in einer Periode zu bearbeitenden Aufträge¹²².
- Die Kapitalbindungskosten, welche ebenfalls den Logistikkosten zugeordnet werden, werden im Rahmen der Simulationsstudie mittels eines modifizierten Lagerzinses ermittelt. Dafür wird für jeden Auftrag das Produkt des Deckungsbeitrages

¹²¹ So setzt beispielsweise die Pepperl+Fuchs GmbH/Mannheim ein auf der Optimierung der Rüstzeiten basierende Verfahren zur Bestückung einer SMD (surface-mounted device) Maschine ein, da diese Maschine bei Anwendung einer First-come-first-served Methode Rüstzeiten von bis zu 50 % der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit aufwies.

¹²² Auf die Ermittlung der Personalwechselkosten wird verzichtet, da diese sich identisch wie die Rüstzeiten verhalten. Die Ergebnisse für die Rüstzeiten können somit auch auf die Personalwechselkosten übertragen werden.

und des Lagerzinssatzes berechnet. Der Lagerzinssatz wird durch das Produkt aus einem Marktzins¹²³ und der Wartezeit eines Auftrages ermittelt.

Diese Bewertungsgrößen werden zunächst für ein Szenario ermittelt, in dem sämtliche Aufträge in der betrachteten Periode bearbeitet werden können. Darüber hinaus wird ein Szenario simuliert, im Rahmen dessen nicht alle Aufträge gefertigt werden können (Überlast). Dadurch sollen zum einen die Ergebnisse weiter validiert werden und zum anderen soll mittels weiterer Bewertungsgrößen überprüft werden, ob das entwickelte System auch für ein solches Szenario ökonomische Verbesserungen verspricht. Hierfür werden zusätzlich die Bewertungsgrößen Ressourcenauslastung und Liefertreue eingeführt. Die Größe Ressourcenauslastung ist den Logistikkosten zuzurechnen und gibt den Prozentsatz an, mit welchem Umfang die Fertigungsstufe in der betrachteten Periode ausgelastet wird. Zusätzlich wird durch die Größe Liefertreue die Anzahl der terminüberschreitenden Aufträge ermittelt. Diese Bewertungsgröße ist der Logistikleistung zuzuordnen.

6.2.2 Ablauf der Simulation

Im Rahmen der Simulationsstudie wurde das Kennzahlenmodell prototypisch implementiert¹²⁴. Dabei wurden sämtlich in Kapitel 5.1.3 entwickelten Kennzahlen implementiert. Da die Gewichtungen der einzelnen Kennzahlen eine unternehmensspezifische Aufgabe darstellt, welche von der Unternehmensstrategie und/oder aktuellem Umweltzustand abhängig ist, werden zur Analyse des Mechanismus mehrere *Szenarien* betrachtet. In Szenario I wird davon ausgegangen, dass mit Hilfe des Kennzahlenmodells eine Steigerung der logistischen Leistung erreicht werden soll. Dementsprechend werden im Rahmen dieses Szenarios lediglich solche Kennzahlen genutzt, welche den Bereich Logistikleistung repräsentieren (Lieferterminrang, Bearbeitungszeitrang, Wartezeitrang, relativer Deckungsbeitragsrang). Die Gewichtungen dieser Kennzahlen werden sukzessive angehoben und die entsprechenden Ergebnisse der Bewertungsgrößen ermittelt. Diese Ergebnisse werden zwei Referenzszenarien gegenübergestellt. Zunächst werden die Ergebnisse einer klassischen First-Come-First-Served Lösung ermittelt und davon ausgehend die Gewichtungen der anderen Kennzahlen erhöht (Szenario I(a)). Darüber hinaus werden die Ergebnisse einem

¹²³ Es wird davon ausgegangen, dass der Marktzins (d.h. die alternative Anlageform) bei 5 % liegt.

¹²⁴ Für die prototypische Implementierung wurde die Skriptsprache PHP (Hypertext Preprocessor) genutzt.

zweiten Referenzszenario gegenübergestellt, in welchem eine Rüstzeitoptimierung vorgenommen wurde (Szenario I(b))¹²⁵. In Szenario II wird davon ausgegangen, dass eine Optimierung der Logistikkosten erreicht werden soll. Dafür werden die Bedeutungen der Kennzahlen, welche im Zielsystem diesen Bereich repräsentieren sukzessive angehoben (Rüstaufwandsrang, Personalkostenrang, Deckungsbeitragsrang, Ressourcenauslastungs-rang). Auch für dieses Szenario werden zur Analyse wieder zwei Referenzszenarien herangezogen (Szenario II(a): Referenzszenario First-Come-First-Served, Szenario II(b): Referenzszenario Rüstzeitoptimierung). Für jede Gewichtungsverteilung in den verschiedenen Szenarien wurden 30 Simulationsdurchläufe¹²⁶ durchgeführt in denen jeweils 30 Aufträge um die Nutzung der Fertigungsstufe konkurrieren. Grundsätzlich könnten die Ergebnisse durch eine Steigerung der Simulationsdurchläufe statistisch weiter abgesichert werden. Aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Szenarien bzw. der notwendigen Gewichtungsverteilung musste auf eine weitere Steigerung der Anzahl der Durchläufe allerdings verzichtet werden. Darüber hinaus wird eine Stichprobengröße von 30 als hinreichend Groß angesehen, da ab dieser Größe nicht mehr davon ausgegangen werden muss, dass es sich um eine kleine Stichprobe handelt (Bortz 1993, S. 129). In den beiden Szenarien wird zunächst davon ausgegangen, dass sämtliche der 30 Aufträge bearbeitet werden können. Diese Annahme wird in den Szenario III sowie Szenario IV aufgehoben und eine Situation betrachtet, in der es in der noch zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich ist, sämtliche Aufträge zu bearbeiten. Für die in dieser gekürzten Zeitspanne bearbeiteten Aufträge werden dann die Bewertungsgrößen ermittelt und wiederum den zwei Referenzszenarien gegenübergestellt. Als Inputwerte werden in den Simulationen, neben den beschriebenen Annahmen, sowohl die angeforderten Produkttypen (d. h. die Zusammensetzung der angeforderten Varianten) sowie die benötigte Menge als auch der geplante Liefertermin und die Ankunftszeit an der Fertigungsstufe mittels eines Zufallszahlengenerator ermittelt. Bezüglich des geplanten Liefertermins wurden dabei bewusst Situationen erzeugt, in denen der Liefertermin häufig nicht eingehalten werden kann, um dadurch Aussagen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Modells hinsichtlich der Verbesserung der Lieferterminverfehlungen treffen zu können.

¹²⁵ Die Optimierung der Rüstzeiten ist nach dem klassischen First-Come-First-Served Prinzip die zweithäufigste Methode zur Bildung der Reihenfolge.

¹²⁶ Die Anzahl von 30 kann als ausreichend angesehen werden, da in diesem Falle davon ausgegangen wird, dass sich die Stichprobenmittelwerte nach dem zentralen Grenzwerttheorem normalverteilen (Bortz 1993, S. 130).

6.2.3 Simulationsergebnisse

6.2.3.1 Ergebnisse Szenario I

Abbildung 6-1 fasst die Entwicklung der vier Bewertungsgrößen Rüstzeiten, Kapitalbindungskosten, Lieferterminverfehlungen sowie Durchlaufzeit für Szenario I(a) zusammen. In der oberen Grafik sind die kostenseitigen Bewertungsgrößen dargestellt, während in der unteren Grafik die Bewertungsgrößen aus dem Bereich der Logistikleitung zu finden sind. Die Durchschnittswerte der einzelnen Bewertungsgrößen aller Simulationsdurchläufe des Referenzszenarios (hier: First-Come-First-Served) werden dabei als 100 % dargestellt. Die absoluten Größen der 30 Simulationsdurchläufe finden sich in Anhang A1. Ausgehend von diesem Referenzszenario (WTZ=100 %) wurden die Gewichtungen der Kennzahlen aus dem Bereich "Logistikleistung" sukzessive um 5 % erhöht und dementsprechend die Gewichtung der Kennzahl Wartezeitrang um 15 % verringert, um somit den Verlauf der Bewertungsgrößen analysieren zu können. Die Ergebnisse der Bewertungsgrößen der einzelnen Gewichtungsverteilungen werden in Prozent zu den Ergebnissen des Referenzszenarios dargestellt. Die Ergebnisse für die einzelnen Gewichtungsverteilungen in absoluten Größen finden sich in Anhang A2-A6.

Da im Rahmen des Szenario I(a) der Rüstaufwandsrang nicht berücksichtigt wurde, bleiben die Rüstzeiten erwartungsgemäß relativ konstant. Diese Entwicklung kann als wünschenswert angesehen werden, da eine Rüstzeitoptimierung keine Zielsetzung im Szenario I darstellt und im Vergleich zur Ausgangslage keine Verschlechterung der Rüstzeit zu beobachten ist. Auch die Kapitalbindungskosten weisen einen konstanten Verlauf aus. Dies überrascht zunächst, da diese unter anderem von der durchschnittlichen Durchlaufzeit abhängig sind, welche wiederum durch das Absenken des Wartezeitranges negativ beeinträchtigt wird. Zu erklären ist diese Beobachtung mit dem gleichzeitigen Anheben des Durchlaufzeitranges. So wirkt sich zwar das Absenken des Wartezeitranges negativ auf die Durchlaufzeit aus, die Berücksichtigung des Durchlaufzeitranges wirkt dem allerdings, wie erhofft, entgegen. Dies wird durch die konstant bleibende Durchlaufzeit bestätigt. Eine deutliche Verbesserung ist bei den Lieferterminverfehlungen beobachtbar. Der Anhebung des Lieferterminranges führt zu dem erwünschten Ergebnis. So sind in dem Szenario Verbesserungen der Lieferterminverfehlungen um bis zu knapp 9 % möglich. Die Rüstzeit, Durchlaufzeit sowie Kapitalbindungskosten können dabei annähernd konstant gehalten werden.

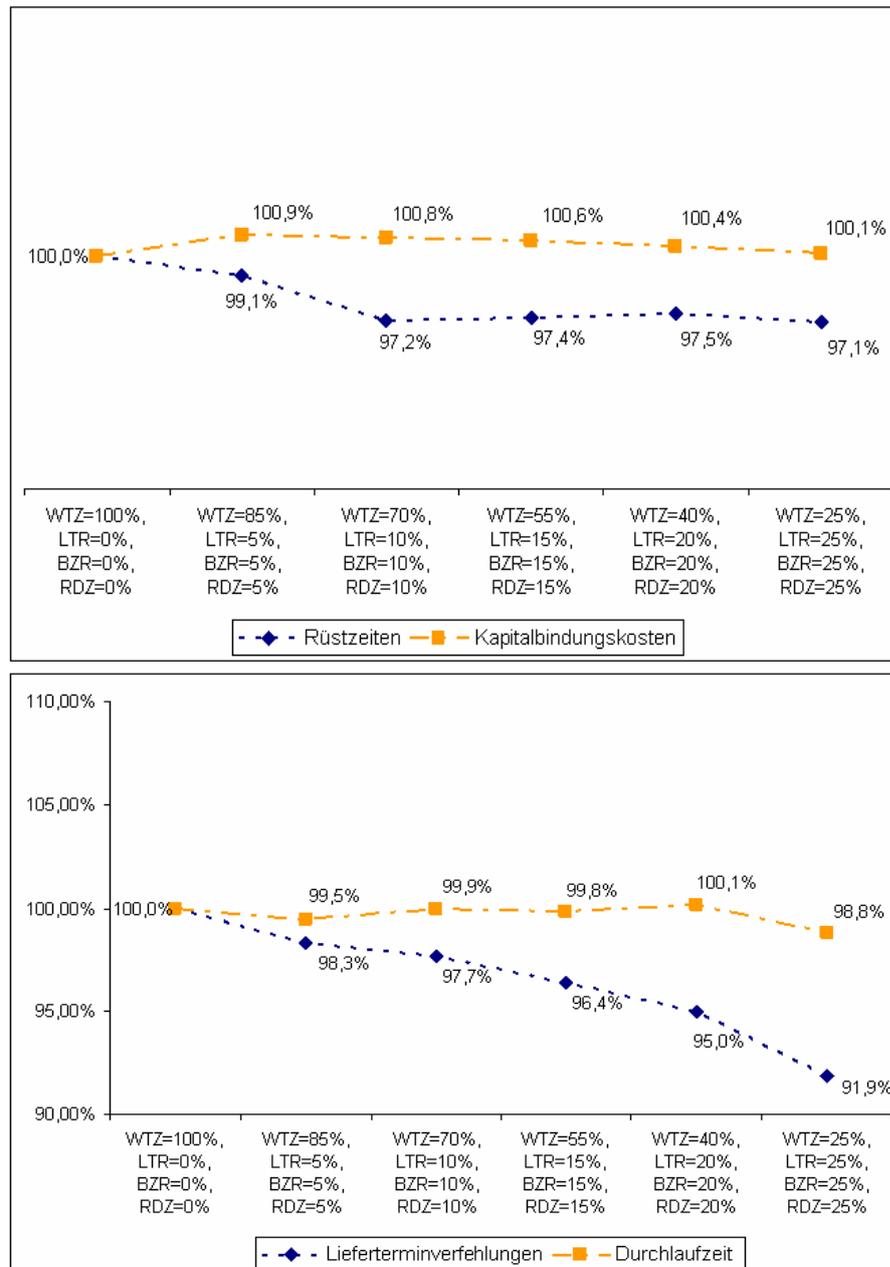


Abbildung 6-1: Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario I(a))

(WTZ= Wartezeitrang, LTR= Lieferterminrang, BZR= Bearbeitungszeitrang, RDZ= relativer Durchlaufzeitrang)

Im Rahmen von Szenario I(b) werden erneut lediglich die Kennzahlen berücksichtigt, welche dem Bereich Logistikleistung zuzuordnen sind. Als Referenzszenario wird dabei allerdings eine rüstzeitoptimierende Reihenfolgeplanung angenommen. Wiederum werden ausgehend von dem Referenzszenario (RAR= 100 %) die Gewichtungen der weiteren Kennzahlen schrittweise um 5 % erhöht. Abbildung 6-1 fasst die Ergebnisse zusammen. Die absoluten Größen der einzelnen Gewichtungsverteilungen finden sich in Anhang A7-A11.

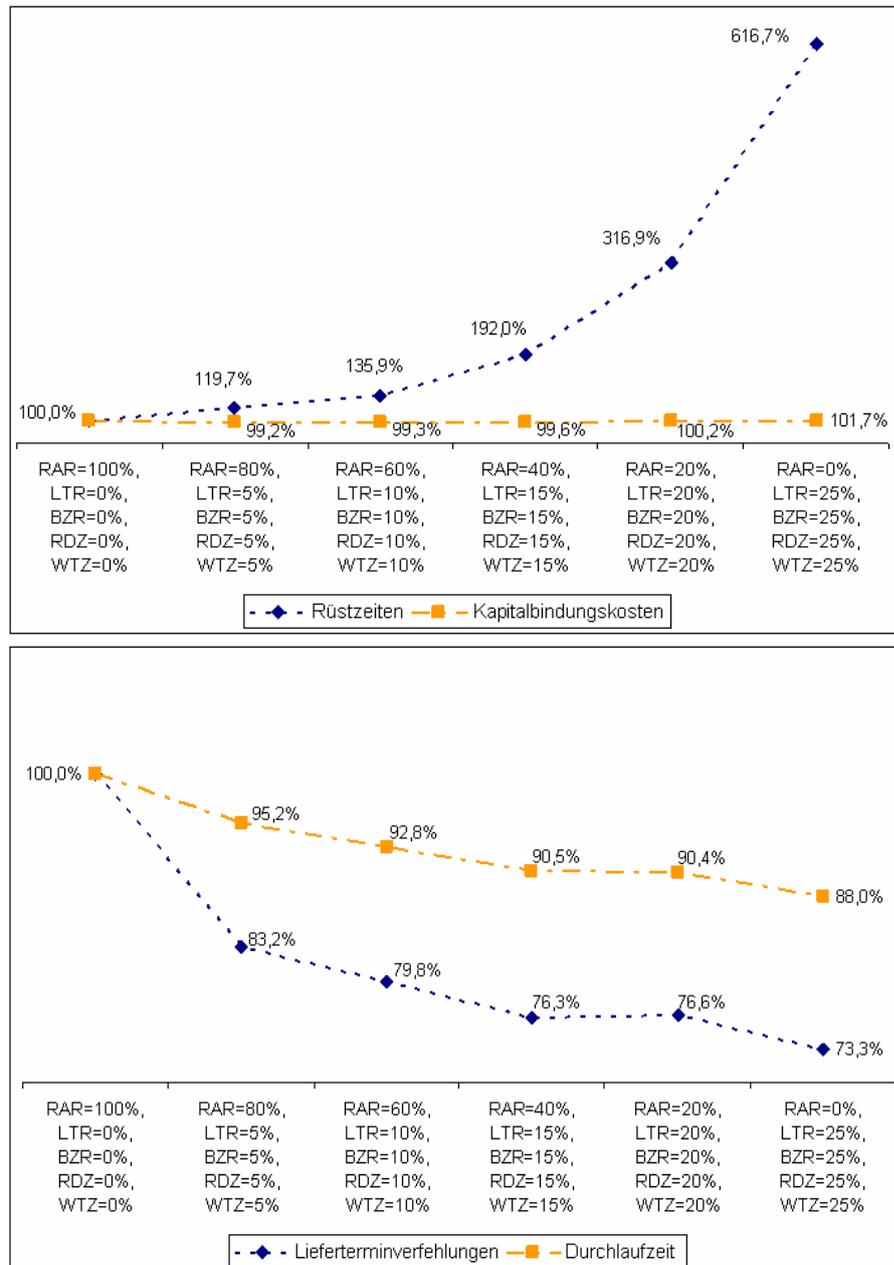


Abbildung 6-2: Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario I(b))

(RAR= Rüstaufwandsrang, WTZ= Wartezeitrang, LTR= Lieferterminrang, BZR= Bearbeitungszeitrang, RDZ= relativer Durchlaufzeitrang)

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verschlechterung der Rüstzeiten. Bei totaler Vernachlässigung des Rüstaufwandsranges erhöht sich die Rüstzeit im Vergleich zur Optimallösung um über 600 %. Aufgrund des Anhebens der Kennzahl „Wartezeitrang“ sowie „Durchlaufzeitrang“ kann die Durchlaufzeit jedoch um 12 % verbessert werden. Die Kapitalbindungskosten weisen dagegen einen konstanten Verlauf aus, was vor dem Hintergrund der Verbesserungen der Durchlaufzeit überrascht. Generell kann eine Verbesserung der

Durchlaufzeit auch zu einer Verbesserung der Kapitalbindungskosten beitragen. Es zeigt sich allerdings, dass dies nicht ausreichend ist und darüber hinaus für eine Verbesserung der Kapitalbindungskosten weitere Kennzahlen (bspw. Deckungsbeitragsrang) zu berücksichtigen sind. Aufgrund der in diesem Szenario betrachteten Zielsetzung einer reinen Leistungssteigerung, können konstante Kapitalbindungskosten allerdings als positiv beurteilt werden. Eine deutliche Verbesserung ist dagegen bei den Lieferterminverfehlungen beobachtbar. Diese konnten um über 26 % verbessert werden. Insgesamt zeigt sich, dass im Rahmen von Szenario I(b), mit Hilfe des Kennzahlenmodells Verbesserungen der Durchlaufzeit sowie der Lieferterminverfehlungen erreichbar ist. Demgegenüber steht erwartungsgemäß eine kräftige Verschlechterung der Rüstzeit.

6.2.3.2 Ergebnisse Szenario II

Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Szenarien wird in Szenario II(a) davon ausgegangen, dass mit Hilfe des Kennzahlenmodells eine Verbesserung der Logistikkosten erreicht werden soll. Aus diesem Grund werden lediglich die Kennzahlen einbezogen, welche im Zielsystem die kostenseitigen Zielgrößen beeinflussen. Als Referenzszenario dient zunächst wieder eine First-Come-First-Served Lösung. Davon ausgehend werden die weiteren betrachteten Kennzahlen schrittweise um 5 % erhöht. Der Verlauf der Bewertungsgrößen für dieses Szenario ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Die Ergebnisse aller Simulationdurchläufe der einzelnen Gewichtungverteilungen finden sich in Anhang A12-A16. Wiederum ist eine deutliche Reaktion der Rüstzeiten zu beobachten. Bei einer Gewichtung von 25 % des „Rüstaufwandsranges“ können die Rüstzeiten, im Vergleich zu einer First-Come-First-Served Lösung, um über 68 % gesenkt werden. Die Kapitalbindungskosten fallen dagegen lediglich marginal. Grund dafür sind die steigende durchschnittliche Durchlaufzeit (Steigerung um 18,3 %), welche sich als Folge der fallenden Bedeutung des „Wartezeitranges“ ergibt. Bemerkenswert ist allerdings, dass trotz dieser Steigerung der Durchlaufzeit die Kapitalbindungskosten zumindest leicht gesenkt werden können. Die Kennzahl „Deckungsbeitragsrang“ kann die steigende Durchlaufzeit offensichtlich kompensieren. Aufgrund der Vernachlässigung der Logistikleistung ergeben sich erwartungsgemäß Verschlechterungen der Lieferterminverfehlungen, wobei diese Verschlechterung das größte Ausmaß bei einer vollkommenen Nichtberücksichtigung des „Wartezeitranges“ annimmt. Zu erklären ist dies mit einer großen Zahl von Aufträgen, welche in diesem Fall im Vergleich zum Durchschnitt eine extrem hohe Wartezeit („Verhungern“) und dementsprechend sehr große Lieferterminverfehlungen aufweisen. Eine totale Nicht-

Berücksichtigung der Logistikleistung erscheint vor diesem Hintergrund nicht empfehlenswert.

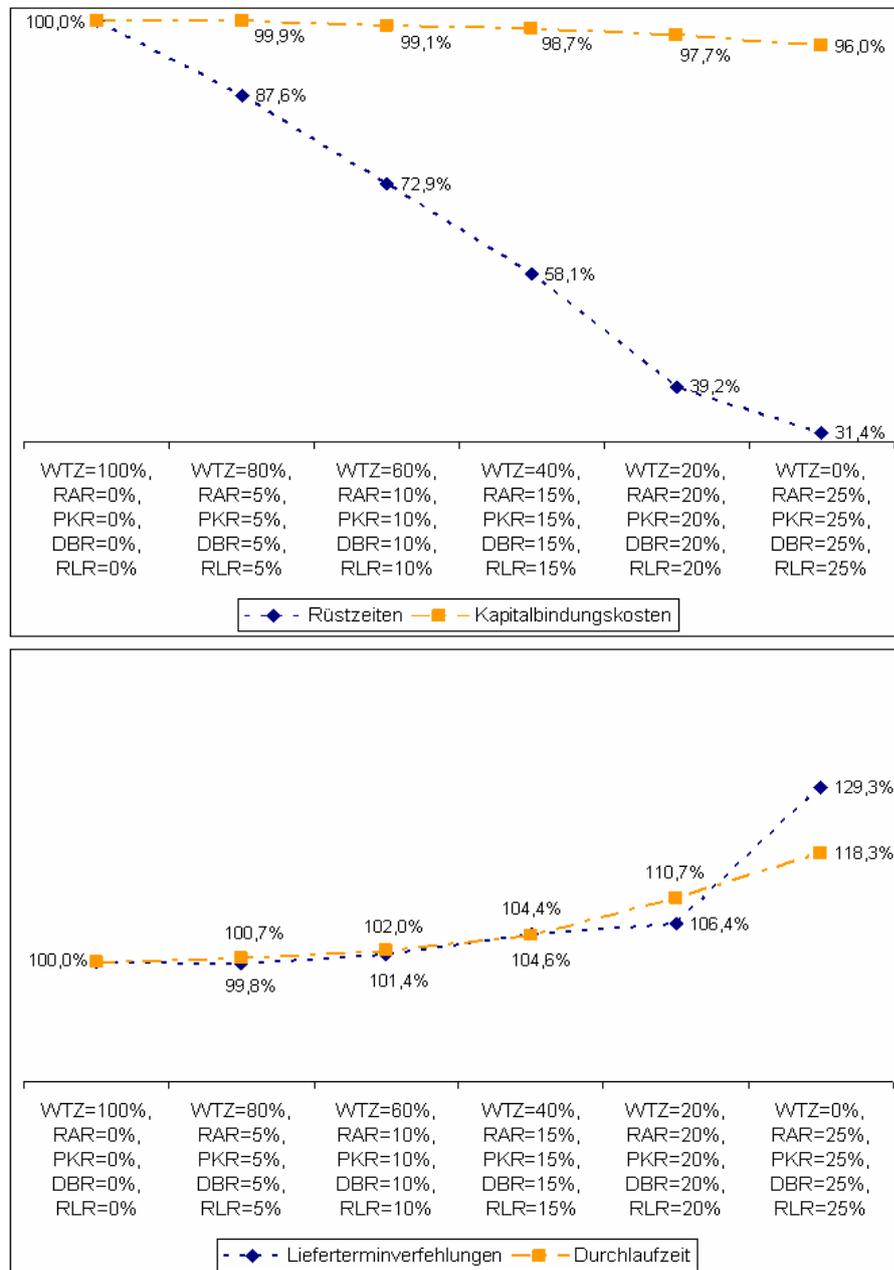


Abbildung 6-3:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario II(a))

(WTZ= Wartezeitrang, RAR= Rüstaufwandsrang, PKR= Personalkostenrang, DBR= Deckungsbeitragsrang, RLR= Ressourcenauslastungsrang)

Ausgehend von dem Referenzszenario einer rüstzeitoptimierten Reihenfolge werden in Szenario II(b) die kostenseitigen Kennzahlen sukzessive um 5 % gesteigert. Die Verläufe der Bewertungsgrößen sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Die absoluten Werte der einzelnen Simulationsdurchläufe finden sich in Anhang A17-A21.

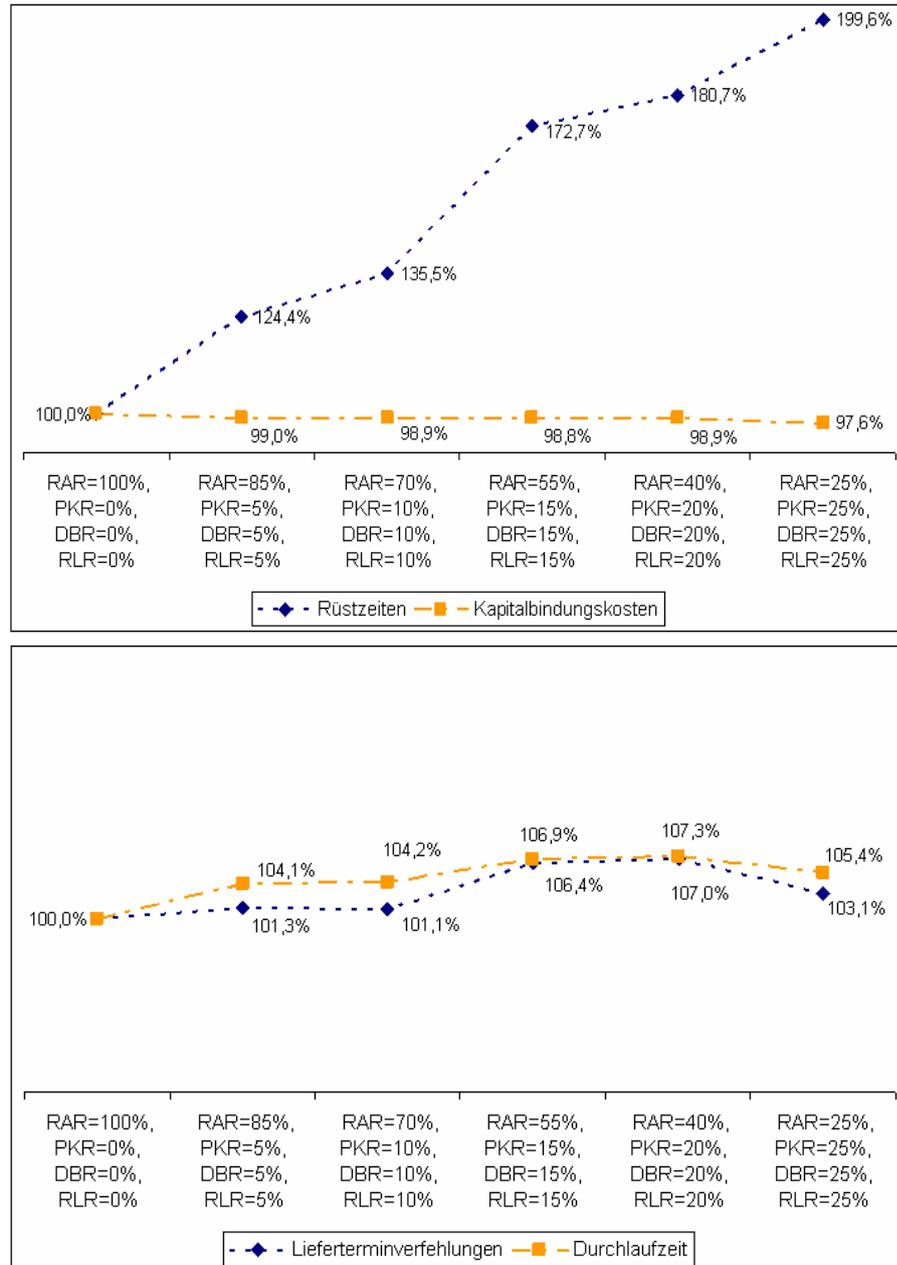


Abbildung 6-4: Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario II(b))

(RAR= Rüstaufwandsrang, PKR= Personalkostenrang, DBR= Deckungsbeitragsrang, RLR= Ressourcenauslastungsrang)

Es wird deutlich, dass die Rüstzeit sich bei einer Senkung des „Rüstaufwandsranges“ um 75 % knapp verdoppelt. Die Kapitalbindungskosten bleiben annähernd konstant, was darauf hindeutet, dass der „Deckungsbeitragsrang“ nicht alleine für eine deutliche Senkung der Kapitalbindungskosten sorgen kann. Diese dürften sich erst bei einer gleichzeitigen Senkung der Durchlaufzeiten einstellen, welche etwa durch Berücksichtigung des „Wartezeitranges“ sowie des „Durchlaufzeitranges“ erreichbar ist. Wie zu erkennen ist, bleibt, aufgrund der Nichtberücksichtigung dieser beiden Kennzahlen, die Durchlaufzeit eher

konstant (mit einer leicht steigenden Tendenz). Ein gleiches Bild zeigt sich für die Lieferterminverfehlungen. Dass diese beiden Bewertungsgrößen einen eher konstanten Verlauf annehmen, kann, aufgrund der Nichtberücksichtigung der Logistikleistung, zwar als positiv bewertet werden, festzustellen ist allerdings, dass sich beide Größen, absolut gesehen, auf einem sehr hohen Niveau bewegen.

6.2.3.3 Ergebnisse Szenario III

Bisher wurde davon ausgegangen, dass sämtliche eingehenden Aufträge in der Betrachtungszeit bearbeitet werden konnten. Im Folgenden wird diese Annahme aufgehoben und eine Situation betrachtet, in der lediglich ein Teil der angeforderten Aufträge fertig gestellt werden kann. Dieses Vorgehen dient zum einem der Validierung der bisherigen Ergebnisse und zum anderen zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit des Mechanismus im Rahmen einer Überlastsituation. Dafür werden zwei neue Bewertungsgrößen eingeführt. Ersten wird die Ressourcenauslastung ermittelt. Während diese bei vollständiger Abarbeitung aller Aufträge gleich bleiben muss, ist sie nun abhängig von den, in dem verkürzten Zeitraum bearbeiteten Auftragsstypen. Zweitens wird die Liefertreue berechnet, welche die Anzahl der im Betrachtungszeitraum fertig gestellten Aufträge repräsentiert. Dies ist insbesondere abhängig von den durchschnittlichen Bearbeitungszeiten der Aufträge.

Abbildung 6-5 fasst die Verläufe der Bewertungsgrößen für Szenario III(a) zusammen, während die absoluten Werte in Anhang A22-A27 zu finden sind. Die kostenseitigen Bewertungsgrößen (Rüstzeit, Kapitalbindungskosten, Ressourcenauslastung) erweisen sich als überwiegend konstant. Die drei Bewertungsgrößen, welche die Logistikleistung betreffen, zeigen dagegen alle eine positive Entwicklung auf. So können die Lieferterminverfehlungen um bis zu 13 % verringert werden. Gleichzeitig wird es, aufgrund der Steigerung der Kennzahl „Bearbeitungszeitrang“ möglich, die Liefertreue leicht (ca. 9 %) zu steigern. Ebenso kann eine Verbesserung der Durchlaufzeit beobachtet werden. Diese kann um bis zu 9 % verringert werden. Insgesamt ergeben sich für Szenario IIIa positive Ergebnisse: Während die kostenseitigen Bewertungsgrößen stabil gehalten werden können, ergeben sich für die Größen der Logistikleistung durchweg positive Entwicklungen.

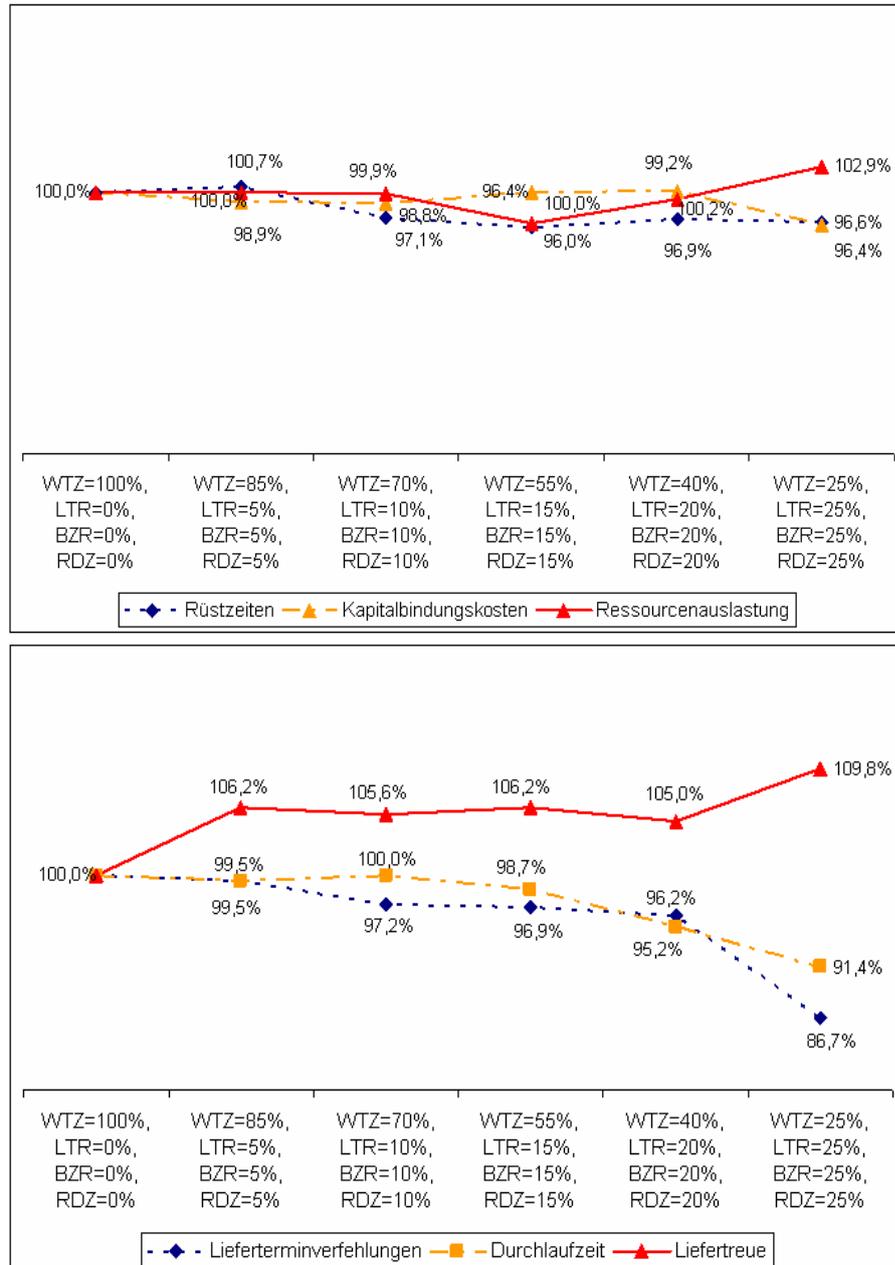


Abbildung 6-5: Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario III(a))

(WTZ= Wartezeitrang, LTR= Lieferterminrang, BZR= Bearbeitungszeitrang, RDZ= relativer Durchlaufzeitrang)

Im Rahmen von Szenario III(b) wird eine rüstzeitoptimierte Reihenfolgeplanung als Referenzszenario angenommen. Davon ausgehend werden wieder die Gewichtungen der Kennzahlen aus dem Bereich der Logistikkosten schrittweise um 5 % erhöht. Abbildung 6-6 fasst die Verläufe der Bewertungsgrößen zusammen. Die absoluten Werte der Simulationsdurchläufe finden sich in Anhang A28-A32.

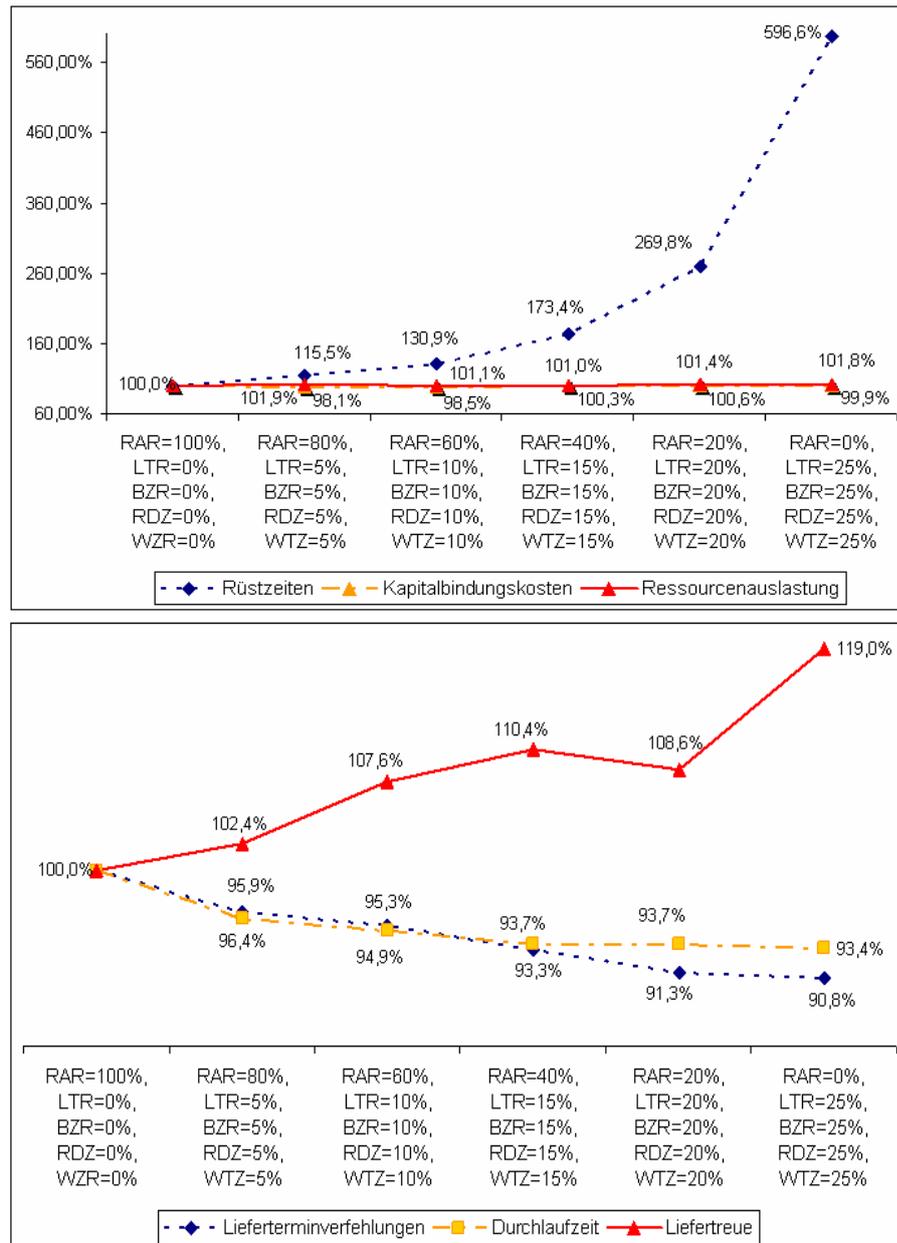


Abbildung 6-6:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario III(b))

(RAR= Rüstaufwandsrang, WTZ= Wartezeitrang, LTR= Lieferterminrang, BZR= Bearbeitungszeitrang, RDZ= relativer Durchlaufzeitrang)

Aufgrund des Absenkens der Kennzahl „Rüstaufwandsrang“ ist eine deutliche Steigerung der Rüstzeit feststellbar (Steigerung um ca. 600 %). Die Ressourcenauslastung bleibt dagegen erwartungsgemäß konstant. Ebenso ergeben sich für die Kapitalbindungskosten keine nennenswerten Veränderungen. Für die Bewertungsgrößen aus dem Bereich Logistikleistung ist dagegen eine positive Entwicklung zu beobachten. So sind Verringerungen der Durchlaufzeit von bis zu ca. 6,5 % erreichbar. Darüber hinaus können die Lieferterminverfehlungen um ca. 9 % verringert werden sowie die Liefertreue um bis zu 19 % gesteigert

werden. Im Rahmen von Szenario III(b) sind folglich deutliche Verbesserungen der Logistikleistung erreichbar. Demgegenüber steht allerdings eine drastische Steigerung der Rüstzeiten.

6.2.3.4 Ergebnisse Szenario IV

Ausgehend von einem First-Come-First-Served Referenzszenarios werden in Szenario IV(a) die kostenseitigen Kennzahlen sukzessive gesteigert. Abbildung 6-7 ist zu entnehmen, dass dadurch die Rüstzeiten um bis zu 72 % verringert werden können (die absoluten Werte aller Simulationsdurchläufe finden sich in Anhang A33-A37). Auch für die Ressourcenauslastung ist eine deutliche Verbesserung erkennbar. So kann diese durch die Berücksichtigung der Kennzahl „Ressourcenauslastungsrang“ um über 16 % gesteigert werden. Für die Kapitalbindungskosten ist dagegen lediglich ein leicht positiver Trend erkennbar (Verringerung um ca. 7 %). Für die Bewertungsgrößen Durchlaufzeit, Lieferterminverfehlungen sowie Liefertreue offenbaren sich annähernd konstante Entwicklungen. Dies kann als positiv bewertet werden, da die Zielsetzung der Verbesserung der Logistikkosten zumindest durch eine Verringerung der Rüstzeiten sowie einer Steigerung der Ressourcenauslastung erreicht werden konnte, ohne die Logistikleistung maßgeblich zu beeinträchtigen.

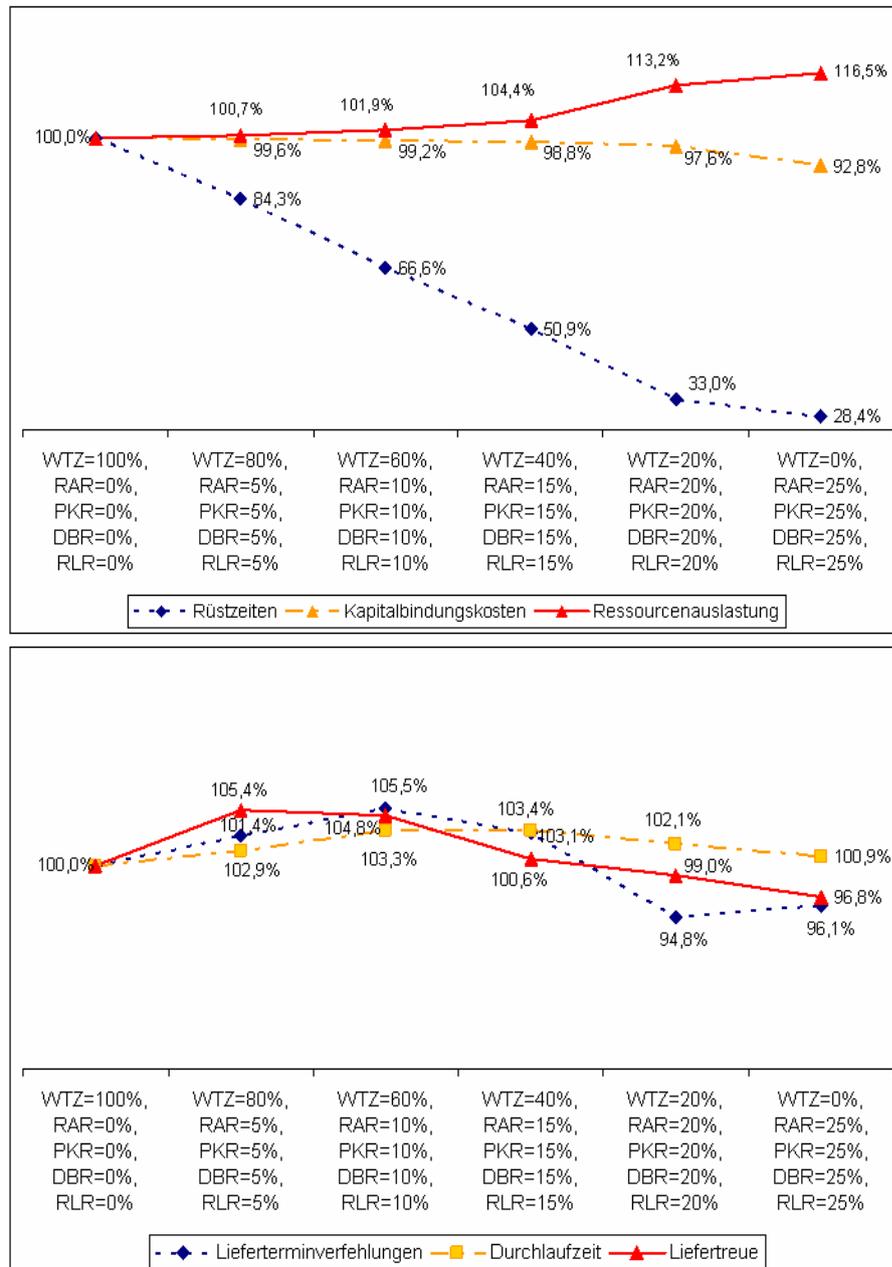


Abbildung 6-7:Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario IV(a))

(WTZ= Wartezeitrang, RAR= Rüstaufwandsrang, PKR= Personalkostenrang, DBR= Deckungsbeitragsrang, RLR= Ressourcenauslastungsrang)

Letztendlich wird in Szenario IV(b) eine Überlastsituation betrachtet, im Rahmen derer, ausgehend von einem rüstopptimierten Reihenfolgeplan, der Versuch unternommen wird mit Hilfe des Kennzahlenmodells die Kosten des Prozesses zu senken. Abbildung 6-8 stellt die Verläufe der Bewertungsgrößen dar. Die absoluten Werte der Simulationsdurchläufe finden sich in Anhang A38-A42.

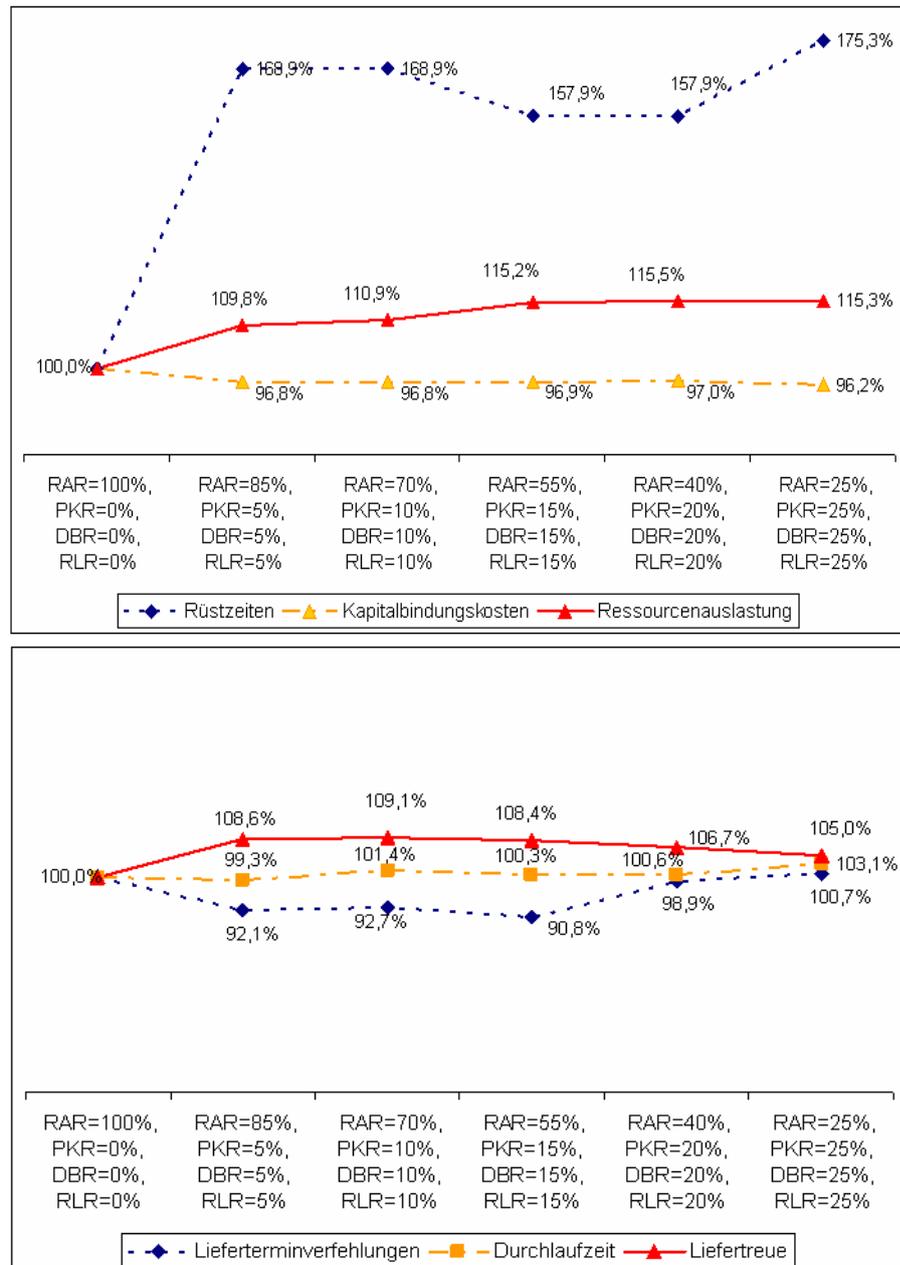


Abbildung 6-8: Ergebnisse der Simulationsstudie (Szenario IV(b))

(RAR= Rüstaufwandsrang, PKR= Personalkostenrang, DBR= Deckungsbeitragsrang, RLR= Ressourcenauslastungsrang)

Erwartungsgemäß zeigt sich aufgrund der Vernachlässigung der Kennzahl „Rüstaufwandsrang“ eine deutliche Verschlechterung der Rüstzeiten (Steigerung um ca. 75 %). Demgegenüber kann die Ressourcenauslastung allerdings um ca. 15 % verbessert werden. Die Kapitalbindungskosten bleiben allerdings trotz Anhebung der Kennzahl „Deckungsbeitragsrang“ annähernd konstant. Ebenso ergeben sich für die Bewertungsgrößen aus dem Bereich der Logistikleistung keine eindeutigen Entwicklungen. So zeigen sich zwar zwischenzeitlich z. T. deutliche Verbesserungen der Größen (Verbesserung der Liefertreue

und Lieferterminverfehlungen um bis zu 9 %), aufgrund der daran anschließenden eindeutigen negativen Entwicklung muss dies allerdings dem Zufall zugeordnet werden. Somit bleibt festzuhalten, dass im Rahmen von Szenario IV(b) Verbesserungen der Ressourcenauslastung möglich sind, welchen allerdings eine Verschlechterungen der Rüstzeit gegenüberstehen.

6.2.4 Bewertung

Die Durchführung des Simulationsexperiments hatte zwei Ziele: Erstens sollte gezeigt werden, dass durch das entwickelte System eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung (organisatorische und dispositive Koordinationsflexibilität) möglich wird. Zweitens sollte überprüft werden, ob somit auch betriebswirtschaftliche Leistungssteigerungen möglich werden.

Aus den durchgeführten Experimenten kann geschlossen werden, dass das System die Flexibilität der Reihenfolgeplanung steigern kann. Die organisatorische Koordinationsflexibilität kann durch eine Steigerung der Entscheidungsspielräume erhöht werden. Die Experimente haben für unterschiedliche Szenarien gezeigt, dass durch die Nutzung der verschiedenen Kennzahlen eine gezielte Beeinflussung der Reihenfolgebildung möglich wird. So wurde beispielsweise in Szenario I(b) deutlich, dass die dortige Zielsetzung einer Steigerung der Logistikleistung durch die Anhebung der entsprechenden Kennzahlen möglich ist (Verbesserungen der Durchlaufzeit sowie der Lieferterminverfehlungen). In Szenario II(a) konnte hingegen gezeigt werden, dass durch die Einbeziehungen der kostenseitigen Kennzahlen zumindest die Rüstzeiten signifikant gesenkt werden können. Im Rahmen dieses Szenarios zeigt sich allerdings auch eine Schwierigkeit des Mechanismus. Während die anderen betrachteten Bewertungsgrößen sehr elastisch auf eine Veränderung der entwickelten Kennzahlen reagieren, zeigen sich die Kapitalbindungskosten für die betrachteten Szenarien als wenig beeinflussbar. Eine deutliche Beeinflussung der Kapitalbindungskosten erscheint nicht durch die alleinige Veränderung der kostenseitigen Kennzahlen erreichbar (insbesondere des Deckungsbeitragsranges). Hierfür müssen auch Kennzahlen aus dem Bereich der Logistikleistung (insbesondere „Durchlaufzeitrang“ und „Wartezeitrang“) genutzt werden. Dennoch konnte für den überwiegenden Anteil der Bewertungsgrößen eine sehr elastische und nachvollziehbare Reaktion auf die Veränderung der Kennzahlen aufgezeigt werden, was als Nachweis für die Steigerung der Entscheidungsspielräume hinsichtlich der Steuerung der unterschiedlichen ökonomischen Ziele angesehen werden kann. Die

dispositive Koordinationsflexibilität wurde im Rahmen der Simulation zwar nicht explizit getestet. Erstens kann aber durch den Nachweis der Funktionsfähigkeit des (dezentralen) Kennzahlenmodells darauf geschlossen werden, dass das angestrebte Kriterium der Dezentralisierung realisiert werden kann. Zweitens lag, bei der Durchführung der Experimente, die Ermittlungsdauer der Reihenfolge im Sekundenbereich¹²⁷, woraus geschlossen werden kann, dass keine Unterbrechung der operativen Tätigkeit bei Einsatz des Mechanismus zu erwarten ist.

Aus dem Nachweis der Steigerung der Flexibilität kann allerdings nicht zwangsläufig auf die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des Systems geschlossen werden. Die Simulationsstudie hatte deshalb ebenfalls das Ziel eine ökonomische Bewertung der Konsequenzen, welche aus der Veränderung der Kennzahlen resultieren, vorzunehmen. Insgesamt ergibt sich ein positives Bild der möglichen betrieblichen Leistungssteigerungen. Allerdings müssen die verschiedenen Szenarien unterschiedlich bewertet werden. So konnte etwa nachgewiesen werden, dass Unternehmen, welche aktuell eine First-Come-First-Served Lösung realisieren, durch die Anwendung der Kennzahlen aus dem Bereich der Logistikleistung (Szenario I(a)) Verbesserungen der Lieferterminverfehlungen um bis zu knapp 9 % realisieren können, ohne dabei eine Verschlechterung der Rüstzeit, Durchlaufzeit und Kapitalbindungskosten erfahren zu müssen. Eine Umsetzung ist in diesem Fall empfehlenswert. Wird die Zielsetzung hinsichtlich einer Verbesserung der Logistikkosten (Szenario II(a)) verändert, konnte gezeigt werden, dass durch die Anhebung der kostenseitigen Kennzahlen die Rüstzeiten um über 68 % gesenkt werden können. Demgegenüber stehen in diesem Fall allerdings Verschlechterungen der Durchlaufzeit (Steigerung um 18,3 %) sowie der Lieferterminverfehlungen (Steigerung um 29 %). Eine Entscheidung zwischen diesem (vermuteten) Zielkonflikt kann nur unter Kenntnis der Unternehmensstrategie und/oder dem aktuellen Umweltzustand getroffen werden. Dieser Zielkonflikt ergibt sich ebenso, wenn man von einer rüstzeitoptimierten Reihenfolgeplanung ausgeht. Bei Anhebung der Kennzahlen aus dem Bereich der Logistikleistung (Szenario I(b)) sind Verbesserungen der Lieferterminverfehlungen um über 26 % sowie Verbesserungen in der Durchlaufzeit um 12 % möglich. Demgegenüber steht allerdings eine sechsfache Steigerung der Rüstzeit. Bei Anhebung der kostenseitigen Kennzahlen (Szenario II(b)) zeigt sich dagegen ein durchweg negatives Bild. So bleiben die Kapitalbindungskosten annähernd konstant, während die Rüst-

¹²⁷ Zu erklären ist diese schnelle Ermittlungszeit mit der Realisierung einer „Greedy“ Strategie (vgl. Kapitel 5.1.1.2).

zeiten sich verdoppeln¹²⁸. Die Experimente im Rahmen des Modells mit einer Überlastsituation weisen insgesamt deutlichere betriebliche Leistungssteigerungen auf. Ausgehend von einer First-Come-First-Served Lösung sind bedeutende Leistungssteigerungen erreichbar (Szenario III(a)). So können die kostenseitigen Bewertungsgrößen stabil gehalten werden, während die Lieferterminverfehlungen (-14 %), die Liefertreue (+ 9 %) und die Durchlaufzeit (+ 9 %) verbessert werden. Auch bei Zielsetzung einer Kostenreduzierung (Szenario IV(a)) ist der Einsatz der entsprechenden Kennzahlen zu empfehlen: Die Zielsetzung „Verbesserung der Logistikkosten“ kann durch eine Verringerung der Rüstzeiten (-70 %) sowie einer Steigerung der Ressourcenauslastung (+16 %) erreicht werden, ohne die Logistikleistung maßgeblich zu beeinträchtigen. Ausgehend von einer rüstopptimierten Reihenfolgeplanung zeigen sich erwartungsgemäß jeweils Verschlechterungen der Rüstzeiten. Allerdings verdeutlichen sich auch große Verbesserungspotentiale: So kann die Logistikleistung in Form einer Verringerungen der Durchlaufzeit (- 6,5 %), einer Verringerung der Lieferterminverfehlungen (- 9 %) sowie einer Steigerung der Liefertreue (+ 19 %) gesteigert werden (Szenario III(b)). Demgegenüber steht eine sechsfach größere Rüstzeit. Bei Zielsetzung „Kostenreduzierung“ zeigen sich Optimierungspotentiale (Szenario IV(b)) in Form einer Steigerung der Ressourcenauslastung (+ 15 %). Die Rüstzeit steigt in diesem Fall dagegen um 75 %. Aufgrund der gegenläufigen Zielgrößen ist in beiden Fällen ohne Kenntnis der Unternehmensstrategie wieder keine eindeutige Empfehlung auszusprechen. Allerdings erscheinen die betrieblichen Leistungssteigerungen im Rahmen der Überlastsituation insgesamt zu überwiegen.

Insbesondere vor dem Hintergrund der beschriebenen zunehmenden Dynamisierung der Märkte¹²⁹ ist die Umsetzung des Systems zu empfehlen. Unternehmen müssen über ein Flexibilitätspotential verfügen, um adäquat auf die sich stetig ändernden und diversen Umweltbedingungen reagieren zu können (Brehm 2003, S. 87; Sanchez 1995). Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermöglicht die Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung für Kanban-basierte Produktionssteuerungssysteme, indem er eine Beeinflussung der Reihenfolgebildung hinsichtlich der verschiedenen logistischen Zielgrößen erlaubt. Je nach

¹²⁸ Zu erklären ist dieses negative Ergebnis mit der bereits beschriebenen unelastischen Reaktion der Kapitalbindungskosten.

¹²⁹ So wurde in der, von der Bundesvereinigung der Logistik (BVL), durchgeführten Studie „Trends and Strategies in Logistics - Agenda for Logistics Management in 2010“ (Straube et al. 2006) festgestellt, dass 68 % der untersuchten Unternehmen aus dem verarbeitenden Gewerbe mit einer stark ansteigenden Volatilität der Nachfrage in den letzten fünf Jahren konfrontiert waren.

Unternehmensstrategie und/oder aktuellem Umweltzustand werden Anpassungen möglich. Die daraus resultierenden betrieblichen Leistungssteigerungen umfassen sowohl Steigerungen der Logistikleistung, als auch Senkungen der Logistikkosten. Dabei ergeben sich die deutlichsten Optimierungsmöglichkeiten in Situationen, in denen die betrachtete Fertigungsstufe eine Überlastung erfährt und nur einen Teil der angeforderten Aufträge bearbeiten kann.

7 Einsatzhindernisse von RFID-gestützten Informationssystemen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Nutzenpotentiale mit Hilfe eines Simulationsexperimentes aufgezeigt wurden, werden nachfolgend die Einsatzhindernisse des Systems untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass die bedeutendsten Hindernisse der Umsetzung beim betrieblichen Einsatz von RFID zu suchen sind. So stellt RFID nach wie vor eine „junge“ Technologie dar, für die der überwiegende Anteil der Unternehmen keine praktische Erfahrung aufweist. Das Hauptaugenmerk liegt daher auf der Analyse der Einsatzhindernisse der RFID-Technologie. Es sei aber darauf hingewiesen, dass neben diesen RFID-spezifischen Hürden weiter organisatorische sowie kostenseitige Einsatzhindernisse existieren. Beispielsweise wäre der Einsatz des Systems sinnlos, sollten Personal und Management nicht auch die Bereitschaft zu einer Anpassung an eine sich verändernde Umwelt haben (fehlende Strukturflexibilität). Darüber hinaus entstehen bei der Implementierung des Mechanismus in den operativen Betrieb zusätzliche Kosten für die Beschaffung und Programmierung der elektronischen Kanban-Tafel. Im Vergleich zu dem RFID-System machen diese Kosten allerdings einen nur geringfügigen Anteil aus.

Um die wesentlichen Hürden des Einsatzes von RFID zu ermitteln wurde eine Umfrage durchgeführt, im Rahmen derer RFID-Anwender eine Auswahl¹³⁰ potentieller Einsatzhindernisse auf einer Fünfer-Skala von 1= „hohe Bedeutung“ bis 5= „keine Bedeutung“ zu bewerten hatten. Die Parameter der Umfrage sind Tabelle 2-1 zu entnehmen. Abbildung 7-1 fasst die Hürden und die entsprechenden Bewertungen der Befragten zusammen. Nachfolgend werden diese Hürden in vier Gruppen zusammengefasst (Integrationshürden, Kosten-Nutzen Hürden, Qualitätshürden sowie mitarbeiterbezogenen und rechtliche Hürden¹³¹) und bezüglich der Bedeutung für das entwickelte System sowie der Bewertung der Anwender analysiert.

¹³⁰ Die Hürden wurden auf Grundlage von zahlreichen Expertengesprächen (bspw. mit der Dematic GmbH, Metro AG, SICK AG) und einer ausführlichen Literaturrecherche ausgewählt.

¹³¹ Eine ähnliche Einteilung der Einsatzhindernisse neuer (Mobilitäts-) Technologien findet sich bspw. auch in (Faupel 2006, S. 57; Faupel & Sackmann 2005, S. 17; Prokein, Faupel & Gille 2007, S. 245).

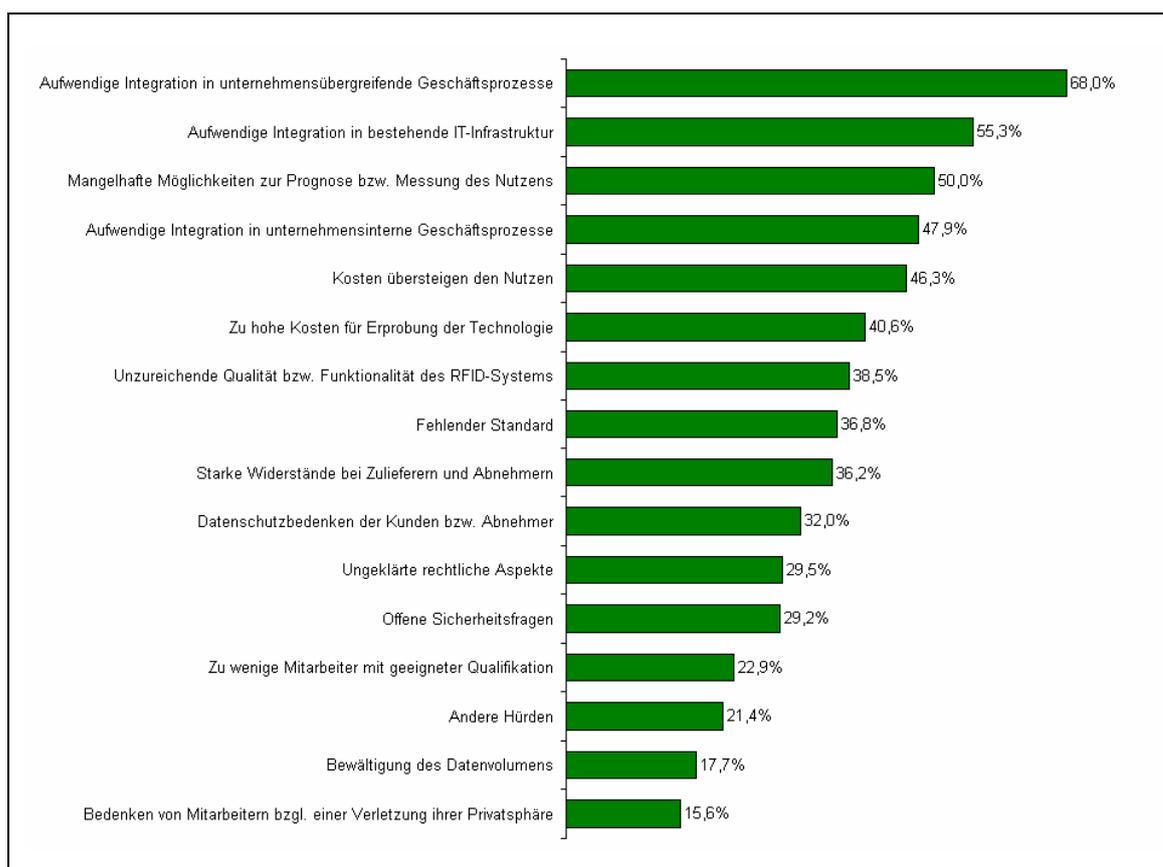


Abbildung 7-1: Hürden beim Einsatz der RFID-Technologie in Deutschland
(Nur Anwender, Summe „hohe“ und „eher hohe“ Bedeutung, n=105)¹³²

7.1 Integrationshürden

Unter dem Begriff „Integrationshürden“ werden die Hürden: „Aufwendige Integration in unternehmensinterne Geschäftsprozesse“, „Aufwendige Integration in bestehende IT-Infrastruktur“, „Aufwendige Integration in unternehmensübergreifende Geschäftsprozesse“ sowie „Starke Widerstände bei Zulieferern und Abnehmern“ zusammengefasst. Aus Abbildung 7-1 ist zu entnehmen, dass die Integrationshürden von den Anwendern insgesamt als bedeutsamste Hürden eingeschätzt werden. So sehen die Befragten die Hürden „Aufwendige Integration in unternehmensinterne Geschäftsprozesse“ (68,0 %) sowie „Aufwendige Integration in bestehende IT-Infrastruktur“ (55,3 %) als die beiden bedeutendsten Hindernisse beim Einsatz von RFID an.

¹³² Vergleiche auch (Strüker, Gille & Faupel 2008, S. 26).

Probleme der Integration von Informationstechnologie in unternehmensinterne Geschäftsprozesse ergeben sich in der Regel aufgrund neuer bzw. veränderter Aufgabenstellungen der Mitarbeiter. So wurde in der Vergangenheit häufig beobachtet, dass aufgrund von Widerständen der Organisationsmitglieder, welche aufgrund der Veränderungen der Aufgabenstellung induziert werden, häufig nur eine unvollständige Ausnutzung von Produktivitätspotenzialen erreicht werden konnte (Martins & Kambil 1999, S. 652; Pennings & Harianto 1992, S. 29; Pijpers & van Montfort 2005, S. 542). Dieses Phänomen kann mit Hilfe der Theorie des „Organisatorischen Konservatismus“ erklärt werden (Child, Ganter & Kieser 1987, S. 87). Im Rahmen des entwickelten Systems sind solche Widerstände allerdings kaum zu erwarten. Insgesamt sind die Veränderungen der Aufgabenstellung der Mitarbeit als nicht gravierend anzusehen. Eine Veränderung des Arbeitsablaufes ergibt sich lediglich aufgrund der Notwendigkeit, die mit RFID ausgestattete Kanban-Karte vor Beginn der Produktion zu beschreiben. Einen Anhaltspunkt, dass dies kein nennenswertes Hindernis darstellt, bietet das Beispiel des RFID-gestützten Kanban Systems bei Bosch (vgl. dazu Kapitel 5.2.1). Die Bosch GmbH hat im Werk Eisenach ihre komplette Produktion auf ein RFID-gestütztes Kanban Systems umgestellt und sämtliche Kanban-Karten mit RFID-Transpondern ausgestattet. Auch dort müssen bei Eintreffen eines neuen Auftrages zunächst die mit RFID ausgestatteten Kanban-Karte mit den erforderlichen Daten beschrieben werden. Dazu wird die Kanban-Karte auf einem RFID-Lesegerät der Firma FEIG Electronic gelegt und beschrieben. Diese für die Mitarbeiter der Produktion neue Aufgabenstellung stellte nach Aussagen von Bosch kein bedeutendes Problem dar. Zwar wurden Mitarbeiterschulungen notwendig, der durch das RFID-System entstehende Nutzen konnte diese Kosten aber mehr als kompensieren (Logistik heute 2007, S. 26). Mitarbeiterschulungen sind auch im vorliegenden Fall zu empfehlen.

Die Notwendigkeit, die mit RFID ausgestattete Kanban-Karte vor Beginn der Produktion zu beschreiben, betrifft ebenso das Problem der Integration in die bestehende IT-Infrastruktur. So müssen die benötigten Informationen den RFID Schreibgeräten zur Verfügung gestellt werden, was letztendlich die Anbindung an übergeordnete Informationssysteme notwendig macht. Für die Anbindung an die bestehende IT-Infrastruktur existieren aber mittlerweile ausgereifte Lösungen. So erlaubt etwa die SAP Auto-ID Infrastructure eine vollständige Integration von RFID-Lesegeräten und –Druckern (SAP 2008). So erscheint diese Hürde aus technischer Sicht als wenig bedeutsam. Zu beachten sind die zusätzlichen Investitionskosten für die Anbindung an die bestehende IT-Infrastruktur.

Das Problem der Integration in unternehmensübergreifende Geschäftsprozesse, welches für 47,9 % der RFID-Anwender in Deutschland ein bedeutendes Problem darstellt, ist für den Mechanismus nicht von Bedeutung. Zwar wird Kanban häufig unternehmensübergreifend eingesetzt, allerdings erfordert es der Einsatz des Mechanismus nicht, den Prozess der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit anzupassen. Auch bei Nichteinsatz des Mechanismus müssen die Spezifikationen der angeforderten Aufträge (bspw. Liefertermin) im Vorhinein ausgehandelt werden. Aus diesem Grund stellen Widerstände der Zulieferer und Abnehmer ebenfalls kein Einsatzhindernis dar.

Insgesamt stellen die Integrationshürden kein unüberwindliches Hindernis für die Einführung des vorgestellten Systems dar. Zu beachten sind allerdings zusätzliche Investitionen in Mitarbeiterschulungen sowie Technologien zur Anbindung an die bestehende IT-Infrastruktur.

7.2 Kosten-Nutzen Hürden

Unter den „Kosten-Nutzen Hürden“ werden die Hürden: „Kosten übersteigen den Nutzen“, „Zu hohe Kosten für Erprobung der Technologie“ sowie „Mangelhafte Möglichkeiten zur Prognose bzw. Messung des Nutzens“ zusammengefasst. Die Hürde „Kosten übersteigen den Nutzen“ wird von den befragten Anwendern als fünftwichtigste Hürde eingeschätzt (46,3 %). Die Kosten stellen selbstverständlich auch für das vorgeschlagenen System einen nicht unerheblichen Faktor dar. Dabei dürften in erster Linie die Transponderkosten zu beachten sein. In den letzten Jahren ist allerdings ein stetiger Preisverfall zu beobachten, was dem Masseneinsatz von RFID heutzutage möglich macht. So kostete ein passiver RFID-Transponders im Jahre 2004 noch knapp 50 Euro Cent (Strüker 2005, S. 138), während im Jahr 2008 Transponder schon zu einem Preis von 11,7 Euro Cent erhältlich sind¹³³. Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, dass im betrachteten Fall die RFID-Transponder in einem geschlossenen Kreislauf zirkulieren und somit deren Wiederverwendbarkeit sichergestellt werden kann, wodurch die Transponderkosten niedrig gehalten werden können. Durch die Verwendung einer HF oder UHF – Lösung, welche aktuell eine stark ansteigen-

¹³³ Der Preis von 11,7 Euro Cent gilt für den Hersteller UPM Raflatec bei einer Abnahmemenge von 3,8 Millionen Stück.

de Verbreitung erfahren¹³⁴, ist darüber hinaus zu erwarten, dass die Preise der benötigten Transponder in Zukunft weiter fallen werden. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Kosten des RFID-Systems den, in Kapitel 6.2.3 nachgewiesenen Nutzen, nicht überschreiten. Ein Hinweis darauf, dass die Kosten des RFID-Systems kein unüberwindbares Hindernis darstellen, gibt wiederum das Beispiel der Bosch GmbH. Obwohl die Bosch GmbH durch die Ausstattung sämtlicher Kanban-Karten mit RFID ökonomische Vorteile lediglich aus einer automatisierten Informationssammlung und der daraus resultierenden Vermeidung händischer Tätigkeit bezieht, wird die Amortisationszeit der RFID-Kanban Lösung auf unter ein Jahr geschätzt. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene RFID-Kanban Lösung geht weit über die reine Automatisierung hinaus, wobei die Kosten des RFID-Systems nicht höher einzuschätzen sind. Die erreichbaren Nutzensteigerungen (bspw. Reduzierung von Lieferterminverfehlungen) dürften die Bosch-Lösung dagegen deutlich übertreffen.

Aus Abbildung 7-1 wird deutlich, dass die Nutzenmessung und –bewertung von RFID von den befragten RFID-Anwendern, als bedeutendes Problem angesehen wird. Das Problem der Messung und Bewertung erzielbarer Performance-Steigerung wird häufig unterschätzt. Welche Bedeutung die Messung und Bewertung aber hat, zeigt sich an der relativen und absoluten Gewichtung durch die RFID-Anwender: Die Hürde „Mangelhafte Möglichkeiten zur Prognose bzw. Messung des Nutzens“ ist die drittbedeutsamste überhaupt und 50 % der RFID-Anwender messen ihr eine „hohe“ und „eher hohe“ Bedeutung zu. Das Problem der Nutzenermittlung wurde in dieser Arbeit mit Hilfe einer Simulationsstudie gelöst. Zu beachten ist allerdings, dass dies einen sehr aufwendigen Weg der Nutzenermittlung darstellt. Grundsätzlich fehlen geeignete und flexibel einsetzbare Verfahren und Instrumenten, um eine angemessene Kosten- und Nutzenbewertung von RFID-Investitionen sowohl ex ante als auch ex post vornehmen zu können (Gille & Strüker 2008).

Ein weiteres, offensichtlich nicht zu unterschätzendes Problem, stellen die hohen Kosten für Erprobung der Technologie dar. 40,6 % der Anwender sehen dies als bedeutende Hürde an. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 dargelegt, sind die RFID-Komponenten relativ anfällig für verschiedene Störungen (bspw. Übertragungsfehlern) bei ungünstigen Umgebungseinflüssen. So sind Systeme, welche im LF sowie UHF-Bereich arbeiten anfällig gegenüber leitfähigen Materialien (bspw. Metall) in ihrer Umgebung. Flüssigkeiten oder organischen

¹³⁴ So wurde im Rahmen der durchgeführten Umfrage festgestellt, dass ca. 87 % der RFID-Anwender eine HF oder UHF – Lösung einsetzen.

Materialien in der Umgebung führt dagegen bei Systemen aus dem UHF- und SHF-Bereich zu starken Absorptionen der elektromagnetischen Wellen und damit zu einer bedeutenden Verringerung der Lesereichweite (Lampe, Flörkemeier & Haller 2005, S. 82). Aus diesem Grund wird es notwendig, die RFID-Komponenten daraufhin zu testen, ob diese, unter den in dem (unternehmensindividuellen) Produktionsprozess vorherrschenden Umweltbedingungen, die notwendigen technischen Funktionalitäten (bspw. Lesereichweite) aufweisen. Diese Tests stellen naturgemäß zusätzliche Kosten dar. Eine Möglichkeit diese Kosten zu beschränken, ist die Nutzung von RFID Testlaboren. So sind mittlerweile verstärkt Bestrebungen zu erkennen, unabhängige Testlabore aufzubauen, in welchen RFID-Anwendungen unter verschiedenen Umweltbedingungen erprobt werden können. Beispielsweise wird in dem vom BMBF-geförderte Projekt „Identprolog“¹³⁵ der Universität Stuttgart und der Leibniz-Universität Hannover ein neuartiger RFID-Versuchsstand konstruiert und in diverse Logistik-Versuchshallen der Universität Stuttgart eingebaut. Solche Testlabors, bieten eine, im Vergleich zu einem selbstentwickelten Prototypen, kostengünstige Möglichkeit, RFID-Anwendungen zu erproben.

Insgesamt ist zu erwarten, dass Kosten-Nutzen Hürden keine bedeutenden Hindernisse für das System darstellen. Die Nutzenpotentiale wurden im Rahmen der Simulationsstudie bereits aufgezeigt. Aufgrund stetig fallender Transponderpreise, der Möglichkeit der Wiederverwendbarkeit der Transponder sowie der Möglichkeit der Erprobung RFID-Anwendungen durch unabhängige Instanzen, ist davon auszugehen, dass diese Nutzenpotentiale die Kosten übertreffen werden.

7.3 Qualitätshürden

Unter Qualitätshürden werden eine unzureichende Qualität bzw. Funktionalität von RFID-Systemen, fehlende Standards, Probleme der Bewältigung des Datenvolumens sowie offene Sicherheitsfragen zusammengefasst. Insgesamt 38,5 % der RFID-einsetzenden Unternehmen geben an, die Qualität bzw. Funktionalität der RFID-Systeme sei unzureichend. Weitere 36,8 % der RFID-Anwender mahnen fehlende Standards an. Somit stellt die technische Reife der angebotenen RFID-Systeme sowie die Spezifizierung nach einem gängigen Standard für über 60 % der RFID-Anwender keine Hürde von hoher Bedeutung dar.

¹³⁵ Vgl. www.identprolog.de.

Auch der relative Vergleich zeigt, dass beide Hürden erst an 7. bzw. 8. Stelle der bedeutendsten Hürden auftauchen. Hierbei ist anzumerken, dass die befragten Unternehmen RFID-Anwender sind und daher von Erfahrungen sprechen, die sie aktuell machen oder bereits gemacht haben. Insgesamt kann daraus geschlossen werden, dass RFID-Systeme mittlerweile eine Marktreife erreicht haben, welche einen betrieblichen Einsatz unproblematisch erscheinen lassen.

Offene Sicherheitsfragen werden von den Anwendern als relativ unbedeutende Hürde angesehen. Lediglich 29,2 % messen dieser Hürde eine hohe bzw. sehr hohe Bedeutung zu. Dieses Problem wird allerdings voraussichtlich an Bedeutung gewinnen, sobald Transponder in ausreichender Zahl vorliegen, die einem der prominenten Standards folgen und deutlich mehr Speicherkapazität als heutige Transponder aufweisen. Die Nutzung von Informationstechnologie führt in der Regel immer auch zu Sicherheits- und Datenschutzbedenken, die durch organisationelle oder technische Regelungen zu adressieren sind.¹³⁶ Auch RFID wird hier keine Ausnahme bilden. Beispielsweise sind nicht-authorisierte Zugriffe auf den Transponder denkbar. Dies stellt eine ernsthafte Bedrohung dar, da ein Angreifer mit Zugriff auf die Transponder ihre Funktionalitäten kontrollieren und damit auch gezielt stören kann. Die Antwort auf diese Form der Gefährdung besteht heute überwiegend darin, eine wirkungsvolle Zugangskontrolle anzustreben. Der bislang prominenteste RFID Industriestandard EPC Class1 Gen2, dessen Spezifikationen insbesondere die überbetriebliche und globale Nutzung zum Ziel hat, sieht beispielsweise einen Passwort-Schutz vor.¹³⁷ Offenen Sicherheitsfragen ergeben sich allerdings vornehmlich, sobald diese Technologie in betriebsübergreifenden Wertschöpfungsketten eingesetzt wird bzw. RFID-Transponder auch nach Abverkauf am Produkt verbleiben (Strüker 2005, S. 135). Im Rahmen der rein innerbetrieblichen Nutzung ergeben sich weit weniger Zugriffsmöglichkeiten Dritter, was das Sicherheitsproblem deutlich einschränkt. Sicherheitsfragen stellen somit kein bedeutendes Einsatzhindernis für RFID im Rahmen des vorgestellten Systems dar.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei der Realisierung des Systems keine bedeutenden Qualitätshürden zu erwarten sind. So zeigen die Ergebnisse der Umfrage, dass die Marktreife von RFID-Systemen einem betrieblichen Einsatz nicht im Wege steht. Darüber

¹³⁶ Für eine Analyse von IT-Sicherheitsproblemen sowie Lösungsansätze vergleiche beispielsweise (Müller, Eymann & Kreutzer 2003, S. 406; Prokein 2008, S. 79).

¹³⁷ Für eine Analyse der Sicherheitsfragen bei RFID-Systemen sowie einem weitergehenden Sicherheitskonzept vgl. (Strüker, Gille, Wonnemann 2007).

hinaus stellen für die Anwender offene Sicherheitsfragen kein beachtliches Einsatzhindernis dar. Bei einem rein innerbetrieblichen Einsatz, wie es im Rahmen des Systems vorgesehen ist, ist das Sicherheitsproblem ohnehin deutlich eingeschränkt.

7.4 Mitarbeiterbezogene und rechtliche Hürden

Unter mitarbeiterbezogenen und rechtlichen Hürden werden Bedenken von Mitarbeitern bzgl. einer Verletzung ihrer Privatsphäre, zu wenige Mitarbeiter mit geeigneter Qualifikation, ungeklärte rechtliche Aspekte sowie Datenschutzbedenken der Kunden bzw. Abnehmer zusammengefasst.

Insgesamt werden diese Hürden von den befragten RFID-Anwendern als wenig problematisch angesehen. Die Hürden „Datenschutzbedenken der Kunden bzw. Abnehmer“ sowie „ungeklärte rechtliche Aspekte“ werden dabei mit 32,0 % bzw. 29,5 % noch am bedeutendsten angesehen. Aufgrund der rein innerbetrieblichen Nutzung von RFID stellt das Problem der Datenschutzbedenken von Kunden bzw. Abnehmer für den vorliegenden Fall kein Problem dar. Bezüglich ungeklärter rechtlicher Fragen stellen sich insbesondere Fragen einer potentiellen Verletzung der Privatsphäre¹³⁸. Die von Mitarbeitern und Kunden gesehene Gefahr der Verletzung der Privatsphäre hat sich bei einer Reihe von RFID-Projekten als problematisch erwiesen¹³⁹. Ein Beispiel dafür stellt das Projekt EMIKA des Instituts für Informatik und Gesellschaft, Lehrstuhl Telematik der Universität Freiburg dar (Müller, Kreuzer, Strasser, Eymann, Hohl, Nopper, Sackmann & Coroama 2003, S. 159). Gegenstand dieses Projekts war die Realisierung einer Systemplattform basierend auf Multiagentensystemen (MAS) und RFID. Ziel war es, Techniken zu erproben, die eine selbstorganisierende Verwaltung der Patientenlogistik am Universitätsklinikum Freiburg ermöglichen. Dabei wurde eine dezentrale Terminplanung realisiert, die auf Basis von marktähnlichen Mechanismen (Preisverhandlungen der Patienten) freie Untersuchungsressourcen zuordnet (Eymann, Sackmann & Müller 2003, S. 491). Die Umsetzung des Systems in der Universitätsklinik Freiburg scheiterte allerdings an massiven Vorbehalten der Organisationsmitglieder, aufgrund eines befürchteten Verlustes der Privatsphäre. So müssen für die

¹³⁸ Generell ergeben sich darüber hinaus etwa Fragen der Haftung bei mangelhafter bzw. fehlerhafter Funktionalitäten der RFID-Komponenten. Diese erscheinen allerdings als wenig bedeutsam, da bezüglich der Haftung keine RFID-spezifischen Besonderheiten erkennbar sind.

¹³⁹ Eine Diskussion von Privatheitsproblemen im Zusammenhang mit neuen Technologien findet sich beispielsweise in (Accorsi 2006, S. 329; Müller 2006, S. 28; Sackmann, Strüker & Accorsi 2006, S. 32)

Umsetzung des EMIKA-Systems permanent aktuellen Zustandsdaten (bspw. Behandlungsdauer eines Patienten oder Arbeitsstatus eines Arztes) mit Hilfe von RFID und Sensortechnologien erfasst werden, was zumindest theoretisch zu der Möglichkeit der Überwachung der Organisationsteilnehmer genutzt werden könnte. Die Nichtberücksichtigung dieser Ängste im Rahmen des EMIKA-Systems führte dazu, dass der Versuch das System in den realen Krankenhausbetrieb der Universitätsklinik Freiburg einzuführen, scheiterte. Als zentrales Argument wurde die umfassende Kontrollierbarkeit der Mitarbeiter und Patienten betont, wohingegen die deutlich effizientere Ressourcenzuteilung aufgrund einer dezentralen Terminplanung nachrangig beurteilt wurde. Ein weiteres, prominentes Beispiel für die Problematik potentieller Verletzungen der Privatsphäre stellt der Extra Future Store der Metro Group dar. In dieser experimentellen Einkaufsstätte wird u. a. der Einsatz von RFID-Transpondern auf Artikelebene zu einer Verbesserung und Individualisierung der Kundenkommunikation erprobt (Strüker 2005, S. 14). Die Reaktion der Öffentlichkeit auf die Ankündigung der Metro AG RFID-Technologie auf Artikel-Ebene einzuführen fielen, aufgrund befürchteter Verletzungen der Privatsphäre der Kunden, äußerst negativ aus. So wurde befürchtet, dass die RFID-Transponder auf den Artikeln der Kunden, aus einer größeren Distanz ausgelesen werden können und somit eine permanente Erfassung der Warenbestände der Kunden möglich wird¹⁴⁰. In Folge massiver Proteste, welche unter anderem die Überreichung des „Big Brother Awards“¹⁴¹ beinhaltete, sah sich die Metro AG gezwungen, ihre Pläne bezüglich des RFID Projektes zu modifizieren (Strüker 2005, S. 146). Die Beispiele zeigen die große Problematik potentieller Verletzungen der Privatsphäre auf. So verwundert es, dass diese Hürde von den befragten Unternehmen als die unbedeutendste angesehen wird. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Probleme bei bisherigem RFID-Projekten, sollten solche Bedenken allerdings durchaus Berücksichtigt werden. Auch wenn im Rahmen des vorgeschlagenen Konzepts eine Überwachung (etwa der Arbeitsleistung) nicht vorgesehen ist, sollten Bedenken der Mitarbeiter mit geeigneten Maßnahmen begegnet werden. Maßnahmen hierfür stellen etwa Schulungen und Aufklärungen bezüglich der Funktionalität des Mechanismus dar. Mitarbeiterschulungen sind aufgrund der Umgestaltung des Prozesses und der Einführung einer neuen Technologie ohnehin zu

¹⁴⁰ So wurde beispielsweise das Bedrohungsszenario beschrieben, ein vorbeifahrende Autos könnten RFID-Transponder in Häusern von Kunden auslesen (Strüker 2005, S. 147; Want 2004, S. 41).

¹⁴¹ Siehe <http://www.bigbrotherawards.de/2003/.cop>.

empfehlen, um eine reibungslose Einführung und Umsetzung des Mechanismus zu erreichen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch die mitarbeiterbezogenen und rechtlichen Hürden kein unüberwindliches Hindernis darstellen. Während sich Datenschutzbedenken von Abnehmern aufgrund der rein innerbetrieblichen Nutzung ausschließen, sollten allerdings Investitionen in Mitarbeiterschulungen getätigt werden. Somit kann einerseits die reibungslose Einführung des Systems sichergestellt werden. Andererseits kann mit Hilfe solcher Maßnahmen Bedenken der Mitarbeiter bezüglich eines Verlustes der Privatsphäre begegnet werden.

7.5 Bewertung

Die Einsatzhindernisse wurden in vier Gruppen unterteilt: Integrationshürden, Kosten-Nutzen Hürden, Qualitätshürden sowie mitarbeiterbezogene und rechtliche Hürden. Die Integrationshürden werden von den befragten RFID-Anwendern insgesamt als die bedeutendsten Hürden angesehen. Das Problem der Integration in unternehmensübergreifende Geschäftsprozesse sowie starke Widerstände der Zulieferer und Abnehmer spielen im Rahmen des Systems keine Rolle, da keine Anpassungen der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit zu erwarten sind. Zu berücksichtigen sind allerdings Probleme bezüglich der Integration in die unternehmensinternen Geschäftsprozesse. Hier sind Mitarbeiterschulungen zu empfehlen, um die Umstellungen der Aufgabenstellungen der Mitarbeiter zu begleiten. Darüber hinaus werden zusätzliche Investitionen in Technologien zur Anbindung an die bestehende IT-Infrastruktur notwendig (bspw. SAP Auto-ID Infrastructure). Die Kosten-Nutzen Hürden setzen sich aus den Hürden „Kosten übersteigen den Nutzen“, „Zu hohe Kosten für Erprobung der Technologie“ sowie „Mangelhafte Möglichkeiten zur Prognose bzw. Messung des Nutzens“ zusammen. Insbesondere auf Grund der stetig fallenden Transponderpreise sowie der Möglichkeit der Wiederverwendbarkeit der Transponder, ist davon auszugehen, dass die Kosten der Umsetzung des Systems gering gehalten werden können. Dies zeigen auch vergleichbare Projekte aus der Industrie. Daher ist von einem positiven Kosten-Nutzen Verhältnis auszugehen. Das Problem der Prognose bzw. Messung des Nutzens wurde im Rahmen dieser Arbeit mittels einer Simulationsstudie gelöst. Die Analyse der Qualitätshürden zeigt, dass die Marktreife von RFID-Systemen einem betrieblichen Einsatz nicht im Wege steht. Die Qualität bzw. Funktionalität der RFID-Systeme ist für über 60 % der Anwender kein Problem von hoher Bedeutung. Auch offene

Sicherheitsprobleme stellen, aufgrund des rein innerbetrieblichen Einsatzes, kein wesentliches Hindernis dar. Die mitarbeiterbezogenen und rechtlichen Hürden werden von den Anwendern als die geringsten Hindernisse angesehen. Die Erfahrungen aus den in Kapitel 7.4 dargestellten RFID-Projekten geben allerdings Hinweise darauf, dass insbesondere Bedenken bezüglich einer Verletzung der Privatsphäre der Mitarbeiter bei einem betrieblichen RFID Einsatz zu berücksichtigen sind. Solchen Bedenken sollte mit geeigneten Maßnahmen begegnet werden. Schulungen und Aufklärungen bezüglich der Funktionalität des Mechanismus sind hier empfehlenswert.

Keines der erörterten Hindernisse der Nutzung stellt eine unüberwindliche Hürde dar. Naturgemäß stellen die Kosten der Einführung einen relevanten Faktor dar. Es ist aber davon auszugehen, dass die Kosten den erreichbaren Nutzen nicht übersteigen werden. So können die Kosten für das RFID-System, insbesondere aufgrund der Nutzung von standardisierten Transpondern sowie der Möglichkeit der Wiederverwendbarkeit, gering gehalten werden. Darüber hinaus sind allerdings weitere Kosten für Mitarbeiterschulungen sowie Technologien zur Anbindung an die bestehende IT-Infrastruktur zu erwarten.

8 Ausblick

Aufbauend auf den neuen Möglichkeiten der Informatisierung betrieblicher Prozesse mittels RFID wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit, ein RFID-gestütztes Informationssystem zu entworfen, welches eine Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung in Kanban ermöglicht. Kern dieses Systems ist ein Kennzahlenmodell, mit Hilfe dessen die Bedeutung einzelner Produktionsaufträge für die betriebliche Zielerreichung abgebildet werden können und, durch einen Vergleich der berechneten (Ober-) Kennzahlen, eine Priorisierung der Aufträge möglich wird. Die RFID-Technologie dient dem Kennzahlenmodell als „Informationsbeschaffer“. Durch die Ausstattung von Kanban-Karten mit RFID-Transpondern werden die dezentralen Einheiten mit den für das Kennzahlenmodell notwendigen Informationen versorgt¹⁴².

Mit Hilfe eines Simulationsexperimentes konnte zum einen gezeigt werden, dass das entwickelte System eine flexible Steuerung hinsichtlich der verschiedenen und zum Teil gegenläufigen logistischen Zielgrößen ermöglicht. Je nach Unternehmensstrategie und aktuellem Umweltzustand ist eine Beeinflussung des Reihenfolgeplans möglich. Dabei können die Entscheidungen bezüglich des Reihenfolgeplans ohne bedeutenden Zeitverlust getroffen werden, was eine zeitnahe Anpassung an eine veränderte Produktionssituation ermöglicht. Zum anderen konnte nachgewiesen werden, dass, im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren, betriebliche Leistungssteigerungen realisiert werden können. Die Analyse der Einsatzhindernisse zeigte, dass keine unüberwindlichen Hürden einer betrieblichen Nutzung des Systems zu erwarten sind.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen die betriebswirtschaftlichen Potentiale des entwickelten Systems. Zu bemerken ist allerdings, dass die Simulationsergebnisse lediglich Gültigkeit im Rahmen des in dieser Arbeit zugrunde gelegten Simulationsmodells haben. Dieses Modell stellt naturgemäß nur eine Annäherung an die Wirklichkeit dar. In diesem Sinne können die Ergebnisse streng genommen nur als Indiz für die Vorteilhaftigkeit des Systems herangezogen werden. Um die Evaluation weiter zu validieren und die Risiken einer

¹⁴² Dafür wird ein RFID-System mit wiederbeschreibbaren, passiven Transpondern empfohlen, welches dem Prinzip „Data-on-Tag“ folgt. Bezüglich des Frequenzbereiches sollte, je nach Produktionsumfeld, eine HF- oder UHF-Lösung realisiert werden.

Umsetzung in den operativen Betrieb weiter zu reduzieren, sind etwa Experimente an einem physischen Prototyp denkbar. Solche Experimente sind zwar mit hohen Investitionskosten verbunden, da insbesondere ein (vereinfachtes) Produktionssystem aufgebaut sowie die informationstechnische Infrastruktur beschafft werden müsste, somit wären beispielsweise aber detailliertere Analysen hinsichtlich potentieller Probleme aufgrund einer Veränderung der Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter möglich. So wird bisher davon ausgegangen, dass die Veränderungen der Aufgabenstellungen der betroffenen Mitarbeiter keinen Einfluss auf die Nutzung des Systems aufweist. Der Theorie des „Organisatorischen Konservatismus“ folgend¹⁴³, ist es aber möglich, dass diese Veränderungen zu Widerständen der Mitarbeiter führen können, was eine nur unvollständige Ausnutzung der Produktivitätspotenziale zu Folge haben kann. Darüber hinaus würden Experimente an einem physischen Prototyp etwa auch Untersuchungen mit unterschiedlichen RFID-Systemen ermöglichen.

Neben der Vertiefung der Evaluation des entwickelten Systems können weitere Forschungsfragen abgeleitet werden: Zum einen wurde bisher nicht erörtert, in wie weit die im Rahmen des Mechanismus genutzte technische Infrastruktur bzw. die anfallenden Informationen weitergehende Optimierungsmöglichkeiten bieten. So würde beispielsweise die langfristige Speicherung der in den Mediatoren anfallenden Informationen (etwa exakter Zeitpunkt der Produktion eines einzelnen Auftrages) eine Verbesserung der Rückverfolgbarkeit und somit eine effizienter Verfolgung von Fehler (etwa Qualitätsmängel) erlauben.

Eine weitere Forschungsfrage stellt die Analyse der Vorteilhaftigkeit einer fundamentalen Änderung des Materialfluss-Steuerungssystems auf Basis von RFID dar. So stellt sich die Frage, ob eine zentrale Echtzeit-Steuerung des Produktionsablaufes auf Basis aller relevanten Informationen (welche zumindest theoretisch mit Hilfe von RFID zu erheben sind) eine realistische Option darstellt. Grundsätzlich würde die lückenlose Beachtung sämtlicher Interdependenzen, was gleichbedeutend mit der Entwicklung eines simultanen Planungsmodells ist, zu einer optimalen Lösung führen. Ein solches Planungsmodell scheitert jedoch bisher an der begrenzten Kapazität der Entscheidungseinheiten und den mit einer Koordination entstehenden Kosten. In wie weit dies in Zukunft durch die Fortschritte in der Informationstechnologie möglich wird ist bisher ungeklärt. Die Entwicklungen im Be-

¹⁴³ Zur Theorie des „Organisatorischen Konservatismus“ vgl. bspw. (Martins & Kambil 1999, S. 652; Pennings & Harianto 1992, S. 29; Pijpers & van Montfort 2005, S. 542).

reich der Multicore-Prozessoren und die damit verbundenen Möglichkeit der Parallelisierung der Optimierungsrechnung oder neue Technologien wie beispielsweise Quantencomputer¹⁴⁴ oder so genannte „organische Computer“¹⁴⁵ werden die Grenze der in sinnvoller Zeit zu bearbeitenden Optimierungsproblemen vermutlich weiter verschieben.

Von der betrachteten Fallstudie abstrahierend, kann weiterer Forschungsbedarf insbesondere in der Entwicklung von Verfahren der Wirtschaftlichkeitsbewertung von RFID-Investitionen abgeleitet werden. Grundsätzlich fehlen geeignete und flexibel einsetzbare Verfahren und Instrumenten, um eine angemessene Kosten- und Nutzenbewertung von RFID-Investitionen sowohl ex ante als auch ex post vornehmen zu können. Zwar existieren mittlerweile Verfahren zur Bewertung der Automatisierungspotentiale von RFID¹⁴⁶. Wie in Kapitel 2.2 aufgezeigt wurde, trägt eine alleinige Beschränkung auf die „Automatisierung“, d.h. die Reduktion manueller Arbeit ohne die gleichzeitige Verarbeitung besserer bzw. neuer Informationen oder einer Anpassung der Prozesse, aber nicht systematisch zu einer Nutzensteigerung bei. Für die Effekte „Informatisierung“ und „Transformation“ existieren bisher keine geeigneten RFID-spezifischen Verfahren der Wirtschaftlichkeitsbewertung. Erste Ansätze hierfür finden sich in (Gille 2007, S. 29; Gille & Strüker 2008).

¹⁴⁴ Ein Quantencomputer ist ein Computer, dessen Funktion auf den besonderen Gesetzen der Quantenmechanik beruht. Im Unterschied zum Digitalrechner arbeitet er auf der Basis quantenmechanischer Zustände. Der Quantencomputer ist bisher allerdings lediglich ein theoretisches Konstrukt mit der Aufgabe, den Quanteninformationsprozess formal zu analysieren. In der experimentellen Realisierung werden zwar stetig Fortschritte erzielt, aber bis ein lauffähiger Quantencomputer existiert, bedarf es noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit (Nielsen & Chuang 2007; Sturm & Schulze 2008).

¹⁴⁵ Unter einem „organischen Computer“ versteht man computerisierte Systeme, welche unter Verwendung von Organisationsprinzipien aus der Natur, die Fähigkeit besitzen sich den jeweiligen Umgebungsbedürfnissen selbständig anzupassen (Müller-Schloer, von der Malsburg & Würtz 2004, S. 332).

¹⁴⁶ Vgl. Bspw. die Arbeiten von (Laubacher, Kothari, Malone & Subirana 2006; Subirana, Eckes, Herman, Sarma & Barrett 2003).

Literaturverzeichnis

Aberdeen Group (2006): Finding the ROI in RFID. Benchmark Report, Boston, MA.

Abowd, G. & Mynatt, E. (2000): Charting Past, Present, and Future Research in Ubiquitous Computing, in: ACM Transactions on Computer Human Interaction, 47 (1), S. 29-58.

Accorsi, R. (2006); On the Relationship of Privacy and Secure Remote Loggin in Dynamic Systems, in: Fischer-Hüber, S., Rannberg, K., Yngström, L., Lindskog, S.: Security and Privacy in Dynamic Enviroments, New York, pp. 329-339.

Adam, D. (1990): Produktionsdurchführungsplanung, in: Jacob, H.: Industriebetriebslehre, Wiesbaden, S. 673-918.

Adam, D. & Johannwille, D. (1998): Die Komplexitätsfalle, in: Adam, D.: Komplexitätsmanagement, Wiesbaden, S. 5-28.

Adam, D. (1996): Planung und Entscheidung: Modelle – Ziele – Methoden, Wiesbaden.

Adam, D. (1998): Produktions-Management, Wiesbaden.

Albers, E. (1991): Ein Standartmodul zur Lösung kombinatorischer Entscheidungsprobleme der Produktionssteuerung, Bergisch Gladbach.

Auto-ID Centre (2003): Auto-ID Object Name Service (ONS) 1.0, http://www.gs1-germany.de/content/e39/e466/e468/datei/ccg/8_auto_id-ons-1.0.pdf, abgerufen am 06.12.2007.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2000): Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung, Berlin.

Bahn Müller, R. & Fisecker, C. (2003): Dezentralisierung, Vermarktlichung und Shareholderorientierung im Personalwesen: Folgen für die Stellung und das Selbstverständnis des Personalwesens und die Interaktionsmuster mit dem Betriebsrat, Tübingen.

Balzert, H. (1998): Lehrbuch der Software-Technik: Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung, Heidelberg.

Bard, J. F., Shtub, A. & Joshi, S. B. (1994): Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize length, in: International Journal of Production Research, 32 (19), S. 2431-2454.

Bartuschat, M. (1995): Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Serienfertigung, Essen.

- Bärwald, W., Baumann, S., Keil, R. & Richter, K. (2007): RFID-Applications in production logistics: Sm@rt Logistics, in: Proceedings of the 1st Annual RFID Eurasia Conference, Istanbul 2007, S. 32-38.
- Baybars, I. (1986): A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem, in: Management Science, 32 (8), S. 909-932.
- Becker, C. & Scholl, A. (2006): A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, in: European Journal of Operational Research, 168 (3), S. 694-715.
- Bitran, G. R. & Chang, L. (1987): A Mathematical Programming Approach to a Deterministic KANBAN System, in: Management Science, 33 (4), S. 427-441.
- Bizer, J., Dingel, K., Fabian, B., Günther, O., Hansen, M., Klafft, M., Möller, J. & Spiekermann, S. (2006): Technikfolgenabschätzung: Ubiquitäres Computing und Informationelle Selbstbestimmung, Berlin.
- Bjorndal, M. H., Caprara, A., Cowling, P. I., Della Croce, F., Lourenco, H., Malucelli, F., Orman, A. J., Pisinger, D., Rego, C. & Salazar, J. J. (1995): Some thoughts on combinatorial optimisation, in: European Journal of Operational Research, 83 (2), S. 253-270.
- Blazewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G. & Weglarz, J. (2001): Scheduling Computer and Manufacturing Processes, Berlin.
- Blohm, H., Beer, T., Seidenberg, U. & Silber, H. (1988): Produktionswirtschaft, Berlin.
- Böhnlein, C. (2002): Strategien zur Rüstzeitvermeidung in der Elektronikfertigung, in: Operations Research Proceedings 2002, S. 47-52.
- Bortz, J. (1993): Statistik für Sozialwissenschaftler, Berlin.
- Boysen, N. (2005): Variantenfließfertigung, Wiesbaden.
- Brad, J. F. & Golany, B. (1991): Determining the number of Kanban in a multiproduct, multistage production system, in: International Journal of Production Research, 29 (5), S. 881-895.
- Brehm, C. (2003): Organisatorische Flexibilität der Unternehmung – Bausteine eines erfolgreichen Wandels, Wiesbaden.
- Brynjolfsson, E. (2003): The IT Productivity Gap, in: Optimize magazine, 21, <http://www.optimize.com/showArticle.jhtml?articleID=17700941>, abgerufen am: 02.10.2008.
- Brynjolfsson, E. & Hitt, L. (2000): Beyond Computation: Information Technology, Organizational Transformation and Business Performance, in: Journal of Economic Perspectives, 14 (4), S. 23-48.
- Bukchin, Y. & Rabinowitch, I. (2006): A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs, in: European Journal of Operational Research, 149 (2), S. 417-429.

- Burmann, C. (2005): Strategische Flexibilität und der Marktwert von Unternehmen, in: Kaluza, B. & Behrens, S.: Erfolgsfaktor Flexibilität. Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen, Berlin, S. 29-53.
- Cerny, V. (1985): Thermodynamical Approach to the Travelling Salesman Problem, in: Journal of Optimization Theory and Applications, 45 (1), S. 41-51.
- Child, J., Ganter, H. D. & Kieser, A. (1987): Technological Innovation and Organizational Conservatism, in: Pennings, J. M. & Buitendam, A.: New Technology as Organizational Innovation. The Development and Diffusion of Microelectronic, Cambridge, S. 87-116.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G. & Aiken, L. S. (2003): Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences, Hilladale, N.J.
- Computerwoche (2007): RFID: Nach dem Hype kommt der Frust, Computerwoche 08/2007, <http://www.computerwoche.de/heftarchiv/2007/08/1218044/>, abgerufen am: 28.08.2008.
- Conway, R., Maxwell, W., McClain, J. O. & Thomas, L. J. (1988): The Role of Work-in-Process Inventory in Serial Production Lines, in: Operations Research, 36 (2), S. 229-241.
- Conway, R. W., Maxwell, W. L. & Miller, L. W. (1967): Theory of Scheduling, Reading, MA.
- Corsten, H. (2007): Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement, München.
- Cutkosky, M., Engelmores, R., Fikes, R., Genesereth, M., Guber, T., Mark, W., Tenenbaum, J. & Weber, J. (1993): PACT: An experiment in integrating concurrent engineering systems, in: IEEE Computer, 26 (1), S. 28-37.
- Dangelmaier, W. (2007): Produktion und Information: System und Modell, Berlin.
- Decker, M. (1993), Variantenfließfertigung, Heidelberg.
- Dickmann, P. (2007): Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen, Berlin.
- Diekmann, T., Melski, A. & Schumann, M. (2007): Data-on-Network vs. Data-on-Tag: Managing Data in Complex RFID Environments, in: Proceedings of the 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, S. 224a.
- Dighero, C., Kellso, J., Merizon, D., Murphey-Hoye, M., & Tyo, R. (2005): RFID: The Real and Integrated Story, Intel Technology Journal, 9 (3), S. 247-257.
- Dinkelbach, W. (1982): Entscheidungsmodelle, Berlin.
- Dittmann, L. (2006): Der angemessene Grad an Visibilität in Logistik-Netzwerken, Wiesbaden.
- Domschke, W. & Drexl, A. (2007), Einführung in Operations Research, Berlin.

- Domschke, W., Scholl, A. & Voß (1997): Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte, Berlin.
- Dorn, J. (1995): Iterative Improvement Methods for Knowledge-based Scheduling, in: European Journal on Artificial Intelligence, 8 (1), S. 20-34.
- Dueck, G. & Scheuer, T. (1990): Threshold Accepting: A general purpose Optimization Algorithm appearing superior to Simulated Annealing, in: Journal of Computational Physics, vol. 90 (1), S. 161-175.
- Dyckhoff, H. (2003): Grundzüge der Produktionswirtschaft, Berlin.
- EPCglobal (2003): Global Commerce Initiative EPC Roadmap. Executive Brief, http://www.gs1-germany.de/content/e39/e466/e468/datei/ccg/roadmap_executive_brief.pdf, abgerufen am 06.12.2007.
- Erel, E. & Sarin, S. C. (1998): A survey of the assembly line balancing procedures, in: Production Planning and Control, 9 (5), S. 414-434.
- Eymann, T., Sackmann, S. & Müller, G. (2003): Hayeks Katallaxie - Ein zukunftsweisendes Konzept für die Wirtschaftsinformatik?, in: Wirtschaftsinformatik, 45 (5), S. 491-496.
- Fandel, G. & Francois, P. (1989): Just-in-Time-Produktion und Beschaffung: Funktionsweise, Einsatzvoraussetzungen und Grenzen, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 59 (5), S. 531-544.
- Faupel, T. (2006): Hindernisse beim Datenzugriff mittels mobiler Kommunikationstechnologie – Eine empirische Analyse, in: Mobile Informationssysteme - Potentiale, Hindernisse, Einsatz, 1. Fachtagung Mobilität und Mobile Informationssysteme (MMS 2006), Passau, S. 57-67.
- Faupel, T. & Sackmann, S. (2005): Der Einsatz mobiler Informations- und Kommunikationstechnologie in deutschen Unternehmen - Eine empirische Untersuchung, Freiburg.
- Faupel, T. & Sackmann, S. (2007): Economic Coordination in Kanban-based Production Systems with Ubiquitous Computing, in: System and Information Sciences Notes (SISN), 2 (1), S. 33-39.
- Faupel, T., Strüker, J. & Gille, D. (2008): Performance Improvements based on RFID - Empirical Findings from a Cross-sectoral Study, in: Proceedings of the 14th Americas Conference on Information Systems (AMCIS 2008), Toronto.
- Faust, M. & Jauch, P. (1994): Dezentralisierung von Unternehmen: Bürokratie- und Hierarchieabbau und die Rolle betrieblicher Arbeitspolitik, München.
- Feldmann, M. (1999): Naturanaloge Verfahren - Metaheuristiken zur Reihenfolgeplanung Gabler, Wiesbaden.
- Ferstl, O. K. & Sinz, E. J. (2008): Grundlagen der Wirtschaftsinformatik, München.
- Fleisch, E., Christ, O. & Dierkes, M. (2005): Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge, in: Fleisch, E. & Matter, F.: Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing

und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen, Berlin, S. 3-38.

Fleisch, E. & Dierkes, M. (2003): Ubiquitous Computing aus betriebswirtschaftlicher Sicht, in: Wirtschaftsinformatik, 45 (6), S. 611-620.

Flörkemeier, C. (2005): EPC-Technologie – vom Auto-ID Center zu EPCglobal, in: Fleisch, E. & Matter, F.: Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen, Berlin, S.

Freitag, M., Herzog, O. & Scholz-Reiter, B. (2004): Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen, in: Industrie Management, 20 (1), S. 23-27.

French, S. (1982): Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-shop, Chichester.

Freye, D. (1997): Reihenfolgeplanung in einem variantenreichen Fließfertigungssystem, Göttingen.

Garey, M. R. & Johnson, D. S. (2003): Computers and intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, New York.

Garg, V., Jones, C. & Sheedy, C. (1999): 17 Billion Reasons to Say Thanks: The 25th Anniversary of the U.P.C. and Its Impact on the Grocery Industry, London.

Gaukler, G. M. & Hausmann, W. H. (2008): RFID in mixed-model automotive assembly operations: Process and quality cost savings, in: IIE Transaction, 40 (11), S. 1083-1096.

Geiger, M. J. (2005): Multikriterielle Ablaufplanung, Wiesbaden.

Gerhäuser, H. & Pflaum, A. (2004): RFID verändert die Architektur logistischer Informationssysteme: vom Identifikationsmedium zu selbststeuernden Transportobjekten, in: Entwicklungspfade und Meilensteine moderner Logistik: Skizzen einer Roadmap, Wiesbaden, S. 267 – 296.

Gille, D. (2007): Modellierung und Messung des Einflusses von RFID-Technologie auf die Produktivität, in: Tagungsband zum Doctoral Consortium der WI 2007, Bayreuther Arbeitspapiere zur Wirtschaftsinformatik, S. 29-47.

Gille, D. & Strüker, J. (2008): Into the Unknown – Measuring the Business Performance of RFID Applications, in: Proceedings of the 16th European Conference on Information Systems (ECIS 2008), Galway.

Glover, F. (1989a): Tabu Search - Part I, in: ORSA Journal on Computing, 1 (3), S. 190-206.

Glover, F. (1989b): Tabu Search - Part II, in: ORSA Journal on Computing, 2 (1), pp. 4-32.

Göbel, E. (1998): Theorie und Gestaltung der Selbstorganisation, Berlin.

Grapp, J., Wycisk, C., Dursun, M. & Hülsmann, M. (2005): Ideengeschichtliche Entwicklung der Selbstorganisation - Die Diffusion eines interdisziplinären Forschungskonzeptes, Bremen.

- Grötschel, M. (2007): Schnelle Rundreisen: Das Travelling-Salesman-Problem, in: Hußmann, S. & Lutz-Westphal, B.: Kombinatorische Optimierung erleben, Wiesbaden, S. 93-129.
- Gstettner, S. (1998): Leistungsanalyse von Produktionssteuerungssystemen: Produktion und Logistik, Heidelberg.
- Günther, H.-O. & Tempelmeier, H. (2005): Produktion und Logistik, Berlin.
- Gutenberg, E. (1979): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Berlin.
- Hansen, H. R. & Neumann, G. (2001): Grundlagen betrieblicher Informationsverarbeitung I, Stuttgart.
- Hansmann, K. W. (2006): Industrielles Management, München.
- Hardgrave, B. C., Waller, M. & Miller, R. (2005): Does RFID Reduce Out of Stocks? A Preliminary Analysis Information Technology Research Institute, Fayetteville, AR.
- Haupt, R. & Schillinger, V. (1993): Simulationsgestützte Untersuchung neuerer Ansätze von Prioritätsregeln in der Fertigung, in: WIST, 12, S. 611-616
- Heinz, K. (1996): Vorgabenzeitermittlung, in: Jacob, H.: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Wiesbaden, S. 2214-2226.
- Hendel, Y., Runge, N. & Sourd, F. (2008): The one-machine just-in-time scheduling problem with preemptions, <http://yann.hendel.googlepages.com/DiscreteOptimization.pdf>, abgerufen am: 06.10.2008.
- Hoch, G. (2003): Erfolgs- und Kostencontrolling, München.
- Hodges, S. & Harrison, M. (2003): Demystifying RFID: Principles & Practicalities Auto-ID Centre, <http://www.autoidlabs.org/uploads/media/CAM-AUTOID-WH024.pdf>, abgerufen am: 04.08.2007.
- Holmqvist, M. & Stefansson, G. (2006): Mobile RFID—A Case from Volvo on Innovation in SCM, in: Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on, Hawaii, S. 251-270.
- Holweg, M. & Frits, P. (2004): The Second Century: Reconnecting Customer and Value Chain Through Build-To-Order; Moving Beyond Mass and Lean Production in the Auto Industry, Cambridge, Mass.
- Horváth, P. (2003): Controlling, München.
- Hülsmann, M. & Wycisk, C. (2006): Selbstorganisation als Ansatz zur Flexibilisierung der Kompetenzstrukturen, in: Burmann, C., Freiling, J. & Hülsmann, M.: Neue Perspektiven des Strategischen Kompetenz-Managements, Wiesbaden, S. 323-350.
- Hwang, J. H. (2006): E-Learning als wissensbasiertes Produkt: Konzept, Märkte und Preisgestaltung, Paderborn.

- Intel (2008): Leading Virtualization Performance and Energy Efficiency in a Multi-processor Server, http://download.intel.com/products/processor/xeon/7400_prodbrief.pdf, abgerufen am: 27.10.2008.
- Jaccard, J. & Choi, K. W. (1996): LISREL approaches to interaction effects in multiple regression, Thousand Oaks, CA.
- Johnson, D. S. & Papadimitriou, C. H. (1985): Computational complexity, in: Lawler, E. L.: The Travelling Salesman - A Guide Tour of Combinatorial Optimization, Chichester, S. 37-86.
- Johnson, S. M. (1954): Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times included, in: Naval research logistics quarterly, 1 (1), pp. 61-68.
- Kaluza, B. (1994): Rahmenentscheidungen zu Kapazität und Flexibilität produktionswirtschaftlicher Systeme, in: Corsten, H.: Handbuch Produktionsmanagement: Strategie - Führung - Technologie - Schnittstellen, Wiesbaden, S. 51-72.
- Kaluza, B. (1995): Flexibilität der Industrieunternehmen, Diskussionsbeiträge des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Gerhard-Mercator-Universität. Duisburg.
- Karagiannaki, A., Mourtos, I., & Pramadari, K. (2007): Simulating the Impact of RFID Technology on Warehousing Operations, in: The HERMES Newsletter by ELTRUN, 44 (May - June 2007).
- Karp, R. M. (1972): Reducibility among Combinatorial Problems, in: Thatcher, J. W.: Complexity of Computer Computations, New York, S. 85-103.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, M. P. & Vecchi, M. (1983): Optimization by Simulated Annealing, in: Science, 220 (4598), S. 671-680.
- Kistner, K.-P. & Switalski, M. (1989): Hierarchical Production Planning - Necessity, Problems, and Methods, in: Methods and Models of Operations Research, 33, S. 199-212.
- Kistner, K. P. & Steven, M. (2001): Produktionsplanung, Heidelberg.
- Knyphausen, D. (1991): Selbstorganisation und Führung - Systemtheoretische Beiträge zu einer evolutionären Führungskonzeption, in: Die Unternehmung, 45 (1), S. 47-63.
- Koether, R. (1986): Verfahren zur Verringerung von Modell-Mix-Verlusten in Fließmontagen Berlin.
- Koether, R. (2004): Taschenbuch der Logistik, München.
- Kuhn, H. (1998): Fließproduktionssysteme - Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung, Heidelberg.
- Kurbel, K. (2003): Produktionsplanung und -steuerung: Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen, München.
- Lack, R. (1996): Kanban, in: Kern, W.: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart, S. 2775-2785.

- Laksham, N. (2006): When Push Comes to Pull, Kanban Wins, in: *Industrial Maintenance & Plant Operation*, June 1, 2006, S. 21-22.
- Lampe, M., Flörkemeier, C. & Haller, S. (2005): Einführung in die RFID-Technologie, in: Fleisch, E. & Matter, F.: *Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen*, Berlin, S. 69-86.
- Lampe, M., Strassner, M. & Fleisch, E. (2004): An Ubiquitous Computing Environment for Aircraft Maintenance, in: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, Nicosia.
- Lancaster, K. J. (1991): *Modern Consumer Theory*, Aldershot.
- Laporte, G. (1992): The Traveling Salesman Problem: An overview of exact and approximate algorithms, in: *European Journal of Operational Research*, 59 (2), S. 231-247.
- Laubacher, R., Kothari, S. P., Malone, T. W. & Subirana, B. (2006): What is RFID Worth to Your Company? - Measuring Performance at the Activity Level, MIT Sloan School, Cambridge, MA.
- Lay, G., Dreher, C. & Kinkel, S. (1996): Neue Produktionskonzepte leisten einen Beitrag zur Sicherung des Standorts Deutschland, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- Lermen, P. (1992): *Hierarchische Produktionsplanung und Kanban*, Wiesbaden.
- Lingnau, V. (1994): *Variantenmanagement*, Berlin.
- Lödding, H. (2005): *Verfahren der Fertigungssteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*, Heidelberg.
- Loebbecke, C. (2007): Piloting RFID Along the Supply Chain: A Case Analysis, in: *Electronic Markets*, 17 (1), S. 29-37.
- Logistik heute (2001): Case Study: E-KANBAN - DaimlerChrysler, in: *Logistik heute*, 11/2001, S. 51-54.
- Logistik heute (2007): „Ein enormes Potenzial“ - Interview mit Carsten Frost/ Gruppenleiter Logistik bei Bosch, in: *Logistik heute*, 4/2007, S. 26-27.
- Lyytinen, K. & You, Y. (2002): Issues and challenges in ubiquitous computing: Introduction, in: *Communication of the ACM*, 45 (12), S. 63-65.
- Malone, T. W. (1987): Modelling coordination in organizations and markets, in: *Management Science*, 33 (10), S. 1317-1332.
- Martins, L. L. & Kambil, A. (1999): Looking back and thinking ahead: Effects of prior success on managers' Interpretations of new information technologies, in: *Academy of Management Journal*, 42 (6), S. 652-661.
- Mattern, F. (2005): Die technische Basis für das Internet der Dinge, in: Fleisch, E. & Matter, F.: *Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen*, Berlin, S. 39-66.

- Maune, G. (2002): Möglichkeiten des Komplexitätsmanagements für Automobilhersteller auf Basis IT-gestützter durchgängiger Systeme, Paderborn.
- McMullen, P. R., Tarasewich, P. & Frazier, G. V. (2000): Using genetic algorithms to solve the multi-product JIT sequencing problem with setups, in: *International Journal of Production Research*, 38 (12), S. 2653-2670.
- Meffert, H. (1985): Größere Flexibilität als Unternehmenskonzept, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 37 (2), S. 121-137.
- Melski, A. & Schumann, M. (2007): Management von RFID-Daten, Institut für Wirtschaftsinformatik, Professur für Anwendungssysteme und E-Business, Georg-August-Universität Göttingen.
- Mensch, G. (1972): Das Trilemma der Ablaufplanung, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 42 (2), S. 77-88.
- Monde, Y. (1988): Adaptable Kanban System helps Toyota Maintain Just-in-Time Production, in: *Industrial Engineering*, 13 (5), S. 22-30.
- Mooney, J. G., Gurbaxani, V. & Kraemer, K. L. (1996): A Process Oriented Framework for Assessing the Business Value of Information Technology, in: *The DATA BASE for Advances in Information Systems*, 27 (2), S. 68-81.
- Müller, G. (2006): Privacy and security in Highly Dynamic Systems, in: *Communication of the ACM*, 49 (9), S. 28-31.
- Müller, G., Eymann, T. & Kreutzer, M. (2003): Telematik- und Kommunikationssysteme in der vernetzten Wirtschaft, München.
- Müller, G., Kreutzer, M., Strasser, M., Eymann, T., Hohl, A., Nopper, N., Sackmann, S. & Coroama, V. (2003): Geduldige Technologie für ungeduldige Patienten: Führt Ubiquitous Computing zu mehr Selbstbestimmung?, in: Mattern, F.: *Living in a Smart Environment*, Heidelberg, S. 159-186.
- Müller-Merbach, H. (1970): *Optimale Reihenfolgen*, Berlin.
- Müller-Schloer, C., von der Malsburg, C. & Würtz, R. P. (2004): Organic Computing, in: *Informatik Spektrum*, 27 (4), S. 332-336.
- Mullins, L. J. (2005): *Management and Organisational Behaviour*, Harlow.
- Nelson, R. R. (2007): IT Project Management: Infamous Failures, Classic Mistakes, and Best Practices, in: *MIS Quarterly Executive*, 6 (2), S. 67-78.
- Neumann, K. & Morlock, M. (1993): *Operations Research*, München.
- Nielsen, M. A. & Chuang, I. L. (2007): *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge.
- Nyhuis, P. & Wiendahl, H. P. (2003): *Logistische Kennlinien*, Berlin.

- Ohno, T. (1986): The Origin of Toyota Production System, in: Monde, Y.: Applying Just in Time, Georgia, S. 3-8.
- Okamura, K. & Yamashina, H. (1979): A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor, in: International Journal of Production Research, 17 (3), S. 233-247.
- Österle, H. (2003): Business Engineering: Auf dem Weg zum Informationszeitalter, Berlin.
- Ow, P. S. (1984): Heuristic Knowledge and Search for Scheduling, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University.
- Ow, P. S. & Morton, T. E. (1989): The Single Machine Early/Trade Problem, in: Management Science, 35 (2), S. 177-191.
- Page, B. (1991): Diskrete Simulation, Berlin.
- Papadimitriou, C. H. & Steiglitz, K. (1982): Combinatorial Optimization, Englewood Cliffs.
- Papadimitriou, C. H. & Steiglitz, K. (1987): Some Examples of Difficult Traveling Salesman Problems, in: Operations Research, 26 (3), S. 434-443.
- Pennings, J. M. & Harianto, F. (1992): The diffusion of technological innovation in the commercial banking industry, in: Strategic Management Journal, vol. 13 (1), S. 29-57.
- Petersen, L.: Eine Analyse alternativer Kanban -Steuerungsmechanismen für Mehrprodukt-Logistiksysteme, in: Tagungsband der 66. Tagung des Verbands der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V., Graz, S. 243-246.
- Petri, C. (2007): Ablaufplanung bei Reihenfertigung mit mehrfacher Zielsetzung auf der Basis von Ameisenalgorithmen, Passau.
- Pfohl, H. C. (1977): Problemorientierte Entscheidungsfindung in Organisationen, Berlin.
- Picker, C. (2007): Prospektive Zeitbestimmung für nicht wertschöpfende Montagetätigkeiten, Aachen.
- Picot, A., Reichwald, R. & Wigand, R. T. (2003): Die grenzenlose Unternehmung, Wiesbaden.
- Pidd, M. (2004): Computer Simulation in Management Science, New York.
- Pijpers, G. G. M. & van Montfort, K. (2005): An investigation of factors that influence senior executives to accept innovations in information technology, in: International Journal of Management, 22 (4), S. 542-555.
- Piller, F. T. (2006): Kundenindividuelle Massenproduktion: Die Wettbewerbsstrategie der Zukunft, München.
- Pine, J. B., Victor, B. & Boynton, A. C. (1993): Making Mass Customization Work, in: Harvard Business Review, 71 (5), S. 108-119.

- Pinedo, M. (2002): Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Upper Saddle River, NJ.
- Prokein, O. (2008): IT-Risikomanagement - Identifikation, Quantifizierung und wirtschaftliche Steuerung, Wiesbaden.
- Prokein, O., Faupel, T. & Gille, D. (2007): Web Services as an Enabler for Virtual Organizations, in: Barnes, S.: E-Commerce and V-Business: Digital Enterprise in the Twenty-First Century, Oxford, S. 245-270.
- Purdum, T. (2007): Kanban Can Make A Difference, Industry Week, <http://www.industryweek.com/ReadArticle.aspx?ArticleID=14172>, abgerufen am: 6.10.2008.
- Raghu, D. (2007): RFID in 2006: A story of extremes, IdTechEx, <http://www.idtechex.com/products/en/articles/00000510.asp>., abgerufen am: 06.10.2008.
- Ramdas, K. (2003): Managing product variety: An integrative review and research directions, in: Production and Operations Management, 12 (1), S. 79-101.
- Rathnow, P. (1993): Integriertes Variantenmanagement, Göttingen.
- Reeves, C. R. (1993): Modern heuristic techniques for combinatorial problems, Oxford.
- Reichmann, T. (2001): Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten, München.
- Reichwald, R. & Piller, F. T. (2002): Mass Customization-Konzepte im Electronic Business, in: Weiber, R.: Handbuch Electronic Business, Wiesbaden.
- Reidel, S. (2006): Ein genetischer Algorithmus zur kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung bei getakteten Mehrproduktfließlinien , Passau.
- Rinnooy Kan, A. H. (1976): Machine Scheduling Problems: Classification, complexity and computations, The Hague.
- Röder, A. & Tibken, B. (2006): A methodology for modelling inter-company supply chains and for evaluating a method of integrated product and process documentation, in: European Journal of Operational Research, 169 (3), S. 1010-1029.
- Rohr, T. (2004): Einsatz eines mehrkriteriellen Entscheidungsverfahrens im Naturschutzmanagement – Dargestellt am Naturschutzprojekt "Weidelandschaft Eidertal", Kiel.
- Rosenberg, O. (1996): Planung von Variantenprogrammen, in: Kern, W. Schröder, H.-H. & Weber, J.: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart, S. 2119-2129.
- Saaty, T. L. (1990): How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, in: European Journal of Operational Research, vol. 48 (11), S. 9-26.
- Saaty, T. L. (1993): The analytic hierarchy process: An overview, in: Central European Journal for Operations Research and Economics, 2 (2), S. 119-137.
- Sackmann, S. & Strüker, J. (2005): 10 Jahre Electronic Commerce: eine stille Revolution in deutschen Unternehmen, Freiburg.

- Sackmann, S., Strüker, J. & Accorsi, R. (2006): Personalization in privacy-aware highly dynamic systems, in: Communications of the ACM, 49 (9), S. 32-38.
- Sanchez, R. (1995): Strategic flexibility in product competition, in: Strategic Management Journal, 16, S. 135-159.
- SAP (2008): SAP -Lösungen für RFID - Optimierung von Logistikabwicklung und Anlagenmanagement SAP, Walldorf, http://www.sap.com/germany/media/mc_437/50088401.pdf, abgerufen am: 28.08.2008.
- Sauer, J. (1993): Wissensbasiertes Lösen von Ablaufplanungsproblemen durch explizierte Heuristiken, Sankt Augustin.
- Schild, K. & Bussmann, S. (2007): Self-Organization in Manufacturing Operation, in: Communication of the ACM, 50 (12), S. 74-79.
- Schimkat, R.-D. (2003): Techniken und Aspekte zur Realisierung proaktiver Informationssysteme, Tübingen.
- Schmitting, W. (2000): Das Traveling-Salesman-Problem - Anwendung und heuristische Nutzung von Vorono-/Delaunay Strukturen zur Lösung euklidischer, zweidimensionaler Traveling-Salesman-Probleme, Düsseldorf
- Schneeweiß, C. (1991): Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen, Berlin.
- Schneeweiß, C. (1974): Dynamisches Programmieren, Würzburg.
- Scholl, A. (1999): Balancing and Sequencing of Assembly Lines, Heidelberg.
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., Rekersbrink, H., Wenning, B. L., Gorltd, C. & Echelmeyer, W. (2005): Auf dem Weg zur Selbststeuerung in der Logistik - Grundlagenforschung und Praxisprojekte, in: Begleitband zur 11. Magdeburger Logistiktagung "Intelligente Logistikprozesse: Konzepte, Lösungen Erfahrungen", Magdeburg, S. 166-180.
- Scholz-Reiter, B., Phillip, T., de Beer, C., Windt, K. & Freitag, M. (2006): Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen, in: Konferenzband zum 3. BVL-Wissenschaftssymposium Logistik, Hamburg, S. 11-26
- Schuh, G. (2006): Sm@rt Logistics: Intelligent networked systems, in: ANNALS- CIRP, 55 (1), S. 505-508.
- Schulz, R. (2002): Simulationsgestützte Beurteilung der logistischen Qualität innerbetrieblicher Entsorgung, Stuttgart.
- Schweitzer, M. (1967): Methodologische und entscheidungstheoretische Grundfragen der betriebswirtschaftlichen Prozeßstrukturierung, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 19, S. 279-296.
- Seelbach, H. (1975): Ablaufplanung, Würzburg .
- Sesterhenn, L. (2003): Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme, Aachen.

Shen, W., Norrie, D. & Barthès, J.-P. (2001): Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing, London.

Simon, H. A. (1954): Centralization vs. Decentralization in Organizing the Controller's Department, New York.

Soom, E. (1986): Die neue Produktionsphilosophie, Just-in-Time Production (2. Teil, Synchronfertigung und Kanban), in: *io Managementzeitschrift*, 55 (10), S. 446-449.

Spahn, M., Berbner, R., Heckmann, O. & Ralf Steinmetz, R. (2006): Ein heuristisches Optimierungsverfahren zur dienstgütebasierten Komposition von Web-Service-Workflows, Technical Report of the Department of Electrical Engineering and Information Technology, Darmstadt.

Spresser, D. M. (1989): The travelling salesman problem: selected algorithms and heuristics, in: *Journal of Mathematical Education Technology*, 20 (6), S. 827-839.

Stadtler, H. (1998): Hauptproduktionsprogrammplanung in einem kapazitätsorientierten PPS System, in: Wildemann, H.: *Innovationen in der Produktionswirtschaft*, München, S. 169-192.

Steinmann, H. & Schreyögg, G. (2005): *Management: Konzepte- Funktionen- Fallbeispiele*, Wiesbaden.

Stosik, D. (2005): *Mehrzielorientierte Ablaufplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung*, Berlin.

Strasser, M. (2008): *Zur Selbstorganisation der Patientenlogistik mit allgegenwärtigen Rechnern*, Lohmar.

Strassner, M. (2005): *RFID im Supply Chain Management - Auswirkungen und Handlungsempfehlungen am Beispiel der Automobilindustrie*, Wiesbaden.

Straube, F., Vogeler, S., Bensel, P. & Spiegel, T. (2007): *Aktuelle Situation der RFID-Standardisierung: Akteure und deren Relation*, Berlin.

Straube, F., Pfohl, H.-C., Günthner, W. A. & Dangelmaier, W. (2006): *Trends and Strategies in Logistics - Agenda for Logistics Management in 2010*, Hamburg.

Streim, H. (1975): Heuristische Lösungsverfahren - Versuch einer Begriffserklärung, in: *Zeitschrift für Operations Research*, 19, S. 143-162.

Strüker, J. (2005): *Individualisierung im stationären Einzelhandel*, Wiesbaden.

Strüker, J. & Gille, D. (2006): *RFID in Deutschland*, Freiburg.

Strüker, J., Gille, D. & Faupel, T. (2008): *RFID Report 2008 - Optimierung von Geschäftsprozessen in Deutschland*, Düsseldorf.

Sturm, T. F. & Schulze, J. (2008): *Quantum Computation aus algorithmischer Sicht*, München.

Subirana, B., Eckes, C., Herman, G., Sarma, S. & Barrett, M. (2003): Measuring the Impact of Information Technology on Value and Productivity using a Process-Based Approach: The case for RFID Technologies, Cambridge.

Sumichrast, R. T., Russel, R. S. & Taylor, B. W. (1992): A comparative analysis of sequencing procedure for mixed-model assembly line in a just-in-time production system, in: *International Journal of Production Research*, 30 (1), S. 199-214.

Takeda, H. (2006): *Das synchrone Produktionssystem*, Landsberg.

Tellkamp, C. (2006): *The Impact of Auto-ID Technology on Process Performance - RFID in the FMCG Supply Chain*, St. Gallen.

Tempelmeier, H. (2001): *Master Planning mit Advanced Planning Systems*, Norderstedt.

Thiesse, F. & Fleisch, E. (2007): Zum Einsatz von RFID in der Filiallogistik eines Einzelhändlers: Ergebnisse einer Simulationsstudie, in: *eOrganisation: Service-, Prozess-, Market-Engineering - Tagungsband der 8. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik*, Band 1, Karlsruhe, S. 71-88.

Thomopoulos, N. T. (1967): Line balancing - Sequencing for mixed-model assembly, in: *Management Science*, 14 (2), S. B59-B75.

Tseng, M. & Jiao, J. (2001): Mass Customization, in: Salvendy, G.: *Handbook of Industrial Engineering*, New York, S. 684-709.

Ulungu, E. L., Teghem, J., Fortemps, P. H. & Tuytens, D. (1999): A Tool for Solving Multiobjective Combinatorial Optimization Problems, in: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8 (4), S. 221-236.

van Zante-de Fokkert, J. & de Kok, T. G. (1997): The mixed and multi model line balancing problem: A comparison, in: *European Journal of Operational Research*, 100 (3), S. 399-412.

Vargas, L. G. (1990): An overview of the analytic hierarchy process and its applications, *European Journal of Operation Research*, 48 (1), S. 2-8.

VDEB (2006): *Management-Leitfaden für den Einsatz von RFID-Systemen*, <http://www.vdeb.de/download/2006/Management-Leitfaden-RFID-2006-VDEB-AIM.pdf>, abgerufen am: 04.08.2008.

VDI (1996): *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen Richtlinien-Entwurf: VDI 3633*, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, Berlin

VDI (2004): *VDI-Richtlinie 4400, Blatt 2 - Logistikkennzahlen für die Produktion*, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, Berlin.

Wachsmann, J. (2006): *Kennliniengestützte Durchführung von Logistiksimulationen*, Hannover

Wamba, S. F., Lefebvre, L. A. & Lefebvre, E. (2006): Enabling intelligent B-to-B eCommer- ce supply chain management using RFID and the EPC network: a case study in the

- retail industry, in: Proceedings of the 8th international conference on Electronic commerce, New Brunswick, S. 281-288.
- Want, R. (2004): The Magic of RFID, in: ACM Queue, 2 (7), S. 41-48.
- Weber, J. (2007): Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten, Dortmund.
- Weber, K. (1993): Mehrkriterielle Entscheidungen, München.
- Weber, K. (1995): AHP-Analyse, in: Journal of Planning, 2 (6), S. 185-195.
- Wester, L. & Kilbridge, M. (1964): The assembly line model-mix sequencing problem, in: Proceedings of the third international conference on Operations Research, Oslo, S. 247-276.
- Westkämper, E., Kirchner, S. & Winkler, R. (2003): Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen: Ergebnisse einer Unternehmensbefragung unter 200 deutschen produzierenden Unternehmen, in: wt Werkstatttechnik, 93 (4), S. 254-260.
- Wiederhold, G. (1992): Mediators in the Architecture of Future Information Systems, in: IEEE Computer, 25 (3), S. 38-49.
- Wiendahl, H.-P. (2007): Betriebsorganisation für Ingenieure, München.
- Wild, R. (1972): Mass-production Management, London.
- Wildemann, H. (1980): Flexible Werkstattsteuerung durch Integration japanischer KANBAN-Prinzipien in deutschen Unternehmen: Pilotanwendungen, München.
- Wildemann, H. (1993): Lean management: Strategien zur Erreichung wettbewerbsfähiger Unternehmen, Frankfurt am Main.
- Wildemann, H. (2007): Kanban-Produktionssteuerung: Einsatz von Karten und elektronischen Kanban zur Einführung des Hol-Prinzips, München.
- Windt, K. (2006): Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik, in: Vec, M., Hütt, M. & Freund, A.: Selbstorganisation - Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft, Köln, S. 271-314.
- Zahedi, F. (1986): The analytic hierarchy process - A survey of the method and its applications, in: Interfaces, 16 (4), S. 96-108.
- Zäpfle, G. (1996): Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagements, Berlin.
- Zäpfle, G. (1989): Taktisches Produktionsmanagement, Berlin.
- Zäpfle, G. & Hödlmoser, P. (1992): Läßt sich das Kanban-Konzept bei einer Variantenfertigung wirtschaftlich einsetzen?, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 62 (4), S. 437-458.
- Zeigler, B., Praehofer, H. & Kim, T. G. (2000): Theory of Modelling and Simulation, San Diego.

Zelewski, S. (1998): Flexibilitätsorientierte Produktionsplanung und -steuerung, in: Corsten, H. & Gössinger, R.: Dezentrale Produktionsplanungs- und -steuerungs-Systeme, Stuttgart, S. 235-257.

Ziegenbalg, J., Ziegenbalg, O. & Ziegenbalg, B. (2007): Algorithmen, Frankfurt am Main.

Ziegler, H. (1990): Produktionssteuerung bei Mehrproduktfließlinien, Paderborn.

Zitzler, S. (1999): Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications, Aachen.

Anhang

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario I(a):

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	159	-29.056	2019,3	1545935,0
2	234	-35.127	2161,1	1592695,0
3	187	-19.645	1713,2	1067263,5
4	193	-17.564	1715,3	1012122,0
5	152	-28.006	1920,4	1330962,0
6	161	-26.586	1844,4	1343768,5
7	186	-32.461	2273,8	1486480,0
8	178	-31.095	2251,9	1747423,0
9	110	-20.066	1741,8	1234558,5
10	160	-29.110	2175,0	1766448,5
11	112	-28.412	2004,7	1743218,5
12	152	-32.060	2014,1	1429683,0
13	152	-17.725	1525,3	769111,0
14	126	-30.076	2098,8	1672710,0
15	104	-20.263	1659,7	1085605,5
16	180	-24.606	1962,7	1482186,5
17	166	-26.103	1876,8	1444030,0
18	171	-28.544	1925,2	1249132,0
19	98	-28.926	2102,8	1684678,0
20	240	-30.120	1928,9	1465888,0
21	141	-29.004	2070,0	1988827,5
22	135	-22.105	1739,3	1260640,0
23	113	-24.603	1985,6	1499041,0
24	172	-35.008	2342,6	2229976,0
25	174	-30.891	2118,6	1701552,5
26	189	-20.783	1536,6	1086768,0
27	217	-28.466	2023,7	1750311,0
28	130	-21.430	1960,9	1343289,0
29	113	-29.998	1926,8	1507622,5
30	156	-35.780	2277,2	1946061,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>158,7</i>	<i>-27120,6</i>	<i>1963,2</i>	<i>1482266,3</i>

A 1: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=100%, RDZ=0%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	162	-28.889	2000,3	1549535,5
2	239	-34.653	2152,0	1586886,5
3	168	-18.805	1687,4	1060170,5
4	193	-17.564	1704,6	1067603,0
5	159	-27.817	1915,6	1400956,5
6	149	-26.227	1839,4	1402026,0
7	224	-32.653	2272,5	1590901,0
8	149	-29.699	2208,8	1830666,5
9	117	-20.218	1738,7	1304908,0
10	153	-28.784	2152,9	1760188,0
11	117	-27.330	2002,3	1747343,5
12	145	-31.605	2002,7	1427996,5
13	167	-17.944	1531,3	773843,5
14	148	-30.136	2118,4	1677397,0
15	99	-20.149	1652,6	1085198,0
16	180	-24.606	1954,8	1482151,5
17	166	-24.521	1862,0	1443576,5
18	186	-28.348	1911,3	1252003,0
19	98	-28.180	2085,6	1685158,0
20	238	-29.623	1914,3	1459814,5
21	138	-27.343	2056,7	1987832,0
22	147	-21.779	1731,7	1261569,0
23	96	-24.246	1962,6	1488011,5
24	148	-34.714	2333,6	2225644,0
25	140	-29.635	2111,2	1694079,0
26	179	-19.511	1520,6	1081764,0
27	229	-28.215	2011,1	1744080,0
28	141	-21.279	1955,9	1344605,0
29	113	-30.015	1942,1	1507465,0
30	132	-35.128	2256,3	1937045,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>157,3</i>	<i>-26653,9</i>	<i>1953,0</i>	<i>1495347,3</i>

A 2: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=5%, BZR=5%, WTZ=85%, RDZ=5%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	162	-28.889	2000,3	1535078,5
2	239	-34.653	2152,0	1571131,5
3	168	-18.805	1687,4	1058310,0
4	193	-17.564	1704,6	1064739,5
5	159	-27.817	1915,6	1403988,0
6	149	-26.227	1839,4	1417680,0
7	224	-32.653	2272,5	1593449,5
8	149	-29.699	2208,8	1822861,0
9	117	-20.218	1738,7	1299925,5
10	153	-28.784	2152,9	1786278,5
11	117	-27.330	2002,3	1741715,5
12	145	-31.605	2002,7	1422163,0
13	167	-17.944	1531,3	770135,5
14	148	-30.136	2118,4	1665909,0
15	99	-20.149	1652,6	1085722,0
16	180	-24.606	1954,8	1486920,0
17	166	-24.521	1862,0	1450674,5
18	186	-28.348	1911,3	1249632,0
19	98	-28.180	2085,6	1679114,5
20	238	-29.623	1914,3	1440616,5
21	138	-27.343	2056,7	1990485,5
22	147	-21.779	1731,7	1264758,0
23	96	-24.246	1962,6	1484442,0

24	148	-34.714	2333,6	2222146,0
25	140	-29.635	2111,2	1701421,0
26	179	-19.511	1520,6	1077664,5
27	229	-28.215	2011,1	1727963,0
28	141	-21.279	1955,9	1351927,5
29	113	-30.015	1942,1	1498127,5
30	132	-35.128	2256,3	1937712,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>157,3</i>	<i>-26653,9</i>	<i>1953,0</i>	<i>1493423,1</i>

A 3: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=10%, BZR=10%, WTZ=70%, RDZ=10%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	123	-28.740	2065,2	1526469,0
2	167	-33.413	2123,2	1562407,5
3	150	-18.701	1691,5	1049427,5
4	200	-15.591	1664,5	1067361,0
5	171	-27.284	1935,7	1410297,5
6	188	-27.185	1878,5	1417746,0
7	162	-30.099	2193,1	1567848,0
8	162	-29.710	2211,2	1827778,5
9	105	-19.818	1737,0	1294649,5
10	199	-26.658	2153,0	1780913,5
11	124	-26.614	2019,7	1742437,5
12	139	-31.214	2004,4	1419216,5
13	160	-18.116	1545,1	772516,0
14	143	-29.186	2104,3	1661725,5
15	85	-19.993	1674,8	1081064,5
16	176	-24.196	1970,1	1476095,0
17	164	-24.823	1912,6	1432142,0
18	177	-28.467	1944,5	1248050,0
19	132	-26.808	2046,6	1688136,5
20	170	-29.283	1883,4	1436593,5
21	131	-26.393	2134,3	1979961,0
22	215	-22.903	1775,5	1291666,0
23	125	-25.132	1996,4	1496605,0
24	131	-33.030	2349,8	2213507,0
25	143	-28.586	2111,2	1689829,5
26	169	-19.696	1535,6	1071227,5
27	205	-27.338	1983,2	1729818,0
28	142	-20.920	1984,2	1349143,0
29	108	-28.109	1943,6	1497318,0
30	169	-36.030	2226,8	1953713,0
<i>Durchschnitt</i>	<i>154,5</i>	<i>-26134,5</i>	<i>1960,0</i>	<i>1491188,8</i>

A 4: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=15%, BZR=15%, WTZ=55%, RDZ=15%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	133	-30.396	2125,4	1522429,0
2	210	-34.365	2155,1	1591036,0
3	121	-19.522	1733,8	1036372,5
4	181	-15.468	1656,5	1066254,5
5	185	-26.926	1914,1	1404554,5
6	137	-27.061	1895,2	1396715,0
7	146	-27.226	2148,5	1557206,5
8	184	-29.727	2227,8	1841483,5
9	122	-18.041	1814,4	1296319,0
10	179	-24.889	2129,8	1773413,0
11	117	-26.434	2015,7	1728700,0
12	139	-30.971	1990,5	1415414,5
13	154	-18.242	1573,2	767440,5
14	159	-28.281	2075,8	1673715,5
15	87	-20.163	1703,1	1053361,0
16	166	-23.223	1899,0	1469338,0
17	180	-26.386	1991,2	1443012,5
18	160	-27.955	1942,5	1246566,0
19	166	-26.011	2031,5	1703581,0
20	173	-28.189	1879,8	1426971,0
21	131	-27.740	2182,2	1980041,5
22	220	-22.526	1767,8	1295986,5
23	110	-24.007	2013,2	1476295,0
24	171	-32.824	2374,0	2221562,0
25	194	-28.389	2168,8	1702716,5
26	169	-19.696	1535,6	1071227,5
27	183	-25.789	1947,3	1715899,5
28	139	-20.167	1970,6	1344665,0
29	106	-27.372	1976,1	1491117,5
30	121	-34.891	2144,3	1924979,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>154,8</i>	<i>-25762,6</i>	<i>1966,1</i>	<i>1488012,5</i>

A 5: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=20%, BZR=20%, WTZ=40%, RDZ=20%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
 (ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	133	-30.396	2125,4	1522429,0
2	176	-28.482	1989,5	1581245,0
3	146	-18.406	1671,5	1039992,0
4	168	-15.130	1641,0	1055539,0
5	183	-24.528	1762,8	1395181,5
6	148	-38.044	2388,2	1381549,0
7	182	-25.278	2078,6	1574312,5
8	147	-26.820	2067,6	1820421,5
9	117	-17.140	1782,2	1289317,0
10	170	-24.026	2052,0	1755466,5
11	160	-27.103	2041,5	1731510,0
12	124	-29.007	1896,6	1412875,0
13	113	-16.104	1549,5	744635,0
14	149	-26.913	2017,3	1684814,0
15	134	-20.186	1711,0	1081443,5
16	139	-15.992	1688,7	1460106,0
17	113	-28.888	2003,8	1422544,0
18	231	-29.557	2070,4	1262720,0
19	148	-25.457	2058,7	1677457,5
20	159	-26.067	1877,1	1417294,5
21	137	-32.744	2368,6	1981277,0
22	178	-20.564	1712,8	1281389,0
23	122	-22.022	1966,1	1469296,0
24	230	-33.167	2345,3	2240776,0
25	194	-26.465	2070,7	1709448,0
26	156	-19.838	1627,9	1057527,0
27	155	-22.361	1836,9	1723030,0
28	133	-19.093	1871,0	1329916,5
29	102	-26.147	1915,5	1478854,5
30	178	-31.608	2026,6	1934490,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>154,2</i>	<i>-24917,8</i>	<i>1940,5</i>	<i>1483895,2</i>

A 6: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=25%, BZR=25%, WTZ=25%, RDZ=25%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
 (ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario I(b):

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	25	-41.584	2275,4	1510777,0
2	25	-35.210	2096,5	1516962,0
3	25	-20.412	1825,7	1024611,5
4	25	-19.084	1912,8	1031175,5
5	25	-36.119	2189,6	1371966,0
6	25	-37.106	2373,6	1375674,0
7	25	-31.293	2228,8	1550259,0
8	25	-36.134	2338,9	1805196,5
9	25	-28.658	2202,4	1288436,5
10	25	-38.246	2448,8	1732445,0
11	25	-40.786	2433,9	1707799,5
12	25	-37.966	2292,4	1399540,5
13	25	-22.854	1680,9	760381,0
14	25	-42.059	2523,3	1644040,5
15	25	-25.516	1774,9	1058425,0
16	25	-32.150	2276,3	1443060,5
17	25	-39.421	2267,5	1412452,5
18	25	-33.497	2010,4	1184217,0
19	25	-35.361	2256,1	1671865,0
20	25	-32.451	2032,0	1395414,0
21	25	-38.318	2553,2	1947498,0
22	25	-31.389	2091,6	1235688,5
23	25	-34.545	2402,9	1481003,0
24	25	-41.664	2290,7	2159954,5
25	25	-36.166	2142,7	1672308,5
26	25	-31.360	2092,0	1036509,0
27	25	-37.375	2228,7	1608173,0
28	25	-24.219	2111,0	1326082,5
29	25	-36.201	2188,9	1493633,5
30	25	-42.981	2591,8	1910516,0
<i>Durchschnitt</i>	<i>25</i>	<i>-34004,2</i>	<i>2204,4</i>	<i>1458535,5</i>

A 7: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=100%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	32	-33.276	2187,5	1491417,0
2	27	-29.900	2014,5	1524110,0
3	32	-23.817	1888,6	1006544,5
4	32	-14.524	1794,3	1015673,0
5	27	-32.403	2181,7	1356075,5
6	27	-32.675	2220,8	1359775,5
7	32	-23.121	1975,0	1529495,5
8	32	-31.708	2232,5	1774342,5
9	32	-16.684	1810,8	1268945,5
10	27	-35.593	2397,2	1715953,5
11	32	-25.862	2067,5	1708712,0
12	37	-30.598	2075,5	1384881,0
13	32	-18.728	1619,0	744755,5
14	27	-38.303	2461,5	1628231,0
15	27	-21.950	1943,8	1072258,5
16	32	-23.805	1881,0	1424299,0
17	37	-31.806	2214,8	1391380,5

18	32	-31.963	2144,3	1210313,0
19	32	-26.986	2109,9	1651209,0
20	25	-24.277	1837,1	1378288,0
21	32	-33.656	2342,8	1932665,0
22	27	-27.535	1968,9	1219826,5
23	27	-26.969	2208,8	1458926,5
24	27	-38.972	2628,8	2162899,5
25	32	-27.908	2030,1	1651708,0
26	27	-25.849	1929,3	1020756,5
27	27	-32.723	2209,2	1650579,5
28	27	-20.763	2043,5	1310104,0
29	32	-28.456	2047,7	1464477,5
30	27	-37.882	2463,2	1894548,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>29,9</i>	<i>-28289,7</i>	<i>2097,6</i>	<i>1446771,7</i>

A 8: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=5%, BZR=5%, WTZ=5%, RDZ=5%, RAR=80%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	39	-33.656	2200,7	1495998,0
2	56	-30.876	2015,0	1530454,0
3	32	-22.703	1845,8	1007331,5
4	32	-14.781	1760,9	1015923,0
5	44	-25.206	1914,0	1362815,0
6	44	-25.435	1899,3	1365172,0
7	32	-22.710	1965,2	1529603,5
8	39	-30.586	2198,6	1778243,0
9	44	-19.205	1896,8	1274084,5
10	32	-24.665	2069,8	1716965,5
11	32	-25.862	2067,5	1708712,0
12	42	-29.404	1973,6	1384525,5
13	32	-18.470	1592,4	745007,5
14	44	-31.257	2183,7	1635911,0
15	32	-20.038	1749,3	1069974,5
16	32	-23.805	1881,0	1424299,0
17	37	-31.806	2214,8	1391380,5
18	32	-31.963	2144,3	1210313,0
19	32	-26.986	2109,9	1651209,0
20	25	-24.277	1837,1	1378288,0
21	32	-33.656	2342,8	1932665,0
22	27	-27.535	1968,9	1219826,5
23	27	-26.969	2208,8	1458926,5
24	27	-38.972	2628,8	2162899,5
25	32	-27.908	2030,1	1651708,0
26	27	-25.849	1929,3	1020756,5
27	27	-32.723	2209,2	1650579,5
28	27	-20.763	2043,5	1310104,0
29	32	-28.456	2047,7	1464477,5
30	27	-37.882	2463,2	1894548,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>34,0</i>	<i>-27146,8</i>	<i>2046,4</i>	<i>1448090,1</i>

A 9: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=10%, BZR=10%, WTZ=10%, RDZ=10%, RAR=60%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	49	-35.072	2296,1	1498911,0
2	63	-30.401	2039,7	1537814,0
3	37	-21.441	1800,5	1008672,5
4	37	-13.099	1702,9	1016971,0
5	44	-25.002	1855,7	1364687,0
6	56	-30.255	2006,9	1364800,0
7	39	-23.130	1979,0	1531801,5
8	59	-30.673	2265,1	1788310,0
9	42	-19.768	1934,4	1275358,0
10	39	-26.932	2179,3	1720004,5
11	49	-25.770	2031,3	1711467,0
12	49	-29.348	1968,7	1388152,0
13	42	-16.737	1541,0	745442,5
14	44	-29.897	2139,1	1637006,0
15	56	-20.804	1785,4	1076924,5
16	44	-24.256	1918,6	1427966,0
17	54	-27.931	2100,6	1403009,5
18	63	-31.355	2156,3	1223495,0
19	39	-26.743	2101,6	1653085,0
20	62	-25.903	1892,0	1382064,5
21	39	-33.864	2349,5	1935323,0
22	44	-21.055	1758,6	1223126,5
23	49	-24.945	2063,0	1457170,5
24	49	-36.260	2333,9	2170627,0
25	81	-26.236	2060,6	1665433,5
26	59	-20.059	1663,7	1028316,5
27	37	-18.217	1708,0	1660016,0
28	39	-21.365	2005,5	1311985,0
29	32	-28.246	2040,7	1465107,5
30	44	-33.498	2200,8	1902020,0
<i>Durchschnitt</i>	<i>48,0</i>	<i>-25942,1</i>	<i>1996,0</i>	<i>1452502,2</i>

A 10: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=15%, BZR=15%, WTZ=15%, RDZ=15%, RAR=40%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	93	-33.942	2255,9	1510303,0
2	104	-31.291	2110,0	1551911,0
3	66	-18.223	1693,3	1019536,5
4	83	-14.779	1742,1	1025460,5
5	64	-23.984	1809,5	1367691,0
6	73	-27.179	1917,7	1374093,0
7	88	-26.379	2131,2	1550624,0
8	83	-29.533	2206,9	1799794,0
9	78	-18.467	1887,6	1283058,5
10	80	-26.841	2202,0	1738179,5
11	73	-27.049	2046,6	1717447,5
12	88	-29.760	1982,0	1397747,0
13	62	-16.411	1529,4	748322,5
14	64	-27.463	2057,3	1639264,0
15	76	-20.082	1727,8	1078402,5
16	56	-22.233	1872,1	1430540,0
17	110	-30.788	2138,4	1418269,5
18	134	-31.684	2082,6	1243426,5
19	42	-25.033	2044,5	1654138,5
20	93	-25.407	1875,3	1388175,0

21	80	-33.731	2386,3	1954481,0
22	78	-22.709	1808,5	1234373,0
23	59	-26.401	2111,2	1458481,0
24	63	-35.367	2449,8	2180153,5
25	125	-28.020	2138,4	1679548,5
26	91	-21.357	1692,6	1035789,5
27	66	-24.872	1768,0	1672616,0
28	63	-20.120	1958,9	1320174,0
29	73	-27.658	2019,7	1474122,5
30	69	-34.404	2125,9	1905311,0
<i>Durchschnitt</i>	<i>79,2</i>	<i>-26038,9</i>	<i>1992,4</i>	<i>1461714,5</i>

A 11: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=20%, BZR=20%, WTZ=20%, RDZ=20%, RAR=20%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=25%, BZR=25%, WTZ=25%, RDZ=25%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%) siehe A 6.

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario II(a):

Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=100%, RDZ=0%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%) siehe A 1

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	125	-29.672	2034,4	1530303,0
2	186	-35.029	2151,1	1574179,0
3	117	-18.834	1685,3	1039550,5
4	149	-17.403	1746,5	1045725,0
5	149	-28.232	1937,0	1397497,5
6	156	-26.923	1875,6	1403586,0
7	169	-32.873	2300,3	1568888,5
8	142	-30.389	2242,6	1829262,5
9	100	-19.948	1749,5	1293804,5
10	143	-28.912	2169,1	1753650,0
11	112	-27.204	2017,3	1740427,5
12	128	-32.018	2023,1	1415849,5
13	156	-17.856	1547,3	771182,0
14	148	-30.373	2127,3	1669484,0
15	92	-20.442	1659,5	1084549,5
16	161	-24.484	1976,4	1470821,0
17	129	-24.899	1893,3	1424148,5
18	150	-28.575	1925,7	1240431,5
19	98	-30.137	2144,1	1679295,0
20	235	-29.673	1932,7	1450235,5
21	94	-27.887	2077,5	1966607,5
22	144	-22.894	1763,6	1259097,0
23	79	-26.280	2074,9	1624488,5

24	140	-35.090	2347,1	2220879,5
25	157	-30.037	2128,7	1694158,0
26	143	-19.305	1540,3	1064492,0
27	193	-28.369	2008,5	1725053,5
28	138	-21.756	1981,0	1346634,5
29	108	-30.568	1965,9	1502617,5
30	132	-35.703	2278,9	1645011,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>139,1</i>	<i>-27058,8</i>	<i>1976,8</i>	<i>1481063,7</i>

A 12: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=80%, RDZ=0%, RAR=5%, PKR=5%, DBR=5%, RLR=5%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	125	-29.257	2.025,7	1.527.797,0
2	126	-34.846	2.162,2	1.550.034,5
3	106	-20.297	1.717,3	1.057.184,5
4	139	-17.255	1.746,7	1.040.457,5
5	146	-29.238	1.979,7	1.396.883,5
6	122	-27.612	1.932,6	1.392.498,0
7	125	-32.822	2.302,1	1.554.383,5
8	108	-31.104	2.257,4	1.806.755,5
9	97	-20.407	1.799,1	1.290.628,0
10	126	-28.562	2.158,0	1.748.361,0
11	112	-28.218	2.048,7	1.738.341,0
12	104	-32.689	2.069,7	1.400.227,5
13	146	-18.110	1.563,4	768.674,5
14	121	-30.573	2.152,1	1.661.533,5
15	84	-20.853	1.669,4	1.059.455,5
16	113	-24.965	1.989,1	1.456.111,5
17	99	-26.764	1.977,9	1.410.357,0
18	116	-28.947	1.940,4	1.235.609,0
19	81	-31.441	2.181,3	1.671.124,0
20	158	-29.264	1.936,6	1.415.673,5
21	84	-28.935	2.151,0	1.961.036,0
22	120	-23.094	1.779,4	1.247.607,0
23	71	-26.450	2.108,9	1.620.380,0
24	120	-34.974	2.359,5	2.211.769,5
25	143	-31.117	2.186,8	1.688.725,5
26	113	-19.388	1.565,4	1.053.419,5
27	132	-28.574	1.998,2	1.692.584,5
28	138	-22.222	2.003,0	1.344.538,5
29	84	-30.290	1.954,7	1.488.845,5
30	113	-36.345	2.333,0	1.560.143,6
<i>Durchschnitt</i>	<i>115,7</i>	<i>-27487,1</i>	<i>2001,6</i>	<i>1468371,3</i>

A 13: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=60%, RDZ=0%, RAR=10%, PKR=10%, DBR=10%, RLR=10%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	115	-30.431	2050,9	1521943,5
2	75	-36.092	2206,5	1543034,0
3	121	-22.236	1816,6	1037679,0
4	118	-18.080	1799,4	1036447,5
5	110	-29.762	1998,1	1377888,0
6	122	-28.900	2005,3	1388822,5
7	115	-32.918	2305,6	1552780,5
8	81	-30.958	2237,9	1790391,5
9	78	-23.927	1953,0	1283817,0
10	88	-28.744	2182,4	1733615,0
11	66	-28.758	2061,4	1724048,5
12	72	-33.220	2142,4	1394621,0
13	94	-18.902	1622,8	761043,5
14	92	-30.108	2157,1	1640622,0
15	79	-22.437	1712,5	1118398,5
16	93	-27.006	2072,6	1448236,0
17	96	-28.958	2064,0	1409465,5
18	103	-29.751	2005,7	1226861,0
19	66	-34.122	2262,4	1663788,0
20	110	-29.168	1947,0	1404366,5
21	96	-32.125	2256,9	1961333,0
22	79	-23.613	1809,9	1233425,0
23	54	-28.617	2280,2	1614325,5
24	103	-33.669	2322,4	2191552,5
25	113	-30.986	2217,0	1676932,5
26	81	-19.997	1627,0	1040372,0
27	103	-27.763	1983,6	1678740,0
28	89	-22.154	2026,8	1322833,0
29	64	-31.670	2006,1	1537045,0
30	88	-36.173	2339,9	1568577,1
<i>Durchschnitt</i>	<i>92,1</i>	<i>-28.374,8</i>	<i>2.049,1</i>	<i>1.462.766,8</i>

A 14: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=40%, RDZ=0%, RAR=15%, PKR=15%, DBR=15%, RLR=15%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	54	-29.726	2190,6	1497247,0
2	61	-33.906	2294,2	1532370,5
3	69	-24.747	1911,8	1077398,0
4	71	-17.727	1916,3	1022593,0
5	86	-28.294	2097,1	1370300,5
6	54	-30.228	2156,0	1364394,5
7	54	-32.246	2365,9	1535575,0
8	61	-32.469	2360,6	1782583,5
9	61	-24.266	2007,2	1282595,0
10	54	-26.353	2242,9	1796998,0
11	64	-30.890	2202,5	1720256,0
12	64	-30.409	2261,4	1391345,5
13	69	-18.768	1682,3	749838,5
14	55	-33.240	2273,7	1637267,0
15	66	-23.813	1740,2	1137872,5
16	81	-28.826	2243,0	1440282,5
17	64	-31.731	2243,2	1401830,0
18	69	-31.613	2175,0	1217821,5
19	52	-31.010	2411,3	1778322,5
20	76	-30.376	2062,3	1389535,0

22	47	-27.340	2015,6	1245898,0
23	49	-29.539	2417,2	1616702,5
24	61	-28.668	2410,7	1687324,2
25	88	-30.155	2307,7	1661593,0
26	47	-25.376	1910,3	1026665,0
27	52	-30.977	2188,7	1656000,5
28	54	-20.098	2110,4	1392317,0
29	59	-33.430	2147,6	1531818,5
30	49	-38.817	2542,8	1564490,6
<i>Durchschnitt</i>	<i>62,2</i>	<i>-28861,1</i>	<i>2174,0</i>	<i>1448559,6</i>

A 15: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=20%, RDZ=0%, RAR=20%, PKR=20%, DBR=20%, RLR=20%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	27	-41.681	2412,4	1493453,5
2	68	-42821	2431,17	1512788,50
3	47	-27378	1995,30	1009212,00
4	61	-22040	1946,37	1016291,50
5	44	-37749	2370,20	1284658,50
6	66	-38652	2451,53	1360405,50
7	56	-34077	2367,70	1534753,50
8	71	-38431	2333,90	1789601,00
9	37	-29784	2189,00	1273098,00
10	42	-37480	2390,60	1689520,50
11	44	-40060	2379,07	1691922,00
12	66	-38922	2470,40	1384039,00
13	49	-22744	1806,30	745140,50
14	32	-41039	2621,73	1628142,00
15	37	-24649	1911,53	1009926,50
16	64	-34228	2330,23	1427552,50
17	47	-38463	2562,83	1396663,00
18	49	-34181	2130,57	1110821,00
19	56	-38143	2389,20	1604033,00
20	47	-34397	2246,23	1380096,50
21	54	-39065	2735,63	1823430,50
22	61	-33205	2260,40	1220736,00
23	44	-32463	2461,37	1450858,50
24	32	-40038	2652,77	2092941,00
25	66	-36238	2368,43	1656754,50
26	37	-30876	2190,77	1020836,50
27	44	-35644	2202,40	1592315,50
28	44	-27254	2154,13	1310520,00
29	73	-37959	2244,40	1294536,00
30	32	-42.109	2676,2	1894625,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>49,9</i>	<i>-35059,0</i>	<i>2322,8</i>	<i>1423322,4</i>

A 16: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=25%, RAR=25%, PKR=25%, DBR=25%, RLR=25%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario II(b):

Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=100%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%) siehe A 7

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	27	-41.681	2412,4	1493453,5
2	39	-37.337	2249,3	1527998,0
3	27	-20.781	1862,7	1008635,0
4	27	-19.451	1950,9	1015197,0
5	27	-36.487	2328,7	1355985,5
6	27	-37.476	2413,6	1359691,5
7	39	-31.663	2269,9	1534274,5
8	51	-36.505	2381,0	1789210,0
9	27	-29.030	2245,5	1272448,0
10	32	-38.619	2492,9	1716454,5
11	39	-41.160	2479,0	1691807,0
12	27	-38.341	2338,5	1383546,0
13	27	-23.230	1728,0	744384,5
14	27	-42.436	2571,5	1628042,0
15	27	-25.894	2024,0	1042424,5
16	27	-32.529	2326,4	1427058,0
17	37	-39.801	2518,7	1396448,0
18	39	-33.878	2062,6	1168210,5
19	27	-35.743	2309,3	1655856,5
20	27	-32.834	2086,1	1379403,5
21	27	-38.702	2608,5	1931485,5
22	27	-31.773	2147,8	1219674,0
23	39	-34.931	2460,1	1464986,5
24	27	-42.051	2648,9	2143936,0
25	39	-36.561	2402,0	1656288,0
26	27	-31.749	2152,6	1020486,5
27	27	-37.768	2290,0	1592148,5
28	27	-24.710	2173,3	1310056,0
29	39	-36.593	2252,2	1477605,0
30	27	-43.404	2660,2	1894485,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>31,1</i>	<i>-34437,3</i>	<i>2294,9</i>	<i>1443389,3</i>

A 17: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=85%, PKR=5%, DBR=5%, RLR=5%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	27	-41.681	2412,4	1493453,5
2	39	-37.337	2249,3	1527998,0
3	27	-20.781	1862,7	1008635,0
4	27	-19.451	1950,9	1015197,0
5	27	-36.487	2328,7	1355985,5
6	27	-37.476	2413,6	1307040,5
7	39	-31.663	2269,9	1481179,0
8	51	-36.505	2381,0	1742435,5
9	27	-29.030	2245,5	1272448,0
10	32	-38.619	2492,9	1716454,5
11	39	-41.160	2479,0	1613723,0
12	27	-38.702	2608,5	1931485,5
13	27	-23.230	1728,0	744384,5
14	27	-42.436	2571,5	1538921,0
15	27	-25.894	2024,0	1042424,5
16	37	-39.801	2518,7	1396448,0
17	110	-30.788	2138,4	1372356,0
18	39	-33.878	2062,6	1168210,5
19	27	-35.743	2309,3	1610435,0
20	27	-32.834	2086,1	1379403,5

21	27	-38.702	2608,5	1931485,5
22	27	-31.773	2147,8	1162389,0
23	39	-34.931	2460,1	1464986,5
24	27	-42.051	2648,9	2143936,0
25	39	-36.561	2402,0	1656288,0
26	27	-31.749	2152,6	1020486,5
27	27	-37.768	2290,0	1592148,5
28	27	-24.710	2173,3	1248085,5
29	39	-36.593	2252,2	1428964,5
30	27	-43.404	2660,2	1894485,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>33,9</i>	<i>-34391,3</i>	<i>2297,6</i>	<i>1442062,5</i>

A 18: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=70%, PKR=10%, DBR=10%, RLR=10%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	27	-41.681	2412,4	1493453,5
2	68	-42.821	2431,2	1529155,0
3	47	-27.378	2087,1	1009212,0
4	44	-21.514	2021,9	1015689,0
5	49	-37.605	2365,2	1356128,0
6	32	-37.800	2424,3	1359776,5
7	56	-33.853	2360,2	1534673,5
8	61	-38.291	2447,5	1789456,0
9	32	-30.138	2282,3	1272723,0
10	32	-38.619	2492,9	1716454,5
11	44	-41.372	2485,9	1691817,0
12	56	-41.636	2466,6	1383734,0
13	44	-23.689	1771,5	744558,5
14	27	-42.436	2571,5	1628042,0
15	37	-25.963	2023,6	1043546,5
16	49	-36.024	2446,2	1427367,0
17	42	-40.969	2557,5	1396528,0
18	49	-35.791	2130,6	1110821,0
19	44	-38.519	2398,8	1656078,5
20	49	-37.045	2246,0	1379915,0
21	44	-42.396	2731,0	1931810,5
22	44	-34.347	2231,0	1220196,0
23	39	-34.931	2460,1	1464986,5
24	27	-42.051	2648,9	2143936,0
25	61	-38.667	2471,4	1656582,0
26	32	-32.767	2186,3	1020831,5
27	27	-37.768	2290,0	1592148,5
28	44	-26.864	2259,5	1310200,0
29	61	-39.333	2342,1	1478007,0
30	27	-43.404	2660,2	1894485,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>43,2</i>	<i>-36189,1</i>	<i>2356,8</i>	<i>1441743,7</i>

A 19: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=55%, PKR=15%, DBR=15%, RLR=15%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	27	-41.681	2412,4	1493453,5
2	68	-42.821	2431,2	1529155,0
3	47	-27.378	2087,1	1009212,0
4	44	-21.514	2021,9	1015689,0
5	44	-37.695	2368,4	1356190,5
6	42	-37.841	2425,3	1360021,5
7	56	-34.077	2367,7	1534753,5
8	68	-38.390	2450,6	1789546,0
9	37	-30.664	2299,7	1273085,5
10	37	-38.994	2505,3	1716524,5
11	44	-41.652	2495,3	1691922,0
12	57	-41.678	2468,0	1383830,5
13	44	-23.542	1790,0	744810,5
14	32	-42.846	2585,0	1628052,0
15	37	-25.963	2023,6	1043546,5
16	44	-36.010	2445,9	1427374,0
17	47	-41.019	2559,0	1396620,5
18	49	-35.791	2130,6	1110821,0
19	56	-41.017	2518,3	1656726,5
20	49	-37.045	2246,0	1379915,0
21	44	-42.396	2731,0	1931810,5
22	54	-34.482	2235,2	1220213,0
23	39	-34.931	2460,1	1464986,5
24	27	-42.051	2648,9	2143936,0
25	56	-38.965	2481,5	1656712,0
26	37	-32.905	2190,8	1020836,5
27	27	-37.768	2290,0	1592148,5
28	44	-27.030	2265,1	1310280,0
29	66	-39.467	2346,4	1478054,5
30	32	-43.816	2673,7	1894550,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>45,2</i>	<i>-36381,0</i>	<i>2365,1</i>	<i>1441825,9</i>

A 20: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=40%, PKR=20%, DBR=20%, RLR=20%)
 (ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Durchlauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)
1	27	-41.681	2412,4	1493453,5
2	68	-42.821	2431,2	1512788,5
3	47	-27.378	1995,3	1009212,0
4	61	-22.040	1946,4	1016291,5
5	44	-37.749	2370,2	1284658,5
6	66	-38.652	2451,5	1360405,5
7	56	-34.077	2367,7	1534753,5
8	71	-38.431	2333,9	1789601,0
9	37	-29.784	2189,0	1273098,0
10	42	-37.480	2390,6	1689520,5
11	44	-40.060	2379,1	1691922,0
12	66	-38.922	2470,4	1384039,0
13	49	-22.744	1806,3	745140,5
14	32	-41.039	2621,7	1628142,0
15	37	-24.649	1911,5	1009926,5
16	64	-34.228	2330,2	1427552,5
17	47	-38.463	2562,8	1396663,0
18	49	-34.181	2130,6	1110821,0
19	56	-38.143	2389,2	1604033,0
20	47	-34.397	2246,2	1380096,5
21	54	-39.065	2735,6	1823430,5
22	61	-33.205	2260,4	1220736,0
23	44	-32.463	2461,4	1450858,5
24	32	-40.038	2652,8	2092941,0
25	66	-36.238	2368,4	1656754,5
26	37	-30.876	2190,8	1020836,5
27	44	-35.644	2202,4	1592315,5
28	44	-27.254	2154,1	1310520,0
29	73	-37.959	2244,4	1294536,0
30	32	-42.109	2676,2	1894625,5
<i>Durchschnitt</i>	<i>49,9</i>	<i>-35059,0</i>	<i>2322,8</i>	<i>1423322,4</i>

A 21: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=25%, PKR=25%, DBR=25%, RLR=25%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario III(a):

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	115	-7.921	1455,3	616845,5	59,7%	56,7%
2	118	-7.893	1427,9	622261,0	86,4%	50,0%
3	157	-6.242	1363,8	630628,5	81,3%	66,7%
4	139	-9.607	1502,5	680345,0	79,9%	71,9%
5	100	-8.351	1457,1	675689,5	86,0%	59,4%
6	98	-8.965	1479,6	628259,5	81,8%	62,5%
7	90	-4.312	1497,2	694759,5	86,3%	40,6%
8	114	-3.731	1468,4	633944,5	94,3%	46,9%
9	62	-6.476	1333,3	596552,0	79,9%	62,5%
10	81	-5.306	1573,4	698681,0	93,9%	46,9%
11	52	-6.107	1403,1	693367,0	90,8%	53,1%
12	112	-5.786	1387,5	630169,5	82,1%	50,0%
13	122	-12.772	1441,3	670783,0	81,3%	81,3%
14	59	-8.614	1602,6	696255,5	81,9%	56,3%
15	45	-4.136	1218,4	619844,0	87,9%	59,4%
16	95	-5.703	1440,9	595888,0	88,3%	50,0%
17	109	-6.590	1460,4	648926,5	76,8%	62,5%
18	84	-4.819	1450,3	648952,5	90,0%	53,1%
19	63	-4.706	1510,5	626858,0	86,3%	50,0%
20	153	-9.268	1460,3	650696,5	90,2%	59,4%
21	92	-6.338	1461,3	626885,5	85,6%	56,3%
22	95	-7.101	1366,5	639971,0	80,5%	62,5%
23	76	-4.910	1420,1	661219,5	81,8%	53,1%
24	77	-5.209	1411,0	617681,0	99,2%	40,6%
25	98	-5.565	1389,3	635743,5	88,0%	50,0%
26	157	-5.978	1143,2	497751,5	73,7%	65,6%
27	132	-5.875	1420,6	638160,5	97,2%	56,3%
28	64	-2.804	1435,4	613380,5	92,5%	50,0%
29	83	-7.802	1369,8	607932,5	83,1%	56,3%
30	61	-2.132	1397,2	599283,5	88,9%	43,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>96,8</i>	<i>-6367,3</i>	<i>1424,9</i>	<i>636590,5</i>	<i>85,2%</i>	<i>55,8%</i>

A 22: Ergebnisse der Simulationsstudie (LTR=0%, BZR=0%, WTZ=100%, RDZ=0%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	118	-7.715	1419,4	619429,0	88,2%	56,7%
2	106	-7.653	1426,3	617935,0	86,4%	50,0%
3	143	-5.560	1289,2	618288,0	83,7%	63,3%
4	139	-9.607	1488,5	681127,0	79,9%	76,7%
5	105	-7.740	1447,8	634218,5	86,0%	63,3%
6	86	-9.529	1477,5	622989,5	78,4%	66,7%
7	114	-4.284	1478,2	619607,5	86,0%	43,3%
8	95	-4.814	1479,9	660366,5	93,3%	53,3%
9	69	-6.558	1325,1	596004,0	79,9%	66,7%
10	64	-5.886	1548,1	639532,5	93,9%	50,0%
11	57	-5.960	1395,1	695637,0	90,8%	56,7%
12	105	-5.537	1378,9	630451,5	77,8%	53,3%
13	137	-12.931	1445,9	598205,5	78,5%	86,7%
14	86	-8.683	1636,3	700050,5	81,9%	60,0%
15	45	-4.101	1211,0	619944,0	87,9%	63,3%
16	107	-7.398	1461,6	665126,5	80,6%	56,7%
17	109	-6.715	1441,9	601493,0	76,8%	66,7%

18	109	-4.622	1424,9	619678,5	86,5%	56,7%
19	73	-4.443	1539,4	646856,0	84,7%	56,7%
20	151	-9.113	1455,9	651907,0	90,2%	63,3%
21	89	-5.713	1441,2	627261,0	82,1%	60,0%
22	95	-5.383	1316,5	588505,0	79,5%	63,3%
23	59	-4.774	1392,5	655451,5	81,8%	56,7%
24	77	-5.209	1411,0	617681,0	99,2%	43,3%
25	81	-4.844	1338,0	626060,5	92,3%	50,0%
26	147	-5.908	1130,0	494956,5	73,7%	70,0%
27	144	-5.948	1418,8	641457,5	96,1%	60,0%
28	69	-3.444	1475,3	666512,5	89,1%	56,7%
29	83	-7.682	1361,7	607965,0	83,1%	60,0%
30	61	-2.271	1458,2	621793,5	86,9%	46,7%
<i>Durchschnitt</i>	<i>97,4</i>	<i>-6334,2</i>	<i>1417,1</i>	<i>629549,7</i>	<i>85,2%</i>	<i>59,2%</i>

A 23: Ergebnisse der Simulationsstudie (LTR=5%, BZR=5%, WTZ=85%, RDZ=5%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	92	-8.066	1487,9	660971,0	88,2%	56,7%
2	82	-7.459	1440,5	615919,0	86,4%	50,0%
3	140	-5.648	1293,1	616707,5	83,7%	63,3%
4	132	-8.858	1480,8	679390,5	79,9%	76,7%
5	108	-6.916	1422,4	593041,0	85,2%	60,0%
6	115	-10.222	1495,7	629769,5	78,4%	66,7%
7	121	-6.024	1504,7	671168,5	87,0%	46,7%
8	71	-3.038	1442,4	625948,0	92,8%	50,0%
9	60	-6.555	1331,1	593573,0	79,9%	66,7%
10	114	-4.086	1548,7	703669,0	93,9%	50,0%
11	57	-6.406	1400,7	676234,0	90,8%	56,7%
12	92	-5.430	1391,8	628542,0	77,8%	53,3%
13	119	-13.398	1467,7	612933,5	78,5%	86,7%
14	57	-7.810	1608,2	691786,0	81,9%	60,0%
15	55	-4.026	1225,0	620019,0	87,9%	63,3%
16	102	-5.286	1445,6	551636,0	79,4%	53,3%
17	121	-7.005	1491,4	603349,0	76,8%	66,7%
18	96	-4.789	1456,1	618422,5	86,5%	56,7%
19	59	-3.817	1513,8	642039,0	84,7%	56,7%
20	134	-9.443	1456,7	643294,5	90,2%	63,3%
21	91	-4.377	1511,3	615154,5	81,1%	56,7%
22	95	-6.939	1365,7	645469,0	80,5%	66,7%
23	57	-6.636	1412,5	669261,0	81,8%	56,7%
24	79	-4.822	1450,6	614500,0	99,2%	43,3%
25	88	-5.449	1317,1	650910,0	92,3%	50,0%
26	140	-6.096	1160,2	492638,5	73,7%	70,0%
27	117	-5.552	1390,3	635816,5	96,1%	60,0%
28	78	-2.689	1460,9	617397,0	88,4%	53,3%
29	74	-6.638	1326,5	627728,5	83,1%	60,0%
30	73	-2.157	1442,2	621912,5	86,9%	46,7%
<i>Durchschnitt</i>	<i>94,0</i>	<i>-6187,9</i>	<i>1424,7</i>	<i>628973,3</i>	<i>85,1%</i>	<i>58,9%</i>

A 24: Ergebnisse der Simulationsstudie (LTR=10%, BZR=10%, WTZ=70%, RDZ=10%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	79	-8.292	1556,0	658486,0	88,2%	56,7%
2	70	-8.804	1492,9	663306,0	87,3%	53,3%
3	125	-5.078	1280,4	620252,5	83,7%	63,3%
4	146	-7.418	1303,7	633533,0	79,0%	73,3%
5	117	-6.401	1296,1	595319,5	85,2%	60,0%
6	125	-10.097	1516,6	626775,5	78,4%	66,7%
7	80	-4.823	1442,4	660755,5	87,0%	46,7%
8	71	-3.098	1438,0	568603,0	92,8%	50,0%
9	57	-6.890	1379,7	650593,5	80,8%	70,0%
10	107	-2.199	1486,6	699658,0	93,9%	50,0%
11	64	-6.436	1436,0	674934,0	90,8%	56,7%
12	82	-6.732	1314,7	648115,5	82,0%	50,0%
13	140	-13.511	1384,9	613728,5	78,5%	86,7%
14	76	-7.431	1471,9	693531,0	81,9%	60,0%
15	45	-3.950	1135,6	617444,0	87,9%	63,3%
16	100	-6.589	1465,4	660949,0	80,6%	56,7%
17	87	-7.244	1443,4	622518,5	79,3%	63,3%
18	96	-4.537	1471,8	617552,5	86,5%	56,7%
19	66	-5.001	1513,1	695381,0	85,6%	60,0%
20	119	-9.855	1441,9	645179,0	90,2%	63,3%
21	96	-3.862	1520,5	611421,0	81,1%	56,7%
22	151	-8.498	1387,6	586681,0	78,5%	66,7%
23	71	-5.110	1404,0	679932,0	81,1%	56,7%
24	72	-4.881	1539,8	648715,0	99,3%	46,7%
25	64	-5.278	1378,8	658426,5	88,0%	53,3%
26	125	-6.575	1194,3	520830,0	74,9%	73,3%
27	120	-5.511	1396,8	635026,5	0,0%	60,0%
28	73	-2.490	1491,6	615997,0	88,4%	53,3%
29	73	-6.012	1260,1	652691,5	87,1%	56,7%
30	90	-2.579	1353,2	623298,5	86,9%	46,7%
<i>Durchschnitt</i>	<i>92,9</i>	<i>-6172,7</i>	<i>1406,6</i>	<i>636654,5</i>	<i>82,1%</i>	<i>59,2%</i>

A 25: Ergebnisse der Simulationsstudie (LTR=15%, BZR=15%, WTZ=55%, RDZ=15%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	74	-8.093	1573,9	649633,5	89,1%	53,3%
2	118	-6.535	1217,0	609582,0	83,9%	50,0%
3	96	-6.048	1267,1	615725,0	82,8%	60,0%
4	147	-5.841	1215,9	674391,5	79,9%	56,7%
5	97	-4.418	1194,8	658015,0	86,0%	63,3%
6	93	-7.856	1343,3	617964,5	78,4%	66,7%
7	46	-3.582	940,8	636314,5	90,6%	43,3%
8	90	-4.113	1304,4	654160,5	92,8%	50,0%
9	74	-6.514	1544,4	666197,5	79,3%	73,3%
10	102	-2.371	1491,3	683799,5	92,1%	53,3%
11	52	-6.423	1438,4	670193,5	90,8%	56,7%
12	102	-6.678	1018,5	652776,5	82,0%	50,0%
13	154	-14.193	1352,4	617266,0	78,5%	86,7%
14	90	-6.727	1419,3	700480,5	81,9%	60,0%
15	69	-5.457	1278,8	617546,0	87,9%	63,3%
16	90	-5.107	1301,1	582219,5	82,9%	53,3%
17	125	-7.959	1521,1	629705,5	56,7%	63,3%
18	89	-5.275	1479,2	586455,5	86,5%	56,7%
19	104	-6.385	1518,0	670407,0	79,9%	63,3%
20	117	-11.885	1470,2	665079,5	89,6%	66,7%

22	158	-8.071	1373,4	589527,5	78,5%	66,7%
23	56	-4.000	1440,9	720715,0	81,4%	56,7%
24	102	-3.596	1506,7	634696,0	100,0%	43,3%
25	86	-3.820	1409,8	659620,0	88,0%	53,3%
26	125	-6.575	1194,3	520830,0	74,9%	73,3%
27	119	-5.859	1380,1	624570,0	94,4%	60,0%
28	80	-3.253	1525,6	672905,0	87,5%	56,7%
29	44	-8.941	1253,5	625218,0	87,1%	56,7%
30	49	-5.577	1272,6	674192,5	87,7%	50,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>93,8</i>	<i>-6123,1</i>	<i>1356,1</i>	<i>638005,5</i>	<i>84,5%</i>	<i>58,6%</i>

A 26: Ergebnisse der Simulationsstudie (LTR=20%, BZR=20%, WTZ=40%, RDZ=20%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)

(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	82	-4.153	1291,8	617927,5	99,2%	40,0%
2	94	-5.897	1195,5	660835,0	84,9%	86,7%
3	92	-5.262	1185,6	602845,0	80,3%	60,0%
4	114	-2.719	1233,4	661284,5	87,2%	63,3%
5	109	-6.400	1289,7	566441,0	83,5%	63,3%
6	58	-5.308	1373,0	585204,5	99,1%	36,7%
7	94	-2.240	1297,9	650192,5	90,6%	43,3%
8	87	-2.178	1373,4	591591,5	96,1%	50,0%
9	107	-7.120	1428,7	620018,0	84,6%	86,7%
10	70	-1.438	1342,9	610076,5	91,6%	50,0%
11	82	-5.312	1224,8	621545,0	93,4%	46,7%
12	94	-6.698	1299,1	631749,5	82,0%	50,0%
13	149	-15.870	1545,2	608444,0	79,2%	86,7%
14	153	-7.907	1575,8	720377,0	78,5%	86,7%
15	58	-5.080	1085,9	493296,5	94,8%	53,3%
16	82	-4.602	1280,8	734834,0	84,8%	60,0%
17	76	-5.160	1187,9	636007,0	88,4%	50,0%
18	124	-6.364	1358,9	554692,5	89,6%	46,7%
19	82	-5.321	1324,2	671927,0	82,8%	56,7%
20	93	-8.578	1383,8	654296,0	89,1%	63,3%
21	70	-2.744	1299,1	570265,0	87,0%	86,7%
22	134	-7.771	1311,6	615105,0	79,5%	70,0%
23	82	-5.341	1430,0	718831,5	82,2%	60,0%
24	94	-3.305	1343,5	563486,0	97,8%	43,3%
25	97	-4.383	1254,7	600213,0	92,3%	86,7%
26	90	-5.486	1136,6	512113,0	79,3%	63,3%
27	109	-4.302	1265,7	587350,0	95,6%	86,7%
28	80	-4.237	1387,9	618051,0	82,4%	56,7%
29	80	-8.819	1243,5	546651,0	86,3%	53,3%
30	68	-5.616	1139,4	578567,0	87,7%	50,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>93,5</i>	<i>-5520,4</i>	<i>1303,0</i>	<i>613473,9</i>	<i>87,7%</i>	<i>61,2%</i>

A 27: Ergebnisse der Simulationsstudie (LTR=25%, BZR=25%, WTZ=25%, RDZ=25%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)

(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario III(b):

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	15	-12.310	1498,3	608722,0	90,5%	63,3%
2	15	-6.751	1352,5	516871,5	89,7%	60,0%
3	15	-7.218	1485,2	828553,0	86,4%	73,3%
4	15	-4.881	1421,9	692534,0	91,5%	36,7%
5	15	-8.285	1209,8	558038,5	80,7%	53,3%
6	15	-7.350	1462,1	510270,0	74,6%	53,3%
7	15	-5.965	1481,0	628141,0	82,4%	53,3%
8	15	-2.694	742,6	519976,0	85,5%	36,7%
9	15	-3.669	1086,1	589545,0	91,5%	53,3%
10	15	-6.296	1494,5	660294,5	90,6%	36,7%
11	15	-3.685	1336,3	675994,0	84,8%	36,7%
12	15	-10.064	1366,0	618129,0	82,4%	60,0%
13	25	-10.499	1478,9	875007,5	78,8%	53,3%
14	15	-6.345	1406,2	624319,0	78,6%	36,7%
15	15	-5.623	1488,2	591451,0	89,4%	36,7%
16	15	-3.318	1418,6	563132,0	95,3%	60,0%
17	15	-6.867	1490,8	653290,0	95,1%	60,0%
18	15	-8.895	1450,8	587766,5	76,9%	70,0%
19	15	-5.404	1714,6	684395,0	85,5%	53,3%
20	15	-4.793	1455,6	555305,5	91,5%	60,0%
21	15	-3.291	1724,7	580139,5	86,0%	60,0%
22	15	-5.102	1315,0	541258,0	83,2%	36,7%
23	15	-4.099	1658,4	678369,0	85,6%	36,7%
24	15	-4.480	1307,9	502820,0	95,1%	60,0%
25	15	-5.691	1406,5	594817,5	84,1%	36,7%
26	25	-9.251	1360,1	531677,5	72,5%	53,3%
27	15	-2.381	1212,2	558562,5	94,1%	63,3%
28	15	-2.795	1391,2	610863,5	85,9%	60,0%
29	15	-6.080	1292,8	653821,0	88,8%	36,7%
30	15	-8.227	1338,0	619758,5	86,6%	53,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>15,7</i>	<i>-6077,0</i>	<i>1394,9</i>	<i>613794,1</i>	<i>86,1%</i>	<i>51,4%</i>

A 28: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=100%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	10	-1.153	1094,0	496625,0	97,9%	46,7%
2	22	-9.244	1207,5	593262,5	79,5%	53,3%
3	22	-10.502	1401,6	585177,0	79,4%	60,0%
4	22	-4.437	1319,2	562156,5	87,3%	60,0%
5	22	-7.320	1534,3	619431,0	81,7%	50,0%
6	22	-9.259	1447,6	609017,5	90,0%	46,7%
7	22	-6.272	1206,2	624338,0	81,6%	56,7%
8	10	-2.660	1204,6	596823,0	98,0%	46,7%
9	10	-6.636	1282,5	593985,0	81,4%	70,0%
10	22	-5.898	1518,5	608257,0	95,2%	40,0%
11	10	-4.332	1361,2	622132,0	88,2%	56,7%
12	22	-7.664	1483,5	636501,5	82,0%	50,0%
13	32	-15.473	1556,9	654162,5	78,0%	90,0%
14	10	-2.062	1201,8	563874,0	100,0%	30,0%
15	22	-4.755	1306,4	522099,0	94,7%	50,0%
16	10	-2.307	1214,8	635321,0	86,0%	63,3%

18	22	-5.188	1232,2	593006,0	95,4%	43,3%
19	10	-4.005	1278,9	659891,0	85,5%	53,3%
20	15	-8.949	1400,5	603218,5	88,3%	66,7%
21	22	-2.641	1172,2	543599,5	96,0%	43,3%
22	22	-7.339	1497,3	630909,5	81,1%	60,0%
23	22	-7.391	1581,8	661438,0	81,4%	56,7%
24	10	-2.905	1245,7	623317,5	100,0%	33,3%
25	22	-3.437	1099,9	620300,5	85,1%	53,3%
26	22	-8.019	1441,2	577962,5	75,5%	63,3%
27	10	-2.237	981,4	475350,0	96,7%	40,0%
28	22	-4.382	1542,9	669320,0	82,9%	56,7%
29	10	-8.044	1262,5	605639,0	88,8%	53,3%
30	22	-5.225	1610,8	673209,5	88,9%	43,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>18,1</i>	<i>-5860,1</i>	<i>1338,1</i>	<i>601963,4</i>	<i>87,8%</i>	<i>52,7%</i>

A 29: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=5%, BZR=5%, WTZ=5%, RDZ=5%, RAR=80%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcen- auslastung	Liefertreue
1	22	-2.924	1142,9	526301,5	97,7%	43,3%
2	22	-9.553	1381,7	640609,0	84,6%	56,7%
3	22	-10.831	1355,7	504860,5	79,4%	60,0%
4	22	-4.694	1263,7	562406,5	87,3%	60,0%
5	34	-8.138	1375,2	631659,0	83,5%	63,3%
6	22	-9.284	1317,1	625635,0	82,0%	66,7%
7	22	-5.474	1269,3	641792,0	82,7%	60,0%
8	22	-3.888	1318,3	618000,5	98,1%	50,0%
9	34	-3.448	1237,0	598660,0	86,6%	56,7%
10	22	-1.636	1208,3	548560,0	92,1%	53,3%
11	10	-4.332	1361,2	622132,0	88,2%	56,7%
12	22	-6.252	1309,0	657769,0	82,1%	56,7%
13	32	-15.215	1527,3	654414,5	78,0%	90,0%
14	22	-5.647	1540,8	589847,0	76,0%	56,7%
15	22	-4.302	1071,5	535498,5	95,1%	56,7%
16	10	-2.307	1214,8	635321,0	86,0%	63,3%
17	22	-6.068	1456,6	598576,5	86,6%	43,3%
18	22	-5.188	1232,2	593006,0	95,4%	43,3%
19	10	-4.005	1278,9	659891,0	85,5%	53,3%
20	15	-8.949	1400,5	603218,5	88,3%	66,7%
21	22	-2.641	1172,2	543599,5	96,0%	43,3%
22	22	-7.339	1497,3	630909,5	81,1%	60,0%
23	22	-7.391	1581,8	661438,0	81,4%	56,7%
24	10	-2.905	1245,7	623317,5	100,0%	33,3%
25	22	-3.437	1099,9	620300,5	85,1%	53,3%
26	22	-8.019	1441,2	577962,5	75,5%	63,3%
27	10	-2.237	981,4	475350,0	96,7%	40,0%
28	22	-4.382	1542,9	669320,0	82,9%	56,7%
29	10	-8.044	1262,5	605639,0	88,8%	53,3%
30	22	-5.225	1610,8	673209,5	88,9%	43,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>20,5</i>	<i>-5791,8</i>	<i>1323,3</i>	<i>604306,8</i>	<i>87,1%</i>	<i>55,3%</i>

A 30: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=10%, BZR=10%, WTZ=10%, RDZ=10%, RAR=60%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	34	-4.433	1371,5	643071,5	98,0%	43,3%
2	34	-8.183	1418,5	670217,5	89,6%	56,7%
3	32	-10.240	1416,1	630832,0	81,4%	63,3%
4	22	-4.456	1327,6	679299,5	86,6%	66,7%
5	34	-6.789	1283,2	633531,0	83,5%	63,3%
6	22	-6.648	1211,6	629654,5	90,7%	50,0%
7	22	-4.110	1195,7	545741,0	80,8%	53,3%
8	34	-3.577	1379,5	662158,5	98,0%	46,7%
9	37	-4.987	1325,4	627663,5	87,2%	56,7%
10	22	-939	1253,4	634333,5	93,4%	46,7%
11	10	-4.283	1301,0	622432,0	88,2%	56,7%
12	34	-6.234	1257,9	636352,5	82,0%	50,0%
13	32	-16.478	1525,2	658486,0	79,5%	96,7%
14	34	-5.300	1439,1	619238,0	76,0%	56,7%
15	34	-4.756	1117,5	538038,5	95,1%	56,7%
16	22	-4.471	1215,6	583830,0	83,9%	56,7%
17	44	-4.662	1313,3	542103,5	77,7%	53,3%
18	46	-4.563	1273,7	598949,0	95,4%	43,3%
19	10	-4.005	1278,9	659891,0	85,5%	53,3%
20	25	-8.063	1459,5	659368,5	89,1%	63,3%
21	22	-4.041	1267,1	559411,0	87,0%	46,7%
22	27	-7.753	1406,7	642466,0	82,8%	66,7%
23	10	-3.633	1320,5	579745,0	81,2%	56,7%
24	22	-4.803	1150,1	607303,0	97,8%	43,3%
25	32	-5.195	1255,5	585112,5	86,0%	56,7%
26	37	-6.552	1182,0	548641,0	77,1%	70,0%
27	27	-7.594	1374,9	650375,0	93,4%	76,7%
28	22	-2.372	1289,1	616334,0	90,0%	46,7%
29	10	-8.044	1262,5	605639,0	88,8%	53,3%
30	22	-2.924	1355,7	604332,5	84,1%	53,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>27,2</i>	<i>-5669,6</i>	<i>1307,6</i>	<i>615818,4</i>	<i>87,0%</i>	<i>56,8%</i>

A 31: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=15%, BZR=15%, WTZ=15%, RDZ=15%, RAR=40%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	58	-4.293	1356,5	645297,5	98,0%	43,3%
2	58	-6.512	1435,3	600887,5	88,5%	50,0%
3	39	-6.166	1292,9	547329,0	79,8%	66,7%
4	56	-6.117	1342,7	681456,5	87,9%	66,7%
5	34	-6.529	1251,2	633975,0	83,5%	63,3%
6	46	-6.847	1304,3	576204,0	80,6%	60,0%
7	46	-2.821	1224,2	638294,5	90,6%	43,3%
8	46	-2.244	1315,6	589718,5	98,0%	46,7%
9	44	-5.961	1414,8	621159,0	84,6%	66,7%
10	46	-751	1296,3	640037,5	93,4%	46,7%
11	22	-4.857	1194,5	608285,0	93,4%	46,7%
12	46	-6.294	1262,8	638722,5	82,0%	50,0%
13	52	-15.417	1494,9	637404,0	78,8%	93,3%
14	34	-4.261	1459,9	590387,0	76,0%	56,7%
15	34	-4.846	1122,8	538866,5	95,1%	56,7%
16	22	-6.021	1273,1	673576,5	80,9%	56,7%
17	64	-5.502	1201,2	633149,5	88,4%	50,0%
18	82	-3.839	1287,4	581967,5	95,4%	43,3%
19	10	-4.005	1278,9	659891,0	85,5%	53,3%
20	25	-8.490	1415,7	622152,5	89,1%	63,3%
21	46	-3.472	1316,1	563059,0	87,0%	46,7%
22	51	-11.639	1518,8	623751,0	80,3%	73,3%
23	22	-3.043	1350,4	700998,5	84,3%	53,3%
24	34	-5.067	1330,6	578800,0	100,0%	40,0%
25	56	-5.287	1250,5	594924,5	88,0%	53,3%
26	61	-5.253	1058,0	562932,5	78,4%	60,0%
27	44	-4.690	1223,2	564435,0	94,3%	60,0%
28	34	-3.494	1410,2	665185,0	82,1%	60,0%
29	34	-9.521	1321,5	628904,0	87,1%	56,7%
30	22	-3.246	1212,1	683109,5	87,7%	50,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>42,3</i>	<i>-5549,5</i>	<i>1307,2</i>	<i>617495,3</i>	<i>87,3%</i>	<i>55,9%</i>

A 32: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=20%, BZR=20%, WTZ=20%, RDZ=20%, RAR=20%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=25%, BZR=25%, WTZ=25%, RDZ=25%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%) siehe A 27

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario IV(a):

Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=100%, RDZ=0%, RAR=0%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%) siehe A 22

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	86	-8.979	1507,6	612509,5	88,2%	56,7%
2	96	-7.209	1431,8	617323,0	86,4%	50,0%
3	97	-6.692	1392,9	655766,0	82,1%	70,0%
4	95	-9.504	1506,3	642682,0	79,9%	76,7%
5	87	-7.890	1459,1	612617,0	85,2%	60,0%
6	93	-9.352	1528,8	719302,5	78,4%	66,7%
7	85	-4.549	1496,4	600403,0	89,8%	40,0%
8	95	-3.632	1488,3	630541,0	92,8%	50,0%
9	52	-6.402	1347,0	590716,0	79,9%	66,7%
10	64	-5.355	1578,0	692438,0	93,9%	50,0%
11	52	-5.885	1424,5	691068,0	90,8%	56,7%
12	83	-6.066	1424,7	623810,5	77,8%	53,3%
13	126	-12.887	1466,1	596468,0	78,5%	86,7%
14	64	-8.699	1640,1	694917,5	81,9%	60,0%
15	45	-4.312	1217,3	619651,5	87,9%	63,3%
16	88	-7.493	1512,5	659609,5	80,6%	56,7%
17	79	-6.580	1494,4	639452,5	76,8%	66,7%
18	79	-4.889	1452,3	615773,0	86,5%	56,7%
19	56	-5.597	1568,4	707561,5	86,3%	53,3%
20	141	-8.952	1474,2	645131,0	90,2%	63,3%
21	67	-6.486	1487,3	620463,5	82,1%	60,0%
22	95	-7.951	1405,8	640578,0	80,5%	66,7%
23	32	-3.925	1356,6	658334,0	87,1%	50,0%
24	79	-5.559	1439,5	615977,5	99,2%	43,3%
25	81	-4.844	1347,3	626130,5	92,3%	50,0%
26	111	-6.268	1201,7	612912,5	74,9%	73,3%
27	115	-6.468	1434,4	635842,0	96,1%	60,0%
28	76	-3.794	1511,6	667789,0	89,1%	56,7%
29	78	-8.133	1395,8	604582,5	83,1%	60,0%
30	49	-2.223	1340,5	464241,5	94,3%	40,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>81,5</i>	<i>-6552,5</i>	<i>1444,4</i>	<i>633819,7</i>	<i>85,7%</i>	<i>58,8%</i>

A 33: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=80%, RDZ=0%, RAR=5%, PKR=5%, DBR=5%, RLR=5%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	81	-8.502	1489,0	611037,5	88,2%	56,7%
2	48	-8.056	1446,2	627100,0	88,0%	56,7%
3	91	-7.427	1419,2	653346,0	82,1%	70,0%
4	85	-9.422	1509,1	638829,5	79,9%	76,7%
5	87	-8.379	1509,4	612220,0	85,2%	60,0%
6	73	-8.922	1555,2	684117,5	85,2%	63,3%
7	61	-4.829	1526,8	598054,0	89,8%	40,0%
8	61	-3.320	1473,4	610562,0	95,9%	46,7%
9	49	-6.651	1411,0	589242,0	79,9%	66,7%
10	57	-6.105	1618,2	668885,5	94,3%	53,3%
11	52	-6.871	1478,2	690517,5	90,8%	56,7%
12	37	-4.459	1373,8	607080,5	86,4%	46,7%
13	116	-13.181	1486,2	594800,5	78,5%	86,7%
14	57	-8.949	1683,2	693650,5	81,9%	60,0%
15	45	-4.388	1223,5	619429,0	87,9%	63,3%
16	59	-6.183	1532,8	593965,0	80,6%	56,7%
17	52	-10.137	1646,7	680988,5	77,9%	70,0%
18	69	-3.490	1433,0	600352,0	87,5%	53,3%
19	39	-5.382	1579,4	608299,5	89,3%	50,0%
20	83	-8.863	1496,2	633290,0	90,2%	63,3%
21	57	-7.423	1594,9	663286,0	85,0%	60,0%
22	71	-8.077	1425,8	635472,0	80,5%	66,7%
23	32	-3.831	1406,3	657424,0	87,1%	50,0%
24	66	-4.632	1380,7	594567,0	100,0%	40,0%
25	74	-5.691	1447,5	623634,5	92,3%	50,0%
26	93	-6.591	1246,3	606955,0	74,9%	73,3%
27	71	-6.764	1421,3	626186,5	96,1%	60,0%
28	76	-4.044	1537,6	666005,0	89,1%	56,7%
29	54	-8.105	1390,9	599044,5	83,1%	60,0%
30	37	-2.837	1436,6	660876,5	97,2%	40,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>64,4</i>	<i>-6717,0</i>	<i>1472,6</i>	<i>631640,6</i>	<i>86,8%</i>	<i>58,4%</i>

A 34: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=60%, RDZ=0%, RAR=10%, PKR=10%, DBR=10%, RLR=10%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	71	-9.547	1493,4	578138,0	88,4%	53,3%
2	36	-6.628	1372,7	594587,5	92,4%	50,0%
3	91	-7.452	1438,9	628917,0	86,3%	63,3%
4	66	-8.604	1540,3	668181,5	82,8%	73,3%
5	52	-7.467	1464,4	585105,0	89,4%	56,7%
6	68	-8.365	1602,5	658776,5	86,6%	60,0%
7	61	-4.829	1526,8	598054,0	89,8%	40,0%
8	37	-5.451	1524,5	620027,5	94,7%	50,0%
9	32	-5.300	1355,7	575065,5	91,4%	56,7%
10	32	-6.286	1634,3	632575,5	93,9%	50,0%
11	42	-5.604	1428,1	670867,0	93,8%	53,3%
12	37	-4.678	1505,0	607039,5	86,4%	46,7%
13	79	-15.023	1534,3	626767,5	81,4%	86,7%
14	30	-9.352	1753,0	743525,5	82,8%	63,3%
15	52	-5.060	1262,6	619168,0	87,9%	63,3%
16	56	-8.273	1539,5	635332,0	86,8%	50,0%
17	49	-9.442	1506,2	659546,0	74,8%	70,0%
18	49	-3.529	1513,9	657147,5	91,3%	53,3%
19	32	-4.046	1580,6	682445,5	95,0%	46,7%
20	59	-8.873	1523,3	668239,0	90,2%	63,3%
21	57	-5.691	1539,4	647562,0	92,5%	53,3%
22	52	-9.158	1498,5	629698,5	80,5%	66,7%

23	22	-3.548	1416,6	646959,5	96,3%	40,0%
24	49	-4.380	1213,7	608671,5	86,0%	50,0%
25	47	-5.801	1523,9	621188,5	92,3%	50,0%
26	59	-5.236	1227,0	573688,0	78,8%	66,7%
27	49	-6.190	1409,8	621468,5	96,1%	60,0%
28	32	-3.629	1539,6	645976,5	92,8%	53,3%
29	44	-7.357	1305,4	585174,5	91,0%	53,3%
30	37	-2.065	1437,8	586005,5	94,3%	40,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>49,3</i>	<i>-6562,1</i>	<i>1473,7</i>	<i>629196,6</i>	<i>88,9%</i>	<i>56,1%</i>

A 35: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=40%, RDZ=0%, RAR=15%, PKR=15%, DBR=15%, RLR=15%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	32	-10.285	1631,3	655411,5	94,1%	53,3%
2	24	-3.527	1325,4	552106,0	98,9%	43,3%
3	52	-9.291	1481,1	586084,0	85,6%	60,0%
4	34	-6.475	1490,2	650010,5	92,5%	70,0%
5	37	-5.408	1411,1	514094,0	94,5%	50,0%
6	22	-6.095	1493,4	582602,5	96,0%	43,8%
7	27	-3.111	1493,2	686085,5	100,0%	50,0%
8	22	-3.689	1422,5	611176,5	100,0%	44,8%
9	32	-7.394	1445,2	552795,5	91,9%	62,1%
10	27	-5.954	1679,3	602399,0	100,0%	51,7%
11	37	-6.033	1444,9	603589,0	97,7%	51,7%
12	37	-5.390	1345,3	668306,5	100,0%	62,1%
13	42	-15.621	1561,8	614325,0	85,8%	83,3%
14	30	-7.871	1701,9	726123,5	90,1%	56,7%
15	32	-7.270	1164,1	553619,0	95,6%	62,1%
16	49	-7.341	1526,1	667194,0	96,9%	46,7%
17	37	-4.169	1311,2	605415,5	98,0%	46,7%
18	37	-3.769	1492,9	616281,0	98,2%	46,7%
19	22	-2.456	1424,0	700979,0	99,7%	62,1%
20	32	-9.217	1430,8	668426,5	100,0%	58,6%
21	37	-4.106	1312,6	623168,5	100,0%	46,7%
22	32	-6.401	1443,7	497742,5	95,9%	51,7%
23	22	-5.977	1468,6	710047,5	99,2%	62,1%
24	22	-4.515	1460,3	654759,0	100,0%	62,1%
25	25	-3.510	1309,4	609149,0	100,0%	62,1%
26	37	-6.499	1321,2	617568,0	91,9%	56,7%
27	25	-7.358	1495,8	542890,0	99,4%	55,2%
28	27	-3.961	1620,8	653243,0	96,9%	53,3%
29	44	-5.325	1298,0	647039,5	97,3%	50,0%
30	22	-3.136	1636,0	673364,5	96,9%	50,0%
<i>Durchschnitt</i>	<i>31,9</i>	<i>-6038,5</i>	<i>1454,7</i>	<i>621533,2</i>	<i>96,4%</i>	<i>55,2%</i>

A 36: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=20%, RDZ=0%, RAR=20%, PKR=20%, DBR=20%, RLR=20%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	22	-5.045	1320,3	625088,0	100,0%	40,0%
2	34	-8.302	1445,4	668197,0	98,5%	43,3%
3	34	-7.736	1385,4	534556,5	98,9%	46,7%
4	17	-6.072	1442,4	666770,0	99,4%	83,3%
5	22	-4.796	1327,9	468030,5	100,0%	36,7%
6	22	-7.191	1473,5	633143,5	99,1%	83,3%
7	34	-6.137	1420,2	648478,5	98,3%	40,0%
8	46	-5.445	1300,6	583909,5	100,0%	36,7%
9	22	-5.982	1604,0	559108,0	100,0%	40,0%
10	22	-3.413	1427,2	615122,0	100,0%	36,7%
11	34	-5.021	1280,3	569195,5	100,0%	36,7%
12	46	-11.385	2067,5	713683,5	100,0%	36,7%
13	27	-23.998	1783,6	636219,0	84,6%	83,3%
14	22	-4.191	1783,6	566913,0	100,0%	83,3%
15	22	-4.466	1320,2	528612,0	100,0%	46,7%
16	22	-4.426	1480,1	618997,0	100,0%	40,0%
17	32	-2.682	1298,8	535085,5	100,0%	83,3%
18	34	-8.835	1323,4	617809,5	100,0%	60,0%
19	22	-7.241	1972,4	708996,0	100,0%	83,3%
20	22	-8.711	1349,1	516688,5	100,0%	46,7%
21	22	-2.148	1351,7	594344,5	100,0%	60,0%
22	22	-2.644	1381,5	496375,5	100,0%	36,7%
23	34	-4.646	1365,9	621433,0	100,0%	36,7%
24	22	-5.212	1319,5	588720,5	100,0%	60,0%
25	34	-3.315	1233,2	517912,5	100,0%	60,0%
26	22	-5.976	1330,2	464269,5	100,0%	40,0%
27	22	-5.229	1286,4	583548,0	99,2%	40,0%
28	22	-2.227	1394,3	607002,0	100,0%	83,3%
29	44	-8.068	1370,9	612118,0	100,0%	83,3%
30	22	-3.561	1328,1	632749,5	100,0%	33,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>27,5</i>	<i>-6136,7</i>	<i>1438,9</i>	<i>591102,5</i>	<i>99,3%</i>	<i>54,0%</i>

A 37: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=25%, PKR=25%, DBR=25%, RLR=25%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Ergebnisse der Simulationsstudie Szenario IV(b):

Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=100%, PKR=0%, DBR=0%, RLR=0%) siehe A 28

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	22	-5.045	1320,3	625088,0	100,0%	40,0%
2	34	-8.975	1410,4	562681,5	81,4%	46,7%
3	22	-6.326	1308,4	621986,0	84,7%	56,7%
4	22	-6.525	1434,6	653771,5	92,9%	76,7%
5	22	-4.239	1295,1	553895,0	95,5%	53,3%
6	22	-9.339	1820,0	623339,5	97,5%	76,7%
7	34	-6.911	1718,1	638308,5	93,8%	43,3%
8	46	-5.650	1654,9	595027,5	95,0%	40,0%
9	22	-5.982	1604,0	559108,0	100,0%	40,0%
10	22	-3.413	1427,2	615122,0	100,0%	76,7%
11	34	-7.372	1280,3	569195,5	100,0%	36,7%
12	15	-1.503	1539,4	648974,5	87,7%	43,3%
13	27	-14.032	1516,5	649448,0	87,4%	76,7%
14	10	-4.107	1208,4	563709,0	100,0%	50,0%
15	22	-6.562	1320,2	528612,0	100,0%	53,3%
16	32	-2.682	1298,8	535085,5	100,0%	76,7%
17	64	-6.905	1201,2	633149,5	88,4%	50,0%
18	34	-7.087	1276,6	605259,0	90,7%	46,7%
19	22	-5.384	1367,9	653838,0	90,0%	53,3%
20	22	-5.479	1348,8	560193,0	88,1%	53,3%
21	22	-3.227	1388,0	556051,0	88,2%	50,0%
22	22	-4.625	1368,9	551330,5	90,8%	43,3%
23	34	-3.203	1247,7	561783,0	100,0%	76,7%
24	10	-5.152	1314,7	623227,5	100,0%	53,3%
25	34	-3.993	1255,3	562180,5	94,5%	36,7%
26	22	-4.776	1255,2	516669,5	100,0%	53,3%
27	22	-5.193	1283,4	581928,0	99,2%	76,7%
28	22	-2.333	1404,4	618261,0	94,6%	43,3%
29	34	-8.358	1354,1	632069,0	97,1%	76,7%
30	22	-3.561	1328,1	632749,5	100,0%	76,7%
<i>Durchschnitt</i>	<i>26,5</i>	<i>-5598,0</i>	<i>1385,0</i>	<i>594401,4</i>	<i>94,6%</i>	<i>55,9%</i>

A 38: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=85%, PKR=5%, DBR=5%, RLR=5%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	22	-5.045	1320,3	625088,0	100,0%	40,0%
2	34	-8.975	1410,4	562681,5	81,4%	46,7%
3	22	-6.326	1553,1	621986,0	84,7%	76,7%
4	22	-3.434	1434,6	653771,5	95,3%	76,7%
5	22	-5.831	1722,6	553895,0	98,2%	36,7%
6	22	-9.339	1820,0	623339,5	97,5%	76,7%
7	34	-6.911	1718,1	638308,5	93,8%	43,3%
8	46	-5.650	1654,9	595027,5	97,5%	76,7%
9	22	-3.947	1228,2	559108,0	100,0%	40,0%
10	22	-3.413	1427,2	615122,0	100,0%	43,3%
11	34	-7.372	1280,3	569195,5	100,0%	76,7%
12	15	-1.503	1539,4	648974,5	87,7%	43,3%
13	27	-14.032	1516,5	649448,0	87,4%	76,7%
14	10	-4.107	1774,2	563709,0	100,0%	43,3%
15	22	-6.562	1320,2	528612,0	100,0%	46,7%
16	32	-5.641	1298,8	535085,5	100,0%	53,3%
17	64	-6.905	1201,2	633149,5	93,1%	50,0%
18	34	-7.087	1276,6	605259,0	90,7%	46,7%
19	22	-5.384	1367,9	653838,0	90,0%	53,3%
20	22	-5.479	1348,8	560193,0	91,9%	53,3%
21	22	-4.879	1388,0	556051,0	92,7%	76,7%
22	22	-4.625	1368,9	551330,5	93,8%	53,3%
23	34	-3.203	1247,7	561783,0	100,0%	43,3%
24	10	-5.152	1314,7	623227,5	100,0%	33,3%
25	34	-3.993	1255,3	562180,5	94,5%	53,3%
26	22	-4.776	1255,2	516669,5	100,0%	76,7%
27	22	-5.193	1283,4	581928,0	99,2%	40,0%
28	22	-2.333	1404,4	618261,0	97,1%	53,3%
29	34	-8.358	1354,1	632069,0	98,6%	76,7%
30	22	-3.561	1328,1	632749,5	100,0%	76,7%
<i>Durchschnitt</i>	<i>26,5</i>	<i>-5633,9</i>	<i>1413,8</i>	<i>594401,4</i>	<i>95,5%</i>	<i>56,1%</i>

A 39: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=70%, PKR=10%, DBR=10%, RLR=10%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	22	-5.045	1320,3	625088,0	100,0%	40,0%
2	34	-5.212	1349,8	596113,0	98,2%	46,7%
3	22	-6.489	1689,9	597395,5	98,9%	73,3%
4	22	-6.267	1751,8	653924,5	98,1%	53,3%
5	22	-6.530	1781,4	604755,5	100,0%	46,7%
6	12	-6.140	1353,5	589127,5	97,7%	43,3%
7	34	-6.767	1718,1	624928,5	98,3%	53,3%
8	46	-5.530	1700,9	583909,5	100,0%	73,3%
9	22	-3.947	1228,2	559108,0	100,0%	73,3%
10	22	-3.413	1427,2	615122,0	100,0%	46,7%
11	34	-5.021	1280,3	569195,5	100,0%	73,3%
12	15	-2.828	1504,8	633821,5	100,0%	53,3%
13	27	-17.555	1548,1	648878,5	93,6%	73,3%
14	10	-4.107	1208,4	563709,0	100,0%	53,3%
15	22	-6.562	1320,2	528612,0	100,0%	46,7%
16	22	-6.315	1480,1	618997,0	100,0%	53,3%

18	34	-4.760	1240,1	583459,5	100,0%	40,0%
19	22	-5.004	1365,2	639204,0	93,8%	53,3%
20	22	-5.260	1349,1	595138,5	100,0%	53,3%
21	22	-4.083	1351,7	594344,5	100,0%	73,3%
22	22	-4.243	1297,6	592079,5	98,3%	53,3%
23	34	-6.478	1247,7	561783,0	100,0%	46,7%
24	10	-6.472	1314,7	623227,5	100,0%	73,3%
25	34	-5.022	1233,2	551212,5	100,0%	73,3%
26	22	-4.776	1255,2	516669,5	100,0%	53,3%
27	22	-5.193	1283,4	581928,0	99,2%	40,0%
28	22	-2.227	1394,3	607002,0	100,0%	46,7%
29	34	-7.998	1366,3	610118,0	100,0%	43,3%
30	22	-3.561	1328,1	632749,5	100,0%	73,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>24,7</i>	<i>-5516,2</i>	<i>1399,6</i>	<i>594556,2</i>	<i>99,2%</i>	<i>55,8%</i>

A 40: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=55%, PKR=15%, DBR=15%, RLR=15%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	22	-5.045	1320,3	625088,0	100,0%	40,0%
2	34	-5.212	1349,8	596113,0	98,2%	73,3%
3	22	-6.489	1689,9	597395,5	98,9%	46,7%
4	22	-6.267	1751,8	653924,5	98,1%	53,3%
5	22	-6.530	1781,4	604755,5	100,0%	53,3%
6	12	-7.930	1353,5	589127,5	97,7%	43,3%
7	34	-6.767	1718,1	624928,5	98,3%	40,0%
8	46	-5.530	1300,6	583909,5	100,0%	53,3%
9	22	-5.982	1604,0	559108,0	100,0%	40,0%
10	22	-5.599	1427,2	615122,0	100,0%	36,7%
11	34	-5.021	1280,3	569195,5	100,0%	73,3%
12	15	-2.829	1504,8	633821,5	100,0%	53,3%
13	27	-15.408	1560,2	640652,0	93,8%	73,3%
14	10	-2.955	1208,4	563709,0	100,0%	73,3%
15	22	-6.562	1320,2	528612,0	100,0%	46,7%
16	22	-6.315	1480,1	618997,0	100,0%	53,3%
17	32	-5.641	1298,8	535085,5	100,0%	73,3%
18	34	-6.835	1240,1	583459,5	100,0%	40,0%
19	22	-5.241	1476,3	671696,0	100,0%	53,3%
20	22	-8.711	1349,1	595138,5	100,0%	46,7%
21	22	-4.083	1351,7	594344,5	100,0%	73,3%
22	22	-4.243	1297,6	592079,5	98,3%	40,0%
23	34	-3.203	1247,7	561783,0	100,0%	36,7%
24	10	-5.152	1314,7	623227,5	100,0%	73,3%
25	34	-3.315	1233,2	551212,5	100,0%	73,3%
26	22	-6.342	1255,2	516669,5	100,0%	40,0%
27	22	-7.601	1283,4	581928,0	99,2%	53,3%
28	22	-4.262	1394,3	607002,0	100,0%	73,3%
29	34	-11.681	1366,3	610118,0	100,0%	43,3%
30	22	-3.561	1328,1	632749,5	100,0%	73,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>24,7</i>	<i>-6010,4</i>	<i>1402,9</i>	<i>595365,1</i>	<i>99,4%</i>	<i>54,9%</i>

A 41: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=40%, PKR=20%, DBR=20%, RLR=20%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)

Lauf	Rüstzeiten (ZE)	Lieferterminverfehlungen (ZE)	Durchlaufzeit (ZE)	Kapitalbindungskosten (GE)	Ressourcenauslastung	Liefertreue
1	22	-5.045	1320,3	625088,0	100,0%	40,0%
2	34	-8.302	1445,4	668197,0	98,5%	43,3%
3	34	-7.736	1385,4	534556,5	98,9%	46,7%
4	17	-6.072	1442,4	666770,0	99,4%	83,3%
5	22	-4.796	1327,9	468030,5	100,0%	36,7%
6	22	-7.191	1473,5	633143,5	99,1%	83,3%
7	34	-6.137	1420,2	648478,5	98,3%	40,0%
8	46	-5.445	1300,6	583909,5	100,0%	36,7%
9	22	-5.982	1604,0	559108,0	100,0%	40,0%
10	22	-3.413	1427,2	615122,0	100,0%	36,7%
11	34	-5.021	1280,3	569195,5	100,0%	36,7%
12	46	-11.385	2067,5	713683,5	100,0%	36,7%
13	27	-23.998	1783,6	636219,0	84,6%	83,3%
14	22	-4.191	1783,6	566913,0	100,0%	83,3%
15	22	-4.466	1320,2	528612,0	100,0%	46,7%
16	22	-4.426	1480,1	618997,0	100,0%	40,0%
17	32	-2.682	1298,8	535085,5	100,0%	83,3%
18	34	-8.835	1323,4	617809,5	100,0%	60,0%
19	22	-7.241	1972,4	708996,0	100,0%	83,3%
20	22	-8.711	1349,1	516688,5	100,0%	46,7%
21	22	-2.148	1351,7	594344,5	100,0%	60,0%
22	22	-2.644	1381,5	496375,5	100,0%	36,7%
23	34	-4.646	1365,9	621433,0	100,0%	36,7%
24	22	-5.212	1319,5	588720,5	100,0%	60,0%
25	34	-3.315	1233,2	517912,5	100,0%	60,0%
26	22	-5.976	1330,2	464269,5	100,0%	40,0%
27	22	-5.229	1286,4	583548,0	99,2%	40,0%
28	22	-2.227	1394,3	607002,0	100,0%	83,3%
29	44	-8.068	1370,9	612118,0	100,0%	83,3%
30	22	-3.561	1328,1	632749,5	100,0%	33,3%
<i>Durchschnitt</i>	<i>27,5</i>	<i>-6136,7</i>	<i>1438,9</i>	<i>591102,5</i>	<i>99,3%</i>	<i>54,0%</i>

A 42: Ergebnisse der Simulationsstudie (Gewichtungen: LTR=0%, BZR=0%, WTZ=0%, RDZ=0%, RAR=25%, PKR=25%, DBR=25%, RLR=25%)
(ZE=Zeiteinheiten, GE= Geldeinheiten)