

STEFAN VOSS
JULIA PAHL
SILVIA SCHWARZE
Herausgeber

Logistik Management

Systeme
Methoden
Integration



Physica-Verlag

Ein Unternehmen
von Springer

Logistik Management



Stefan Voß • Julia Pahl • Silvia Schwarze
Herausgeber

Logistik Management

Systeme, Methoden, Integration



Physica-Verlag

Herausgeber

Prof. Dr. Stefan Voß
Julia Pahl
Dr. Silvia Schwarze

Universität Hamburg
Institut für Wirtschaftsinformatik
Von-Melle-Park 5
20146 Hamburg
stefan.voss@uni-hamburg.de
pahl@econ.uni-hamburg.de
schwarze@econ.uni-hamburg.de

ISBN 978-3-7908-2361-5 e-ISBN 978-3-7908-2362-2
DOI 10.1007/978-3-7908-2362-2
Springer Dordrecht Heidelberg London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- und Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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

Umschlagabbildung: mit freundlicher Genehmigung von ZVB, Braunschweig
Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Physica-Verlag und Springer-Verlag sind Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Preface

Globalization and virtualization of business relations increase the importance and complexity of logistical challenges faced by companies. The coordination and integration as well as the management of logistic networks especially regarding the relations to logistic service providers become vital factors of competitiveness. The combined knowledge of scientists and practitioners about this led to the development and discussion of strategies, methods and tools to enable companies to meet the high demands concerning logistical tasks.

This proceedings volume consists of selected papers presented at the conference *Logistics Management 2009* (LM 09), held at the University of Hamburg, Germany, from September 02nd to 04th, 2009. The LM 09 is the continuation of a series of scientific conferences initiated in 1999 and aims to stimulate the exchange of ideas and discussions among scientists and practitioners about current problems, solutions, and future development in logistics. Previous conferences were held in Bremen (1999), Aachen (2001), Braunschweig (2003), Dresden (2005), and Regensburg (2007). These are well documented as follows:

- Kopfer, H. and C. Bierwirth (eds.) (1999). *Logistik Management*. Springer, Berlin.
- Sebastian, H.-J. and Grünert, T. (eds.) (2001). *Logistik Management – Supply Chain Management und e-Business*. Teubner, Stuttgart.
- Spengler, T., Voß, S. and Kopfer, H. (eds.) (2004) *Logistik Management – Prozesse, Systeme, Ausbildung*. Physica, Heidelberg.
- Lasch, R. and Janker, C.G. (eds.) (2005) *Logistik Management. Innovative Logistikkonzepte*. Gabler, Wiesbaden.
- Otto, A. and Obermaier, R. (eds.) (2007) *Logistikmanagement: Analyse, Bewertung und Gestaltung logistischer Systeme*. Gabler, Wiesbaden

The conference is held in cooperation with the Scientific Commission “Logistics” within the Association of University Professors of Business Administration. The conference is situated within Hamburg the “schönste Stadt der Welt,” or, in even more glamorous words, “the gate to the world.” The city is known for its logistics expertise, e.g., with its port being the second largest in Europe – after Rotterdam

– and as the second biggest container port in Europe belonging to the biggest container ports worldwide. Moreover, the metropolitan region is home of numerous logistics companies and activities. That makes Hamburg the perfect location for the Logistics Management Conference 2009.

The contributions that are presented at the conference as well as the selected papers in these proceedings show that logistics management is gaining more and more importance in various areas. Academics as well as practitioners are well involved in the development of the field. We group the papers into different parts as follows:

- Coordination and Contracts
- Production Planning and Lot Sizing
- Handling and Transportation
- Logistics and Reverse Logistics
- Applications and Case Studies

While the title of the book suggests a German conference, this in fact is not the case as more English than German papers had been included, indicating the growing internationality of the conference. While we believe that these proceedings provide insights into the state-of-the-art of the field, we also hope and know that the story is never-ending. That is, new advances on different levels are expected, taking into consideration innovations in all areas in logistics management.

Acknowledgements

Of course such an ambitious project like organizing the conference and publishing the proceedings to reflect its outcome would not have been possible without the most valuable input of a large number of people. First of all, we wish to thank all the authors and presenters for their contributions. Furthermore, we greatly appreciate the valuable help from the members of the international program committee as well as the referees.

Christian Bierwirth, Halle-Wittenberg, Germany
 Kai Brüssau, Hamburg, Germany
 Teodor Gabriel Crainic, Montreal, Canada
 Joachim R. Daduna, Berlin, Germany
 Wolfgang Domschke, Darmstadt, Germany
 Michael Eßig, Munich, Germany
 Armin Fügenschuh, Darmstadt, Germany
 Hans-Otto Günther, Berlin, Germany
 Richard F. Hartl, Vienna, Austria
 Heiner Hautau, Hamburg, Germany
 Sin C. Ho, Aarhus, Denmark
 Karl Inderfurth, Magdeburg, Germany
 Kap Hwan Kim, Pusan, South Korea
 Peter Klaus, Erlangen-Nürnberg, Germany

Robert Klein, Augsburg, Germany
 Herbert Kopfer, Bremen, Germany
 Herbert Kotzab, Copenhagen, Denmark
 Heinrich Kuhn, Eichstätt-Ingolstadt, Germany
 Gilbert Laporte, Montreal, Canada
 Rainer Lasch, Dresden, Germany
 Dirk Christian Mattfeld, Braunschweig, Germany
 Herbert Meyr, Darmstadt, Germany
 Stefan Minner, Vienna, Austria
 Pitu Mirchandani, Tucson, USA
 Andreas Otto, Regensburg, Germany
 Warren Powell, Princeton, USA
 Frank Schwartz, Hamburg, Germany
 Hans-Jürgen Sebastian, Aachen, Germany

L. Douglas Smith, Missouri-St. Louis, USA Horst Tempelmeier, Cologne, Germany
Thomas S. Spengler, Braunschweig, Germany Günther Zäpfel, Linz, Austria
Maria Grazia Speranza, Brescia, Italy
Eric Sucky, Bamberg, Germany

The conference has only been made possible by the support and motivation we achieved from various people. While running the conference and compiling the proceedings we received enthusiastic support from the team from the Institute of Information Systems (IWI), University of Hamburg. Moreover, some people deserve special mention, as there are Torsten Schneider for the design of the conference web page and Torsten Reiners, among others, for the technical support. Furthermore, we would like to thank Julia Bachale for her input in preparing the conference and doing the local arrangements. Last not least our thanks go to Werner A. Müller at Springer Publishers for his help and encouragement.

Julia Pahl, Hamburg
Silvia Schwarze, Hamburg
Stefan Voß, Hamburg

September 2009

Contents

Part I Coordination and Contracts

Coordination in Supply Chain Management - Review and Identification of Directions for Future Research 1
Andreas Breiter, Tobias Hegmanns, Bernd Hellingrath, and Stefan Spinler

Multi Period Contracts in Transport under Asymmetric Information and Prior Investments 37
Xavier Brusset

Supply Chain Kooperation in der Ersatzteillogistik für die Luftfahrt 55
Sebastian Friedrich und Stefanie List

Revenue Management bei Auftragsfertigung – Ein Ansatz zur Kapazitätssteuerung 77
Eric Sucky

Part II Production Planning and Lot Sizing

Marktorientierung im Supply Chain Management durch Produktionskompetenz am Beispiel der Lebensmittelindustrie 97
Markus Amann und Michael Eßig

A Hybrid Algorithm for the Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem with Setup Carry-over 123
Marco Caserta, Adriana Ramirez, Stefan Voß and Romualdo Moreno

Berücksichtigung von Lieferantenkrediten in der Bestellmengenplanung . 139
Erik Hofmann

Identifikation von Ablauffamilien zur Integration flussorientierter Fertigungsstrukturen in der Halbleiterproduktion	161
Sophia Keil, Rainer Lasch, Arthur Deutschländer, Harald Heinrich und Germar Schneider	
Koordination der unternehmensübergreifenden Produktionsplanung mit variablen Optimierungszentren	187
Rainer Lasch und Gregor Schulte	
Dynamische Losgrößenplanung mit Wiederaufarbeitungs- und Entsorgungsoptionen	211
Christian Schwarz, Udo Buscher und Steffen Rudert	
Part III Handling and Transportation	
Efficient Lower and Upper Bounds for the Multi-commodity Capacitated Multi-facility Weber Problem with Rectilinear Distances ...	229
M. Hakan Akyüz, Temel Öncan, and İ. Kuban Altınel	
Verkehrsträgerwettbewerb im Güterverkehr – Eine Scheindiskussion? ..	247
Joachim R. Daduna	
Integrationskonzepte für das taktische und operationale Management von Ladungsträgern	261
Dirk C. Mattfeld und Thomas Huth	
Computing Optimized Stock (Re-)Placements in Last-In, First-Out Warehouses	279
Ulrike Ritzinger, Matthias Prandstetter, and Günther R. Raidl	
A General Approach to Robustness in Logistics – Basic Concepts, Quantification Approaches and Experimental Evaluations	299
Jörn Schönberger and Herbert Kopfer	
Part IV Logistics and Reverse Logistics	
A New Approach for an Inventory Model of a Remanufacturing System with Stochastic Decomposition Process	325
Matin Bagherpour, Behrooz Pourghannad, and Narges Shahraki	
Strukturen der Logistikforschung: Ergebnisse einer Zitations- und Kozytationsanalyse internationaler Logistikzeitschriften	339
Christoph Georgi, Inga-Lena Darkow und Herbert Kotzab	
Modeling the Supply Chain in the Semi-Integrated Steel Industry: A Case Study in Colombia	353
Edgar Gutierrez-Franco, Jairo R. Montoya-Torres, Luz Helena Mancera und Jaime Cabra	

Integrierte Planung von Produktions-, Nacharbeits- und Recyclingprozessen bei fehlerbehafteter Produktion 369
Steffen Rudert, Udo Buscher und Christian Schwarz

Part V Applications and Case Studies

An Integrated Framework for Bus Logistics Management: Case Studies . 389
József Békési, Andrej Brodnik, Miklós Krész, and David Pash

Modeling Container Terminal Scheduling Systems as Hybrid Flow Shops with Blocking Based on Attributes 413
Bin Li, Wen-feng Li, and Stefan Voß

Supporting the Definition of Strategies for the Configuration of Health Care Supply Chains 435
Nazaré Rego and Jorge Pinho de Sousa

A Late Acceptance Algorithm for the Lock Scheduling Problem 457
Jannes Verstichel and Greet Vanden Berghe

Coordination in Supply Chain Management - Review and Identification of Directions for Future Research

Andreas Breiter, Tobias Hegmanns, Bernd Hellingrath, and Stefan Spinler

Abstract We review developments in fundamental research on coordination in supply chain management. The review presents recent articles in the field and explicitly addresses new trends in supply chain management, namely, the consideration of multi-tier value-added processes, the coordination of multi-sourcing/customer relationships and the handling of complex bill-of-materials structures. Our contribution is the segmentation of the existing approaches, employing a general framework and leading to insights for the future direction of research. We describe the state-of-the-art and point out areas where further research is necessary. We analyze which coordination problems models address, how they structure supply chains and which roles and relationships of supply chain partners they assume. We conclude two research potentials: First, more emphasis should be laid on approaches that apply to multi-tier production and logistic networks. Second, more attention should be paid to the problem of resource coordination in networks.

Andreas Breiter

WHU - Otto Beisheim School of Management, Lehrstuhl für Produktionsmanagement, Burgplatz 2, 56179 Vallendar, GERMANY

E-mail: Andreas.Breiter@whu.edu

Tobias Hegmanns

Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Joseph-von-Fraunhofer Str. 2-4, 44227 Dortmund, GERMANY

E-mail: Tobias.Hegmanns@iml.fraunhofer.de

Bernd Hellingrath

Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Logistik, Leonardo-Campus 3, 48149 Münster, GERMANY

E-mail: Bernd.Hellingrath@wi.uni-muenster.de

Stefan Spinler

WHU - Otto Beisheim School of Management, Lehrstuhl für Logistikmanagement, Burgplatz 2, 56179 Vallendar, GERMANY

E-mail: Stefan.Spinler@whu.edu

1 Introduction

Supply chain management (SCM) is concerned with the management of material, information and financial flows in a network consisting of suppliers, manufacturers, distributors, and customers. Coordination and integration of these flows within and across companies are critical in effective supply chain management [34]. The above definition of SCM stresses the term coordination as a core requirement of supply chain management. This article investigates how coordination in a supply chain can be achieved. The state of coordination in a supply chain can be understood as an act of properly combining (relating, harmonising, adjusting, aligning) a number of objects (actions, objectives, decisions, information knowledge, funds) for the achievement of the chain goal [68, p. 291]. By formal definition coordination in a supply chain is present if “the set of supply chain optimal actions is a Nash equilibrium, i.e., no firm has a profitable unilateral deviation from the set of supply chain optimal actions” [12, p. 230]. Cachon [12] sees supply chain coordination in the light of the surplus oriented channel coordination literature, which has been developed in operations and marketing. This article incorporates recent research on coordination by extending supply chain coordination beyond the limits of surplus optimization. Since the determination of a global supply chain optimum is not always possible under these circumstances or not intended, this article applies the less restrictive understanding of the term coordination as presented by [71]. A supply chain is coordinated if the behaviour of all involved partners results in an improved plan for the overall supply chain compared to an initial or default situation [71, p. 2]. This review targets at recent publications on supply chain coordination. We do not limit the field to the classic surplus oriented coordination, but present a number of less developed branches of the literature in order to provide a broad overview on the recent frontier. Our contribution is the segmentation of these approaches, employing a general framework and leading to insights for the future direction of research on supply chain coordination. We call the procedure for aligning the behaviour of two or more supply chain actors a “coordination scheme”. It should be remarked at this point that we use the term scheme independently of whether the actual coordination mechanism describes a single interaction of the partners or an iterative process between them. We review developments in fundamental research on coordination. These advances are complemented with a description of several branches of research explicitly dealing with these new trends, namely, the consideration of multi-tier value-added processes, the coordination of multi-sourcing/customer relationships and the handling of complex bill-of-materials structures.

1.1 *Supply Chains as Networks*

Most literature in the field of supply chain coordination regards a supply chain as companies interrelated through a “flow of goods, information, and funds” [78, p. 301]). In the typical focus of the analysis is a two-tier supply chain between

a buyer and a supplier as generally described by [78]. Modern supply chains are strongly interweaved constructs with the structure of networks rather than linear chains with a restricted number of players. These production and logistic networks are characterized by steadily growing complexity. The two predominant reasons for this development are outsourcing and an increasing focus on flexibility. Enterprises focus on their core competencies and outsource manufacturing and other activities to suppliers and service providers. In consequence, modern networks comprise various supply, production, transportation and service relationships between numerous legally independent entities. Complexity is increased by multi-sourcing and multi-customer strategies. Mastering these networks becomes an even more challenging task in face of volatile market demand and complex product structures. This paper investigates how recent approaches to supply chain coordination take account for the requirements arising from this change of the environment.

1.2 The Decentralization Problem

The benchmark for supply chain profitability is the integrated supply chain. Centralizing all decisions in a supply chain leads to the first-best case. This optimization criterion is known from the surplus oriented coordination literature; however, it also holds for other areas of coordination. In practice, it can be observed that supply chains are most commonly planned and controlled on a decentralized basis [47], i.e., production, inventory, and transportation decisions distributed among a number of independent inter- or intra-organizational planning units. These decentralized supply chain networks are less advantageous than the first-best case, as the expected profit from the centralized scenario exceeds the expected profit from the decentralized case [78, p. 304]. Decentralized decision making results in uncoordinated management, e.g., a local warehouse manager only possesses inventory information on a very limited section of the supply chain and thus will not come to the same results that a central planner would derive [14, p. 343]. The lack of information sharing results in suboptimal production policies and thus leads to additional stock.

The classic literature on supply chain coordination describes two basic effects causing the inefficiency of decentralized supply chains. The negative effect of the independent optimization of the supplier's and the buyer's profits in presence of demand risk is known as double marginalization (e.g., [12, p. 229], [78, p. 304], [44, p. 48]). The supplier calculates prices in line with profit maximization conditions. The buyer, in turn, is induced to order less than in the optimum and thus reduces the total surplus. Another known example for inefficiencies due to missing information on downstream demand patterns and long lead times is the bullwhip effect (see [14, 48]). Here, each party optimizes her own profits and does not interact with other players, leading to substantial variance in order levels. There are four reasons for the bullwhip effect: demand signalling, shortage of supply, order batching and fluctuating prices [48, p. 555]). There are a large number of less well known coordination issues besides double-marginalization and the bullwhip effect. This paper reviews

the characteristics of coordination problems in these various existing approaches and presents new perspectives on the decentralization problem.

1.3 *The Delicate Vision of Integrated SCM*

Supply chain management as a means of coordination has for long focused on the integrated supply chain. A recurrent theme found in almost any piece of the wide literature about supply chain management is the vision to achieve a supply-chain-wide optimum through integrated system management. “The belief that integrated performance will produce superior results over loosely managed individual functions is the fundamental paradigm of logistics“ [8]. The motivation for integrated supply chain management can be summarized in four statements:

- Simultaneously solving problems, which are otherwise investigated in isolation and partially, enlarge the solution space of the general problem.
- Conflicts in objectives between companies can be resolved in a cross-company process.
- Assumptions about the availability of capacities can be replaced by real capacity data across multiple stages.
- Buffers for coupling non-balanced sub-optima can be eliminated.

Research in network planning increasingly doubts the appropriateness of centralized planning approaches. [37] state, “it is difficult, or maybe even impossible, to get a large network consisting of independent companies to agree on and implement a centralized planning and control solution”. Three major barriers towards the success of integrated, centralized supply chain management have to be considered:

- *Multi-network involvement of supply chain partners:* A company is usually a part of several networks at the same time. Planning activities of these different networks interfere. Consequently, it is possible that the individual networks impose conflicting claims on the resources of a partner. Under a centralized approach this structural problem can hardly be resolved, without increasing the scope of the plan to all networks involved. Balancing the conflicting request from different network lies within the local decision autonomy of an independent organization and cannot be outsourced to a central model of a particular network.
- *(Un)willingness to share information:* Due to the confidentiality of certain kind of information it is in general not possible to gather all information relevant for the setup of a comprehensive network model. Partners are not willing to provide information that they fear their partners could abuse.
- *Lack of acceptance of central plans:* The enforcement of central plans requires the surrender of local decision autonomy which is not realistic. Moreover, when aiming at a supply-chain-wide optimum, some partners will experience deterioration of their profit. The acceptance of such planning results from their side is doubtful.

From the above arguments the conclusion can be drawn that on the one hand a centralized approach is not suitable to achieve network wide coordination between the various independent organizations in complex production and logistic networks. On the other hand a pure decentralized setup of the supply chain leads to the mentioned inefficiencies. A coordination scheme intending to overcome the shortfalls of pure decentralized behaviour must take account for the conditions that evolve from informational privacy and decision autonomy of the supply chain or network partners. The target of this paper is to provide a clearer picture of the current research frontier in supply chain coordination in the light of the above restraints.

1.4 Segmentation of the Existing Literature

Supply chain coordination literature is not a single homogeneous field. We would like to refer to [31] for a very broad overview on supply chain management literature. Regarding coordination, our interest is in supply chain operations, that is the coordination of the procurement, production and distribution processes in supply chains. Therefore, we omit more general literature on coordination, e.g., from an organizational or sociological perspective (e.g., [76, 54, 35, 2]) or managerial perspective [9, 11, 66, 42]. For the literature review both, journal articles and book chapters have been taken into consideration. Criteria for consideration in the review are advancement of research, generalizability and recent publication. Moreover there must be an independent model or an independent concept. We explicitly did not consider older fundamental articles, in order to stress the focus on recent developments and directions in the coordination literature. We review the contributions according to the mechanisms employed for coordination, where two basic categories are distinguished: supply chain contracting and collaborative planning and control. We understand these two categories as follows:

- *Supply chain contracts*

Supply chain contracts are bilateral agreements between supply chain parties, specifying the parameters employed for an exchange of goods. The optimal actions of the parties involved in the exchange may be not aligned, requiring transfers to reach coordinated behaviour [12]. Supply chain contracts aim at guiding the involved parties towards the globally desired outcome [83] in situations where each party is led by local incentives from benefits, costs or risks.

We structure this section according to the mechanisms employed to contract.

- Bargaining
- Auction processes
- (Secondary) markets

- *Collaborative planning and control*

Collaborative planning and control refers to planning and control processes spanning more than one planning domain. A planning domain refers to a part of the

supply chain and the planning tasks within, which are under the responsibility of one organization. While supply chain contracts deal with the effects of contracts on the behaviour of individual parties and with the design of the business terms of pricing and accountability, the approaches put together under the headline of collaborative planning and control concentrate more on processes and models used for achieving coordination. Approaches in this category describe how partners can cooperate to establish coordination between their respective planning domains.

Again we structure the literature in this category by the mechanisms employed:

- Centralized collaborative planning
- Hierarchical anticipation
- Mathematical decomposition and distributed models
- Self-Selection
- Automated negotiations
- Collaboration concepts

We describe each article reviewed in the two categories along three dimensions: the characteristics of the coordination scheme, structural aspects of the supply chain described and the relationship of the parties involved in coordination. These dimensions have been chosen with respect to the intended evaluation of the coordination schemes. We are interested which coordination problems have been considered and which tasks remain for future research. Moreover, as outlined above we intend to review coordination in the light of network structures and the requirement of a decentralized planning approach. Therefore, we must examine structural and relational aspects of the identified schemes. The descriptive criteria themselves are common to describe and classify planning and coordination schemes (see, e.g., [71, 28]). Table 1 provides an overview on these characteristics and the sub-criteria.

The characteristics of each coordination scheme are described by the task it coordinates, the tool it employs and the achievements reached. From the review of literature we have deduced a set of coordination tasks to structure the available approaches (see Section 3). A classical example for a coordination task is order quantity decisions, other examples are lot sizing decisions or capacity investments. The tool applied can be a contract, an auction, a negotiation, a mathematical model or any coordinative process or action. The achievements of the coordination scheme are described by three possible states of the results and the performance of the scheme. The ideal outcome of the coordination is the result, which an integrated firm would reach, i.e., the global supply chain optimum. With regards to the overall fairness, a Pareto improvement could be the aim of coordination. Often the supply chain optimal solution cannot be reached or remains unknown. In this case, we state if it was shown that the coordination scheme achieves an improvement about the uncoordinated solution.

Structural aspects describe the environment, in which coordination takes place. The supply chain layout and the product structure determine the complexity of trans-

Table 1 Descriptive parameters and requirements applied to the reviewed approaches.

Coordination Scheme Characteristics					
Issue of Coordination Which task or decision is coordinated?		<i>e.g., purchase quantities, inventory levels, lot sizes</i>			
Tools Employed Which means, instruments or mechanisms achieve coordination?		<i>e.g., type of contract or agreement, mathematical decomposition, collaborative planning, auctions</i>			
Improvements Achieved How does the coordination scheme improve the situation?		<i>Improvement vs. uncoordinated solution Pareto improvement Global supply chain optimum</i>			
Structural Aspects					
Supply Chain Layout Which kind of supply chain is modelled?	Chain	<i>2-tier (1:1)</i>		<i>Multi-tier (1:1:1...)</i>	
	Network	<i>2-tier diverging (1:n)</i>	<i>2-tier converging (n:1)</i>	<i>2-tier complex (n:m)</i>	<i>Multi-tier complex (n:m:k...)</i>
Product Structure Number of products considered and structure of BOM	Number	<i>One</i>	<i>Two</i>	<i>Multi</i>	
	BOM (Bill of Materials) Structure	<i>None</i>	<i>Single-level</i>	<i>Multi-level</i>	
Relationship of Parties Involved in Coordination					
Decision-Making Who decides in the supply chain?		<i>Centralized</i>		<i>Decentralized</i>	
Distribution of Power How are supply chain actors interrelated?		<i>Hierarchic</i>		<i>Heterarchic</i>	
Information Sharing How is information distributed?		<i>Symmetric</i>		<i>Asymmetric</i>	

actions. In particular, simple structures and network layouts have to be differentiated. The structural characteristics used for the evaluation are straightforward as shown in Table 1. The simplest form of a supply chain is a two-tier supply chain with one actor on each tier. More complex layouts can be achieved by introducing multiple actors on each tier or by adding additional tiers.

Finally, the relationship of the parties involved in coordination is evaluated. The design of the coordinating mechanism depends on the decision-making authority and the distribution of power in the supply chain. We distinguish the following properties to describe the relationships in the supply chain. Decision-making can be

- *centralized*, i.e., the decision is determined centrally involving private information of all parties,
- *decentralized*, i.e., the decision is determined within the private planning domain of each party.

The decision situation can furthermore be described as hierarchic or heterarchic depending on the power of the supply chain actors:

- *hierarchic*: A more powerful supply chain party can enforce decisions on other parties.
- *heterarchic*: Equally powerful parties derive decisions.

Finally the distribution of information in the supply chain is considered. A coordination scheme may assume

- a *symmetric distribution of information*, i.e., information transparency is complete. Information is transparent to all supply chain parties,
- an *asymmetric distribution of information*; i.e., one or more partner(s) do not have access to all decision-relevant information. Information is intransparent or unequally distributed between parties.

2 Literature Review

We divide the review chapter according to the segmentation introduced above. First, we provide an overview on articles, where coordination is achieved, employing a contract between the parties involved in the supply chain (see also Table 2). Second, we review the literature from the field of collaborative planning and control (see also Table 3).

2.1 Contract Models

2.1.1 Determination of Coordinating Contract Parameters through Bargaining

The presented research in the category of bargaining type contracting schemes focuses on deriving coordinating policies employing incentives such as price discounts or penalty costs. The aim of these approaches is to coordinate the behaviour of the involved entities in a way that the first best solution, the solution of a centralized planning model, is approached. The majority of coordinating contracts is based on risk sharing. Risk is redistributed between the supply chain parties to achieve an environment that enforces the supply chain optimal decisions. Many articles assume that one party moves first due to the structure of the game or has superior power, allowing her to impose a contract on the other party. This structure allows for a first mover advantage, when determining contract parameters. Here coordination can be achieved, as the Stackelberg leader can predict the other party's optimal reaction, given she possesses the necessary information, e.g., knowledge of the other party's variable costs. There is a smooth transition to games where both players bargain

Table 2 Articles on Coordinating Contracts Reviewed.

	Tools Employed	Supply Chain Outline	Task to be Coordinated	Improvements Achieved
Determination of Coordinating Contract Parameters through Bargaining				
[4]	Order smoothing	2-tier converging network	Forecasting, inventories	Reduction in channel costs
[6]	Option on capacity	2-tier linear chain	Supply chain throughput	Pareto improvement vs. uncoordinated solution, global optimum under certain conditions
[10]	Option on capacity	2-tier linear chain	Supply chain throughput	Pareto improvement vs. uncoordinated solution under certain conditions, global optimum is not reached
[13]	Revenue sharing contract	2-tier linear chain and 2-tier diverging network	Supply chain throughput	Global supply chain optimum
[15]	Modified buy-back contract	2-tier linear chain	Supply chain throughput, capacity investment	Global supply chain optimum
[32]	Demand forecast and revenue sharing	2-tier linear chain	Inventories, forecasting, truth-telling	Global supply chain optimum
[44]	Wholesale price with conditional ex post transfer	2-tier linear chain	Supply chain throughput and promotion effort	Global supply chain optimum
[49]	Wholesale price with demand signal	2-tier diverging network	Supply chain throughput	Global supply chain optimum
[52]	Contract leader location	Multi-tier complex network	Information structure	Global supply chain optimum
[62]	Buy-back of used products	2-tier diverging network	Supply chain throughput and retail prices	Pareto improvement, global optimum under certain conditions
[70]	Option on capacity	2-tier linear chain	Supply chain throughput	Pareto improvement
[69]	Option on capacity	2-tier linear chain	Supply chain throughput	Pareto improvement
[77]	Channel rebate	2-tier linear	Supply chain throughput, truth-telling	Global supply chain optimum
Determination of Coordinating Contract Parameters through Auctions				
[16]	Extended profit sharing contract	2-tier converging network	Supply chain throughput, information structure	Global supply chain optimum

Table 2 Articles on Coordinating Contracts Reviewed (continued).

Tools Employed	Supply Chain Outline	Task to be Coordinated	Improvements Achieved
[59] Transfer; Extension: option contracts	2-tier converging network	Supply chain throughput	Global supply chain optimum
Reaching Coordination through (Secondary) Markets			
[46] Wholesale price contracts in two periods	2-tier diverging network	Inventories	Channel efficiency increases, effect on wealth is unclear

over the contract, as the distribution of profits depends on power. [12] provides a detailed review of the mathematical formulation of such contracts.

[6] analyze the effects of flexible supply contracts on suppliers' and buyers' profits. A single manufacturer sells one product to a single buyer, where the selling season is short and allows for a single demand update. The buyer orders a portfolio of inflexible firm commitments and flexible options. [6] show that backup agreements, quantity flexibility contracts and pay-to-delay capacity reservation contracts are special cases of options on capacity. The two key assumptions are that the supplier commits to deliver all options capacity executed and that demand distributions are common knowledge. Return policies coordinate the channel; however, whenever the buyer has better access to the salvage market, the supplier makes zero profits.

[77] analyzes whether channel rebates coordinate the supply chain. Channel rebate contracts are different from quantity discounts in that the retailer only receives a refund for units sold to the end customer, but not for inventory. The effect of the channel rebate on the quantity ordered by the retailer depends on the sales target specified in the contract. For higher threshold levels the probability that the rebate is actually going into effect decreases. According to the findings of [77], channel rebates can coordinate the channel. [77] extends the model to incorporate sales effort by the retailer. The retailer chooses her effort level when demand resolves and after quantity decisions have been taken. As she aims to reach the sales target set by the manufacturer, she exerts effort to increase demand.

[70] show that a combination of an options and a spot market is Pareto improving compared to a spot market only. The supplier, as the Stackelberg leader, optimizes profits by choosing the option parameters, based on the buyer's best response function. There are three state contingent sources of risk: demand, marginal cost and spot price. The optimal reservation quantity is independent of the reservation and the execution fee, as long as the reservation fee equals the expected difference between the spot price and the execution fee. Consequently, the supplier will set a price close to this limit in order to protect herself against as many states of the world as possible. Options are only executed if the execution fee is lower than the spot price, which is why the supplier sets the execution fee close to marginal costs.

[10] evaluate option contracts in an environment characterized by long lead times, short selling seasons and high uncertainty of demand. By introducing option

contracts, risk is shared between the supplier and the retailer. The buyer optimizes the mix of forward and option contracts in order to maximize profits. [10] assume a downward sloping linear demand curve, which includes a stochastic market size factor. They propose the existence of a volatility threshold, which limits the benefit of options to the retailer. [10] find that options increase supply chain profits, but do not reach the first-best solution.

[13] analyze revenue sharing contracts with respect to channel coordination. The manufacturer proposes a wholesale price and a share of revenue, passed from the retailer to the manufacturer. The retailer decides on the purchasing quantity and the retail price. It is shown that revenue sharing contracts coordinate the supply chain, where the allocation of profits depends on the parties' bargaining powers. In addition, [13] compare revenue sharing contracts to other types of contracts and find similarities to buyback and price-discount contracts for fixed price newsvendor models; however, when there are multiple noncompeting price setting retailers, revenue sharing contracts are superior. It is remarkable that the reduction in efficiency compared to the integrated channel is reduced when more than one retailer serves the market.

[69] extend the model of [70]. They introduce a more general utility function and show that options are only traded, when the reservation fee lies between certain thresholds. The buyer is not willing to pay more than the expected difference of the spot price and the execution fee. When this value is negative, no options are purchased. The supplier requires at least a reservation fee covering the expected difference between the marginal production costs and the execution fee as well as the expected opportunity costs in case of high spot prices.

[52] discuss the impact of the contract leader's position in a supply chain network on channel performance. The network is modelled as a system of suppliers and assemblers, which converges to a single retailer, serving the market. The leader of the network is the party first offering contracts to its neighbours. The position of the leader in the tree is independent of competition and only depends on the network structure. [52] provide an algorithm, which determines the supply chain profit maximizing positioning of the contract leader. They suggest that companies can use mergers and acquisitions to reshape the network in a way that the contract leader is located optimally.

Contract parameters can transfer information and thus lead to coordination. [49] survey whether a manufacturer, selling to multiple competing retailers, should distribute demand information directly or through the contract parameters offered. Each retailer has private information on the demand function. This information may be redistributed to other retailers, or it can be treated confidentially and may only be employed for choosing the supply chain optimal wholesale price. Under confidentiality, retailers still receive a signal from the emerging wholesale price. A high wholesale price signals a positive state of the world, which increases retail prices, reducing sales. Thus, demand from retailers becomes more price elastic and as a result the equilibrium wholesale price decreases. The supply chain optimum in terms of profits is reached, when all retailers share their knowledge on the demand curve in a confidential process.

Employing contracts on capacity to coordinate a supply chain under uncertainty is one possibility. Another approach is to improve coordination by contracting for reducing uncertainty itself. [4] suggest that controlling variability of demand reduces the need for inventory with the supplier and thus results in a leaner supply chain. This target is reached through replenishment policy agreements between the retailer and the manufacturer. As a result, volatility is smoothed and the supplier receives information on the distribution of demand for the next order. Within the borders of the smoothing policy, each stage of the supply chain minimizes costs. [4] find that order smoothing can significantly decrease supply chain costs.

An emerging area of supply chain coordination literature is the design of contracts for product returns. Two types of product returns have to be distinguished. Companies must design reverse supply chains for returns of leftover inventory and for used products, which still have a salvage value to the manufacturer. Contracting on the reverse channel can coordinate the overall supply chain. [3] provide a review on related articles.

[15] propose a return contract, where both parties compensate each other for leftover inventories. In the first period, the manufacturer purchases raw materials and produces components. At the beginning of the second period, the retailer receives updated demand information and places her order. During the third period the retailer sells the goods to consumers. The standard buy-back contract fails to coordinate the supply chain in this setting, because the supplier has an incentive to produce less than the supply chain optimum in order to maximize her individual profits. Under the contract proposed, the retailer partially compensates the manufacturer for unused inventory. However, when the retailer cannot sell all goods purchased, the manufacturer pays a buy-back fee to the retailer. A numerical analysis shows that the contract proposed leads to superior supply chain performance compared to standard buy-back contracts.

Return policies for used products gain in importance as resources become more expensive. These contracts can be employed to achieve coordination of the new product supply chain. [62] investigate why some manufacturers choose to implement a direct collection system for old products, while others direct returns via retail stores. Double marginalization negatively affects not only the forward supply chain, but also the reverse channel. In the case of direct collection, the manufacturer faces the trade-off between lower manufacturing costs and increasing collection efforts. In the case of indirect collection, where the retailers collect returns, the manufacturer incurs a fixed cost per unit returned and gains a reduction in production costs at the same time. Channel coordination can be reached through the indirect reverse channel.

Sales incentives have major potential to collide with coordinating schemes. [44] analyze a situation, where moral hazard is caused by a coordinating contract. A manufacturer offers a wholesale price in combination with a conditional ex post transfer. A retailer orders inventory and decides on her level of promotional effort. The realization of stochastic demand is only accessible to the retailer. A buy-back transfer is not sufficient to achieve channel coordination. If the retailer runs a promotion, she sells additional units of inventory and gains for each the difference between the

retail price and the buy-back fee. Consequently, higher buy-back transfers lead to reduced promotional effort. [44] suggest that the manufacturer rewards the retailer for promotional efforts by sharing the associated expenses. When the manufacturer cannot observe the expenses, the retailer bears when running a promotion, mark-down allowances are a possibility to coordinate the channel. Here, the manufacturer must have information about early season demand.

Suppliers in general do not have as good access to demand information as do retailers. Consequently, the retailer has the possibility of submitting an untruthful forecast to improve her situation. [32] survey a situation, where a single manufacturer delivers goods under a vendor-managed inventory revenue sharing scheme to a single retailer facing uncertain demand. When the retailer reports demand truthfully, then double marginalization occurs. However, the retailer has an incentive to provide the supplier with a degenerated forecast, as she knows the supplier's critical fractile and thus can indirectly determine the quantity supplied. [32] show that the retailer can communicate demand distributions, which are credible, coordinate the supply chain and provide both players with positive profits. The model is limited in that the retailer needs to know the suppliers production costs to construct a coordinating forecast.

2.1.2 Determination of Coordinating Contract Parameters Through Auctions

Auction structures are a suitable coordination mechanism, whenever there is a market with sufficient liquidity and competition. An excellent review is presented by [41]. They review auctions as a supply chain coordination mechanism and provide a structure of existing auction designs.

[84] consider a model where several sellers supply one buyer with a single product. Transactions can be handled via a contract and a spot market. Each seller is characterized by a distinctive marginal cost and a maximum capacity constraint. All sellers bid simultaneously in a single auction. [84] show that a contract mechanism based on option contracts is efficient and thus coordinating the channel, when there is competition among sellers. The resulting equilibrium provides no incentive to renegotiate.

In general, contracts require detailed knowledge on the supplier's costs to coordinate the channel. However, this information is costly. [16] propose a contract scheme, which does not require *ex ante* knowledge of the supplier's cost function. A single buyer sources from multiple competing suppliers. She contracts on multiple parameters which could, e. g., include quantity, quality or delivery time. [16] assume that the buyer has no information on the suppliers' cost functions and thus, the standard profit sharing contract fails. Nevertheless, the buyer can maximize her profit and coordinate the channel by using a scheme combining auctions, audits and profit sharing components. An entry fee auction selects the optimal supplier through a single parameter. The audit reveals the cost function of the supplier chosen and then the profit sharing component can provide the necessary incentive for coordination.

[59] consider a multi-period model, where capacity constrained suppliers bid for orders from a single buyer. They derive a transfer which coordinates the channel in a multi-period setting. In addition, [59] extend the model to include a market player, who is not limited in capacity and incurs stochastic costs. In this auction setting, both, the transfer and options on capacity coordinate the channel.

2.1.3 Reaching Coordination Through (Secondary) Markets

Secondary markets are an extension of traditional contract models. Coordination could be reached by offering an opportunity to resell unused inventory by creating an additional spot market during the selling season. [46] propose introducing secondary markets and survey their effect on coordination. Several non-competing retailers purchase a product from a manufacturer. [46] include a secondary market, which allows for an exchange of inventory in the middle of the sales period. [46] find that the secondary market price is strictly lower than the original wholesale price, as the merchandise already lost the opportunity of sales in the first part of the sales period. The introduction of a secondary market may increase or decrease the volume sold by the manufacturer depending on the difference between the initial wholesale price and the retail price. From the retailers' point of view, the introduction of a secondary market is always advantageous, as it offers an option to participate. From a coordination point of view, a secondary market increases sales to end customers and decreases stockouts and excess inventory. However, the effect on total welfare and thus on coordination in terms of profit is unclear.

2.2 Collaborative Planning and Control

2.2.1 Coordination by Means of Centralized Collaborative Planning

Centralized collaborative planning solutions intend to improve supply chain coordination through information sharing. By revealing private information a central entity is enabled to determine an approved allocation of resources or materials. Such approaches are to be seen critical in inter-organizational supply chains. However, practice shows that many intra-organizational supply chains consist of distinct planning domains as well. These intra-organizational planning domains are represented by different functional units, regional divisions or sites of a company. Often a lack of transparency of the overall decision-situation leads to poor coordination in decisions involving several of these intra-organizational planning domains. To establish coordination in this situation, centralized collaborative planning solutions provide remedy by offering decision models and processes. In this category we do not consider general centralized supply chain models, the approaches listed put an emphasis on the collaborative aspects of information sharing and decision-making.

Table 3 Articles reviewed in collaborative planning and control.

Tools Employed	Supply Chain Outline	Task to be coordinated	Improvements achieved
Centralized collaborative planning			
[21] Information sharing	Multi-tier complex	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution
[30] Information sharing and resource planner function	2-tier diverging network	Inventory levels	Improvement vs. uncoordinated solution
[33] Nash bargaining solution	2-tier linear chain	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[67] Information sharing	2-tier complex network	Production plans and capacity planning	Improvement vs. uncoordinated solution
[1] Information exchange scheme	Multi-tier complex network	Resource allocation	Global optimal supply chain optimum
Hierarchical anticipation			
[65] Hierarchical planning with reactive anticipation	2-tier linear chain	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[51] Hierarchical planning heuristic with non-reactive anticipation	2-tier diverging network	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution
Mathematical decomposition			
[25] Lagrangean Decomposition of mathematical optimization model	Multi-tier complex	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[5] Lagrangean Decomposition of mathematical optimization	2-tier diverging network	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[82] Lagrangean Decomposition of mathematical optimization model	2-tier diverging network	Supply chain throughput, production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[43] Augmented Lagrangean Decomposition of mathematical optimization model	2-tier complex network	Production plans, resource allocation	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[23, 24] Negotiation-based collaborative planning scheme	2-tier diverging network	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[26] Bundle Auction Market	Multi-tier complex network	Resource allocation, truth telling	Improvement vs. uncoordinated solution

Table 3 Articles reviewed in collaborative planning and control (continued).

	Tools Employed	Supply Chain Outline	Task to be coordinated	Improvements achieved
Self-Selection				
[74]	Self-Selection Mechanism	2-tier linear chain	Production Plans	Pareto improvement
[18]	Quantity discount contracts	2-tier linear chain	Production plans, information structure	Improvement vs. uncoordinated solution
Automated negotiations				
[27]	Negotiations	2-tierlinear chain	Production plans	Pareto improvement
[36]	Negotiations	Multi-tier complex network	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution
[72]	Negotiations	Multi-tier complex	Production plans, truth-telling	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
[20]	Negotiations	2-tier linear chain with carrier	Production plans, logistics and transports	Improvement vs. uncoordinated solution
[39]	Negotiations	2-tier-complex network	Production plans	Improvement vs. uncoordinated solution (Quantified gap to global optimal solution)
Collaboration schemes				
CPFR [79]	Collaborative processes and information sharing	2-tier linear chain	Forecasts and order quantities	Improvement vs. uncoordinated solution
DCP [58]	Collaborative processes and information sharing	2-tier complex network	Demand and capacity planning	Improvement vs. uncoordinated solution
VMI	Collaborative processes and information sharing	2-tier linear chain	Inventory and order quantities	Improvement vs. uncoordinated solution
SCMo [57]	Collaborative processes and information sharing	Multi-tier complex network	Inventory transparency	Improvement vs. uncoordinated solution

[21] describe the implementation of a stochastic multi-echelon inventory model for a supply network in the semiconductor industry. The synchronized base stock policy is applied to support the weekly collaborative planning of operations between a manufacturer and a customer, both being subsidiaries of the same top-level corporate organization [22]. A collaborative planning process is set up involving joint decision-making in periodic virtual-round-table meetings of the involved production and warehousing sites. The approach assumes extensive information sharing including live data on actual stocks, scheduled receipts and in-transit-materials of each node in the supply network. Aim is the collaborative determination of work orders for all items of the production network under consideration of the multi-echelon inventory at all nodes in the network.

A similar approach making use of improved information sharing in the supply chain in combination with mathematical optimization models is described by [67]. They outline the application of several decision support tools ranging from the strategic to tactical planning horizon for production procurement planning in a two-tier network consisting of several production sites of a manufacturer and several suppliers in the high-tech industry. The first tool supports the weekly material ordering process. The second tool helps to coordinate procurement and capacity adjustment planning decisions with suppliers over the next few quarters and the third tool addresses the long-term capacity planning with suppliers over a three years horizon. Basis for all optimization tools are shared capacity models regularly updated by suppliers and the manufacturer.

[30] have presented an approach to coordinate inventory within several divergent supply chains between a manufacturer and several retailers. The situation under consideration arises when some of the retailers cooperate and share information and others do not. The authors demonstrate that this configuration may lead to suboptimal results if separate models are solved for the cooperative and non-cooperative supply chains, respectively. To achieve coordination the concept of a resource planning function is introduced. Retailers make agreements with this resource planning function about the service level required from the manufacturer. A two-step heuristic is applied to solve the coordination problem. First, the planning problems of the cooperative and non-cooperative retailers are solved separately. Second, the results of the optimisations are communicated to the resource planner function to optimize the shared inventory under the given service constraints.

[33] present an approach for fair, optimized profit distribution in a supply chain with one manufacturer and one buyer. Their model formulation applies the Nash bargaining solution (see [56]) for finding optimal and fair profit levels. The solution delivers an optimal fair split of the total supply chain profit, whereas a mere global optimization would optimize the sum of the profit at the manufacturer and the buyer, independent of its distribution. The overall problem formulation is a non-linear mixed integer program solved by a specialized branch-and-bound algorithm with relaxations. The authors compare results of the Nash approach to a pure global optimization of the entire supply chain. Results show that the solution of the Nash approach is very close to the overall supply chain optimum, but profits are more evenly distributed between the partners.

[1] describe a collaborative approach to coordinate capacity provision in a hierarchical production network. Each enterprise in the network decides about the provision of capacity to the network. To coordinate the individual capacity provision decisions a centralized coordination entity on the network level is introduced. Under the control of the central coordination entity, a network capacity pool is maintained to fulfil network orders at a specific service level. To actuate the companies of the network to allocate some fraction of their capacities to the network pool, the coordination entity offers a variable reservation fee. The coordination problem is to find the right fee level without knowledge of the individual capacity provision functions of the enterprises. For this reason the reservation fee is determined by an iterative communication scheme. Coordination entity and individual company planning units announce an reservation fee level resp. the capacity offered at this fee level turn by turn until the pool capacity suffices to fulfil the given service level.

2.2.2 Coordination by Means of Hierarchical Anticipation

Hierarchical anticipation [63, p. 16] is a technique introduced in the context of hierarchical planning problems (see [53]). Hierarchical planning understands the supply chain as sequence of planning models with the structure of a top-level and bottom-level planning model. The top-level decision is taken first and influences the decision of the bottom-level model. Examples are: order decision of a customer affecting the production decisions of a manufacturer or price discount decisions of a manufacturer influencing the order decisions of the customer. Anticipation in this context means to integrate the (anticipated) reaction of the bottom-level model into the top-level decision-model in order to achieve coordination between the two levels. Since separation in a top- and a bottom-level decision problem is the distinctive characteristic of the concept of hierarchical anticipation, coordination schemes using this technique predominantly apply to bilateral supply chain settings.

A solution approach using the concept of hierarchical anticipation is presented by [65]. The approach focuses on an order-dependent production setting. A manufacturer (buyer) orders components of an end product from a supplier in a just-in-time mode. Production at the manufacturer is allowed to start only if all required components are available. Late or incomplete deliveries cause costs for extra capacities to finish the order on-time. If components arrive too early, they cause cost for storing them until start of production. At the supplier limited capacities make it appealing to risk late deliveries rather than making use of costly extra capacities. Goal of the coordination is to set and update parameters (e.g., penalties for late deliveries) of a predefined contract during operations. The chosen penalties should force the supplier to adhere to the given supply schedule while at the same time costs of the supply chain are minimized. Base-level and top-level model are modelled as distinct planning models. The link between the two models is represented by an iterative procedure where the results of the top-level model are used as an input to the (anticipated) base-level model. This loop is repeated until the decisions of the

anticipated base-level model are satisfactory for the top-level model. The buyer then announces the determined penalty rates to the supplier.

Another hierarchical planning situation is considered by [51]. Here a powerful vendor able to suggest an order interval to his multiple buyers is assumed. A heuristic approach is presented for the one-vendor-multi-buyer case. The model requires knowledge of each buyer's annual demand and previous order frequency. The goal of the model is to suggest order intervals for each buyer leaving him with defined tolerable cost increase over his local optimal order costs. The modelling approach can be understood as non-reactive anticipation (see [64, p. 243]) since the maximum tolerable cost increases of the buyers (bottom-level(s)) are represented in the decision model of the vendor (top-level).

2.2.3 Coordination by Means of Self-Selection

Self-selection is an approach applied to coordination problems with asymmetric information. If one actor possesses incomplete information about the other actor's decision structure and parameters, a way to achieve coordination is to offer a set of incentive-compatible decision options (e.g., a combination of order quantities and transfer payments) that induces truthful revelation of private information [45, p. 63]. The less powerful actor designs an incentive-compatible option menu which makes it attractive for the other party to choose the option designed for his specific decision problem. By picking one of the offered options, the other party indirectly reveals his decision parameters.

[74] investigates the question how integrated ordering and production policies can be determined under the influence of asymmetric distributed information and power in a supply chain. The case most often encountered in reality is a powerful customer able to enforce his local optimal order policy against the will of the supplier. To create an incentive for the customer to deviate from his local optimal ordering policy, the author develops a model for the determination of an optimal contract menu, i.e., a set of contracts each consisting of a proposed supply quantity (resp. delivery frequency) and a side payment. The supplier estimates different alternative sets of possible values of the buyer's decision relevant costs parameters. To each set of cost parameters the supplier assigns a probability which represents the probability that a particular set of cost parameters matches the true cost profile of the buyer. A non-linear stochastic decision model is used to determine the optimal contract menu which minimizes the expected value of the total costs of the supplier.

[18] present a similar scheme to determine the joint economic lot-size in a one-buyer one supplier decision situation under information asymmetry. In their scheme a menu of different quantity discounts is designed by the supplier requiring the buyer to reveal his true holding costs when choosing the quantity discount optimal to him. However, an assumption is that the buyer's ordering costs are known, thus information asymmetry is partial.

2.2.4 Coordination by Means of Mathematical Decomposition and Distributed Models

Generally decomposition techniques are used to determine an optimal solution to a global decision problem with less computational effort. Examples for decomposition techniques are Lagrangean decomposition, Dantzig-Wolfe decomposition or Benders decomposition. [71, p. 3f] has outlined how mathematical decomposition techniques relate to and are used to create collaborative planning models. In the context of supply chain coordination problems mathematical decomposition can be understood as the disaggregation of the global model into sets of parallel sub-models. Each sub-model represents an actor of the overall supply chain coordination problem and may have private knowledge of local decision parameters or constraints. On top of the sub-models a top-level model is installed representing the view of the global decision problem. The top-level model controls the search for the optimal solution by means of a coordination procedure, e.g., announcing updated conflict or transfer prices after each solving of the sub-models.

[25] describe a mechanism for production coordination in a supply chain using mathematical decomposition. Their research studies a multi-tier supply chain consisting of several manufacturing facilities. Each manufacturing facility faces a multi-level capacitated lot sizing problem. A Lagrangean relaxation approach is applied to decompose the centralized global model of the network into facility sub-models. A central coordinator orchestrates the solution process aiming at the convergence of the overall solution to a solution with equal deviations from the local minimum cost results across all sub-models. The resulting solution is not the minimal cost solution for the entire supply chain, but a fair solution for all involved partners. On average the gap in costs to the optimal results of a centralized model is 10%. However, the authors argue that the solution of their scheme outperforms the centralized solution with regards to the overall fairness.

A similar approach using Lagrangean decomposition is taken by [5], here a coordinator is needed for both the coordination of the solution process and for removing inconsistencies between the local plans after the scheme has terminated by means of a hierarchical heuristic. Another application of Lagrangean decomposition is presented by [82] who suggest this approach for distributed planning in a product recovery network. In this case the presence of a central coordinator seems reasonable since a focal company leads the network in this specific application scenario in the recycling industry.

[43] make use of augmented Lagrangean decomposition techniques to achieve coordination between the production and marketing (sales) division of a semiconductor manufacturer. Problem formulations for each decision unit apply a 2-stage stochastic program with production yields resp. demand as uncertain factors. While the product managers aim at optimizing the satisfaction of demand with lowest operational costs for holding inventory and outsourcing, the manufacturing managers aim at the efficient utilization of their facilities. The resulting coordination problem is interpreted as finding a set of transfer pricings on an internal market where manufacturing capacity is the economical commodity traded between the product and

manufacturing managers. The headquarter functions as the intermediary between the “buyers” and “sellers” on this internal market.

An approach not making use of exact mathematical decomposition, but linking distributed local planning models by a negotiation-based planning process, is presented by [23] and [24]. They consider a supply chain setting where a supplier and several customers have to coordinate supply resp. order quantities and dates with their internal production planning. The widely known multi-level capacitated lot-sizing model is used to generate plans in the local planning domains. The core idea of the approach is to iteratively pass order/supply proposals between customers and supplier. Dudek and Stadtler [23, 24] develop a mechanism which analyses the consequences of a received proposal on local planning decisions and generates a counter-proposal by introducing partial modifications to the received proposal.

[26] introduce a decentralized coordination mechanism using an auction-market. The supply chain problem they consider is known under the term multi-commodity-network-flow problem where a network of suppliers, manufacturing facilities, warehouses, distribution centres and transportation systems transforms raw materials into final products for the end customer. The proposed mechanism is a double auction sealed-bid call market. This means that both sellers and buyers of resources submit trade offers but are not allowed to see each others' bid. Trade offers are bundles. They offer/request capacity on a set of available/required resources in a particular combination. An auctioneer matches the bundle orders at a pre-specified time when the market is called. The authors show analytically that the more agents there are in the market, the less incentive there is to understate (overstate) the valuation (cost) of the buy (sell) offers.

2.2.5 Coordination by Means of Automated Negotiations

Approaches in this category apply automated negotiations, with companies or decision making units represented as software agents as the mechanism to establish coordination in the supply chain. Negotiation is the process by which a group of agents communicate with one another to try and come to a mutually acceptable agreement on some matter [50, p. 4f]. Negotiation can be viewed as a distributed search through a space of potential agreements. Agreeing on a joint agreement means to establish coordination between the negotiators about the matter of negotiation. To negotiate agents suggest points of the space in which they are willing to make agreements. During the negotiation process, the agents' agreement spaces as well as the function used to evaluate a potential agreement may change [38, p. 202]. The state of coordination is achieved when the agents find a jointly acceptable point in the agreement space.

A coordination scheme making use of such negotiations is presented by Fink [27]. He describes a generic negotiation concept between firms aiming at the coordination of their production sequences. A mediator is used to propose new candidate solutions which are accepted or rejected by the agents. In order to prevent the ne-

gotiation process from getting stuck in local optima, agents conditionally agree on utility deteriorations according to a probabilistic acceptance criterion.

[39] present an approach for the decentralized coordination of the production and distribution function of an enterprise. Each function may comprise the planning for several factory resp. distribution centres. The coordination problem is decomposed into a production planning model controlled by a production agent and a distribution planning model controlled by a distribution agent. An iterative coordination scheme is proposed defining the procedure for the exchange of the planning results and how these results are integrated as restrictions into the solving of the local models. Coordination is achieved when the available production quantities at the factories match with the requested quantities from the distribution centres.

In [73] a decentralized negotiation protocol for scheduling of jobs in a supply chain environment is presented. The agent-based application of this mechanism is called DISPOWEB, it is presented in [72]. Agents maximize their local profits by optimizing their local schedule. They apply local search heuristics to determine and evaluate schedules other than their local optimal one. Agents can offer side payments to other agents to compensate them for accepting a detrimental local schedule. In this way both are achieved, cumulative total savings and win-win-situations for the concerned partners [72, p. 183ff]. The research done in the context of this work also addresses the question of how exploitative and untruthful behaviour of a selfish agent affects the results and benefits of the coordination scheme. To prevent exploitation a mechanism using trust-accounts is designed and proved to be effective.

[36] describes a multi-agent-based, adaptive planning concept for quantities and capacities in production networks. The prototypic implementation of this concept allows the successive propagation of changes to the initial production plan throughout the network under consideration of material and capacity restrictions. Material, capacity and process agents are modelled with individual planning strategies to handle changes to existing plans. The agents of the network exchange requests and counter-proposals until a plan is achieved that finds accordance on all sides.

Dangelmaier et al. [20, p. 61ff],[19] introduce a multi-agent-system called CoagenS with the purpose of supplier scheduling. The system intends to improve coordination between the triangle supplier, customer and carrier. The aim is to optimize freight costs by consolidating several call-offs into combined shipments while fulfilling restrictions from material provision at the supplier and due dates necessary for the production process at the manufacturer. The suggested agent-based application consolidates demands for call-offs in a pre-defined time window and allows the carrier to determine optimal delivery dates and quantities at the price of slightly increased stock levels.

2.2.6 Coordination by Means of Collaboration Concepts

The category of collaboration schemes is less tightly bound to a specific scientific concept than the other categories. A variety of solution approaches can be found in

this category. The emphasis is not so much on decision support by means of exact (mathematical) models and methods. Collaboration schemes aim at increasing the performance of the supply chain by improved information transparency and collaborative processes. A collaboration concept involves elements making this scheme superior to simple upstream planning or one-way instruction. Collaboration concepts base on consensus-like agreements and make use of common objectives, measures and defined decision rules between partners. Coordination is usually achieved through communicative, negotiation-like processes.

CPFR (Collaborative Planning Forecasting and Replenishment) was introduced by the Voluntary Interindustry Commerce Standards Association in 1998, the latest revision of the CPFR standards appeared in 2004 [79]. Due to its successful application in the consumer goods industry, CPFR was adopted as a Best Practice in the Supply Chain Reference Model (SCOR) published by the Supply Chain Council [75]. The CPFR concept recommends collaborative planning processes and information sharing to improve operations in the supply chain between manufacturer and retailer. Key elements of CPFR are a joint collaboration agreement between the partners and introduction of a joint forecasting and ordering process.

Demand Capacity Planning (DCP) is another collaborative process concept for supply chain management. DCP deals with the mid- to long-term balancing of demand and capacity between the partners of the supply chain. In the automotive industry a standardized reference process has been worked out by [58]. The aim of DCP is reduction of capacity bottlenecks and avoidance of serious under-utilization of resources. The DCP concept by [58] describes the process to be used in combination with a joint capacity model which visualizes the capacity situation between partners and available adjustment measures to resolve a capacity conflict. With DCP an enterprise can collaborate with multiple suppliers resp. customers.

The concept of vendor-managed inventory (VMI) is increasingly applied in the industry. VMI aims at optimizing the operative processes of inventory control and management between two partners in the supply chain. The focus is on service level optimization and on the reduction of inventory holding costs. VMI is a pure bilateral concept in which the supplier has taken over the procurement responsibilities from its customer for the replenishment of stocked materials. The concept is only applicable to volume production of products with a forecastable demand. The contribution of VMI to reduce the effects of uncoordinated supply chain behaviour has been studied widely (e.g., [60], [40]).

Supply Chain Monitoring (SCMo) aims at the integration of supply chain partners in the short- and mid-term horizon. The focus is to ensure inventory coverage for the current and planned operations. A standardized reference process has been introduced by [57] for the automotive industry. The SCMo concept proposes a centralized view on the inventory situation in the network driven by a strong leader of the supplier network (e.g., focal OEM).

3 The Current State of Supply Chain Coordination Literature

The prior literature review was structured along the mechanisms employed to achieve coordination. In the following we investigate and compare the characteristics of the approaches reviewed. We describe the state-of-the-art and point out areas where future research is necessary. We analyze which coordination problems the models address, how they structure supply chains and which role and relationship of supply chain partners they assume. We cluster the coordination schemes with regards to the tasks coordinated. We summarize the schemes under headlines, standing for the three flows which together constitute a supply chain: information, materials and resources (see [17], [34]). In addition, supply chains contain a flow of funds, which we do not consider in our review. The articles reviewed show that coordination can be reached. However, a number of limitations have to be considered. We present several common points that provide potential for further research.

Table 4 shows that a focus of the articles in terms of coordination targets is on the coordination of material flows. Within this category, coordinating supply chain throughput and production plans has the highest weight (16 out of 42 approaches each). This is little surprising since coordination of quantity throughput is one of the root problems of supply chain management. Coordination of production plans addresses the decision how much of what item is produced at what point in time. A large subset of this category considers the coordination of order quantity resp. order frequency decisions of the customer with the optimal lot-sizing decision at the supplier. We can distinguish between multi-period settings with limited capacities (e.g., [23], [25]) and single-period settings with infinite capacities (e.g., [74], [51]). A few approaches within this category address coordination of the production schedule, i.e., coordination of due dates and delivery times of production jobs (e.g., [27], [72]). We distinguished the category of production plan coordination from pure inventory optimization where production-related decision (e.g., lot sizing, set up decisions) are not involved. Within the category of materials, transportation is considered only once as a coordination target, although transportation costs are a major fraction of logistics costs.

Coordination of information and resources receives less attention and is often modelled as an additional challenge to the optimization of channel throughput. Coordination of capacity investments harmonizes the decisions how much capacity a company builds up and makes available to the supply chain partner(s) (e.g., [1], [77], [84]). Resource allocation addresses the question how to allocate scarce resources efficiently in a network, so that the maximum outcome for the network is realized. This question seems close to the problem of supply chain throughput coordination. We differentiate between the two, by defining supply chain throughput coordination as aiming at the coordination of material throughput, while resource allocation is aiming at the coordination of resource capacities.

Information coordination is considered in many models, as provision of truthful and accurate information is highly relevant for any supply chain activity. The need to coordinate information flows is mainly considered in contract models, as these require knowledge of private information of supply chain partners to coordinate. In

Table 4 Coordinated tasks.

Coordination of ...	Information				Materials		Resources	
	Forecasting	Truth-telling	Distribution of information	Supply chain throughput	Production plans	Inventory	Logistics and transportation	Capacity investment Resource allocation
Supply Chain Contracts								
[4]	x					x		
[6]				x				
[10]				x				
[13]				x				
[15]				x				x
[16]			x	x				
[32]	x	x				x		
[44]			x	x				
[46]						x		
[49]				x				
[52]			x					
[59]				x				
[62]				x				
[70]				x				
[69]				x				
[77]		x		x				x
[84]				x				

some models the distribution of information in the chain is manipulated since information asymmetry is reduced after the coordinative activities, i.e., partners have gained insights into information being initially private (e.g., [74], [18], [16]), while other models aim at optimal deployment of the information that is available (e.g., [52]). Forecasts are required in settings where demand is uncertain. Improving the quality of forecasts by coordinative activities is target of initiatives such as CPFR. In some settings, one party has an incentive to submit faulted information to put itself in an advantageous position, although this reduces overall supply chain performance. Here, truth-telling must be ensured to achieve coordination (e.g., [72]).

Examining the structural set up of the approaches reviewed, it becomes apparent (Table 5) that research has laid emphasis on the two-tier supply chain setting consisting of a single buyer and a single supplier. This is particularly the case for a large part of the supply chain contracting literature. Here, the target is to show the coordinating effect of a measure, where closed form solutions can often only be obtained in linear settings. Fewer approaches address coordination in a network setting, and if so, there is a focus on two-tier network structures. Coordination becomes increasingly complex the more supply chain links are taken into account. Compared to the basic 1-to-1 supply chain setting of a buyer and supplier, additional decision prob-

Table 4 Coordinated tasks (continued).

Coordination of ...	Information			Materials			Resources		
	Forecasting	Truth-telling	Distribution of information	Supply chain throughput	Production plans	Inventory	Logistics and transportation	Capacity investment	Resource allocation
Collaborative Planning and Control									
[1]									x
[5]					x				
[18]			x		x				
CPFR [79]	x			x		x			
[20]				x			x		
DCP [58]								x	x
[21]					x				
[23, 24]					x				
[25]					x				
[26]		x							x
[27]					x				
[30]						x			
[33]					x				
[36]					x				
[39]					x				
[43]					x				x
[51]					x				
SCMo [57]						x			
[67]					x			x	
[72]		x			x				
[74]			x		x				
VMI					x	x			
[82]				x	x				
[65]					x				
# of approaches	3	4	4	16	16	7	1	4	4

lems are induced in the network case: Allocation of scarce materials or resources and dependencies of material and resource availabilities across supply chain stages (vertical) and between supply chains (horizontal). In the multi-tier diverging or converging structure, allocation decisions arise only at the single node where the supply chains split resp. merge, while in the multi-tier complex network structure allocation decisions have to be taken at several nodes at the network influencing each other. Coordination in multi-tier complex networks with a diverging-converging network structure is aimed at by some approaches using decomposition of mathematical optimization models (e.g., [25], [26]) or centralized collaborative planning approaches (e.g., [21]). Their disadvantage in the light of the requirements of decentralized network coordination is that they require some kind of coordinative entity, an auc-

tioneer or control unit, to run the model, update control parameters or match bids and requests. Within the category of approaches using automated negotiations some allow the examination of multi-tier complex network scenarios by decentralized coordination (e.g., [72], [36]).

Proving optimality of a suggested approach analytically is often required in contract theory; however, for network layouts this criterion is hard, sometimes impossible to derive. Thus, many approaches from the collaborative planning and control category evaluate the improvement in performance reached by means of a comparison (e.g., [24], [25], [65]) to both the theoretical centralized model (best case benchmark) and the uncoordinated situation, e.g., simple upstream planning, pure decentralized planning (worst-case benchmark). Another set of criteria employed for

Table 5 Classification by structural aspects

Supply chain layout	Linear supply chains		Networks			
	2-tier linear 1:1	multi-tier linear 1:1:1...	2-tier diverging 1:n	2-tier converging n:1	2-tier complex n:m	Multi-tier complex n:m:k:...
Approaches	[6], [10], [13], [15], [18], CPFR, [20], [27], [32], [33], [44], [69], [70], [74], [77], VMI, [65]		[5], [23], [30], [46], [49], [51], [62], [82]	[4], [16], [59], [84]	DCP, [39], [43], [67]	[1], [21], [25], [26], [36], [52], [61], SCMo [73],
#	16	0	7	4	4	9

characterizing the models reviewed is product structure (Table 6). Product structure is closely related to supply chain structure when manufacturing of predecessor materials spreads out across several stages of the production network. A large fraction of the supply chain contracting literature deals with the one product case (e.g., [70], [13]). When resources, in particular capacities are infinite, these approaches are applicable to the multi-product case as well. When resource limitations are considered, approaches dealing with a multi-product scenario face additional complexity since several products compete for scarce production, logistic and sales resources. Relations between (pre-) products are rarely considered.

Multi-level bills of materials create even more complex coordination problems since they lead to intermediate material buffers within an organization (e.g., [23]) and increase the number of interdependencies in the supply. If availability of materials or capacity for any of the predecessors cannot be provided in one branch of the network, then this affects the production activities of customers downstream, but also the manufacturing of other predecessor materials from other related upstream branches of the network, which are no longer required. There are some approaches addressing this multi-level BOM setting in a multi-tier network. The anal-

ysis showed that coordination in the multi-level BOM case in a multi-tier network scenario is touched only by particular streams of research: the distributed mathematical optimization models (e.g., [25], [26]), the negotiation-based approaches (e.g., [36], [72]) and centralized collaborative planning models (e.g., [21]). Most of

Table 6 Classification by product structure.

Product structures	Number of products		Product complexity		
	One product	Multi-product	No BOM	Single-level BOM	Multi-level BOM
Approaches	[4], [6], [10], [13], [15], [16], [18], [30], [32], [44], [46], [49], [52], [59], [62], SCMo, [69], [70], [74], [77], VMI, [84]	[1], [5], CPFR, [20], DCP, [21], [23], [25], [26], [27], [33], [36], [39], [43], [51], [67], [72], [82], [65]	[1], [4], [5], [6], [10], [13], [15], [16], [18], CPFR, DCP, [30], [32], [39], [43], [44], [46], [49], [51], [59], [62], [67], [69], [70], [74], [77], VMI, [84]	[20], [33], [82], [65]	[21]; [23], [25], [26], [27], [36], [52], SCMo, [72]
#	21	29	27	4	9

the coordination approaches reviewed apply to decentralized decision-making situations where both partners possess some private decision-relevant knowledge used to take autonomous and independent decisions. Yet some of these decentralized solutions also share a centralized element, they make use of a central coordinator or auctioneer function (e.g., [1], [26], [25], [82] and [27], [52]). Centralization extends up to approaches where decisions are determined by one entity only (e.g., [51], [33], [21]). In this case the other supply chain entities' role is to provide information or to adopt the decision results. Although the majority of approaches is decentralized (34 out of 42), the distribution of power differs. Table 7 points out that especially contract-based models apply to hierarchic supply chain relationships. A hierarchic setting is present if one company dominates the others, due to its size, market power and or economic strength. This is the case when a powerful OEM producer (e.g., [20], [51]) or a powerful buyer (e.g., [70], [74], [16]) is part of the coordination problem. Some models approach the coordination problem from the dominating partner's point of view (e.g., [65], [82], [51]). In contrast to that, other models provide a scheme to improve coordination by enabling the inferior partner to improve the overall performance of the chain by creating win-win situations offering incentive to the dominating partner to deviate from his local best plan (e.g., [74], [32]). Many contract models assume a Stackelberg structure of the game, where the supplier is the first mover. However, when the buyer has superior power, it is questionable, whether these contracts still coordinate the channel. Research in this direction should be supported by game theoretic analysis. A related research gap is the length

Table 7 Classification by role and relationship of the supply chain partners

Decision-making:	Centralized	Decentralized
Approaches	[1], [21], [30], [33], [51], [52], SCMo, [67]	[4], [5], [6], [10], [13], [15], [16], [18], CPFR, [20], DCP, [23], [25], [26], [27], [32], [36], [39], [43], [44], [46], [49], [59], [62], [69], [70], [74], [77], VMI, [82], [84], [65]
# of approaches	8	33
Distribution of power:	Hierarchic control	Heterarchic control
Approaches	[4], [6], [10], [13], [15], [16], [18], [20], [44], [49], [51], [59], [62], SCMo, [67], [69], [70], [74], [77], [82], [84], [65]	[1], [5], CPFR, DCP, [21], [23], [25], [26], [27], [30], [32], [33], [36], [39], [43], [46], [52], [72], VMI
# of approaches	22	19
Distribution of information:	Symmetric	Asymmetric
Approaches	[4], [6], [10], [13], [15], CPFR, [21], [46], [52], [59], [62], SCMo, [67], [70], [69], VMI, [84]	[1], [5], [16], [18], [18], [20], DCP, [23], [25], [26], [27], [30], [32], [33], [36], [39], [43], [44], [49], [51], [72], [74], [77], [82], [65]
# of approaches	16	25

of the time horizon of analysis. Models on the subject of coordinating contracts usually focus on single shot games. It would be rewarding to see how contracts perform in evolutionary settings. Here trust and revenge come into play. Auction markets could be analyzed with regards to developing an understanding of how the game is played. Methodologies from evolutionary game theory could prove helpful to gain new insights into the dynamics of mechanisms, which are intended to coordinate the channel. In addition, the stability of the coordination solutions derived is often not considered. Supply chain parties usually bargain on contract parameters once a year. It is unclear, whether the resulting contracts eventually coordinate the channel, as they depend on factors that are subject to change over time. It would thus be interesting to develop contracts which are robust to frequent changes, e.g., by automatic adaption. Again the difficulty is to find the optimal mix between robustness and cost of gathering the data required to determine the coordinating contract parameters.

Concerning the distribution of information in the supply chain, the analysis revealed that there is a split between models which assume asymmetric and symmetric information. Hence, for both settings solutions are available. Models focusing on valuation (e.g., [10]) and on showing the coordinating effect of a contract (e.g., [4]) often assume full information. This includes proprietary information like cost data, which is clearly not available to all parties. As a result, coordinating contracts as proposed in literature are often not applicable in practice. A first approach to solve

this challenge is presented by [16]. Another group of models surveys the applicability of those contracts when some information is private (e.g., [16], [49]). [80] provide insights on the relation of transaction costs and coordination in the field of contracts. They highlight the fact that exchanging information is costly and reduces profitability. They suggest employing game theory as a means of modelling information exchanges and interdependencies between decisions. Future contributions on coordinating contracts must clearly line out, that the information required for the contract in question can be gathered with reasonable effort.

4 Conclusions from the Literature Review and Outlook

From our literature review we conclude two insights that we think should drive the future frontier of research on supply chain coordination (cf. Table 8). First, more emphasis should be laid on approaches that apply to multi-tier production and logistic networks. Second, more attention should be paid to the problem of resource coordination in networks. A variety of approaches is available to coordinate bilat-

Table 8 Summary of future research agenda

Research task	Consideration of multi-tier networks	Consideration of resource coordination
Directions for future research	Integration of the increased number of supply chain interfaces into coordination schemes	Coordination of the allocation of flexible capacities
	Integration of allocation decisions between multiple customers	Approaches to supply chain coordination in built-to-order networks without stocked materials
	Renunciation of central coordinators	Transfer from research on operational risk management to supply chain coordination research
	Bringing together research on coordination schemes and research on agent infrastructures	
	Analysis of risk sharing in more complex networks	

eral supply chain settings or supply chain coordination problems within one firm. Facing the fact that supply chains are networks in reality, it is necessary to cover the resulting extended coordination problems arising from complexity. The trend to supply networks grew the number of interfaces and created additional coordination targets. Interdependencies between parties emerge in the multi-tier network case. When suppliers deliver complementary components, interdependent decisions must be coordinated and it is unclear, which coordinating mechanisms are suitable for

such settings. To be generalizable, coordinating mechanisms must hold, when there are multiple competing suppliers or buyers. There should be further research on supply chain contracts in relations with multiple products. In addition, variance from different product versions, e.g., languages, must be considered. Allocation decisions have to be taken in order to allow materials and resources downstream between multiple customers while managing a supplier network in dependence of these allocation decisions upstream. The literature review has shown that multi-tier networks are addressed by mathematical decomposition approaches and some of the negotiation-based (multi-agent) solutions. Mathematical decomposition approaches bear the disadvantage that they often require a central coordinator to control the solving process of the distributed model. Approaches based on automated negotiations seem promising in this context since they allow full decentralization of decision-making and complex network scenarios. Besides the approaches mentioned in this review, there are a few more multi-agent solutions. They have not been included in this review since they focus on researching the technological platform for evaluation of the behaviour of supply chains given a particular coordination scheme, rather than the coordination scheme itself (e.g., [29], [61], [7], [55]). It could be worthwhile bringing together these capable agent infrastructures with research on sophisticated coordination schemes for complex networks.

Most supply chain coordination literature focuses on the coordination of materials. Supply chain contracting literature extensively covers this field, especially addressing throughput maximization and inventory optimization in the supply chain. There exist also well-developed solutions to coordinate lot-sizing decisions in bilateral supply chains or two-tier divergent/convergent networks. They effectively coordinate the flow of materials between the partners so that the resulting production plan minimizes costs of production and inventory in the network. With the emphasis on the coordination of supply chain throughput and production plans, the current frontier of research shows an imbalance towards the coordination of materials, while coordination of resources experiences less attention. There are a few approaches dealing with the coordination of capacity investments which is one aspect of resource coordination. Nonetheless, the examination of the underlying supply chain structure reveals that these approaches mainly focus on bilateral 1:1 supply chain settings or the two-tier divergent case. Approaches to resource-oriented coordination dealing with the question of coordinating flexible and adaptable resources in a multi-tier network are rare. Important insights into the value of resource flexibility have been gained in operations research. Supply chain management research can build on these insights and consider allocation problems for funds, labour and capacities. Literature on supply risk developed a number of models on operational hedging, where flexible excess capacities are established or flexible suppliers are introduced. Companies often outsource production these days, as seen at the example of the major computer manufacturers. Here, production capacity is no more restricted by a fixed limit, but can be extended flexibly. The existing approaches to the coordination of production plans neglect the adaptability of resources. Most approaches address the coordination of lot-sizing decisions assuming fixed resource capacities at all partners. Resource coordination is a challenging problem to today's

build-to-order networks where demand orientation requires networks to build up and cut resource capacities tightly coupled with the development of market demand. There is still need for further research.

References

1. Ahlert K.-H., Corsten H., Gössinger R.: Kapazitätsmanagement in auftragsorientierten Produktionsnetzwerken - Ein flexibilitätsorientierter Ansatz. In: Günther H.-O., Mattfeld D. C., Suhl L. (Eds.): *Management logistischer Netzwerke. Entscheidungsunterstützung, Informationssysteme und OR-Tools*. Physica-Verlag Heidelberg, Heidelberg (2007) 113–136
2. Alonso R., Dessein W., Matouschek N.: When Does Coordination Require Centralization? *American Economic Review* 98 (2008) 145–179
3. Atasu A., Guide Jr. V. D. R., Van Wassenhove L. N.: Product Reuse Economics in Closed-Loop Supply Chain Research. *Production and Operations Management* 17(5) (2008) 483–496
4. Balakrishnan A., Geunes J., Pangburn M. S.: Coordinating Supply Chains by Controlling Upstream Variability Propagation. *Manufacturing and Service Operations Management* 6(2) (2004) 163–183
5. Barbarosoglu G., Özgür D.: Hierarchical design of an integrated production and 2-echelon distribution system. *European Journal of Operational Research* 118(3) (1999) 464–484
6. Barnes-Schuster D., Bassok Y., Anupindi R.: Coordination and Flexibility in Supply Contracts with Options. *Manufacturing and Service Operations Management* 4(3) (2002) 171–207
7. Böhle C., van Hueth J., Hellingrath B.: A Framework for the Development of Multi-Agent Systems in Supply Chain Management. *System Sciences HICSS'09. 42nd Hawaii International Conference on HICSS* doi: 10.1109/HICSS.2009.14 (2009) 1–9
8. Bowersox D. J., Closs D. J.: *Logistical management: the integrated supply chain process*. McGraw-Hill, New York (1996)
9. Browne J., Hunt I., Zhang J.: The Extended Enterprise. In: Molina, A. (Hrsg.): *Handbook of life cycle engineering. Concepts, models and technologies*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1998) 3–29
10. Burnetas A., Ritchken P.: Option Pricing with Downward-Sloping Demand Curves: The Case of Supply Chain Options. *Management Science* 51(4) (2005) 566–580
11. Burton T. T., Boeder S. M.: *The lean extended enterprise. Moving beyond the four walls to value stream excellence*. J. Ross Publishing (2003)
12. Cachon G. P.: Supply Chain Coordination with Contracts. In: De Kok, A. G. and Graves, S. C. (eds.): *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*. Elsevier, Amsterdam (2003) 457–519
13. Cachon G. P., Lariviere M. A.: Supply Chain Coordination with Revenue-Sharing Contracts: Strengths and Limitations. *Management Science* 51 (2005) 30–44
14. Chen F.: Information Sharing and Supply Chain Coordination. In: De Kok, A. G. and Graves S. C. (eds.): *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*. Elsevier, Amsterdam (2003) 341–413
15. Chen H., Chen J., Chen Y.: A coordination mechanism for a supply chain with demand information updating. *International Journal of Production Economics* 103 (2006) 347–361
16. Chen Y.-J., Seshadri S., Zemel E.: Sourcing Through Auctions and Audits. *Production and Operations Management* 17(2) (2008) 121–138
17. Christopher M.: *Logistics and supply chain management, strategies for reducing cost and improving service*. Financial Times Pitman Publishing, London (1998)
18. Corbett C. J., de Groote X.: A Supplier's Optimal Quantity Discount Policy Under Asymmetric Information. *Management Science* 46(3) (2000) 444–450

19. Dangelmaier W., Krebs W., Pape U., Rütter M.: Optimierung einer Wertschöpfungskette am Beispiel einer Frachtoptimierung im Projekt CoagenS. In: Busch A., Dangelmaier W. (Eds.): *Integriertes Supply-Chain-Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*. Gabler, Wiesbaden (2004) 471–484
20. Dangelmaier W., Pape U., Rütter M.: Dezentrales Planungs- und Steuerungssystem für die Supply Chain. In: Hossner R. (Eds.): *Jahrbuch der Logistik 2003*. Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Düsseldorf (2003) 70–75
21. De Kok T.G., Janssen F., van Doremalen J., van Wachem E., Clerckx M., Peeters W.: Philips Electronics Synchronizes Its Supply Chain to End the Bullwhip Effect. *Interfaces* 35(1/2) (2005) 37–48
22. De Kok T. G., Fransoo J. C.: Planning Supply Chain Operations: Definition and Comparison of Planning Concepts. In: de Kok A.G., Graves S. C. (Eds.): *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Elsevier (2003) 597–675
23. Dudek G., Stadler H.: Negotiation-based collaboration between supply chains partners. *European Journal of Operational Research* 163(3) (2005) 668–687
24. Dudek G., Stadler H.: Negotiation-based collaborative planning in divergent two-tier supply chains. *International Journal of Production Research* 45(2) (2007) 465–484
25. Ertogral K., Wu D. S.: Auction-theoretic coordination of production planning in the supply chain. *IIE Transactions* 32(10) (2000) 931–940
26. Fan M., Stallaert J., Whinston A. B.: Decentralized Mechanism Design for Supply Chain Organization Using an Auction Market. *Information Systems Research* 14 (2003) 1–22
27. Fink A.: Supply chain coordination by means of automated negotiations. *System Sciences 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (2004) 1–10
28. Fleischmann B., Meyr H.: Planning Hierarchy, Modeling and Advanced Planning Systems. In: A.G. de Kok; S.C. Graves (eds.): *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*. Elsevier (Handbooks in operations research and management science) 11 (2003) 455–523
29. Fox M. S., Barbuceanu M., Teigen R.: Agent-Oriented Supply-Chain Management. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 12(2/3) (2000) 165–188
30. Fransoo J. C., Wouters M. J. F., de Kok T. G.: Multi-echelon multi-company inventory planning with limited information exchange. *Journal of the Operational Research Society* 52(7) (2001) 830–838
31. Ganeshan R., Jack E., Magazine M. J., Stephens P.: A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research. In: Tayur, S., Ganeshan, R. and Magazine, M. J. (eds.): *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA (1999) 839–879
32. Gerchak Y., Khmelnitsky E., Robinson L. W.: Untruthful Probabilistic Demand Forecasts in Vendor-Managed Revenue-Sharing Contracts: Coordinating the Chain. *Naval Research Logistics* 54(7) (2008) 742–749
33. Gjerdrum J., Shah N., Papageorgiou L. G.: Fair transfer price and inventory holding policies in two-enterprise supply chains. *European Journal of Operational Research* 143(3) (2002) 582–599
34. Global Supply Chain Forum (1998): cited from: Pfohl H.C.: *Supply Chain Management: Konzept, Trends, Strategie*. In: Pfohl H.C.: *Supply Chain Management: Logistik plus?*. Erich Schmidt, Darmstadt, (2000) 1-44
35. Groll M.: *Koordination im Supply-Chain-Management*. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag (2004)
36. Heidenreich J.: *Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktion-snetzwerken der Serienfertigung*. Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, Paderborn (2006)
37. Holmström J., Främling K., Tuomi J., Kärkkäinen M., Ala-Risku T.: Implementing collaboration process networks. *The International Journal of Logistics Management* 13(2) (2002) 39–50

38. Jennings N. R., Faratin P., Lomuscio A. R., Parsons S., Wooldridge M. J., Sierra C.: Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges. *Group Decision and Negotiation* 10(2) (2001) 199–215
39. Jung H., Jeong B.: Decentralised production-distribution planning system using collaborative agents in supply chain networks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25(1/2) (2005) 167–173
40. Kaipia R., Holmström J., Tanskanen K.: VMI: What are you losing if you let your customer place orders. *Production Planning & Control* 13 (2002) 17–25
41. Kalagnanam J., Parkes D. C.: Auctions, Bidding and Exchange Design. In: Simchi-Levi D., S. D. Wu, Z. M. Shen (eds.): *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the E-Business Era*. Springer, New York, USA (2004) 1–84
42. Kaluza B., Blecker T.: Management der Produktion und der Logistik in der Unternehmung ohne Grenzen. In: Kaluza B. (ed.): *Produktions- und Logistikmanagement in virtuellen Unternehmen und Unternehmensnetzwerken*. Berlin, Springer (2000) 1–31
43. Karabuk S., Wu S. D.: Decentralizing semiconductor capacity planning via internal market coordination. *IIE Transactions* 34(9) (2002) 743–759
44. Krishnan H., Kapucinski R., Butz D. A.: Coordinating Contracts for Decentralized Supply Chains with Retailer Promotional Effort. *Management Science* 50 (2004) 48–63
45. Laffont J.-J., Tirole J.: *A theory of incentives in procurement and regulation*. MIT Press, Cambridge Mass. u. a. (1993)
46. Lee H., Whang S.: The Impact of the Secondary Market on the Supply Chain. *Management Science* 48(6) (2002) 719–731
47. Lee H., Whang S.: Decentralized multi-echelon supply chains: Incentives and information. *Management Science* 45(5) (1999) 633–640
48. Lee H., Padmanabhan V., Whang S.: Information Distortion in Supply Chains. *Management Science* 43(4) (1997) 546–558
49. Li L., Zhang H.: Confidentiality and Information Sharing in Supply Chain Coordination. *Management Science* 54(8) (2008) 1467–1481
50. Lomuscio A. R., Wooldridge M., Jennings N. R.: A Classification Scheme for Negotiation in Electronic Commerce. *Group Decision and Negotiation* 12 (2003) 31–56
51. Lu L.: A one-vendor multi-buyer integrated inventory model. *European Journal of Operational Research* 81(2) (1995) 312–323
52. Majumder P., Srinivasan A.: Leadership and Competition in Network Supply Chains. *Management Science* 54(6) (2008) 1189–1204
53. Hax A. C., Meal H. C.: Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. *TIMS Studies in Management Science* 1 (1975) 53–69
54. Möller K.: *Wertschöpfung in Netzwerken*. München, Vahlen (2006)
55. Moyaux T., Chaib-draa- Brahim, D’Amours S.: Supply Chain Management and Multiagent Systems: An Overview. In: Chaib-draa B., Müller J. P. (Eds.): *Multiagent-based supply chain management*. Springer, Berlin [u.a.] (2006) 1–27
56. Nash J.: The bargaining problem. *Econometrica* 18 (1950) 155–162
57. Odette: *Supply Chain Monitoring V1.0*. Odette International Limited (2003)
58. Odette: *Demand Capacity Planning V1.1*. Odette International Limited (2004)
59. Perakis G., Zaretsky M.: Multiperiod Models with Capacities in Competitive Supply Chain. *Production and Operations Management* 17(4) (2008) 439–454
60. S. M. Disney, Towill D.R.: The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *International Journal of Production Economics* 85(2) (2003) 199–215
61. Sadeh N. M., Hildum D. W., Kjenstad D., Tseng A.: MASCOT: An Agent-Based Architecture for Coordinated Mixed-Initiative Supply Chain Planning and Scheduling. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh (1999) 1–16
62. Savaskan C. R., Van Wassenhove L. N.: Reverse Channel Design: The Case of Competing Retailers. *Management Science* 52 (2006) 1–14
63. Schneeweiss C.: *Distributed decision making*. Springer, Berlin (2003a)

64. Schneeweiss C.: Distributed decision making - a unified approach. *European Journal of Operational Research* 150 (2003b) 237–252
65. Schneeweiss C., Zimmer K.: Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain. *European Journal of Operational Research* 152 (2004) 687–703
66. Schuh G., Friedli T., Kurr M. A.: *Kooperationsmanagement*. Hanser, München (2005)
67. Shirodkar S., Kempf K.: Supply Chain Collaboration Through Shared Capacity Models. *Interfaces* 36(5) (2006) 420–432
68. Simatupang T. M., Wright A. C., Sridharan R.: The knowledge of coordination for supply chain integration. *Business Process Management* 8(3) (2002) 289–308
69. Spinler S., Huchzermeier A.: The valuation of options on capacity with cost and demand uncertainty. *European Journal of Operational Research* 171(3) (2006) 915–934
70. Spinler S., Huchzermeier A., Kleindorfer P.: Risk hedging via options contracts for physical delivery. *OR Spectrum* 25 (2003) 379–395
71. Stadler H.: A framework for collaborative planning and state-of-the-art. *OR Spectrum*, Online First, DOI 10.1007/s00291-007-0104-5 (2007) 1–26
72. Stockheim T., Wendt O., König W.: Trust-Based Distributed Supply-Web Negotiations. In: Kim S., Herzog O. et al. (Eds.): *Multiagent engineering*. Springer, Berlin (2006) 177–196
73. Stockheim T., Wendt O., Schwind M.: A Trust-based Negotiation Mechanism for Decentralized Economic Scheduling. *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Science* 2005 (2005) 1–10
74. Sucky E.: Coordinated order and production policies in supply chains. *OR Spectrum* 26(4) (2004) 493–520
75. Supply Chain Council (2006): *Supply Chain Operations Reference Model, Version 8.0*, Supply Chain Council, Washington DC, <http://www.supply-chain.org>
76. Sydow J.: Management von Netzwerkorganisationen: Zum Stand der Forschung. In: Sydow, J. (ed.): *Management von Netzwerkorganisationen*. Gabler, Wiesbaden (2003) 387–472
77. Taylor T. A.: Supply Chain Coordination under Channel Rebates with Sales Effort Effects. *Management Science* 48(8) (2002) 992–1007
78. Tsay A.: Modeling supply chain contracts: A review. In: Tayur S., Ganeshan R., Magazine M. (Eds.): *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Kluwer Acad., Boston, Massachusetts (1999) 299–335
79. Voluntary Interindustry Commerce Standard VICS: Collaborative Planning Forecasting and Replenishment (CPFR). VICS (2004)
80. Voß S., Schneiderei G.: Interdependencies between Supply Contracts and Transaction Costs. In: Seuring S., Goldbach M. (eds.): *Cost Management in Supply Chains*. Physica, Heidelberg (2002) 253–272
81. Walther G., Spengler T. S.: Negotiation-based coordination in product recover networks. *International Journal of Production Economics* 111(2) (2008) 334–350
82. Walther G., Schmid E., Spengler T. S.: Negotiation-based coordination in product recovery networks. *International Journal of Production Economics* 111(2) (2008) 334–350
83. Whang S.: Coordination in operations: A taxonomy. *Journal of Operations Management* 12 (1995) 413–422
84. Wu D. J., Kleindorfer P.: Competitive Options, Supply Chain Contracting, and Electronic Markets. *Management Science* 51(3) (2005) 452–466

Multi Period Contracts in Transport under Asymmetric Information and Prior Investments

Xavier Brusset

Abstract How does a carrier evaluate the transport contract he must offer a shipper under various assumptions of information about this shipper's other options and specific investments? A carrier can benefit from contract renegotiation when fully informed about the shippers' outside options, but the shipper can claim back some of the rent transfer when information is asymmetric. We compare the single-period contract case to the multi-period renegotiation one. This paper presents a way to link the interactions of shipper and carrier over multiple periods or contracts under several scenarios of information available to the carrier. The Nash equilibria contracts are presented in literal form. We conclude with some managerial insights.

1 Introduction

Carriers and shippers often do invest in specific assets to better mesh their operations and increase the efficiency and productivity of operators. For example, a logo painted on the sides of lorries working for a certain shipper, specific temperature control equipment, security controls are all specific investments to enhance some aspect of the service. When a shipper adds a new carrier to the number with which she works, she must add some type of control and performance measurement infrastructure to the one she already has. We include in that category the adjustments made to the shipper's and carrier's information systems so that both systems can interact seamlessly. These investments are often committed prior to any work or operation. The carrier may incur some of those investments even before the shipper has signed any contract (e.g., the regulatory requirements that the shipper stipulates as qualifiers to submit contractual offers). We wish to study here some effects of carrier

Xavier Brusset

Centre of Excellence in Supply Chain Management, Louvain School of Management, Catholic University of Louvain, BELGIUM

E-mail: xavier.brusset@uclouvain.be

information on the rent distribution between shipper and carrier when the contract linking them can be reopened or not. We present several information and negotiation scenarios. Information may be private and a contract may be binding or may be reopened at some future date if the partners agree to do so. We present several propositions regarding the generic contracts that the carrier and shipper may enter under each scenario and give some concluding remarks about managerial practice.

2 Literature Review

Game Theory is attractive in modeling the bargaining that goes inevitably on between shipper and carrier. The basis goes back at least to [13, p. 155] where the bargaining problem is defined as “two individuals who have the opportunity to collaborate for mutual benefits in more than one way.”, but other sources more recently, such as [15] have brought interesting results. A guide to the history of bargaining theory is presented in [19]. Bargaining theory is a branch of game theory that deals with the bargaining situations between two parties. In particular, if the bargaining game is single shot, one may characterize its Nash equilibria.

The study in this paper wishes to bring forward the fact that both actors in a bargaining game must invest at some point in some relationship specific assets. This class of problems has not received much attention in game theoretic supply chain management literature. Most mentions trace their scientific basis to transaction cost economics [16, 17, 18], we mention [9] where the authors argue that the advent of the Internet leads to lower specific asset investments between players who use online auctions and other web-enabled technologies. In [10], the authors call for more research in how electronic marketplaces change the importance of specific assets and impact supply chain management. In the management of information technology literature, one finds a mention of relationship specific assets as not being wholly borne by the parties but rather by a community of parties [12]. In transaction cost economics, we mention [8] where trustworthiness is shown to induce lower specific asset investments by both parties in a relationship. In the same stream of literature, [14] provides evidence that a firm in the flower supply chain is able to gain competitive advantage by investing in relationship specific assets with her suppliers.

A more relevant reference is [20] which provides basis for the choice of long or short term contract by a buyer and this choice coupled with a lack of prior information about future production costs induces the seller into under investing in specific assets for fear of being held up by the buyer threatening to buy on the spot market. Other related works include several papers by Jacques Crémer who has studied the effect of information acquisition and asymmetry in principal-agent settings on the terms of trade and equilibrium strategies [5, 6, 7]. When a principal is confronted with several agents, [4] argues that information gathering by the agents enables the principal to select the best suited.

Information asymmetry remains a key feature of real transport and logistic relationships and such asymmetry is difficult to model because the probability structure

of a stochastic process may be perceived differently by the parties to the contract, leading to disagreement on the evaluation of expected profits. We prefer to go along the path set in Section 5 of [19] on bilateral supply-chain bargaining which describes how a pair of supplier and buyer set about splitting a certain system surplus. Before entering the negotiation, each actor has outside options and the surplus to be split is higher than the sum of outside options, ensuring incentive compatibility. In the same alternating-offers bargaining as presented in [15], each actor makes an offer to the other, either accepts or rejects the offer received and with a certain probability, the negotiation breaks down. Though the model in [19] specifies that the probability of the negotiation breakdown can be exogenous, in this paper we take into consideration only endogenous causes stemming from incentive incompatibility or rationality constraint violation.

3 Model of the Relationship between Shipper and Carrier over Several Periods

We are interested in the general case where a shipper S (she) and a carrier C (he)¹ set up a long term relationship and invest in specific assets with costs A_{s1} and A_{c1} to enable their ongoing interaction. The shipper has some prior engagements to deliver some goods downstream which she must honour. Her objective is to minimize the cost C_s of doing so. The carrier's objective is to maximize his partial profit function Π_c from working either for the shipper or some third party.

In time (see Figure 1), the sequence of events is the following: the shipper and carrier evaluate the required investments in specific assets that each is required to have to be able to work with the other. The carrier invests first in those specific assets. He then offers a contract in a way which shall be made clearer later. If the shipper rejects the offer, both turn to outside options: the shipper must find another carrier and the carrier must find another shipper (this option is not represented in Figure 1). If, on the other hand, the shipper finds the offer of the carrier interesting, a contract is agreed upon and the shipper invests in her turn in the required specific assets. Demand is realized and revealed instantly to both. Transport and payout take place. At some future time, in some scenarios which will be defined later, one or the other decide to re-open the negotiations.² The carrier has the ability to revise the offers he makes to the shipper and the shipper compares these offers to outside options. If a contract is agreed upon, the relationship can continue. At any future date, both can again come together to negotiate for a new contract, no additional relationship specific investment is necessary since those are already in place (assuming that they have worked together in the past).

¹ In difference with the convention which considers the principal to be a "she", we shall term the shipper, even though an agent here, a "she" to remain coherent throughout the paper.

² This process is different from the commitment and renegotiation as defined in [11].

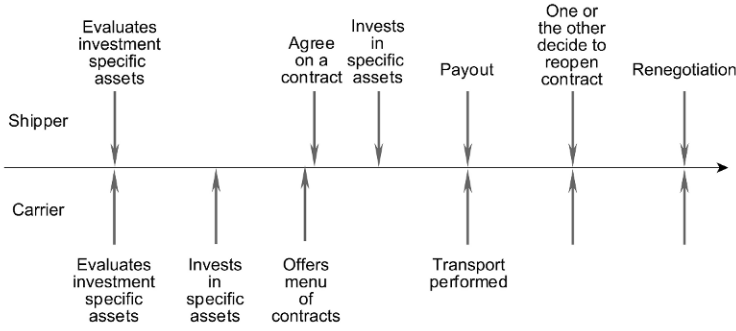


Fig. 1 Timeline of events when shipper and carrier agree on a contract and to a new relationship. If the shipper does not agree to a contract, the timeline is stopped on this disagreement, each starts a new timeline (not represented here).

In this model, to economize on notation, we shall consider initially two periods. The period number shall be presented in superscript form. The results are then extended to a finite number of periods n . We assume that both shipper and carrier hold as common information n , the number of times that the contract shall be reopened.

If they do not agree to work together in the first or second period, both have the outside option of working with another counterparty. Setting up a relationship with another counterparty also entails a cost in specific asset A_{s2} for the shipper and A_{c2} for the carrier. The counterparty number is indicated in subscript. For example, if the shipper decides to work with the carrier in period one but in period two turns to another carrier, she incurs the investment A_{s2} . She can decide in any posterior period to work again with the first carrier. In this case, she does not incur the cost of the specific asset which is considered to have been borne in the first period. This is to reflect the fact that a shipper and a carrier have an interest in maintaining a relationship even though the initial cost of this relationship is sunk.

The contract is named $\phi(\gamma^i)$ with $\gamma^i, i \in \{1, 2\}$, as the vector of that contract's parameters and proper to period i . The contract which the shipper may sign with some third party is labeled $\phi_s(\cdot)$. The carrier can also sign a contract $\phi_c(\cdot)$ with a third party. The contracts are members of a finite set \mathcal{P} which describes all relevant contracts. The vector γ of parameters for the contract ϕ belongs to a finite set Γ of possible vectors describing potentially available parameters for that contract. We call δ_s^i the shipper's participation decision variable in period i which can take binary values. We present all the notation relative to this appendix in Table 1.

To investigate fully this general case, we have to consider the effect of potential renegotiation in the future; and we have to evaluate the impact of full or asymmetric information about the cost of investing in specific assets and eventual outside options. We shall consider four cases which are set along two dimensions. One is the dimension of renegotiation, the other is information (see Figure 2). In the bottom right square, we have the case where the parties enjoy full information and no renegotiation. The interesting case is when the players are subject to asymmetric in-

Table 1 Table of notations.

Type	Notation	Definition
Shipper	A_{s1}	specific asset investment by shipper with the carrier
	A_{s2}	specific asset investment by shipper with outside option
	$\phi_s^i(\cdot)$	contract available to shipper from outside option
	$\phi(\gamma^i)$	contract offered in period i by carrier to shipper
	$C^i(\cdot)$	shipper's transport cost in period i for the shipper
Carrier	δ_s^i	binary decision variable, 1 when agreeing with carrier
	A_{c1}	specific investment by carrier for shipper
	A_{c2}	specific investment by carrier in outside option
	$\phi_c^i(\cdot)$	outside option contract available in period i to carrier
	Φ^i	$\phi_c^i(\cdot) - A_{c2}$
Carrier beliefs	$\Pi_c^i(\cdot)$	carrier's profit function in period i
	$f_Z(A), F_Z(Z)$	pdf and cdf of belief about $Z = \phi_s(\cdot) + A_{s2} - A_{s1}$
Time	$f_{s1}(A_{s1}), F_{s1}(A_{s1})$	pdf and cdf of belief of A_{s1}
	n	common information about the number of times a contract can be reopened in renegotiation scenario

formation and both have the ability to renegotiate in the top righthand corner. In the right hand side of Figure 2, shipper and carrier agree beforehand to have the option of renegotiating: periodically, both may agree to consider a new contract by which to conduct their business. In the top half of Figure 2, the shipper is private to the expected demand and rent derived between the transport cost and the revenue obtained from the delivery of the demand which she receives within the period. The carrier is private to his costs and opportunities. The cost of the specific assets are also private to the relevant investing party. We present in Section 3.2 the case where the carrier lacks the information about the relationship specific investment that the shipper has to make and about her outside option. At times, both agree to open negotiations on a new contract. This case requires substantial calculations to be fully covered. This

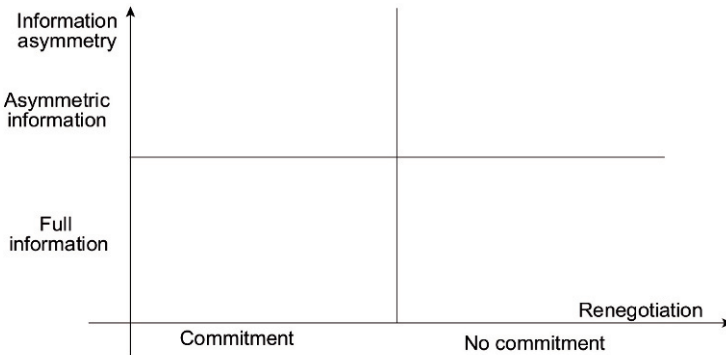


Fig. 2 Dimensions of relationship between shipper and carrier: renegotiation and information.

paper will not cover it, it shall be broached in another communication. In the bottom half of Figure 2, the carrier and the shipper share the same information about specific asset costs, outside options and transport costs. These cases are discussed in Sections 3.1 and 3.3.

It is often seen in literature that the carrier, as Stackelberg leader, offers a menu of contracts. We shall assume here that the carrier makes an initial estimate using all the information at his disposal and makes one final offer that either the shipper accepts or rejects. No negotiation takes place.

3.1 Full Information and Commitment

In this case both parties set up a contract which governs their relationship for the first and only period because they agree to commit to the terms of this contract for any future period in the same way. The carrier's objective is to maximize his profit function Π_c in terms of the decision he takes and the contract he offers under constraint of the shipper's choice of carrier and his own participation constraint. So, we have

$$\begin{aligned} \max_{\delta_c^1, \gamma^1} \mathbb{E} \left(\Pi_c(\delta_c^1, \phi(\gamma^1)) \mid \delta_s^1 \right) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbb{E} \left(C_s(1, \phi(\gamma^1)) \right) \leq \mathbb{E} \left(C_s(0, \cdot) \right), \\ \mathbb{E} \left(\Pi_c(1, \phi(\gamma^1)) \right) \geq \mathbb{E} \left(\Pi_c(0, \phi_c(\cdot)) \right), \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

with $\delta_c^1 \in \{0, 1\}$, $\delta_s^1 \in \{0, 1\}$, $\gamma^1 \in \Gamma$, $\phi \in \mathcal{P}$, and where \mathbb{E} is the expectation sign. Given that we shall deal in all the following with expected outcomes, to alleviate the notation, we shall drop the expectation sign. So, more simply, we must have

$$\begin{aligned} \max_{\delta_c^1, \gamma^1} \Pi_c(\delta_c^1, \phi(\gamma^1)) \mid \delta_s^1 \\ \text{s.t.} \begin{cases} \phi(\gamma^1) + A_{s1} \leq \phi_s(\cdot) + A_{s2}, \\ \phi(\gamma^1) \geq \phi_c(\cdot) - A_{c2}, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

with $\delta_s^1 \in \{0, 1\}$, $\delta_c^1 \in \{0, 1\}$, $\gamma^1 \in \Gamma$, $\phi \in \mathcal{P}$.

The carrier must offer the shipper a contract which at least offers the shipper the minimum cost which beats or equals the expected cost from her outside options, given her investment costs for both options. The carrier must be able to make more from working with the shipper than his outside option $\phi_c(\cdot)$ less the investment in relationship specific assets A_{c2} . If his return from the contract with the shipper is higher than $\Phi^1 = \phi_c^1(\cdot) - A_{c2}$, he will bear to work for the shipper.

The contract is hence written as

$$\phi(\gamma^1) = \phi_s(\cdot) + A_{s2} - A_{s1}, \quad (3)$$

subject to

$$\phi(\gamma^1) \geq \Phi^1, \quad (4)$$

the carrier's individual rationality constraint.

Proposition 1 *Full information and commitment contract*

When shipper and carrier are fully informed about each other's outside opportunities, relationship specific investment costs, the optimal full commitment contract and corresponding parameters for the carrier is

$$\phi(\gamma^1) = \phi_s(\cdot) + A_{s2} - A_{s1}, \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \phi(\gamma^1) \geq \Phi^1, \gamma^1 \in \Gamma, \phi \in \mathcal{P}. \quad (6)$$

3.2 Asymmetric Information and Commitment

In this case, the carrier and shipper also negotiate for just one period since renegotiation is not available. Their first choice of contract and parameters are set once and for all, whatever the length of the relationship. The carrier forms a belief about the shipper's reservation contract and investment in relationship specific levels.

Let us name Z as this estimate. We have, from equation (3),

$$Z = \phi_s(\cdot) + A_{s2} - A_{s1}. \quad (7)$$

The carrier holds a belief about Z which can go from \underline{Z} to \bar{Z} . The carrier also forms a belief about the estimated distribution of Z . This belief has a distribution law which follows a density function $f_Z(\cdot)$ and a cumulated density function $F_Z(\cdot)$ which we shall assume to be IFR (Increasing Failure Rate) as defined in [1]. These functions include quite a large variety of classical statistical distributions such as the exponential, the gamma, the Weibull, the modified extreme value distribution and the truncated normal for most types of common parameter sets as characterized in [1].³ We can write the *expected* profit function of the carrier in terms of the belief of the threshold Z (written \hat{Z}) as:

$$\begin{aligned} \max_{\delta_c^1, \gamma^1, \hat{Z}} \left(\Pi_c(\delta_c^1, \phi(\gamma^1), \hat{Z}) \mid \delta_s^1 \right) &= \phi(\gamma^1) \bar{F}_Z(\hat{Z}) + \Phi^1 F_Z(\hat{Z}) \\ \text{s.t. } \begin{cases} \phi(\gamma^1) \leq \hat{Z} \\ \phi(\gamma^1) \geq \Phi^1, \end{cases} & \quad (8) \end{aligned}$$

with $\delta_c^1 \in \{0, 1\}$, $\delta_s^1 \in \{0, 1\}$, $\gamma^1 \in \Gamma$, $\phi \in \mathcal{P}$, $\hat{Z} \in [\underline{Z}, \bar{Z}]$ and $\bar{F}_Z(\hat{Z}) = 1 - F_Z(\hat{Z})$.

The parameter over which the carrier must maximize his profit is here the estimate of Z .

³ Note that in an IFR distribution $\bar{F}_s(\bar{Z}) \neq 0$ which leads to the notion that $F_Z(\bar{Z}) < 1$ but can be defined chosen such that it is arbitrarily close to 1.

The carrier wishes to maximize his profit: hence he will want to offer the most expensive contract at his disposal, this is the case when $\phi(\gamma^1) = \widehat{Z}$. He offers the contract which he believes the shipper will accept, given his belief about Z . So, from (8), the first differential in Z is written

$$\frac{\partial \Pi_c(Z)}{\partial Z} = f_Z(Z)(\Phi^1 - Z) - F_Z(Z) + 1. \quad (9)$$

For this optimal contract to be a maximizing one in terms of profit to the carrier, we must have

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_c(Z^*)}{\partial Z} = 0, Z^* \in [Z, \overline{Z}] \\ \frac{\partial^2 \Pi_c(Z^*)}{\partial Z^2} < 0, Z^* \in [Z, \overline{Z}]. \end{cases} \quad (10)$$

The first order condition for an optimum means that

$$Z - \frac{\overline{F_Z}(Z)}{f_Z(Z)} = \Phi^1. \quad (11)$$

The second differential is written, under the restriction that $f_Z(Z) \neq 0$,

$$\frac{\partial^2 \Pi_c(Z)}{\partial Z^2} = (\Phi^1 - Z)f'_Z(Z) - 2f_Z(Z). \quad (12)$$

If both conditions have to be realized, then, replacing $\Phi^1 - Z$ by its value in (11) in (12), we can write

$$f'_Z(Z) \frac{F_Z(Z) - 1}{f_Z(Z)} - 2f_Z(Z) < 0. \quad (13)$$

Since $f_Z(Z)$ is positive for all Z in the range $[Z, \overline{Z}]$, we can restate this inequality as

$$f'_Z(Z)(F_Z(Z) - 1) - 2f_Z(Z)^2 < 0. \quad (14)$$

However, we have assumed that the distribution of Z is IFR which means that the failure rate $r(Z) = f_Z(Z)/\overline{F_Z}(Z)$ is weakly increasing for those values of Z for which $F_Z(Z) < 1$. Then the first differential of the function r , which is written

$$\frac{\partial r(Z)}{\partial Z} = \frac{f'_Z(Z)(1 - F_Z(Z)) + f_Z(Z)^2}{(1 - F_Z(Z))^2} \quad (15)$$

must be positive or null, so that

$$\frac{\partial r(Z)}{\partial Z} \geq 0 \Rightarrow f'_Z(Z)(F_Z(Z) - 1) - f_Z(Z)^2 \leq 0. \quad (16)$$

This last condition is stronger than the one spelt in (14) because $f_Z(Z)^2 > 0$. So if the carrier holds a belief about the distribution of the estimate of Z which is IFR and if we confine ourselves to the cases when $f_Z(Z) \neq 0$, then inequality (14) holds and

we have a unique optimal solution \widehat{Z} to the optimization problem of the carrier if the FOC is satisfied.

Evidently, the carrier can not second guess the actual levels of A_{s1} , A_{s2} nor of $\phi_s(0, \cdot)$. He is bound by this initial estimate.

Does this contract satisfy the shipper? For that, we must have $\phi(\gamma^1) \leq \phi_s(0, \cdot) + A_{s2} - A_{s1}$. The solution is very similar to the one spelt out in Proposition 1, except that this time the shipper may have some rent left. Using the optimal Z^* which solves equation (11) as the optimal contract for the carrier, we can spell out the following proposition.

Proposition 2 *Asymmetric information and commitment contract*

When the carrier is not informed about the shipper's outside opportunities, relationship specific investment costs, the optimal full commitment optimal contract and corresponding optimal parameters for the carrier are characterized by the following conditions

$$\begin{cases} \phi(\gamma^1) = Z^*, \\ \phi(\gamma^1) \geq \Phi^1, \\ Z^* - \frac{\overline{F_Z}(Z^*)}{f_Z(Z^*)} = \Phi^1. \end{cases} \quad (17)$$

It is clear that such commitment appears as overly rigid and impracticable. In the upcoming scenario presented in Section 3.3, we study the case where the carrier (and the shipper) can reopen the contract.

3.3 Full Information and Renegotiation

In this case, the parties may decide periodically to renegotiate the contract and they possess all relevant information to do so. In a way, this corresponds to a decentralized group with entities working together. Here, since the carrier and shipper know each other's relationship specific investment costs, if there was a negotiation, its outcome and the terms of the contract are straightforward [15].

In the first period, the shipper can decide to work with the carrier or not, in the second period, the shipper can again decide to work with the carrier or not, whether she has done so in the first period or not. This is a decision tree with two levels and two branches at each level and investments that depend upon the decisions. Note that the shipper is forced to work either with the carrier or with some other carrier: she *has* to have her products transported (see bottom right hand corner in Table 2). In the same way, we assume that the carrier also has to work, either with the shipper or some other party, as mentioned earlier. The corresponding outcomes in terms of the relationship specific investments which he incurs are presented in Table 3.

The model will evaluate all the shipper's possible strategies.

To solve this problem, we enumerate all cases. We start with the decisions to be taken at the leaves of the decision tree, in our case after the outcome of the first period (Figure 3).

Table 2 The shipper’s investment in relationship specific assets according to her decisions in first (horizontal) and second (vertical) period.

$$\delta_s^2 \begin{array}{c|c} 1 & A_{s1} + A_{s2} \\ \hline 0 & A_{s2} \end{array} \begin{array}{c} A_{s1} \\ \hline A_{s1} + A_{s2} \\ \hline 1 \end{array}$$

δ_s^1

Table 3 The carrier’s investment in relationship specific assets according to the shipper’s decisions in first (horizontal) and second (vertical) period.

$$\delta_s^2 \begin{array}{c|c} 1 & A_{c2} \\ \hline 0 & A_{c2} \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ \hline A_{c2} \\ \hline 1 \end{array}$$

δ_s^1

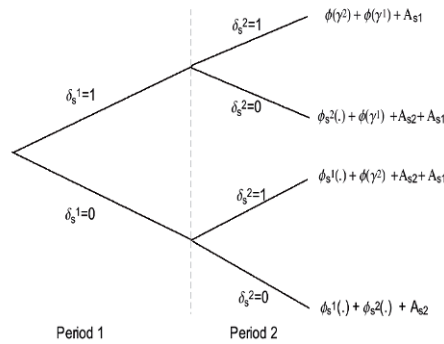


Fig. 3 Shipper’s decision tree in the two periods according to the possible decisions of the carrier.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_s^1 = 1 \left\{ \begin{array}{l} \delta_s^2 = 1, C_s = C_s^1 + \phi(\gamma^2) \\ \delta_s^2 = 0, C_s = C_s^1 + \phi_s^2(\cdot) + A_{s2} \end{array} \right. \\ \delta_s^1 = 0 \left\{ \begin{array}{l} \delta_s^2 = 1, C_s = C_s^1 + \phi(\gamma^2) + A_{s1} \\ \delta_s^2 = 0, C_s = C_s^1 + \phi_s^2(\cdot), \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (18)$$

where C_s^1 is the cost incurred in the first period by the shipper. Working backwards, this first period cost can be written depending upon the decision of the shipper to work with the carrier or not as

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_s^1 = 1, C_s^1 = \phi(\gamma^1) + A_{s1} \\ \delta_s^1 = 0, C_s^1 = \phi_s^1(\cdot) + A_{s2}. \end{array} \right. \quad (19)$$

Since both players know that the other is a profit maximizer, the shipper knows that if she decides in the first period to work with the carrier, she will be offered in the second period the contract which equates both working with the carrier and taking her outside option. That is, when

$$C_s(\phi, \gamma | \delta_s^1 = 1, \delta_s^2 = 1) = \phi(\gamma^1) + \phi(\gamma^2) + A_{s1}. \quad (20)$$

Whereas if she does not work with the carrier in the second period, her cost function becomes

$$C_s(\phi, \gamma | \delta_s^1 = 1, \delta_s^2 = 0) = \phi(\gamma^1) + \phi_s^2(\cdot) + A_{s1} + A_{s2}. \quad (21)$$

So she knows that, in the second period, the carrier will maximize his profit by offering

$$\phi(\gamma^2 | \delta_s^1 = 1) = \phi_s^2(\cdot) + A_{s2}. \quad (22)$$

Hence, once the decision in the first period is to work with the carrier, the shipper's cost function across both periods can be fully written as

$$C_s(\phi, \gamma | \delta_s^1 = 1) = \phi(\gamma^1) + \phi_s^2(\cdot) + A_{s1} + A_{s2}, \quad (23)$$

whether $\delta_s^2 = 0$ or $\delta_s^2 = 1$, when $\delta_s^1 = 1$.

The other branch of the alternative to the shipper is to go for her outside option in the first period. In this case, the carrier is willing to offer in the second period a contract such that

$$\phi(\gamma^2 | \delta_s^1 = 0) = \phi_s^2(\cdot) - A_{s1}, \quad (24)$$

insofar as

$$\phi(\gamma^2 | \delta_s^1 = 0) \geq \phi_c(\cdot), \quad (25)$$

the carrier's participation constraint.⁴

So, replacing in (18) the second period contract $\phi(\gamma^2)$ by the maximum offers that the carrier is bound to make, the shipper's cost is the same whether she chooses to work with the carrier in the second period or not:

$$C_s(\phi, \gamma | \delta_s^1 = 0) = \phi_s^1(\cdot) + \phi_s^2(\cdot) + A_{s2}. \quad (26)$$

Which is the dominant strategy for the shipper? In other words, how does she decide whether to accept or reject the contract in the *first* period given that she now knows what contracts the carrier will offer her in the *second* period?

The carrier's best course is to offer contracts to the shipper in such a way as to obtain positive decisions from her in both periods, as can be seen in Table 3. The carrier must offer a contract in the first period such that $\delta_s^1 = 1$, which means that the shipper's cost as evaluated in (23) must be lower than the cost evaluated in (26).

$$\phi(\gamma^1) + \phi_s^2(\cdot) + A_{s1} + A_{s2} \leq \phi_s^1(\cdot) + \phi_s^2(\cdot) + A_{s2} \quad (27)$$

⁴ Note that the carrier has had to invest A_{c2} in the first period, since he could not work with the shipper.

When the second period contract is replaced by the expression computed in (22), this inequality becomes

$$\phi(\gamma^1) \leq \phi_s^1(\cdot) - A_{s1}. \quad (28)$$

To maximize his profit in the first period, the carrier will offer the shipper a contract such that

$$\phi(\gamma^1) = \phi_s^1(\cdot) - A_{s1}. \quad (29)$$

We now evaluate the carrier's participation constraints. The carrier makes the offer and is tied by it: he is forced to accept the shipper's decision. To participate in the first period, he offers a contract such that $\phi_s^1(\cdot) - A_{s1} \geq \phi_c^1(\cdot) - A_{c2}$. The worst case for him is when $\delta_s^1 = 0$ since he has to make the further investment A_{c2} in the first period and to offer in the second period $\phi(\gamma^2 | \delta_s^1 = 0) = \phi_s^2(\cdot) - A_{s1}$. However, the carrier would only offer such a contract if $\phi_s^2(\cdot) - A_{s1} \geq \phi_c^2(\cdot)$. If that were not the case, he would prefer going for his outside option, given that he has already made the outside investment A_{c2} .

The carrier's participation can be summed up as the following:

$$\begin{cases} \phi_s^2(\cdot) - A_{s1} \geq \phi_c^i(\cdot), i \in \{1, 2\} \\ \phi_s^1(\cdot) - A_{s1} \geq \phi_c^1(\cdot) - A_{c2}, \\ \phi_s^2(\cdot) + A_{s2} \geq \phi_c^2(\cdot) - A_{c2}. \end{cases} \quad (30)$$

Does this dominant strategy for the shipper satisfy the carrier's participation constraint? And would it also be a dominant strategy for the carrier? The shipper's dominant strategy will also be the carrier's dominant one if we have

$$\phi_s^2(\cdot) + A_{s2} \geq \phi_c^1(\cdot) - A_{c2}, \quad (31)$$

which is the same as the last participation constraint of the carrier iff $\phi_c^1(\cdot) = \phi_c^2(\cdot)$.

Proof. When $\delta_s^1 = 1$, $\delta_s^2 = 1$, $\Pi_c = \phi_s^1(\cdot) - A_{s1} + \phi_s^2(\cdot) + A_{s2}$. Whereas, when $\delta_s^1 = 0$, $\delta_s^2 = 1$ or when $\delta_s^1 = 1$ and $\delta_s^2 = 0$, $\Pi_c = \phi_s^1(\cdot) - A_{s1} - A_{c2} + \phi_c^1(\cdot)$, so, prior to his first offer to the shipper, the carrier must have

$$\phi_s^2(\cdot) + A_{s2} \geq \phi_c^1(\cdot) - A_{c2}, \quad (32)$$

or he would not make an offer to the shipper in the first place.

3.3.1 Extending the Results to Three Periods or More...

Let us investigate the results and policies when instead of two periods, the shipper and carrier wish to reopen negotiations $n - 1$ times, at the beginning of $n - 1$ periods.

In any future period j , with $j \geq 3$, the shipper can only be in three different states of relationship specific investments. She either has only invested in the relationship specific assets required to work with the carrier, or she has incurred also the investment in order to work with her outside option, or, third, she has never incurred the

investment A_{s1} but instead has incurred A_{s2} . Note that, initially, the period in which the investment occurs, or, alternatively, the first time in which $\delta_s = 0$, is irrelevant. Since the carrier knows the state the shipper is in, he tailors the contract he offers so as to match that state.

The following demonstration is in two steps: we initially extend the results of a two-period game and then reflect on the outcome before offering a new optimal strategy for both shipper and carrier.

STATE 1: shipper has only invested A_{s1} , the cost in period one is

$$C^1 = \phi_s(\cdot), \quad (33)$$

since the carrier induces the shipper into working with him by refunding the relationship specific investment A_{s1} . At this stage of our reasoning, we consider that the carrier just extends the result of the two-period game to the following periods. We shall see later that is not optimal. In any posterior period

$$\phi(\gamma^j) = \phi_s^j(\cdot) + A_{s2}, \quad \text{if } \forall i \in \{1, \dots, j-1\}, \delta_s^i = 1. \quad (34)$$

The participation constraints for the shipper and carrier are respectively

$$\begin{cases} \phi(\gamma^j) < \phi_s^j(\cdot) + A_{s2} \\ \phi(\gamma^j) > \phi_c^j(\cdot) - A_{c2}. \end{cases} \quad (35)$$

The flow of profits to the carrier over n periods can now be evaluated as

$$\Pi_c = \sum_{i=2}^n (\phi_s^i(\cdot) + A_{s2}) + \phi_s^1(\cdot) - A_{s1}. \quad (36)$$

And the shipper's total cost over n periods is

$$C = \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + (n-1)A_{s2} \quad (37)$$

STATE 2: shipper has invested both A_{s1} and A_{s2} , carrier has invested A_{c2} : the carrier does not enjoy any particular advantage over the shipper's outside option, so he must match this outside party's proposition.

$$\phi(\gamma^j) = \phi_s^j(\cdot), \quad \text{if } \exists \{i, k\} \in \{1, \dots, j-1\}^2, i \neq k, \delta_s^i = 0, \delta_s^k = 1. \quad (38)$$

As in period 2, $\phi(\gamma^j) \geq \phi_c(\cdot)$ or the carrier would prefer his outside option. For the shipper, the participation constraint is basically $\phi(\gamma^j) \leq \phi_s^j(\cdot)$ since she has already borne the cost of the investment A_{s2} in previous periods. In effect, there is no link between period i and previous periods in terms of the participation constraints because in those earlier periods the shipper could not anticipate the carrier's actions, so she had to "amortize" the investment A_{s2} over the first period in which she chose to work with her outside option. The flow of profits to the carrier is now written

$$\Pi_c = \sum_{i=1}^{j-1} (\phi_s^i(\cdot) + A_{s2}) + \sum_{i=j+1}^n (\phi_s^i(\cdot)) - A_{c2} - A_{s1}. \quad (39)$$

All costs to the shipper after period j are equal to the outside contract cost $\phi_s^i(\cdot)$, so we can write the total cost over the n periods as

$$C = \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + (j-1)A_{s2}. \quad (40)$$

The lowest possible outcome in this case is for the shipper to refuse to work with the carrier in the second period, so that

$$C^2 = \phi_s^2(\cdot) + A_{s2}, \quad (41)$$

whether or not the carrier offers $\phi_s^2(\cdot) + A_{s2}$ as his contract. The overall cost becomes

$$C = \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + A_{s2}. \quad (42)$$

STATE 3: shipper has not yet invested A_{s1} , so the carrier offers

$$\phi(\gamma^j) = \phi_s^j(\cdot) - A_{s1}, \quad \text{if } \forall i \in \{1, \dots, j-1\}, \delta_s^i = 0, \quad (43)$$

under the participation constraints: $\phi(\gamma^j) \geq \phi_c(\cdot)$ or the carrier would simply walk away; $\phi(\gamma^j) \leq \phi_s^j(\cdot) + A_{s2}$ or the shipper would choose her outside option. Now the stream of profits to the carrier over n periods is even less:

$$\Pi_c = \sum_{i=1}^n \phi_c(\cdot) - A_{s1}. \quad (44)$$

Reciprocally, the stream of costs to the shipper becomes

$$C = \sum_{i=1}^n \phi_s(\cdot) + A_{s2}. \quad (45)$$

In the second state, since the shipper has invested in relationship specific assets with both her counterparties, the carrier cannot exploit the incumbent's advantage of the relationship specific investment with the shipper's outside option. This explains why he simply matches the shipper's outside option.

When comparing the streams of costs for the three states of reputation specific assets for the shipper, we see that the worst state for her is to have accepted to deal only with the carrier all along.

Hence the shipper's best strategy is to refuse to work with the carrier in period two: $\delta_s^2 = 0$ after $\delta_s^1 = 1$ and again to accept to work with him in all posterior periods $i > 2$, $\delta_s^i = 1$. Note that we suppose that the shipper accepts to work with the carrier rather than with her outside option all other conditions being equal because

we assume that she has chosen the carrier in the first place for reasons which escape the present model but which can be related to the relative quality advantage of the carrier over her outside option.

How can the carrier yet change this strategy to reflect this predictable decision on the shipper's part in the second period?

As we have assumed in the preamble that both know n , the carrier can tailor his second period and all posterior period contracts so as to equal the terms that the shipper obtains in states 2 and 3. Thus, his best offer is

$$\phi(\gamma^j) = \phi_s^i(\cdot) + \frac{A_{s2}}{n-1}, \quad \forall i, i \geq 2, \quad (46)$$

under the participation constraint

$$\phi_s^i(\cdot) + \frac{A_{s2}}{n-1} \geq \phi_c^i(\cdot) - A_{c2}. \quad (47)$$

Given this offer, the shipper's total cost over n periods in state 1 becomes

$$C = \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + A_{s2}, \quad (48)$$

and his participation constraint becomes

$$\sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + A_{s2} - A_{s1} \geq \sum_{i=1}^n \phi_c^i(\cdot) - A_{c2}. \quad (49)$$

To the carrier, the profit flow over the n periods is obviously larger than what he would have in either state 2 or 3.

Proof. When the shipper is in state 1, the carrier's profit is

$$\Pi_c = \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + A_{s2} - A_{s1}. \quad (50)$$

This is compared to

$$\Pi_c = \sum_{i=1}^j \phi_s^i(\cdot) + \frac{j}{n-1} A_{s2} + \sum_{k=j+1}^n \phi_c^k(\cdot) - A_{s1} - A_{c2} \quad (51)$$

in state 2 and

$$\pi_c = \sum_{i=1}^n \phi_c^i(\cdot) - A_{c2} \quad (52)$$

in state 3. Both these strategies yield inferior outcomes if the participation constraint in inequalities (47) and (49) are satisfied.

This is a Nash equilibrium because if, in any posterior period j , $j > 2$, the shipper decides to diverge from this strategy, her cost becomes

$$C = \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + A_{s2} + \frac{j-1}{n-1} A_{s2}. \quad (53)$$

The cost of such a strategy is minimized when $j = 2$. This strategy is clearly inferior to the other strategy: the shipper is not better off than accepting the Nash equilibrium strategy.

Now we have a dominant strategy for the carrier which is also a dominant strategy for the shipper.

We can now bring together the conditions of the emergence of common dominant strategies for both carrier and shipper. When the carrier knows exactly the outside option and relationship specific investments, the offers he makes can be spelt in the following proposition.

Proposition 3 *Full information and renegotiation*

When the carrier is informed of the outside opportunities and relationship specific investments that the shipper has and when the shipper and carrier have the ability to reopen negotiations after an initial period, then the carrier will offer contracts over the n periods such that

$$\begin{cases} \phi(\gamma^1) = \phi_s^1(\cdot) - A_{s1}, \\ \phi(\gamma^i) = \phi_s^i(\cdot) + \frac{A_{s2}}{n-1}, \forall i, i \geq 2. \end{cases} \quad (54)$$

The previous are subject to the following participation constraints

$$\begin{cases} \phi_s^i(\cdot) - A_{s1} \geq \phi_c^1(\cdot) - A_{c2}, & \text{(PC)} \\ \phi_s^i(\cdot) + \frac{A_{s2}}{n-1} \geq \phi_c^i(\cdot) - A_{c2}, & \text{(PC)} \\ \sum_{i=1}^n \phi_s^i(\cdot) + A_{s2} - A_{s1} \geq \sum_{i=1}^n \phi_c^i(\cdot) - A_{c2}. & \text{(PC)} \end{cases} \quad (55)$$

This strategy represents a Nash equilibrium.

It is interesting to note that the optimal contract to the carrier, if the shipper's outside option relies on a price-only relational contract, is a minimum purchase commitment (MPC). If, for example, the shipper relies for her outside option on the spot market, the fixed cost A_{s2} is her information cost of finding counterparties in the spot market and the contract $\phi_s^i(\cdot), i \in \{1, 2\}$ is in fact the expected spot market price times the expected demand.

4 Conclusion

The single most remarkable result for a practitioner is the fact that the first period contract costs so much less to the shipper than the second period one. If the relationship specific investment is important relative to the cost of the outside opportunity open to the shipper, the carrier may well be offering a contract which may not yield

more than the economic profit. He does so in the knowledge that the second period contract will be so much more profitable. It will in fact be in proportion to the relationship specific investment that the shipper would have to incur to work with her outside option.

In all the preceding, we show how the carrier must take into account his competition when pricing his contracts. Even if the competition is reduced to the spot market, he can tailor his contract so as to be preferred by taking into account the fixed costs that the shipper incurs when gathering information about available spot market capacity. We explain in this way how even large shippers who may have good information about conditions in the spot market still turn to carriers with whom they have worked before. We show that a shipper must at least once refuse to work with the carrier so that he knows that the relationship specific investment with a third party has been incurred and so the first carrier can no longer extract an extra rent but simply match the outside option's best offer in the remaining periods.

We have shown in the above how a carrier can tailor the contract according to his knowledge of the shipper's relationship specific investments in the first and eventual posterior periods. This situation is seen in practice when new entrants in a market wish to conquer market share and offer to subsidize a shipper to work with them. As we have shown, this practice does not make shippers change suppliers unless the subsidy over just one contract or period is equal or superior to the corresponding cost of the relationship investment. The present model, however, does not take into account the differing quality or reliability of the transport service suppliers and hence remains mute as to the other possible causes that hinder shippers from changing suppliers. We may conjecture about the inclusion of quality and reliability issues as specific costs to the other relationship specific investment that the shipper is to make but this would require further research.

In the present paper we have chosen to limit the carrier to just one final take-it-or-leave-it offer to the shipper. In real life, the carrier would very likely be able to make several offers in successive bargaining rounds [2].

We show how the shipper and carrier can be linked in their relationship over several periods and hence how both can try to obtain an advantage over the other even without considering the exact contractual mechanism which can link them. The present work extends and enriches previous work on the multi-period contractual relationship between shipper and carrier in [3] by offering new modeling instruments to explain the behaviour of shipper and carrier which often continue working together even when neither is satisfied with the other.

In this paper, we have not examined the renegotiation case where the carrier has no information about the shipper's exact investment in relationship specific assets and so must estimate it. Further research is ongoing in this area.

Acknowledgements I am deeply grateful to my thesis advisor Professor Per J. Agrell for the extensive help in giving this paper its added value. All remaining errors are attributable to me.

References

1. Barlow, R.E., Proschan, F.: *Mathematical theory of reliability*. John Wiley & Sons (1965) 9–18
2. Baron, D., Besanko, D.: Regulation and information in a continuing relationship. *Information Economics and Policy* 1 (1984) 267–302
3. Brusset, X.: Choosing a transport contract over multiple periods. *International Journal Logistics Systems and Management* 5(2-3) (2009) 273–322
4. Compte, O., Jehiel, P.: Gathering information before signing a contract: a new perspective. Working Paper, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, <http://www.enpc.fr/ceras/compte/acquisition2003.pdf> (2003)
5. Crémer, J., Khalil, F.: Gathering information before signing a contract. *American Economic Review* 82 (1992) 566–578
6. Crémer, J., Khalil, F.: Gathering information before the contract is offered: the case with two states of nature. *European Economic Review* 38 (1994) 675–682
7. Crémer, J., Khalil, F., Rochet, J.: Strategic information gathering before a contract is offered. *Journal of Economic Theory* 81 (1998) 163–200
8. Dyer, J.H., Chu, W.: The role of trustworthiness in reducing transaction costs and improving performance: empirical evidence from the United States, Japan, and Korea. *Organization Science* 14(1) (2003) 57–68
9. García-Dastugue, S.J., Lambert, S.J.: Internet-enabled coordination in the supply chain. *Industrial Marketing Management* 32(3) (2003) 251–264
10. Grieger, M.: Electronic marketplaces 2003: a literature review and a call for supply chain management research. *European Journal of Operational Research* 144 (2003) 280–294
11. Laffont, J.J., Tirole, J.: *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*. MIT Press, Cambridge (1993)
12. Melville, N., Kraemer, K.L., Gurbaxani, V.: Review: Information technology and organizational performance: an integrative model of it business value. *MIS quarterly* 28(2) (2004) 283–322
13. Nash, J.F.: The bargaining problem. *Econometrica* 18 (1950) 155–162
14. Claro, D.P., Hagelaar, G., Zylbersztajn, D.: Relationships with suppliers and strategic network effects: a case of an exporter of the supply chain of flowers. *Midwest Review of International Business Research* 16 (2002) 152–166
15. Rubinstein, A.: Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica* 54 (1982) 97–109
16. Williamson, O.E.: *Markets and Hierarchies: analysis and antitrust implications*. Free Press, New York (1975)
17. Williamson, O.E.: *The Mechanisms of Governance*. Oxford University Press, New York (1996) 115–116
18. Williamson, O.E.: The theory of the firm as governance structure: from choice to contract. *Journal of Economic Perspectives* 16(3) (2002) 171–195
19. Wu, S.D.: Supply Chain Intermediation: a bargaining theoretic framework. In: Simchi-Levi, D., Wu, S.D., Shen, Z.J.: *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the E-Business Era*. International Series in Operations Research & Management Science, Springer, New York (2004) 67–115
20. Zhu, T.: Holdups, simple contracts and information acquisition. *Journal of Economic Behaviour & Organization* 42 (2000) 549–560

Supply Chain Kooperation in der Ersatzteillogistik für die Luftfahrt

Sebastian Friedrich und Stefanie List

Zusammenfassung Die Ersatzteillogistik bekommt im Rahmen der Wartung, Reparatur und Überholung (Maintenance, Repair and Overhaul, MRO) von Flugzeugen eine immer größere Bedeutung. Aufgrund von sehr speziellen Anforderungen an die logistischen Leistungen ist die enge Zusammenarbeit von MRO-Anbieter und Logistikdienstleister eine wesentliche Voraussetzung für eine gute Wettbewerbsposition. Im Fokus dieses Beitrags steht die Betrachtung von erfolgsbestimmenden Faktoren in der Konzeption von Supply Chain Kooperationen. Dazu werden die organisatorischen Verflechtungen und die konkreten Kooperationsprozesse sowie die Gestaltung der Leistungsbeziehung zwischen den kooperierenden Unternehmen analysiert. Aufbauend auf einer theoretischen Betrachtung wird die konkrete Ausgestaltung der Kooperation zwischen der Lufthansa Technik AG und der Lufthansa Technik Logistik GmbH dargestellt und bewertet.

1 Bedeutung der Ausgestaltung von Kooperationen

Das Supply Chain Management hat sich als zentrale Disziplin zur Gestaltung und Führung von Unternehmensnetzwerken etabliert. Als wesentliches Ziel des Managements von Supply Chains wird das Erreichen einer ökonomisch sinnvollen Balance zwischen dem Servicelevel gegenüber den Kunden, den Produktkosten und dem eingesetzten Kapital angeführt [8, 9]. Andere Autoren leiten aus dieser abstrakten Formulierung hierarchisch untergeordnete Zielgrößen ab. Darunter finden sich Zielsetzungen wie die Synchronisierung des Materialflusses des Anbieters mit dem Bedarf der Kunden [23] bzw. eine Verstetigung des Materialflusses [24], die Reduzierung der durch Lagerbestand verursachten Kapitalbindung [24, 3],

Sebastian Friedrich · Stefanie List

Lufthansa Technik Logistik GmbH, Weg beim Jäger 193, 22335 Hamburg, GERMANY

E-mail: {sebastian.friedrich, stefanie.list}@ltl.dlh.de

eine Verkürzung der Auftragsdurchlaufzeiten und eine Auslastung der logistischen Kapazitäten [24] sowie die Erhöhung des Servicelevels [3].

Als Maßnahme zur Realisierung der Potenziale, die das Supply Chain Management bietet, wird häufig die Integration von Geschäfts- und Planungsprozessen genannt [10, 20]. Weniger stark im Blickfeld stehen die Chancen, die sich aus der Partnerschaft selbst ergeben, sowie deren konkrete Ausgestaltung. Durch Zusammenarbeit und Diskussion mit Supply Chain Partnern werden zum Teil Mängel unternehmensinterner Prozesse offen gelegt, die vorher nicht bekannt waren. Ferner führt Kooperation zu Beziehungen zwischen Mitarbeitern der verschiedenen Unternehmen auf persönlicher Ebene. Durch derartige persönliche Beziehungen können gemeinsame Projekte zur Verbesserung von Teilbereichen der Supply Chain wesentlich einfacher und mit weniger Reibungsverlusten durchgeführt werden. Auch zusätzliche Verträge zwischen den Partnern bei zukünftigen Problemen oder neuen Marktchancen können so einfacher zum Abschluss gebracht werden [7, 1].

Im Fokus dieses Beitrags stehen Möglichkeiten der detaillierten Ausgestaltung von Kooperationen zwischen Supply Chain Partnern. Dabei sollen unterschiedliche Ausprägungsformen von Kooperationen beleuchtet und wesentliche Aspekte geeigneter Ausgestaltungsmöglichkeiten herausgearbeitet werden. Den Kern der Untersuchung bildet die Betrachtung der Kooperation zwischen der Lufthansa Technik AG (LHT) und der Lufthansa Technik Logistik GmbH (LTL) in der Branche der Wartung, Reparatur und Überholung (Maintenance, Repair and Overhaul, MRO) von Verkehrsflugzeugen. Die Kooperation zwischen diesen Unternehmen wird anhand der in diesem Beitrag erarbeiteten theoretischen Überlegungen und Konzepte beurteilt.

In Abschnitt 2 werden zunächst grundsätzliche Aspekte der Ersatzteillogistik für die Luftfahrt erörtert. Nach einer Vorstellung der Geschäftsfelder von Wartungs-, Reparatur- und Überholungsdienstleistern in der Luftfahrt wird die Bedeutung der Logistik für diese Geschäftsfelder diskutiert. Ergänzt wird diese Diskussion durch eine Darstellung der speziellen Anforderungen, die an die Ersatzteillogistik in der Luftfahrt gestellt werden. Abschnitt 3 beschäftigt sich mit theoretischen Überlegungen zur Ausgestaltung von Kooperationen. Dazu werden eingangs grundsätzliche Kooperationsformen aufgezeigt. Den Kern des zweiten Unterabschnitts bildet die Darstellung von Möglichkeiten der detaillierten Gestaltung von Kooperationen. Im dritten Unterabschnitt wird die vertragliche Ausgestaltung kooperativer Beziehungen problematisiert. Abschnitt 4 betrachtet die Kooperation zwischen der LHT und der LTL unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3 erarbeiteten theoretischen Grundlagen. Dabei wird die Zusammenarbeit der LTL und der LHT zunächst anhand des organisatorischen Aufbaus dargestellt. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Abdeckung der in Abschnitt 2 aufgezeigten Geschäftsfelder durch die LHT und die LTL eingegangen. Den Schwerpunkt des vierten Abschnitts bildet die Vorstellung des von der LTL für die Zusammenarbeit mit der LHT entwickelten Kooperationsmodells. In Unterabschnitt 4.3 wird, in Analogie zu Abschnitt 3, die konkrete vertragliche Ausgestaltung der Leistungsbeziehung zwischen der LTL und der LHT dargestellt. Abschnitt 5 fasst die im Rahmen dieser Untersuchung erarbeiteten Erkenntnisse zusammen.

2 Ersatzteillogistik in der Luftfahrt

2.1 Wartung, Reparatur und Überholung von Verkehrsflugzeugen

Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen im Luftverkehr sind die Wartung, Reparatur und Überholung von Flugzeugen wichtige Bestandteile der Luftfahrt. Sie verfolgen das Ziel, unter Beachtung eines hohen Sicherheitsstandards und einer Vielzahl behördlicher Vorschriften die Ausfallzeiten von Flugzeugen zu minimieren.

Die Wartung umfasst Reparatur- und Instandhaltungsarbeiten, die direkt am Flugzeug durchgeführt werden. Hierbei ist zwischen akuten und somit nicht planbaren sowie planbaren Wartungsereignissen zu unterscheiden. Im Rahmen eines akuten Wartungsereignisses werden Fehler behoben, die zwingend vor einem weiteren Einsatz des Flugzeugs beseitigt sein müssen. Diese Reparaturen werden größtenteils direkt auf dem Flughafenvorfeld durchgeführt. Planbare Wartungsereignisse hingegen können im Hangar oder auf dem Flughafenvorfeld erfolgen und sind üblicherweise einige Stunden vor Ankunft des Flugzeugs bekannt. Dadurch bieten sie einen gewissen Spielraum zur Bereitstellung des richtigen Werkzeugs, des benötigten Materials sowie qualifizierter Mechaniker. Der Umfang von Wartungstätigkeiten kann überwiegend innerhalb von wenigen Stunden bewältigt werden. In Ausnahmefällen steigt der Aufwand auf mehr als einen Tag an.

Unter dem Begriff Reparatur wird die Instandsetzung und Erneuerung von Flugzeugkomponenten zusammengefasst. Flugzeugkomponenten umfassen alle Bauteile, die ausgebaut und ausgetauscht werden können. Dazu zählen z.B. Triebwerke, Bremsen, Bordcomputer und sonstige elektronische Teile sowie auch Bordküchen eines Flugzeuges. Die Komponenten werden anschließend vom MRO-Dienstleister oder einem auf bestimmte Komponenten spezialisierten Drittanbieter repariert. Derartige Reparaturen sind überwiegend gut planbar, da in der Regel feste, langfristige Austauschzyklen vereinbart oder vorgegeben sind. Dennoch ist auch die Reparatur von Komponenten bei einer akuten Fehlfunktion oder einem Ausfall kurzfristig einzuplanen. Aufgrund des überwiegend großen Aufwands bei Reparaturarbeiten an Komponenten können diese jedoch selten für den sofortigen Wiedereinbau repariert werden.

Im Rahmen einer Flugzeugüberholung wird ein Flugzeug vollständig in seine Einzelteile zerlegt. Dabei wird jedes Detail überprüft und gegebenenfalls repariert, bevor schließlich das Flugzeug wieder zusammengebaut wird. Avioniker untersuchen die Elektrik und die Elektronik, Fluggerätemechaniker die beweglichen Bauteile von den Landeklappen bis zu den Steuerflächen und Fluggerätekonstrukteure die Struktur zum Beispiel nach Rissen in der Beplankung. In Abhängigkeit des Flugzeugalters und der Anzahl an Flugstunden fällt eine Überholung bei Langstreckenjets etwa alle sechs Jahre an und dauert abhängig vom Zustand eines Flugzeugs zwischen 30 und 45 Tagen. Flugzeugüberholungen sind generell planbar. Allerdings wird erst im Zuge des Auseinanderbauens der notwendige Reparaturumfang erkennbar.

2.2 Bedeutung der Ersatzteillogistik in der Luftfahrt

Eine Voraussetzung für den effizienten Ablauf der MRO-Prozesse liegt in einer leistungsfähigen, maßgeschneiderten Ersatzteillogistik. Ziel ist es, alle MRO- und Kundenstandorte bedarfsgerecht mit Bauteilen und Verbrauchsmaterialien zu versorgen.

An Flugzeugbauteile werden sehr hohe Anforderungen in Bezug auf Sicherheit und Belastbarkeit gestellt. Dies macht den Einsatz hochwertiger Werkstoffe notwendig und führt zu einem erheblichen Prüf- und Kontrollaufwand bei der Herstellung der Bauteile, aber auch bei deren Reparatur, Lagerung und Transport, und in der Folge zu einem relativ hohen Wert der Bauteile. In einer Untersuchung aus dem Jahr 2005 schätzen Pfohl und Trautmann [19] den Wert des weltweiten Ersatzteilbestandes an Flugzeugkomponenten auf 20-30 Mrd. US\$. Sie beziffern die jährlichen Kosten der Lagerung von Bauteilen auf 22% der Anschaffungskosten. Diese lassen sich in Kapitalbindungskosten (50%), Kosten für die Lagerung, Dokumentation, Versicherung und Steuern (30%) und Kosten durch Überalterung, erneute Zertifizierung, Beschädigung und Diebstahl (20%) gliedern [19]. Ein Aspekt, der die Bedeutung der hohen Ersatzteilkosten weiter verstärkt, ist die Vielfalt an Bauteilen, die bereits für ein einzelnes Flugzeugmuster benötigt wird, und die oftmals hohe Zahl weltweiter Standorte, an denen Ersatzteile verfügbar sein müssen. Der Ersatzteilbestand der LHT wird beispielsweise in einer Untersuchung aus dem Jahr 2005 auf 420.000 verschiedene Einzelteile geschätzt [19]. In der Bilanz der LHT für 2007 schlagen die reparaturfähigen Ersatzteile mit knapp 500 Mio. Euro zu Buche [13].

Den Kosten für Ersatzteile stehen auf der anderen Seite ebenfalls erhebliche Kosten durch den möglichen Ausfall eines Flugzeugs gegenüber. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an die Ersatzteillogistik, die die weltweite Versorgung einer Fluggesellschaft sicherstellt. Durch eine leistungsfähige Logistik, die mit einem im Verhältnis niedrigen Bestand an Ersatzteilen eine hohe Verfügbarkeit sicherstellt, lassen sich die Gesamtkosten der Ersatzteilversorgung in beträchtlichem Maß senken. Neben den reinen Instandhaltungs- und Reparaturleistungen hat die umfassende, weltweite Versorgung der Kunden mit Ersatzteilen folglich einen großen Stellenwert. Im Wettbewerb der MRO-Dienstleister stellt die Logistik ein entscheidendes Differenzierungsmerkmal dar [19].

Insbesondere für Fluggesellschaften mit einer kleinen Flotte ist es durch die große Teilevielfalt mit relativ hohen Kosten verbunden, die Verfügbarkeit von Ersatzteilen selbstständig sicherzustellen. Um die Kosten von Kapitalbindung und Lagerung zu verringern, haben sich verschiedene Fluggesellschaften an einen Pool von Ersatzteilen angeschlossen. Die Lufthansa Technik AG bietet ihren Kunden z.B. für die Geräteversorgung ein Poolprodukt unter dem Namen „Total Component Support“ (TCS®) an [17]. Darüber hinaus wird von der Lufthansa Technik AG mit dem Produkt „Total Material Operations“ (TMO®) die vollständige Versorgung eines Kunden an seinen verschiedenen Standorten mit allen benötigten Geräten und Verbrauchsmaterialien inklusive aller logistischen Leistungen angeboten [15] sowie mit dem Produkt „Total Operations Management“ (TOM®) das vollständige, maßgeschneiderte Management einer Flotte inklusive aller Wartungsdienstleistungen.

gen und der erforderlichen Logistik [16]. Die SR Technics Group bietet ihren Kunden ähnliche Dienstleistungen unter den Namen „Integrated Component Solutions“ (ICS®) und „Integrated Airline Solutions“ (IAS®) an [22], ebenso KLM Engineering & Maintenance unter den Namen „Total Component Care“ und „Total Aircraft Care“ [11]. Für die Kunden wird die Beschäftigung mit der Ersatzteillogistik durch derartige Produkte überflüssig. Für den MRO-Dienstleister ergeben sich bei steigender Größe zunehmend Effizienzpotenziale im Bereich der Ersatzteillogistik.

2.3 Spezielle Anforderungen an die Ersatzteillogistik

Die Anforderungen an die Logistik weichen für einzelne MRO-Dienstleistungen deutlich voneinander ab. Von besonderer Bedeutung sind im Kontext der Ersatzteillogistik für die Luftfahrt die Aspekte Prozessgeschwindigkeit, Termintreue, Logistikkosten, Fehlerrate, Flexibilität und Vertrauen. Eine hohe Prozessgeschwindigkeit ist insbesondere im Zusammenhang mit der Materialversorgung für die Wartung wichtig. Alle Wartungsstandorte müssen kurzfristig mit Ersatzteilen versorgt werden können, um Ausfallzeiten von Flugzeugen aufgrund ungeplanter Instandhaltungsarbeiten nach Möglichkeit zu vermeiden. Für das Geschäftsfeld Reparatur sind kurze Reparaturkreisläufe und damit eine hohe Prozessgeschwindigkeit erforderlich, um die Kapitalbindungskosten möglichst gering zu halten. Neben der schnellen Auslieferung von einsatzbereiten Flugzeugkomponenten hat der schnelle Komponentenzulauf zu den Reparaturbetrieben hier eine ebenso große Bedeutung. Im Rahmen von Flugzeugüberholungen spielt die Prozessgeschwindigkeit hingegen eine im Vergleich weniger starke Rolle, da der Bedarf an Ersatzteilen überwiegend langfristig geplant wird. Eine Ausnahme stellen lediglich ungeplante Reparaturereignisse im Zuge der Überholung dar, die zu einem zusätzlichen, kurzfristigen Bedarf an Ersatzteilen führen.

Der Aspekt Termintreue ist in der Ersatzteillogistik generell von hoher Bedeutung. Dies gilt insbesondere für alle Materialversorgungsleistungen. Im Vergleich dazu kann gegebenenfalls eine leicht geringere Termintreue für den Rücklauf von defekten Flugzeugkomponenten akzeptiert werden. Die Logistikkosten verlieren gegenüber den anderen Aspekten in den Bereichen an Bedeutung, in denen ein Flugzeugausfall oder die Verlängerung einer Liegezeit droht, da mögliche Ausfallkosten die beeinflussbaren Logistikkosten in der Regel weit übersteigen.

Mögliche Fehler in den logistischen Prozessen bestehen in einer falschen Auslagerung von Material, einer fehlerhaften Terminierung oder Adressierung sowie einer Beschädigung oder dem Verlust von Material. Generell ist eine niedrige Fehlerrate im Rahmen der Ersatzteillogistik für die Luftfahrt von großer Wichtigkeit. Im Speziellen steigt die Bedeutung der Fehlerrate mit den Folgekosten, die durch Fehler verursacht werden. Die Folgekosten wiederum werden zum einen durch den Reparaturaufwand im Fall von Beschädigungen und zum anderen durch Kosten aufgrund einer ausbleibenden Versorgung oder einer notwendigen Ersatzbeschaffung bestimmt. Insbesondere bei Triebwerken und bei teuren Spezialbauteilen, die nur

von einem oder wenigen Herstellern angeboten werden, ist eine kurzfristige Ersatzbeschaffung oftmals nur schwer möglich und mit hohen Kosten verbunden. Für das Geschäftsfeld Reparatur gilt, dass eine höhere Fehlerrate beim Zulauf von defekten Geräten eher geduldet wird als im Rahmen der Materialversorgung für den akuten Bedarf.

Ein weiterer Aspekt, der speziell im Rahmen von MRO-Dienstleistungen einen hohen Stellenwert hat, ist die Flexibilität der Logistikleistungen. Im Rahmen der Materialversorgung kommt es z.B. vor, dass nach der Beauftragung eines Ersatzteilversands der Bedarfsort oder der Bedarfstermin geändert wird. Ein in derartigen Fällen erforderlicher Eingriff in laufende Prozesse stellt hohe Anforderungen an die Steuerungssysteme und zieht darüber hinaus oftmals manuellen Aufwand nach sich.

Die Umsetzung der angeführten Anforderungen macht einen tiefen Einblick des Logistikdienstleisters in die Abläufe des MRO-Anbieters notwendig und setzt dadurch ein hohes Maß an Vertrauen zwischen den Partnern voraus.

3 Kooperationen in Supply Chains

3.1 Kooperationsformen

Das Ziel von Kooperationen in Supply Chains liegt darin, zumindest einen Teil der Geschäftsprozesse der Unternehmen aufeinander abzustimmen und damit Effizienz- und Effektivitätsgewinne zu erzielen sowie die gemeinsame Position am Markt zu stärken [7]. Ein Grundbaustein im Rahmen der Untersuchung von Kooperationen ist die Betrachtung der organisatorischen Struktur der kooperierenden Unternehmen. Im Kontext des Supply Chain Managements können grundsätzlich vertikale und horizontale Kooperationen unterschieden werden. Bei vertikalen Kooperationen arbeiten Unternehmen unterschiedlicher Stufen der Wertschöpfungskette zusammen. Dabei steht in der Regel die Abstimmung von Warenflüssen zwischen Lieferant und Abnehmer im Vordergrund. Bei horizontalen Kooperationen findet die Zusammenarbeit auf der gleichen Stufe der Wertschöpfungskette statt. Vorteile dieser Kooperationsform liegen häufig in einer Erhöhung der Marktmacht gegenüber Lieferanten oder Abnehmern sowie in der Erzielung von Synergieeffekten durch Etablierung gemeinsamer und dadurch gegebenenfalls effizienterer Prozesse.

3.2 Gestaltung von Kooperationen

Neben den grundsätzlichen Überlegungen zum organisatorischen Aufbau von kooperierenden Unternehmen in Supply Chains spielt insbesondere die Frage nach der detaillierten Ausgestaltung der konkreten Abstimmungsprozesse in einer Kooperation eine entscheidende Rolle. Um mögliche Effizienzgewinne ausschöpfen zu können,

ist die Zusammenarbeit der Partner und die tatsächliche Integration der Abläufe sowie die damit einhergehende Verbesserung der Qualität der Beziehung zwischen den Partnern von hoher Bedeutung. Su et al. [25] heben eine Reihe von wesentlichen Aspekten zur Beurteilung der von ihnen so genannten Supply Chain Relationship Quality (SCRQ) hervor: Ein wesentlicher die SCRQ bestimmender Aspekt ist danach die Institutionalisierung der Kooperation. Unter Institutionalisierung wird dabei die bewusste Etablierung von Regeln, Standards und Prozessen der Kooperation verstanden, um diese so fest zu verankern.

Als wichtiger Gesichtspunkt der SCRQ bzw. der Beziehungsqualität wird auch die Kommunikation zwischen den Partnern angeführt. Dazu zählt insbesondere ein gemeinsames Verständnis hinsichtlich der Absprache von Zielen und der Bewältigung von Konflikten.

Ein weiterer Aspekt der Beziehungsqualität ist nach Su et al. [25] das Vertrauensverhältnis zwischen den Partnern. Der Aufbau von Vertrauen stellt einen Schlüssel für die Etablierung einer langfristigen Kooperation dar [28]. Je mehr die Partner Vertrauen zueinander aufbauen, desto stärker lässt sich der Informationsaustausch ausweiten. Dies kann eine Grundlage für Effizienzgewinne innerhalb der Partnerschaft darstellen. Bernardes und Zsidisin [1] stellen den Grad, in dem Partner in einer Supply Chain gegenseitig eingebunden sind, als wesentliche Grundlage einer Vertrauensbeziehung innerhalb der Kooperation dar.

Eng an die vorherigen Aspekte geknüpft ist das Betriebsklima bzw. die Stimmung zwischen den Kooperationspartnern. Gelebt wird die Kooperation auf einer persönlichen Ebene. Die Beziehung zwischen Personen hat folglich einen entscheidenden Einfluss auf die Vorteile beider Parteien, die sich durch eine Kooperation erzielen lassen.

Als letzten Aspekt der Beziehungsqualität führen Su et al. [25] schließlich die Bereitschaft zur Anpassung an den Partner an. Bei einer langfristigen Kooperation müssen sich die Partner auf das Geschäft des jeweils anderen einstellen, um dessen Bedarf präzise zu erfüllen. Entsprechend hat die Bereitschaft, aber auch die Fähigkeit zur Anpassung an den Kooperationspartner einen großen Einfluss auf die Qualität der Kooperation.

Die Ausgestaltungsmöglichkeiten der einzelnen die SCRQ bestimmenden Aspekte und die insgesamt erreichbare Qualität der Beziehung in einer Supply Chain Kooperation hängt essentiell von der formalen Gestaltung der Kooperation ab. Als wesentliche Gesichtspunkte dieser Gestaltung lassen sich die organisatorische Verankerung der Kooperation und das Aufgabenspektrum, das dem Management der Kooperation zugeordnet wird, identifizieren.

Hinsichtlich der *organisatorischen Verankerung* der Kooperation ist zunächst der grundsätzliche Aufbau der Schnittstelle zwischen den Partnern zu betrachten. Christopher und Jüttner [2] grenzen vier Typen des organisatorischen Aufbaus von Schnittstellen voneinander ab (vgl. Abbildung 1).

Bei dem ersten Typ stehen sich die Kooperationspartner in einer reinen Einkäufer- bzw. Verkäuferfunktion gegenüber. Eine Kooperation zwischen den Fachabteilungen oder dem Management der beiden Unternehmen findet nicht statt. Einigkeit über Leistungen und Preise wird ausschließlich über Verhandlungen erzielt. Ein Vorteil

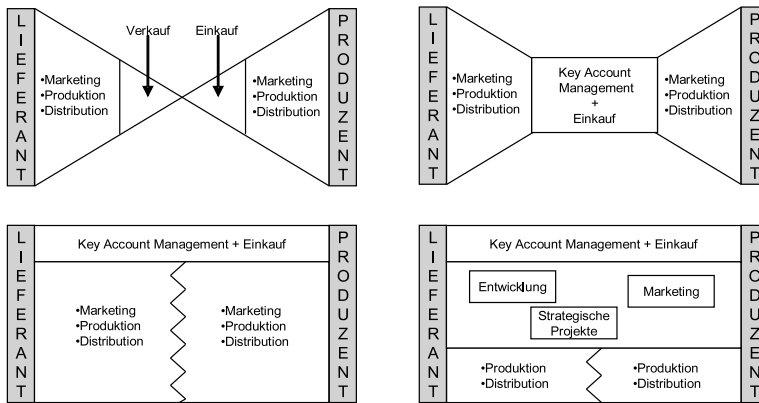


Abb. 1 Organisatorischer Aufbau der Schnittstelle zwischen Supply Chain Partnern.

dieser Art der Kooperation besteht darin, dass wenige Ressourcen für die Kooperation benötigt werden. Ferner führt diese Form der Kooperation zu einer hohen Flexibilität hinsichtlich eines Wechsels von Partnern. Die im Zusammenhang mit der SCRQ angeführten Chancen können bei dieser Art der Kooperation jedoch kaum ausgenutzt werden. Für größere, wichtige Kunden besteht ein erster Schritt hin zu einer tatsächlichen Zusammenarbeit oftmals in der spezifischen Ausrichtung von Verkaufsfunktionen auf diese Geschäftspartner durch ein Key Account Management. Allerdings lassen sich viele derartige Beziehungen noch unter dem ersten Kooperationstyp einordnen.

Als wesentliches Merkmal des zweiten Kooperationstyps stellen Christopher und Jüttner [2] eine engere Kooperation zwischen Einkauf und Key Account Management dar. Ressourcen aus den Fachabteilungen beider Partner stehen dem Kooperationsteam zur Verfügung. Durch die engere Zusammenarbeit von Einkauf und Key Account Management können reine Verhandlungen über Leistungen und Preise zum Teil bereits durch einen gemeinschaftlichen Entwurf von gegenseitigen Leistungen ersetzt werden.

Bei dem dritten Typ findet eine direkte Kooperation zwischen Fachabteilungen der Partner statt. Geschäftsprozesse werden unternehmensübergreifend aufgebaut. Einkauf und Key Account Management koordinieren die Zusammenarbeit zwischen den Fachabteilungen. Die Rollen von Einkäufer und Verkäufer weichen in diesem Fall bereits deutlich von deren klassischen Varianten ab. Vorteile liegen in der Möglichkeit zur gezielten Ausrichtung der Leistungen der Partner aufeinander. Dies geht allerdings mit einem hohen Abstimmungsaufwand einher.

Der vierte Typ zeichnet sich nach Christopher und Jüttner [2] schließlich dadurch aus, dass nicht nur Geschäftsprozesse unternehmensübergreifend aufgebaut, sondern auch strategische Fragestellungen gemeinschaftlich behandelt werden. Dieser Typ erfordert das höchste Maß an Kommunikation und gegenseitigem Vertrauen. Er ermöglicht aber den größten Grad der Ausrichtung der Partner aufeinander.

Neben dem Aufbau der Schnittstelle stellt die Kontinuität bzw. die zeitliche Befristung des Managements der Zusammenarbeit einen weiteren wichtigen Gesichtspunkt im Hinblick auf die organisatorische Verankerung der Kooperation dar. Eine Möglichkeit besteht in einer zeitlich beschränkten Unterstützung der Kooperation, um diese zu etablieren. Gemünden und Walter [6] rechtfertigen diese Herangehensweise damit, dass in der Regel vor allem in der Anfangsphase einer Zusammenarbeit Barrieren zwischen den kooperierenden Unternehmen zu überwinden sind. Als erste Barriere führen sie an, dass oftmals eine unzureichende Kenntnis über das Geschäft des jeweiligen Partners herrscht. Diese Kenntnis gilt es, im ersten Schritt herzustellen. Als zweite Barriere führen Gemünden und Walter an, dass häufig die Kenntnis über Ansatzpunkte für eine Kooperation bzw. für die Erzielung gemeinschaftlicher Effizienzgewinne fehlt. Hier gilt es, in der ersten Phase der Kooperation einen Dialog zwischen den Partnern aufzubauen. Schließlich sehen sie als mögliche weitere Barriere den fehlenden gegenseitigen Willen zu kooperieren. Hier besteht eine wichtige Aufgabe darin, die Kommunikation zwischen den Partnern auf allen Ebenen, insbesondere der operativen, in Gang zu setzen und den gegenseitigen Respekt zu fördern. Erst dann könne eine Kooperation tatsächlich gelebt werden. Diese initiale Unterstützung der Kooperation kann durch externe Berater oder interne Repräsentanten beider Partner geleistet werden. Christopher und Jüttner [2] führen jedoch an, dass es externen Beratern oftmals an Akzeptanz für die langfristige Etablierung einer Kooperation fehlt. Vom Aufbau einer Kooperation durch eigene Kräfte kann danach eine größere Nachhaltigkeit erwartet werden. Auf der anderen Seite können externe Berater Erfahrungen anderer Kooperationen einbringen, an denen es Mitarbeitern der kooperierenden Unternehmen in der Regel fehlt.

Neben der geschilderten befristeten Unterstützung der Kooperation besteht eine Alternative in einem von vorne herein unbefristeten, expliziten Management der Kooperation. Bei dieser Variante ist die Frage nach der Einordnung in die organisatorische Struktur von großer Bedeutung. Grundsätzlich kann das Management einer Kooperation in vorhandene Funktionen integriert oder als zusätzliche Funktion etabliert werden. Beide Varianten bergen sowohl Chancen als auch Risiken. Durch die Schaffung einer zusätzlichen Funktion, die ausschließlich das Management der Kooperation zur Aufgabe hat, bietet sich die Möglichkeit, dass sich diese Unternehmensfunktion von vorne herein mit allen die Kooperation betreffenden Aspekten beschäftigen kann, ohne sogenannte Altlasten mitzuführen. Bei dieser Variante besteht jedoch ein möglicher organisatorischer Konflikt zwischen dem Kooperationsmanagement und der in der Regel bereits vorhandenen Schnittstelle zwischen Einkauf und Verkauf der Partner. Einkauf und Verkauf bzw. Key Account Management bilden die natürliche Schnittstelle zwischen in einer Supply Chain nachgelagerten Unternehmen.

Eine Alternative zur Schaffung einer zusätzlichen Funktion besteht darin, das Management der Schnittstelle dem Einkauf und dem Key Account Management zu übertragen. Eine Gefahr dieser Variante liegt darin, dass das alte Rollenverhalten in diesen Funktionen nur langsam abgelegt wird und einer effizienten Kooperation entgegenwirkt. Begegnen lässt sich dieser Gefahr durch eine explizite Neudefinition des Aufgabenspektrums, das sich klar von dem der alten Funktionen abgrenzt.

Das *Aufgabenspektrum*, das dem Kooperationsmanagement zugeordnet wird, stellt den zweiten Gesichtspunkt der formalen Gestaltung von Kooperationen dar. Es ist je nach Verankerung in der Organisation, den Geschäftsfeldern der Partner und insbesondere auch der Ressourcenausstattung des Kooperationsmanagements individuell und entsprechend den Erfordernissen und Möglichkeiten auszugestalten.

Eine Kernaufgabe, die in jedem Fall dem Management der Kooperation zugeordnet wird, ist das Monitoring der Beziehung [2]. Im Rahmen der Kooperation wird eine Reihe von Vereinbarungen getroffen, deren Einhaltung kontinuierlich beobachtet werden muss. Gegebenenfalls kann bei Abweichungen von vereinbarten Zielgrößen direkt auf der Ebene des Kooperationsmanagements über Maßnahmen verhandelt werden. Darüber hinaus existiert im Rahmen der Positionierung des Managements einer konkreten Kooperation eine Reihe von Freiheitsgraden. Das Management der Kooperation kann proaktiv an der Weiterentwicklung der Kooperation mitwirken oder lediglich Konflikte und Probleme im Rahmen der Kooperation reaktiv behandeln. Die proaktive Gestaltung von übergreifenden Lösungen und Geschäftsprozessen bleibt in solchen Fällen den Fachabteilungen der Partner überlassen.

Eng damit verknüpft ist die Dimension, die sich aus der Bandbreite zwischen einer Beratungsfunktion und der Funktion eines Moderators ergibt. Dem Management der Kooperation kann dabei eine gestalterische oder lediglich eine vermittelnde Funktion zukommen.

Weiterhin können die Aufgaben nach deren Frist unterschieden werden. Das Management der Kooperation kann den langfristigen Geschäftserfolg oder die kurzfristige Lösung von Problemen im Fokus haben oder selbstverständlich jedes denkbare Aufgabenpaket zwischen diesen Extrempositionen. Darüber hinaus kann das Management der Kooperation sich ausschließlich mit monetären Gesichtspunkten beschäftigen oder an der fachlichen Konzeption mitwirken.

Eine wichtige Frage bei der Etablierung des Managements einer Kooperation besteht schließlich darin, inwiefern es Entscheidungsbefugnisse über kooperative Aktivitäten besitzt. Gegebenenfalls ist es sinnvoll, dem Management der Kooperation relativ weit reichende Entscheidungsbefugnisse zuzuordnen, damit die Steuerungsfunktion der kooperativen Aktivitäten effektiv wahrgenommen werden kann. Voraussetzung ist, dass das Wissen über Anforderungen an Verbesserungsprojekte und deren Dringlichkeit im Kooperationsmanagement zusammenläuft. Nicht in jedem Fall wird man dem Management der Kooperation jedoch derartig weitreichende Befugnisse geben.

3.3 Leistungsbeziehung

Eine Frage, die sich unmittelbar an die organisatorische Ausgestaltung der Beziehung zwischen den Partnern anschließt, besteht darin, wie Kooperationsvorteile auf die Partner verteilt und wie die Leistungen, die die Partner gegenseitig erbringen, effizient vertraglich geregelt werden können. Was die Verteilung

von gemeinschaftlich erworbenen Kooperationsvorteilen betrifft, kann eine gewisse Willkür grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden [4, 21]. Fleischmann [5] diskutiert mögliche Anforderungen an Verteilungsregeln in Logistikkooperationen. Er empfiehlt eine kostenproportionale Verteilung. Wasner und Zäpfel [29] schlagen eine Gleichverteilung vor. Eine ausführliche Diskussion verschiedener in der Literatur vorgeschlagener Konzepte der Verteilung von Kooperationsvorteilen findet sich in [18]. Die Verteilung derartiger Vorteile hat bei einer konzerninternen Kooperation jedoch einen deutlich geringeren Stellenwert als bei einer Kooperation zwischen wirtschaftlich unabhängigen Marktteilnehmern.

Hinsichtlich der Möglichkeiten im Rahmen der Gestaltung von Vertragswerken bieten langfristig angelegte Kooperationen Vorteile. Verträge zwischen vollständig unabhängigen Unternehmen werden oftmals kurzfristig geschlossen und umfassen in der Regel nur einzelne Leistungen. Innerhalb von Supply Chain Kooperationen ergibt sich die Möglichkeit, die Leistungsbeziehung zwischen den Partnern über ein umfassendes Vertragswerk zu regeln. Auf diese Weise kann ein grundsätzlich abgestimmtes Verhalten zwischen den Partnern erreicht werden. Die Vorteile koordinierter Entscheidungen können so ausgeschöpft und gegebenenfalls fair verteilt werden. Ist ein Partner beispielsweise zugunsten eines besseren Gesamtergebnisses der Supply Chain schlechter gestellt, können vertraglich geregelte Kompensationen in anderen Punkten zugesagt werden. Eine Reihe von Autoren beschäftigt sich mit den Auswirkungen von vertraglichen Vereinbarungen auf die Supply Chain Planung. Grundsätzlich lassen sich Untersuchungen im Bereich der Analyse von Kontrakten und Untersuchungen im Bereich des Designs von Kontrakten voneinander abgrenzen [30]. Die Beiträge im Bereich der Analyse von Kontrakten beschäftigen sich primär mit der Planung unter Beachtung existierender Verträge. Diese Beiträge untersuchen individuell optimales Verhalten. Die Forschung im Bereich des Designs von Kontrakten beschäftigt sich hingegen mit der Ausgestaltung von Verträgen, um durch bessere Koordination eine Effizienzsteigerung der Vertragspartner zu erreichen [30]. Im Rahmen von Kooperationen sind primär Beiträge aus dem Bereich des Designs von Kontrakten relevant. Ein Ziel sollte in der gemeinsamen Ausgestaltung eines Vertrages liegen, der beiden Partnern Anreize für ein aus Gesamtsicht näherungsweise optimales Verhalten setzt.

4 Kooperation zwischen der Lufthansa Technik AG und der Lufthansa Technik Logistik GmbH

4.1 Organisatorischer Aufbau

Die Lufthansa Technik AG bietet Dienstleistungen im Bereich der Wartung, Reparatur und Überholung von Flugzeugen an, die Lufthansa Technik Logistik GmbH übernimmt für die LHT sämtliche logistische Aufgaben. Diese umfassen im Kern die weltweite Lagerung von Ersatzteilen und das Management von Transporten.

Ferner zählt beispielsweise auch die Abwicklung der Zollformalitäten zu den von der LTL durchgeführten Dienstleistungen.

Die LHT deckt über sechs separate Geschäftsbereiche das gesamte Spektrum an MRO-Dienstleistungen für die zivile Luftfahrt ab. Die Flugzeugwartung und die Flugzeugüberholung werden über je einen eigenen Geschäftsbereich repräsentiert. Die Dienstleistungen, die Reparaturen von Flugzeugkomponenten umfassen, sind in der LHT in drei verschiedene Geschäftsbereiche aufgeteilt: „Geräte“, „Triebwerke“ und „Fahrwerke“. Der sechste Geschäftsbereich „VIP-Flugzeuge“ bietet maßgeschneiderte Innenausstattungen von Flugzeugen an [12]. Die LTL unterstützt alle Geschäftsbereiche der LHT durch logistische Dienstleistungen (vgl. Abbildung 2). Insofern findet sowohl eine horizontale Kooperation zwischen den verschiedenen Geschäftsbereichen der LHT, als auch jeweils eine vertikale Kooperation zwischen dem Logistikdienstleister LTL und den einzelnen Geschäftsbereichen der LHT statt.

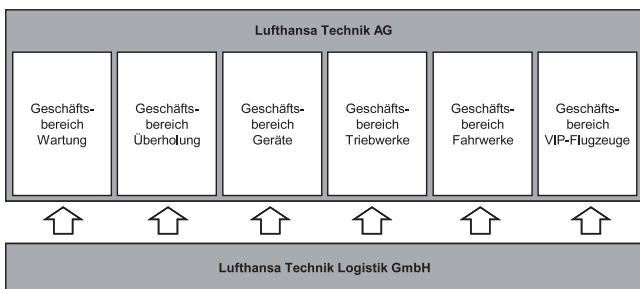


Abb. 2 Organisatorischer Aufbau.

Die beiden Hauptwartungszentren der LHT liegen in Frankfurt und München. Daneben besitzt die LHT eine Vielzahl weiterer Wartungsstationen in Deutschland, aber auch weltweit. Die LTL verantwortet die Versorgung aller Wartungsstandorte mit Ersatzteilen. Darüber hinaus ist die LTL an den beiden Hauptwartungszentren und an einigen Wartungsstationen mit Niederlassungen vertreten, um vor Ort verschiedene Logistikleistungen zu erbringen. Dazu gehören beispielsweise die Zusammenstellung benötigter Materialien für bestimmte Instandhaltungsarbeiten sowie der Betrieb von Werkzeugausgaben.

Die wichtigsten Überholungszentren der LHT befinden sich in Hamburg, aber auch in Ungarn, auf Malta, auf den Philippinen und in China. Aufgabe der LTL ist es, die Materialversorgung für Überholungsereignisse aus Deutschland heraus sicherzustellen. Am Überholungsstandort in Hamburg übernimmt die LTL über eine Niederlassung an diesem Standort eine Vielzahl weiterer Logistikleistungen wie z.B. den Materialtransport zwischen der Überholungshalle und den Reparaturwerkstätten.

Die Reparatur der Flugzeugkomponenten erfolgt schwerpunktmäßig am Standort Hamburg. Die für Reparaturen zuständigen Geschäftsbereiche werden von der LTL durch die Organisation und Optimierung der Reparaturkreisläufe unterstützt. Die Versorgung mit reparierten Komponenten umfasst neben den Wartungs- und

Überholungszentren vor allem Standorte von Kunden der LHT. Darüber hinaus verantwortet die LTL die Versorgung der LHT-Werkstätten mit Ersatzteilen für Reparaturen sowie die logistische Anbindung von Fremdwerkstätten, die Reparaturen an Komponenten im Auftrag der LHT durchführen.

Der Geschäftsbereich „VIP-Flugzeuge“ ist ebenfalls in Hamburg angesiedelt. Auch für diesen Geschäftsbereich übernimmt die LTL eine Vielzahl logistischer Dienstleistungen.

Über die LHT hinaus bedient die LTL noch eine Reihe weiterer Kunden der MRO-Branche mit maßgeschneiderten logistischen Dienstleistungen [14].

Da ein großer Teil der logistischen Prozesse in gleicher oder ähnlicher Form für alle Geschäftsbereiche der LHT durchgeführt wird, profitieren alle Kooperationspartner von Synergien und Größenvorteilen. Gleichzeitig bietet die vertikale Kooperation der LTL mit den einzelnen LHT-Geschäftsbereichen den Vorteil, gemeinsam Logistiklösungen entwickeln zu können, die passgenau auf die einzelnen Geschäftsbereiche zugeschnitten sind. Die LTL wiederum profitiert durch den Aufbau von Know-how im Bereich der MRO-Logistik. Dies stärkt ihre Position im Wettbewerb um weitere Kunden in der MRO-Branche.

4.2 Kooperationsmodell

Im Rahmen der Kooperation zwischen der Lufthansa Technik AG und der Lufthansa Technik Logistik GmbH wurde von der Lufthansa Technik Logistik GmbH ein Kooperationsmodell entwickelt, um die Zusammenarbeit zwischen den beiden Partnern weiter zu verbessern. Die Elemente dieses Kooperationsmodells sollen im Folgenden anhand der in Abschnitt 3.2 entwickelten Überlegungen analysiert werden. Grundsätzliche Aspekte der Kooperation werden dabei aus der Sicht beider Partner betrachtet. Die detaillierte Betrachtung des Kooperationsmanagements fokussiert die Aufgaben auf der Seite der LTL.

Hinsichtlich der *organisatorischen Verankerung* der Schnittstelle ist zunächst festzustellen, dass sich die Kooperation zwischen der LTL und der LHT nicht eindeutig in einen der vier von Christopher und Jüttner [2] identifizierten grundsätzlichen Typen des organisatorischen Aufbaus von Schnittstellen einordnen lässt. Die LTL bedient, wie oben beschrieben, sämtliche Geschäftsbereiche der LHT. Die logistischen Prozesse sind individuell auf die Anforderungen der verschiedenen Geschäftsbereiche zugeschnitten und unternehmensübergreifend ausgelegt. Dadurch finden sich auf operativer Ebene eng verzahnte Abläufe bzw. Geschäftsprozesse. Gemeinschaftliche Projektteams werden nach Bedarf zusammengestellt. Insofern sind die wesentlichen Elemente des vierten Kooperationstyps entsprechend [2] wiederzufinden. Beide Partner bilden das Spektrum von Unternehmensfunktionen selbstständig ab. Die Funktionen Einkauf auf der Seite der LHT und Key Account Management auf der Seite der LTL bilden ebenfalls einzelne organisatorische Einheiten. Sie übernehmen gemeinschaftlich das Management der Kooperation und bilden damit ein unternehmensübergreifendes Kooperationsmanagement.

Trotz des gemeinschaftlichen Managements der Kooperation sind dem Kooperationsmanagement auf den Seiten der LHT und der LTL zum Teil unterschiedliche *Aufgaben* zugeordnet, die sich aus deren unternehmensinternen Funktionen, Einkauf bzw. Key Account Management, ergeben. Der Fokus dieses Beitrags liegt, wie bereits eingangs dargestellt, auf der Untersuchung des Aufgabenspektrums für das Kooperationsmanagement auf der Seite der LTL. Während Gemünden und Walter [28] das Management einer Kooperation, wie oben geschildert, primär als temporäre Aufgabe sehen, ist das Kooperationsmanagement hier dauerhafter Bestandteil der Beziehung zwischen den beiden Unternehmen. Die Aufgaben des Kooperationsmanagements auf der Seite der LTL schließen einen großen Teil der klassischen Elemente eines Key Account Managements mit ein. Der Aufbau von Know-how über das Geschäft des Partners und die kooperative Entwicklung von Produkten und Leistungen stellt jedoch den Kern des Managements der Kooperation dar. Kernauftrag des Kooperationsmanagements auf der Seite der LTL ist die Ausrichtung ihrer Organisation und Produkte auf die Anforderungen und das Geschäft der LHT. Durch die intensive Kooperation mit der Ausrichtung der logistischen Dienstleistung auf die Produkte der LHT gewinnt die eigenständige Identifikation von Anforderungen an logistische Leistungen an Stellenwert. Das logistische Know-how auf der Seite der LTL erleichtert die Identifikation von Potenzialen durch Anpassung bestehender oder Etablierung neuer logistischer Dienstleistungen. Das Management der Kooperation hat damit eine für den gemeinsamen Geschäftserfolg wichtige Beratungsfunktion. Der Einsatz des logistischen Know-hows der LTL für den Kooperationspartner LHT stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor der Kooperation zwischen diesen beiden Unternehmen dar.

Ein weiterer Aspekt der Kooperation zwischen der LHT und der LTL sind die deutlich voneinander abweichenden Anforderungen der verschiedenen Geschäftsbereiche der LHT an die Logistik. Mit jedem der Geschäftsbereiche wird eine eigene, separate Kooperation aus der LTL heraus gepflegt. So ist das Kooperationsmanagement auf der Seite der LTL in der Lage, die unterschiedlichen logistischen Anforderungen individuell zu erfüllen und dennoch Synergien durch die Nutzung gemeinsamer fachlicher Ressourcen innerhalb der LTL auszuschöpfen (vgl. Abbildung 3).

Nach dem von der LTL entwickelten Kooperationsmodell sind dem Kooperationsmanagement auf der Seite der LTL im Detail folgende Aufgaben zugeordnet:

- Identifikation und Entwicklung lang- sowie mittelfristiger Logistikanforderungen aus den Geschäftsfeldstrategien und der Produktion der LHT-Geschäftsbereiche: Das Kooperationsmanagement der LTL nimmt eine Beratungsfunktion gegenüber den Geschäftsbereichen der LHT ein. Ziel ist es, das Angebot der logistischen Dienstleistungen der LTL direkt auf die jeweiligen Strategien der einzelnen Geschäftsbereiche der LHT auszurichten. Dafür ist ein tiefes Verständnis für das Geschäft und den Markt der LHT-Geschäftsbereiche notwendig. Für jeden Geschäftsbereich der LHT ist ein Kooperationsmanager auf der Seite der LTL langfristig verantwortlich. Dieser bündelt auf der einen Seite das logistische Know-how der LTL und beschäftigt sich auf der anderen Seite intensiv mit dem Geschäft des zugeordneten LHT-Geschäftsbereichs. Dadurch ist sichergestellt,

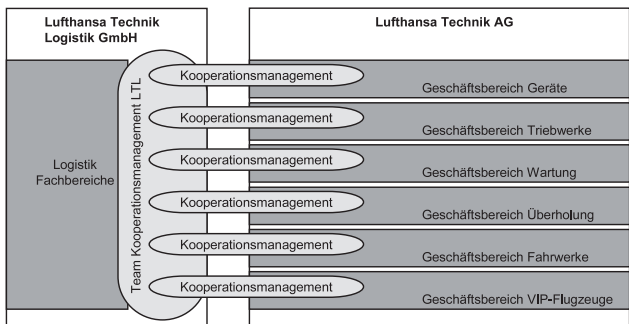


Abb. 3 Kooperationsmanagement zwischen der Lufthansa Technik AG und der Lufthansa Technik Logistik GmbH.

dass langfristige Trends auf der Seite der LHT erkannt werden können. Die LTL ist so in der Lage, frühzeitig auf Trends zu reagieren und das Angebot an logistischen Dienstleistungen proaktiv anzupassen.

- **Steuerung der Logistikanforderungen innerhalb der LTL:**
Zur Erfüllung neuer logistischer Anforderungen ist in der Regel das Know-how und die Mitarbeit verschiedener Fachabteilungen notwendig. Darüber hinaus existieren nahezu zu jedem Zeitpunkt mehrere unerfüllte Anforderungen über neue oder zu verändernde Leistungen. Dem Kooperationsmanagement kommt hier eine Koordinationsfunktion zu. Aufgaben sind zu priorisieren und je nach Schwerpunkt bestimmten Fachabteilungen zuzuordnen. Ferner sind ähnliche Anforderungen zu bündeln, um eine Doppelbearbeitung in verschiedenen Bereichen zu verhindern. Nur durch die zentral koordinierte Steuerung der Anforderungen können effizient ganzheitliche Logistiklösungen erstellt werden.
- **Management der Konzeption von Logistiklösungen:**
Werden Anforderungen des Kunden von Logistik-Fachbereichen durch Entwicklung und Veränderung von Leistungen und Prozessen bearbeitet, so ist die Übereinstimmung von Kundenanforderung und Leistungsangebot kontinuierlich zu überprüfen. Dies betrifft sowohl die fachlichen als auch die terminlichen Anforderungen. Auch diese Aufgabe obliegt dem Kooperationsmanagement.
- **Vereinbarung von Leistungen und Konditionen:**
Die Vereinbarung von Leistungen und Konditionen gehört zu den klassischen Aufgaben des Key Account Managements, aber auch zu den Kernaufgaben des Kooperationsmanagements. Aufgrund der Langfristigkeit der Partnerschaft besteht hier jedoch die Möglichkeit, grundsätzliche Vereinbarungen zu treffen und weniger Ressourcen für intensive Verhandlungen über einzelne Leistungen zu vergeuden.
- **Durchführung eines laufenden Performance- und Kostenmonitorings:**
Die Überprüfbarkeit von Leistungen und deren tatsächliche Überprüfung bilden die Basis für die langfristige Vertrauensbildung in einer Kooperation. Folglich stellt das Monitoring wesentlicher Indikatoren eine wichtige Aufgabe des Ko-

operationsmanagements dar. Insbesondere die Einhaltung von Voraussetzungen, die bestimmten Vereinbarungen zugrunde liegen, muss stetig überprüft werden.

- Eskalation akuter Probleme:
Neben den mittel- und langfristig ausgerichteten Aktivitäten treten auch akute Probleme auf, die unmittelbar die Kooperation betreffen. Ein Beispiel stellen Abstimmungsprobleme in unternehmensübergreifenden Projekten dar. Durch den Überblick über die Projektlandschaft und die Zuständigkeit der verschiedenen Fachabteilungen können Probleme durch das Kooperationsmanagement effizient in die verantwortlichen Bereiche weitergeleitet werden. Abzugrenzen von den akuten Problemen in der Kooperation sind akute Probleme in den operativen Abläufen. Diese können auch innerhalb einer Kooperation effizienter durch den Customer Service der LTL bearbeitet werden.
- Verankerung von logistisch relevanten Zielen aus den Geschäftsfeldstrategien der LHT in der LTL-Strategie:
Durch die starke Fokussierung auf den Partner LHT ist es von großer Bedeutung für die LTL, die Geschäftsfeldstrategie der einzelnen Bereiche im Rahmen der Ausrichtung der eigenen Strategie zu berücksichtigen. Das gebündelte Wissen über die Strategie der Geschäftsbereiche der LHT liegt innerhalb der LTL bei dem jeweiligen Kooperationsmanager für diesen Bereich. Eine weitere Aufgabe der Kooperationsmanager besteht daher in der Verankerung der für die Logistik relevanten Aspekte der LHT-Geschäftsbereichsstrategien in der LTL-Gesamtstrategie.

Innerhalb der in der allgemeinen Darstellung aufgeführten Freiheitsgrade lässt sich das Kooperationsmanagement der LTL wie in Abbildung 4 gezeigt einordnen. Hinsichtlich dieser Freiheitsgrade lässt sich festhalten, dass die reaktive Behandlung

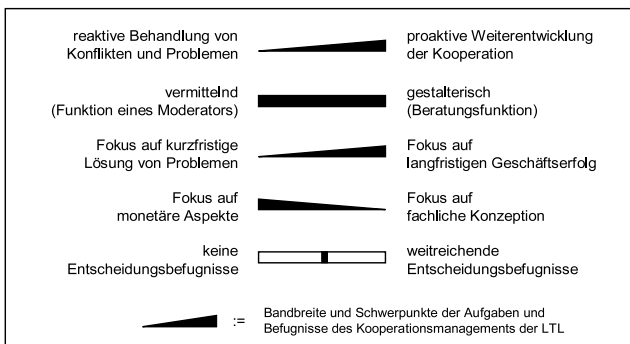


Abb. 4 Positionierung des Kooperationsmanagements der Lufthansa Technik Logistik GmbH.

von Problemen der Kooperation grundsätzlich vom Kooperationsmanagement geleistet werden muss. Der Fokus liegt jedoch in der proaktiven Weiterentwicklung der Kooperation. Dennoch decken die Aufgaben das gesamte Spektrum zwischen einer rein vermittelnden Tätigkeit bis hin zu einer beratenden Funktion ab. Der Schwer-

punkt liegt dabei klar auf dem langfristigen Geschäftserfolg und weniger stark auf der kurzfristigen Lösung von Problemen. Im Fokus des Kooperationsmanagements stehen ferner monetäre Aspekte. Um Leistungen und Lösungen sinnvoll im Rahmen der Kooperation vorantreiben zu können, muss das Kooperationsmanagement allerdings auch einen Überblick über die relevanten fachlichen Konzeptionen besitzen. Erst dadurch wird es in die Lage versetzt, Anforderungen im Rahmen der Kooperation zu priorisieren und Einzelmaßnahmen aufeinander abzustimmen und so die Zusammenarbeit kontinuierlich zu verbessern.

Das hier entwickelte Kooperationsmodell unterstützt effektiv die in [25] herausgestellten und in Abschnitt 3.2 beschriebenen wesentlichen Aspekte der Qualität von Kooperationen bzw. der SCRQ. Der Grundstein für die Qualität der Beziehung zwischen der LTL und der LHT ist dabei der Aspekt der Institutionalisierung der Kooperation. Erst durch die explizite Positionierung des Kooperationsmanagements in der Organisation und die Gestaltung von Kooperationsprozessen wird in den Partnerunternehmen eine stabile Kooperationskompetenz geschaffen. Diese wiederum bildet die Basis für die Nutzung und das bewusste Leben der Kooperation in den Fachabteilungen. Der Aspekt der Kommunikation ist fester Bestandteil der Kooperationsprozesse. Durch die klare Verankerung in Prozessen und die damit verbundenen eindeutigen Kommunikationswege kann die Effizienz der Kommunikation zwischen den Partnern erheblich gesteigert werden. Auch das Vertrauensverhältnis zwischen den Partnern wird durch die Institutionalisierung der Kooperation und die damit verbundene Regelmäßigkeit der Zusammenarbeit gestärkt und ermöglicht in der Folge eine Stimmung zwischen den Partnern, die eine konstruktive Zusammenarbeit erlaubt. Ein für die Beziehung zwischen der LTL und der LHT besonders wichtiger Aspekt ist darüber hinaus die bereits im Kontext des organisatorischen Konzernaufbaus aufgezeigte Anpassung der Partner aneinander. Die LTL hat ihr Leistungsangebot nicht nur speziell auf den Kunden LHT zugeschnitten, sie bietet sogar jeweils spezielle Leistungen für die Anforderungen der einzelnen Geschäftsbereiche des Partners an. Diese Ausrichtung der LTL auf die differenzierten Anforderungen des Kooperationspartners trägt einen erheblichen Anteil an der hohen Qualität der Kooperation.

4.3 Ausgestaltung der Leistungsbeziehung

Vertragliche Grundlage der Leistungsbeziehung zwischen der LTL und der LHT ist ein umfassendes Leistungsverzeichnis. Dieses regelt die Zusammenarbeit der beiden Unternehmen und beschreibt sämtliche Leistungen, die die LTL für die LHT erbringt. Im Mittelpunkt der vertraglichen Regelung stehen der individuelle Zuschnitt der Vereinbarungen auf die Geschäftsbereiche, eine hohe Transparenz sowie eine flexible Erweiterbarkeit der Vereinbarungen.

Das Leistungsverzeichnis besteht aus zwei Säulen, einem allgemeinen Teil, der für alle Geschäftsbereiche der LHT Gültigkeit besitzt, und geschäftsbereichsspezifischen Leistungsvereinbarungen. Im allgemeinen Teil sind zum einen Rahmen-

bedingungen beschrieben und zum anderen diejenigen Leistungen, die für mehrere LHT-Geschäftsbereiche gleichermaßen erbracht werden. Zu den Rahmenbedingungen zählen die Laufzeit und Kündigungsregelungen sowie Teile des Kooperationsmodells. Beispiele für nicht geschäftsbereichsspezifische Leistungen sind die Erstellung von Transportkonzepten und der Betrieb von Lagern.

Die geschäftsbereichsspezifischen Leistungen sind entsprechend dem in Abbildung 5 dargestellten Aufbau strukturiert.

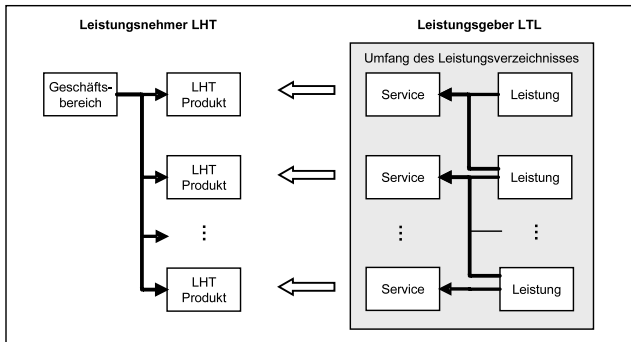


Abb. 5 Struktur der geschäftsbereichsspezifischen Leistungen des Leistungsverzeichnisses.

Ausgangspunkte der Vertragsstruktur sind die MRO-Produkte, die die LHT-Geschäftsbereiche ihren Kunden am Markt anbieten. Jedem dieser Produkte stehen auf der Seite der LTL ein oder mehrere spezifische Services gegenüber. Diese Services bündeln alle logistischen Leistungen, die für die Erstellung des jeweiligen LHT-Produktes erforderlich sind. Beispielsweise ist dem Produkt TCS® des Geschäftsbereichs „Geräte“ der Service „Gerätelogistik Pool“ zugeordnet. Ein anderes Beispiel ist die Zuordnung der Services „Standortlogistik an den Hauptwartungszentren“ und „Anbindung der Wartungsstationen“ zu den Dienstleistungen des Geschäftsbereichs „Wartung“.

Für jede Leistung, die in einen oder mehrere Services eingeht, sind die einzelnen Bestandteile und Parameter detailliert beschrieben. Zu den Parametern einer Leistung zählen Vereinbarungen über Cut-Off-Zeiten, Durchlaufzeiten, Servicezeiten und Servicelevel. Ergänzend ist je Leistung, verpflichtend für den Leistungsnehmer, der Beauftragungsprozess dokumentiert. Auch die Parameter für die Messung und Überprüfung von Leistungen sind in den Leistungsbeschreibungen definiert. Beispielsweise sind Orte und Typen von Zeitstempeln, als Grundlage für die Leistungsmessung, detailliert beschrieben. Diese bilden die Basis für ein geschäftsbereichsspezifisches Reporting.

Der in Abschnitt 3.3 beschriebene Aspekt der Aufteilung von Kooperationsvorteilen spielt im Leistungsverzeichnis eine untergeordnete Rolle. Die Verrechnung der Leistungen zwischen den Kooperationspartnern erfolgt über einfache Abrechnungsgrößen, deren Definition sich an den Produkten und Geschäftsbereichen der

LHT orientiert. Die Bewertung dieser Größen mit Preisen erfolgt regelmäßig im Rahmen von Verhandlungen auf der Ebene des Kooperationsmanagements.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Struktur des Leistungsverzeichnisses konsequent auf die Produkte und Geschäftsbereiche der LHT ausgerichtet ist. Der entscheidende Vorteil der dargestellten modularen Struktur des Leistungsverzeichnisses liegt darin, dass Änderungen bestehender und die Aufnahme neuer Leistungen auf einfache Weise in das Vertragswerk integriert werden können. Die Weiterentwicklung der logistischen Leistungen im Rahmen der Zusammenarbeit sowie die Definition und die vertragliche Vereinbarung der Leistungen durch das Kooperationsmanagement werden dadurch wirkungsvoll unterstützt. Die Kooperationspartner profitieren ferner von der Transparenz der Vereinbarung, die durch die klare Zuordnung von Leistungen zu Produkten der LHT erreicht wird.

5 Fazit

Reibungslose Abläufe zwischen Supply Chain Partnern bilden die Quelle für Effizienzgewinne und weitere gemeinsame Vorteile aus der Zusammenarbeit. Die Qualität der partnerübergreifenden Prozesse wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren verschiedener Fachrichtungen bestimmt und aus ebenso vielen unterschiedlichen Forschungsrichtungen betrachtet. Voraussetzung für die Realisierung von Vorteilen aus einer Kooperation ist jedoch in jedem Fall das Funktionieren der Kooperation auf der Ebene der persönlichen Beziehung zwischen den Partnern. Ohne den grundsätzlichen Willen zur Zusammenarbeit auf dieser Ebene und ein gemeinsames Verständnis darüber, wie diese Zusammenarbeit zu koordinieren ist, lässt sich das Potenzial einer Partnerschaft nur in geringem Maß ausschöpfen.

In diesem Beitrag wurde dargestellt, welche wesentlichen Aspekte im Rahmen der Etablierung und der dauerhaften Fortführung einer Partnerschaft zu beachten sind und durch welche Faktoren die Qualität dieser Beziehung beeinflusst werden kann. In Ergänzung der theoretischen Darstellung wurde die Gestaltung der Kooperation zwischen der Lufthansa Technik Logistik GmbH und der Lufthansa Technik AG aufgezeigt. An diesem Beispiel aus einem relativ komplexen Geschäftsfeld wird das grundsätzliche Potenzial einer Zusammenarbeit, in diesem Fall zwischen einem Anbieter von MRO-Leistungen und einem Logistikdienstleister, sehr deutlich. Entsprechend hoch ist der Stellenwert einer reibungslosen Zusammenarbeit zwischen den Partnern. Die vertragliche Regelung der Leistungen und Konditionen zwischen der LHT und der LTL bildet einen Grundstein für die Qualität der Leistungsbeziehung. Darüber hinaus stellt das hier vorgestellte Kooperationsmodell einen vielversprechenden Ansatz dar, die Zusammenarbeit zwischen diesen beiden Partnern nachhaltig zu verbessern.

Literaturverzeichnis

1. Bernardes, E.S., Zsidisin, G.A.: An examination of strategic supply management benefits and performance implications. *Journal of Purchasing & Supply Management* 14 (2008) 209–219
2. Christopher, M., Jüttner, U.: Developing strategic partnerships in the supply chain: a practitioner perspective. *European Journal of Purchasing & Supply Management* 6 (2000) 117–127
3. Cooper, M.C., Ellram, L.M.: Characteristics of supply chain management and the implications for purchasing and logistics strategy. *The International Journal of Logistics Management* 4(2) (1993) 13–22
4. Ewert, R., Wagenhofer, A.: *Interne Unternehmensrechnung*. Springer, Berlin (2002)
5. Fleischmann, B.: Kooperation von Herstellern in der Konsumgüterdistribution. In: Engelhard, J., Sinz, E. (Hrsg.): *Kooperation im Wettbewerb*. Gabler, Wiesbaden (1999) 167–186
6. Gemünden, H., Walter, A.: The relationship promoter – key role for inter-organization innovation process. In: Sheth, J., Partratiyer, A. (Hrsg.): *Relationship Marketing: Theory, Methods and Applications*. Emory University, Center for Relationship Marketing, Atlanta (1994)
7. Handfield, R.B., Nichols, E.L.: *Introduction to Supply Chain Management*. Prentice-Hall, Upper Saddle River (1999)
8. Houlihan, J.B.: International supply chain management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management* 15(1) (1985) 22–38
9. Jones, T.C., Riley, D.W.: Using inventory for competitive advantage through supply chain management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management* 15(5) (1985) 16–26
10. Kilger, C., Reuter, B., Stadler, H.: Collaborative Planning. In: Stadler, H., Kilger, C. (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer, Berlin, (2008) 263–284
11. KLM Engineering & Maintenance: <http://www.klm.com/engineeringmaintenance/site/en/index.html> [24.02.2009]
12. Lufthansa Technik AG: Die Geschäftsfelder der Lufthansa Technik. http://www.lufthansa?technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?_nfpb=true&_pageLabel=Template15&requestednode=17&node=17&action=initial [24.02.2009]
13. Lufthansa Technik AG: *Jahresbericht 2007* (2008)
14. Lufthansa Technik Logistik GmbH: *Produkte & Services*. http://www.lufthansa.com/online/portal/lh_ltl/de/products_services?l=de&cid= [24.02.2009]
15. Lufthansa Technik AG: The new standard in component support. *Connection – The Lufthansa Technik Group Magazine. Special Edition Total Material Operations* (2006)
16. Lufthansa Technik AG: *Total Operations Management*. http://www.lufthansa?technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?_nfpb=true&_pageLabel=Template5_6&requestednode=66&node=66&action=initial [24.02.2009]
17. Lufthansa Technik AG: *Total Component Support TCS*. http://www.lufthansa-technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?_nfpb=true&_pageLabel=Template5_6&requestednode=214&node=214&action=initial [24.02.2009]
18. Minner, S.: Modellgestützte Ermittlung und Verteilung von Kooperationsvorteilen in der Logistik. In: Spengler, T., Voß, S., Kopfer, H. (Hrsg.): *Logistik Management*. Physica, Heidelberg (2003) 111–132
19. Pfohl, H.-C., Trumppfeller, M.: Stellenwert der Ersatzteillogistik in der Luftfahrt. *Thema Forschung* 3 (2005) 40–44
20. Reuter, B., Rohde, J.: Coordination and Integration. In: Stadler, H., Kilger, C. (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer, Berlin, (2008) 247–262
21. Riebel, P.: *Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung*. Gabler, Wiesbaden (1994)
22. SR Technics Group: *Integrated Solutions*. <http://www.srtechnics.com/cms/index.asp?TopicID=122> [25.02.2009]

23. Stevens, G.C.: Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 19(8) (1989) 3–8
24. Steven, M., Krüger, R.: Internationale Logistik: Vom internationalen Gütertransfer zum globalen Supply Chain Management. In: Sebastian, H.-J., Grünert, T. (Hrsg.): *Logistik Management – Supply Chain Management und e-Business*. Teubner, Stuttgart (2001) 31–40
25. Su, Q., Song, Y.-T., Li, Z., Dang, J.-X.: The impact of supply chain relationship quality on cooperative strategy. *Journal of Purchasing & Supply Management* 14 (2008) 263–272
26. Tsay, A.A., Nahmias, S., Agrawal, N.: Modeling supply chain contracts: A review. In: Tayur, S., Ganeshan, R., Magazine, M. (Hrsg.): *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer, Boston (1999) 300–336
27. Voß, S., Schneidereit, G.: Interdependencies between supply chain contracts and transaction costs. In: Seuring, S., Goldbach, M. (Hrsg.): *Cost Management in Supply Chains*. Physica, Heidelberg (2002) 253–272
28. Walter, A., Hölzle, K., Ritter, T.: Relationship functions and customer trust as value creators in relationships. In: *Proceedings of the Eighteenth IMP-Conference, Dijon (2002)*
29. Zäpfel, G., Wasner, M.: Logistische Planungsprobleme in kooperativen Transportnetzwerken für Sammelgutspeeditionen. In: Kaluza, B., Blecker, T. (Hrsg.): *Produktions- und Logistikmanagement in Virtuellen Unternehmen und Unternehmensnetzwerken*. Springer, Berlin (2000) 321–344
30. Zimmer, K.: *Koordination im Supply Chain Management*. Gabler, Wiesbaden (2001)

Revenue Management bei Auftragsfertigung – Ein Ansatz zur Kapazitätssteuerung

Eric Sucky

Zusammenfassung Erfolgt die Inanspruchnahme von Leistungen (Konsumption) und ihre Produktion simultan, sodass keine Vorratsproduktion möglich ist und übersteigt die erwartete Nachfrage die vorhandene Kapazität und lassen sich für die weitgehend homogenen Leistungen unterschiedliche Preise erzielen, so muss bereits vor Auftragseingang entschieden werden, wie die vorhandene Kapazität zielorientiert genutzt werden soll. Dieses Entscheidungsproblem ist Gegenstand des Revenue Managements. Der Beitrag fokussiert auf Revenue Management in der kundenindividuellen Sachgüterproduktion. Unter Beachtung der verfügbaren knappen Kapazität und der erwarteten Nachfrage ist so über die Annahme oder Ablehnung eingehender Aufträge zu entscheiden, dass der erwartete Gewinn maximiert wird. Ziel des Beitrages ist es, auf der Basis eines einfachen Ansatzes zur Kapazitätssteuerung, das Einsatzpotenzial von Revenue Management in der kundenindividuellen Sachgüterproduktion zu analysieren.

1 Einleitung

Erfolgt die Inanspruchnahme von Leistungen (Konsumption) und ihre Produktion simultan, sodass keine Vorratsproduktion möglich ist und übersteigt die erwartete Nachfrage die vorhandene Kapazität und lassen sich für die weitgehend homogenen Leistungen unterschiedliche Preise erzielen, so muss bereits vor Auftragseingang entschieden werden, wie die vorhandene Kapazität zielorientiert genutzt werden soll. Auf dieses Entscheidungsproblem¹ fokussiert das Revenue Management. Nach

Eric Sucky

Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Produktion und Logistik, Feldkirchenstr. 21, 96052 Bamberg, GERMANY
E-mail: eric.sucky@uni-bamberg.de

¹ Das betrachtete Entscheidungsproblem betrifft im Kern die Auftragsselektion bei Unsicherheit, welche beispielsweise bereits von [28, 45, 54] betrachtet wurde.

Klein umfasst Revenue Management „[...] eine Reihe von quantitativen Methoden zur Entscheidungsunterstützung über Annahme oder Ablehnung unsicherer, zeitlich verteilt eintreffender Nachfrage unterschiedlicher Wertigkeit. Dabei wird das Ziel verfolgt, die in einem begrenzten Zeitraum verfügbare, unflexible Kapazität möglichst effizient zu nutzen.“²

Revenue Management entstand Ende der 1970er Jahre als Reaktion auf die Deregulierung des US-amerikanischen Luftverkehrs. Die in Folge der Deregulierung ausgelösten Preiskämpfe führten dazu, dass *American Airlines* als erste Fluggesellschaft das Instrument der Preisdifferenzierung nutzte. Zugleich wurden weitere Planungsinstrumente entwickelt. Neben der Weiterentwicklung bestehender Prognose-systeme – welche vor allem zur zielgerichteten Überbuchung eingesetzt wurden – ist insbesondere die Kapazitätssteuerung als Instrument zur Annahme bzw. Ablehnung von Anfragen unter Beachtung beschränkter Kapazität entwickelt worden.³ Aufgrund des Erfolgs von Revenue Management in der Luftverkehrsindustrie ist auch die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Revenue Management stark auf dieses Anwendungsgebiet fokussiert (vgl. z.B. [52, 4, 57].) So identifizieren Chiang et al. [15, S. 101] 49 wissenschaftliche Arbeiten im Zeitraum 2000 – 2006 zum Revenue Management bei Fluggesellschaften. Weitere Schwerpunkte von Revenue Management – auch in der wissenschaftlichen Diskussion – bilden unterschiedliche Bereiche der Dienstleistungsindustrie wie Hotels (vgl. z.B. [46, 6, 5, 43]) und Restaurants, Autovermietungen (vgl. z.B. [22, 11]), Reiseanbieter (vgl. z.B. [74]) sowie Dienstleistungen im Bereich Kultur- und Sportveranstaltungen (vgl. z.B. [38]), Messen oder Personen- und Gütertransport (vgl. [2, 10, 63, 16, 30]).⁴

Neben den klassischen Anwendungsgebieten im Dienstleistungsbereich ist Revenue Management auch für alle Unternehmen mit Auftragsfertigung relevant, die aufgrund beschränkter Kapazität zwischen Annahme oder Ablehnung eintreffender Aufträge entscheiden müssen, ohne den zukünftigen Nachfrageverlauf sicher zu kennen [35, S. 248]. In diesem Sinne führen Talluri und van Ryzin [64, S. 574] aus: “There is significant interest in applying [Revenue Management] in manufacturing.”.

Der vorliegende Beitrag fokussiert auf Revenue Management in der kundenindividuellen Sachgüterproduktion. Wie in den oben genannten Dienstleistungs-bereichen müssen auch bei der kundenindividuellen Sachgüterproduktion regelmäßig Entscheidungen über die Annahme oder Ablehnung eingehender Kundenaufträge getroffen werden. Da der Leistungserstellungsprozess bei kundenindividueller Produktion erst durch eingehende, angenommene Kundenaufträge initiiert wird, resultiert somit eine kundenorientierte, stochastische, operative Produktionsprogramm-

² Siehe [35, S. 248]. Zu möglichen Definitionen des Begriffs Revenue Management vgl. z.B. [36, S. 6-7] oder [18, S. 5-7].

³ Vgl. [34, S. 2]. Zu einem ausführlichen Überblick zur historischen Entwicklung des Revenue Managements vgl. z.B. [7].

⁴ Vgl. [15], [64, Kap. 10] und [69, S. 649-652]. Chiang et al. [15, S. 100] bezeichnen Fluggesellschaften, Hotels und Autovermietungen als “[...] three major traditional applications of revenue management”.

planung [49, S. 12], welche durch den Einsatz des Instruments der Kapazitätssteuerung unterstützt werden kann.

Bei kundenindividueller Sachgüterproduktion besteht die Aufgabe der Kapazitätssteuerung darin, unter Beachtung der verfügbaren knappen Kapazität und der erwarteten Nachfrage, so über die Annahme oder Ablehnung eingehender Aufträge zu entscheiden, dass ein möglichst hoher Deckungsbeitrag erzielt wird. Im Folgenden werden zunächst kurz die Instrumente und Anwendungsvoraussetzungen von Revenue Management vorgestellt und dessen Einsatzpotenzial in der kundenindividuellen Sachgüterproduktion heraus gearbeitet. Darauf aufbauend wird ein einfacher Ansatz zur Kapazitätssteuerung bei Auftragsfertigung entwickelt. Unter Anwendung dieses Ansatzes gelingt eine zielgerichtete Kapazitätskontingentierung als Basis zur Entscheidung über Annahme oder Ablehnung unsicherer, zeitlich verteilt eintreffender Aufträge. Auf der Basis dieses Ansatzes gelingt es aber insbesondere, grundsätzliche Hemmnisse des Revenue Managements in der kundenindividuellen Sachgüterproduktion zu identifizieren.

2 Grundlagen des Revenue Managements

Die Aufgabe des Revenue Managements besteht zunächst darin, geeignete Instrumente bereitzustellen, damit die in einem begrenzten Zeitraum verfügbare Kapazität möglichst effektiv genutzt werden kann. Im Folgenden werden zunächst die Preisdifferenzierung⁵ und die Kapazitätssteuerung⁶ als wichtigste Instrumente des Revenue Managements vorgestellt. Als weitere Instrumente des Revenue Managements können die Prognose und Überbuchungen genannt werden.

Die Prognose bildet durch die Bestimmung von Zahlungsbereitschaften und Nachfragequantitäten die Basis sowohl für die Preisdifferenzierung als auch für die Kapazitätssteuerung und wird daher nicht als originäres Instrument des Revenue Managements angesehen [34, S. 13], [15, S. 109-111]. Die gezielte Überbuchung der vorhandenen Kapazität wird im Rahmen der Dienstleistungsproduktion eingesetzt, da es zu Stornierungen und so genannten „no-shows“ kommen kann. Da dies i.d.R. bei kundenindividueller Sachgüterproduktion nicht der Fall ist, wird dieses Instrument nicht näher betrachtet.⁷

Es kann zwischen segmentorientierter und mengenorientierter Preisdifferenzierung unterschieden werden. Während bei mengenorientierter Preisdifferenzierung der Durchschnittspreis je Produkteinheit aufgrund von z.B. Mengenrabatten ab-

⁵ Da die Preisdifferenzierung ein originäres Instrument der Preispolitik und damit des Marketings ist, werden nur die zum Verständnis der weiteren Ausführungen notwendigen Grundlagen dargestellt. Zur Preisdifferenzierung vgl. z.B. [48, S. 396-400].

⁶ Während die Instrumente der Preisdifferenzierung, Prognose und Überbuchung bereits vor Entwicklung und Einführung des Revenue Managements eingesetzt wurden, bildet die Kapazitätssteuerung die eigentliche Neuerung und damit das Kernelement des Revenue Managements. Vgl. [34, S. 2].

⁷ Vgl. zum Instrument der Überbuchung z.B. [24, 14, 68, 29].

hängig ist von der Abnahmenmenge, erfolgt bei segmentorientierter Preisdifferenzierung eine Unterteilung der Nachfrager in Segmente mit unterschiedlicher Bepreisung. Weitgehend homogene Produkte werden den einzelnen Segmenten dann zu unterschiedlichen Preisen angeboten [26]. Gelingt die Gruppierung der Nachfrager in unterschiedliche Segmente mit segmentspezifischer Bepreisung,⁸ wird – gegenüber eines Einheitspreises – zusätzliche Nachfrage generiert und die Abschöpfung zusätzlicher Konsumentenrente realisiert (vgl. Abbildung 1).

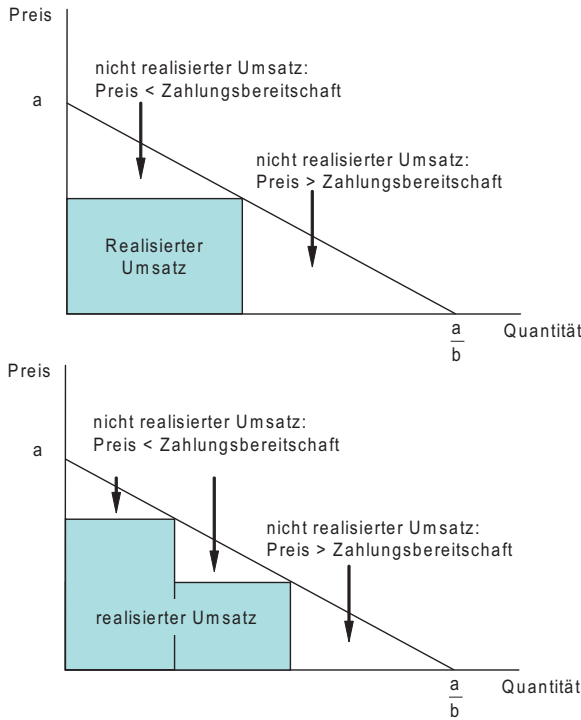


Abb. 1 Wirkung der Preisdifferenzierung.

Eine Preisdifferenzierung ist jedoch nur dann wirksam, wenn Nachfrager aus höherpreisigen Segmenten nicht in niedrige Preissegmente wechseln können. Um die Unwirksamkeit der Preisdifferenzierung zu verhindern sind daher Wechselbarrieren einzurichten, so genannte Fences. Diese Abgrenzung – Fencing – gelingt bei Flug- oder Bahnreisen z.B. über Vorausbuchungsfristen, Stornierungsgebühren oder Umbuchungsmöglichkeiten. So ergibt sich für eine Bahnfahrt Frankfurt – Köln eine Ersparnis von über 50%, wenn Zugbindung in Kauf genommen wird und auf

⁸ Je nachdem, ob geographische, zeitabhängige oder nachfragerspezifische Kriterien zur Segmentierung herangezogen werden, kann die segmentorientierte Preisdifferenzierung in eine räumliche, zeitliche oder personenbezogene Preisdifferenzierung unterteilt werden. Vgl. hierzu z.B. [26].

die Möglichkeit des Umtauschs bzw. der Stornierung verzichtet wird (vgl. Abbildung 2).

Reisedaten 1 Erwachsener, 2. Klasse						
Hinfahrt	Bahnhof/Haltestelle	Datum	Zeit	Dauer	Umst.	Produkte
	Frankfurt(Main)Hbf	Do, 29.01.09	ab 10:10	1:30	0	ICE
	Köln Hbf	Do, 29.01.09	an 11:40			
<input checked="" type="checkbox"/>	Dauer-Spezial	Zugbindung. Umtausch und Erstattung ausgeschlossen. Begrenztes Fahrkartenkontingent, Vorkaufsfrist bis spätestens 3 Tage vor Reisetag.				29,00 EUR
<input checked="" type="checkbox"/>	Normalpreis	Volle Flexibilität (keine Zugbindung). Umtausch und Erstattung vor dem 1. Geltungstag kostenfrei, Umtausch und Erstattung ab dem 1. Geltungstag 15 EUR.				63,00 EUR

Abb. 2 Preisdifferenzierung bei Bahnfahrten (Quelle: www.bahn.de).

Fences leiten sich i.d.R. aus der Unterscheidung zwischen Geschäftsreisenden und Privatreisenden ab. Hierbei wird angenommen, dass Geschäftsreisende, die kurzfristig buchen und Umbuchungs- und Stornierungsmöglichkeiten häufig nutzen, eine höhere Zahlungsbereitschaft aufweisen als Privatkunden [69, S. 632]. Im Rahmen der Kapazitätssteuerung ist unter Beachtung der verfügbaren Kapazität und der erwarteten Nachfrage so über die Annahme oder Ablehnung eingehender Aufträge zu entscheiden, dass ein möglichst hoher Umsatz erzielt wird.⁹ Zur Lösung dieses Entscheidungsproblems erfolgt eine Kapazitätskontingentierung, d.h. die verfügbare Gesamtkapazität wird auf die Preissegmente aufgeteilt. Hierbei kann zwischen einfachen und geschachtelten Buchungslimits unterschieden werden. Bei einfachen Buchungslimits wird für jede Preisklasse eine bestimmte Kapazität fest reserviert (vgl. Abbildung 3).¹⁰ Geht ein Auftrag ein, ist zu prüfen, ob noch genügend Kapazität dieser Preisklasse vorhanden ist. Bei geschachtelten Buchungslimits (nested booking limits) können Aufträge höherer Preisklassen auf die Kapazitätskontingente niedriger Preisklassen zugreifen.

Die Kapazitätssteuerung stellt ein stochastisch dynamisches Entscheidungsproblem dar. Geht ein Auftrag für eine bestimmte Preisklasse ein, so muss unter Beachtung der (noch) verfügbaren Kapazität als auch unter Beachtung der noch zu erwartenden Nachfrage schon bei Auftragsseingang (real-time) entschieden werden, ob der Auftrag angenommen oder abgelehnt wird. Hierbei sind zum Entscheidungszeitpunkt die zukünftigen Auftragsgänge unsicher. Erfolgt eine Auftragsannahme, so ändert sich aufgrund der durch die Auftragsannahme reduzierten, noch verfügbaren Kapazität die Entscheidungssituation. Des Weiteren sind die einzelnen Kapazitätskontingente so festzulegen, dass einerseits Umsatzverluste vermieden werden, die dann entstehen, wenn Aufträge niedriger Preisklassen abgelehnt werden, in der

⁹ Die Approximation der Gewinnmaximierung durch das Ziel der Umsatzmaximierung ist sinnvoll, wenn hohen Fixkosten vernachlässigbare variable Kosten gegenüber stehen. Dies ist z.B. in der Luftverkehrsindustrie gegeben.

¹⁰ Vgl. zu möglichen Kapazitätskontingentierungen [58, S. 58-60].

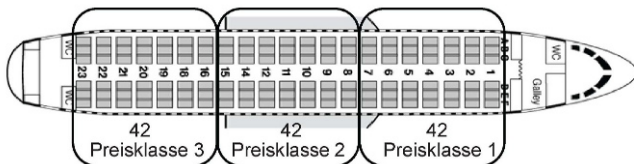


Abb. 3 Einfache Buchungslimits bei Flugtickets

Hoffnung, dass noch Aufträge für höhere Preisklassen eintreffen, diese aber ausbleiben. Andererseits ist eine Umsatzverdrängung zu vermeiden. Diese entsteht, wenn zu viele Aufträge niedriger Preisklassen angenommen werden und später Aufträge höherer Preisklassen aus Kapazitätsgründen abgelehnt werden müssen. Es ist ein stochastisch dynamisches Mehrzielproblem mit konkurrierenden Zielbeziehungen zu lösen.

Für einen erfolgreichen Einsatz des Revenue Managements müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein (vgl. z.B. [33, 71, 27, 21, 70, 18, 34]).¹¹ Insbesondere müssen weitgehend fixe, d.h. kurzfristig nicht anpassbare Kapazitäten vorliegen, die bezogen auf die erwartete Nachfrage knapp sind.¹² Die Nachfrage wiederum muss heterogen sein, damit eine Preisdifferenzierung gelingt. Schließlich muss die Leistungserstellung die Integration eines externen Faktors (der Nachfrager selbst oder eines seiner Verfügungsobjekte) erfordern, d.h. eine Vorratsproduktion ist ausgeschlossen.¹³ Diese Anwendungsvoraussetzungen werden auch bei Auftragsfertigung erfüllt, auf die im Weiteren fokussiert wird.

3 Revenue Management bei kundenindividueller Produktion

Eine kundenindividuelle Sachgüterproduktion – purchase-to-order, make-to-order und assemble-to-order – liegt vor, wenn die Produktionsauslösung für das Endprodukt individuell und zeitlich nach Kundenauftragseingang erfolgt. Die kundenindividuelle Sachgüterproduktion weist weitreichende Parallelen zur Dienstleistungsproduktion auf. Es wird lediglich die Bereitschaft angeboten, eine bestimmte Leistung zu erbringen. Die Leistungserstellung als solche wiederum bedingt die Integration eines externen Faktors, welcher sich in einem konkreten Kundenauftrag manifestiert. Eine Vorratsproduktion ist somit (zumindest auf Endproduktenebene) nicht möglich. Da der Leistungserstellungsprozess bei kundenindividuel-

¹¹ Zu einer ausführlichen Darstellung der Anwendungsvoraussetzungen siehe [36, S. 8-18].

¹² Zehle spricht in diesem Zusammenhang explizit von dem „Verderb ungenutzter Kapazitäten“ [75, S. 489]. Ist die Kapazität nicht knapp, besteht kein Auswahlproblem und es können sämtliche, sich lohnende Aufträge angenommen werden.

¹³ Bei Vorratsproduktion sind Nachfrageschwankungen über Lagerbestände abfangbar.

ler Sachgüterproduktion durch eingehende, angenommene Kundenaufträge initiiert wird, resultiert eine dynamische, kundenorientierte, stochastische, operative Produktionsprogrammplanung [49, S. 12].

Das Einsatzpotenzial von Revenue Management im Rahmen der kundenindividuellen Sachgüterproduktion betonen Specht und Groß [58, 59, 60] und Kroll [40].¹⁴ Empirische Ergebnisse zur Verbreitung von Revenue Management präsentieren [41, 39].¹⁵ Kniker und Burman [37], Kuhn und Defregger [42] und Defregger und Kuhn [19] ermitteln die Auftragsannahmepolitik mit einem Markov-Entscheidungsprozess. Spengler und Rehkopf [62], Rehkopf und Spengler [50], Rehkopf [49] und Spengler et al. [61] verwenden die Bid Price Control Methode¹⁶ zur Kapazitätssteuerung in der Eisen- und Stahlindustrie. Groß [23] präsentiert einen Ansatz des Revenue Managements im Rahmen der Produktion und Distribution von Neuwagen. Weitere Anwendungen von Revenue Management in der Sachgüterproduktion zeigen [25, 1, 3, 9, 72].

Im Weiteren wird ein Ansatz der Kapazitätssteuerung entwickelt, der auf dem Konzept einfacher Buchungslimits (vgl. Abbildung 3) basiert. Dieser Ansatz zeichnet sich einerseits durch seine einfache Implementierungsfähigkeit in der Unternehmenspraxis aus. Andererseits lassen sich anhand dieses Ansatzes konkrete Anwendungsprobleme des Revenue Managements in der Sachgüterproduktion herausarbeiten, die in der bisherigen wissenschaftlichen Diskussion noch nicht beachtet wurden.

3.1 Ein Ansatz der Kapazitätssteuerung bei kundenindividueller Produktion

Im Rahmen der Kapazitätssteuerung ist unter Beachtung der verfügbaren Kapazität und der erwarteten Nachfrage so über die Annahme oder Ablehnung eingehender Aufträge zu entscheiden, dass ein möglichst hoher Deckungsbeitrag erzielt wird.¹⁷ Es wird zunächst ein Grundmodell zur Kapazitätskontingentierung darge-

¹⁴ Zu einer ausführlichen Diskussion der Erfüllung der Anwendungsvoraussetzungen in der Sachgüterproduktion am Beispiel der Automobilindustrie vgl. [23, S. 44–53].

¹⁵ Während Kolisch/Zatta [39] insbesondere die chemische Industrie, die Erdölindustrie und die Pharmaindustrie als besonders erfolgversprechende Einsatzorte für Revenue Management identifizieren, zeigt die Studie von Kuhn/Defregger [41], dass in der deutschen Papier-, Stahl- und Aluminiumindustrie Revenue Management zwar wenig verbreitet ist, die Anwendungsvoraussetzungen aber erfüllt sind.

¹⁶ Der Bid Price repräsentiert den dynamischen Mindestpreis der noch verfügbaren Kapazität. Aufträge, die unter dem Bid Price liegen, werden abgelehnt. Insbesondere bei vernetzter Leistungserstellung ist die Bid Price Methode geeignet [69, S. 638-640]. Zur Bestimmung von Bid Prices vgl. z.B. [62, S. 130-131], [35, S. 254-256], [66] und [64, Kap. 3].

¹⁷ Die Problemstellung weist weitreichende Analogien zu dem Seat Inventory Control-Problem von Fluggesellschaften auf, da hierbei ebenfalls die Kapazitätssteuerung bei einer Ressource betrachtet wird. Einen Überblick zu mathematischen Modellen und Lösungsverfahren für dieses Problem gibt [4, S. 67-71].

stellt, d.h. es wird zunächst die Annahme getroffen, dass die Nachfrage deterministisch ist (Entscheidung bei Sicherheit). Es wird ein Unternehmen betrachtet, das eine auftragsbezogene Endmontage von Produkten aus standardisierten Komponenten (assemble-to-order) durchführt. Es werden J verschiedene Produktkategorien/-gruppen ($j = 1, 2, \dots, J$) differenziert, wobei jede Produktkategorie Produkte enthält, die hinsichtlich Kosten- und Erlösbeitrag sowie Nachfragestruktur und Ressourcenbeanspruchung¹⁸ übereinstimmen. Es ist die zu reservierende Kapazität je Produktgruppe c_j [KE] so festzulegen, dass der Gesamtdeckungsbeitrag DB [GE] einer Periode maximiert wird.¹⁹ Es wird folgende Notation verwendet:

p_j	Absatzpreis je Mengeneinheit der Produktgruppe j [GE/ME]
k_j	Variable Stückkosten der Produktgruppe j [GE/ME]
a_j	Kapazitätsbedarf je Mengeneinheit der Produktgruppe j [KE]
y_j	Bekannte und gegebene Nachfrage nach Produktgruppe j [ME]
R_j	Notwendige Kapazität zur vollständigen Befriedigung der Nachfrage nach Produktgruppe j [KE], mit $R_j = a_j \cdot y_j$
C	Verfügbare Gesamtkapazität [KE]

Mit Stückdeckungsbeitrag $d_j = p_j - k_j$ [GE/ME] und Produktionskoeffizienten a_j [KE/ME] folgt der relative Stückdeckungsbeitrag s_j [GE/KE] der Produktgruppe j :

$$s_j = \frac{d_j}{a_j} \quad (1)$$

Es lässt sich folgendes Planungsmodell formulieren:²⁰

$$\max DB = \sum_{j=1}^J s_j \cdot c_j \quad (2)$$

$$\text{u.d.N.} \quad \sum_{j=1}^J c_j \leq C \quad (3)$$

$$c_j \leq R_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$c_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (5)$$

Die zu reservierende Kapazität je Produktgruppe (Kapazitätskontingent) ist so festzulegen, dass der Gesamtdeckungsbeitrag maximiert wird. Die Restriktion (3) stellt sicher, dass nicht mehr Kapazität reserviert wird, als insgesamt verfügbar ist.

¹⁸ Als Ressource können eine Betriebsmittelgruppe oder der Personalbestand betrachtet werden, deren Kapazitätsangebote (Maschinenstunden bzw. Arbeitsstunden) pro Periode gegeben und nicht in andere Perioden transferiert werden können (fixe und knappe Kapazitäten).

¹⁹ Bei Sachgüterproduktion kann das Ziel der Gewinnmaximierung nicht durch die Umsatzmaximierung approximiert werden, da die variablen Kosten nicht vernachlässigbar sind.

²⁰ Im Rahmen der Produktionsprogrammplanung bei Mehrproduktproduktion und einem Engpass finden sich analoge Modellformulierungen bei [32, S. 83-85], [31, S. 173] und [51, S. 291-301]. Im Kontext des Revenue Managements wird diese Formulierung auch als Deterministic Linear Programming (DLP) Model bezeichnet. Vgl. [73, S. 68-69] und [65, S. 208-209].

Durch die Bedingungen (4) werden Obergrenzen für die zu reservierenden Kapazitäten berücksichtigt, d.h. es darf für eine Produktgruppe nicht mehr Kapazität reserviert werden, als zur vollständigen Befriedigung der Nachfrage nötig ist.

Das Grundmodell (2) – (5) ist aufgrund der unsicheren Nachfrage nicht anwendbar. Es besteht vielmehr das stochastische Optimierungsproblem, die zu reservierenden Kapazitäten unter Beachtung unsicherer, erwarteter Nachfrage so festzulegen, dass der erwartete Gesamtdeckungsbeitrag maximiert wird. Zur Lösung dieses Entscheidungsproblems wird ein Ansatz des Chance-Constrained-Programming²¹ entwickelt. Idee des Ansatzes ist es, das stochastische Entscheidungsproblem in ein deterministisches Ersatzproblem zu überführen. Der hier entwickelte Ansatz hat den Vorteil, dass der Fall optimaler aber nicht zulässiger Lösungen – wie bei Chance-Constraint-Programming häufig vorkommend – ausgeschlossen ist. Im ersten Schritt dieses Ansatzes werden die maximal zu reservierenden Kapazitäten ermittelt; dies sind die Kapazitätskontingente, welche sich bei unsicherer Nachfrage und unbeschränkter Gesamtkapazität ergeben würden. Im zweiten Schritt werden diese Maximalkapazitäten als Obergrenzen in das Planungsmodell integriert.

Zur Bestimmung der angestrebten Kapazitätskontingente im ersten Schritt wird ein Newsvendor-Modell, vgl. z.B. [67, S. 215-227], herangezogen. Hierbei bezeichnet:

- Y_j Stochastische (unsichere) Nachfrage nach Produktgruppe j [ME] (kontinuierliche Zufallsvariable).
- k_j^L Leerkostensatz [GE/ME]. Leerkosten entstehen, wenn die Nachfrage nach Produktgruppe j geringer ist, als die mit der für Produktgruppe j reservierten Kapazität herstellbare Quantität.
- k_j^F Fehlmengenkostensatz [GE/ME]. Fehlmengenkosten entstehen, wenn die Nachfrage nach Produktgruppe j größer ist, als die mit der für Produktgruppe j reservierten Kapazität herstellbare Quantität.

$$\begin{aligned}
 K(\hat{y}_j) &= k_j^L \cdot E[\max(\hat{y}_j - Y_j; 0)] + k_j^F \cdot E[\max(Y_j - \hat{y}_j; 0)] \\
 &= k_j^L \cdot \int_{y_j=0}^{\hat{y}_j} (\hat{y}_j - y_j) f(y_j) dy_j + k_j^F \cdot \int_{y_j=\hat{y}_j}^{\infty} (y_j - \hat{y}_j) f(y_j) dy_j
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

In (6) ist die Funktion der erwarteten Kosten angegeben, in Abhängigkeit der Quantität \hat{y}_j der Produktgruppe j , für die eine entsprechende Kapazität reserviert werden soll. Die Quantität \hat{y}_j der Produktgruppe j , für die eine genügende Kapazität reserviert werden soll, ist so festzulegen, dass die Summe aus erwarteten Fehlmengen- und Leerkosten minimiert wird.²² Durch Ableiten und Nullsetzen ergibt sich die optimale angestrebte Quantität \hat{y}_j^* der Produktgruppe j .²³ Die Quantität

²¹ Zum Ansatz des Chance-Constrained-Programming vgl. [12, 13, 8].

²² Die ermittelte Quantität führt implizit dazu, dass der erwartete Gewinn maximiert wird.

²³ Die Herleitung von (7) findet sich z.B. bei [44, S. 525-535], [55, S. 385-387], [67, S. 274-275] und [56, S. 120]. Zur besseren Übersicht ist die Bestimmung von (7) auch im Anhang dargestellt.

\hat{y}_j^* ist dort gegeben, wo die Verteilungsfunktion den Wert der Critical Ratio (CR) annimmt.²⁴

$$F(\hat{y}_j^*) = \frac{k_j^F}{k_j^F + k_j^L} \hat{=} CR \quad \text{bzw.} \quad \hat{y}_j^* = F^{-1} \left(\frac{k_j^F}{k_j^F + k_j^L} \right) \quad (7)$$

Die Critical Ratio (CR), d.h. die Relation von Fehlmengenkostensatz zur Summe aus Fehlmengenkostensatz und Leerkostensatz, ist zwischen 0 und 1 definiert. Je höher der Fehlmengenkostensatz im Vergleich zu dem Leerkostensatz ist, desto höher ist CR und desto mehr Kapazität sollte reserviert werden. In diesem Fall werden hohe Fehlmengenkosten vermieden unter Inkaufnahme niedriger Leerkosten. Die angestrebte Quantität \hat{y}_j^* der Produktgruppe j , für die eine entsprechende Kapazität reserviert werden soll, wird daher so bestimmt, dass mit einer Wahrscheinlichkeit in Höhe von CR, die Nachfrage kleiner oder gleich der angestrebten Quantität ist.

In der unternehmerischen Praxis besteht das Problem, dass sowohl die Fehlmengenkosten als auch die Leerkosten nur schwer oder gar nicht quantifizierbar sind. Bei den Leerkosten stellt sich das Problem, dass aufgrund der unsicheren Nachfrage nur ex post bestimmbar ist, ob und insbesondere wie nicht genutzte Kapazitätseinheiten hätten verwendet werden können. Die Höhe der Fehlmengenkosten wiederum ist abhängig vom situativen und zukünftigen Verhalten der Nachfrager, deren Aufträge abgelehnt wurden.²⁵ Es bietet sich daher die Anwendung des α -Servicegrades an, der die Wahrscheinlichkeit angibt, dass mit \hat{y}_j^* die gesamte Nachfrage nach Produktgruppe j erfüllt werden kann. Es gilt:

$$F(\hat{y}_j^*) = \alpha \hat{=} CR \quad \text{bzw.} \quad \hat{y}_j^* = F^{-1}(\alpha) \quad (8)$$

Durch Angabe eines α -Servicegrades wird die Relation der Fehlmengen- und Leerkostensätze (und damit der Critical Ratio) implizit angegeben. Ein hoher α -Servicegrad impliziert einen hohen Fehlmengenkostensatz im Vergleich zu dem Leerkostensatz. Mit der Quantität \hat{y}_j^* und dem Produktionskoeffizienten a_j [KE/ME] ergibt sich die notwendige Kapazität zur vollständigen Befriedigung von \hat{y}_j^* :

$$\hat{R}_j^* = a_j * \hat{y}_j^* \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (9)$$

Die so ermittelten Kapazitäten bilden die Obergrenzen in dem folgenden Planungsmodell zur Bestimmung der zu reservierenden Kapazitäten der einzelnen Produktgruppen, d.h. der Kapazitätskontingente:

Bei dem dargestellten Problem handelt es sich grundsätzlich um ein Multi-Item Newsvendor Problem. Zu optimalen und heuristischen Lösungsverfahren für dieses Problem vgl. [20, 47].

²⁴ Diese Herleitung ist unabhängig von der zu Grunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung.

²⁵ Vgl. zum Verhalten von Nachfragern in so genannten Out-of-Stock-Situationen beispielsweise [17]. Speziell für die Automobilindustrie zeigt Groß potenzielle Verhaltensalternativen von Kunden auf, deren Aufträge nicht erfüllt werden können [23, S. 84-86].

$$\max E[DB] = \sum_{j=1}^J s_j \cdot c_j \quad (10)$$

$$\text{u.d.N.} \quad \sum_{j=1}^J c_j \leq C \quad (11)$$

$$c_j \leq \hat{R}_j^* \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (12)$$

$$c_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (13)$$

Die zu reservierende Kapazität je Produktgruppe (Kapazitätskontingent) ist so festzulegen, dass der erwartete Gesamtdeckungsbeitrag maximiert wird. Die Restriktion (11) stellt sicher, dass nicht mehr Kapazität reserviert wird als verfügbar ist. Durch die Bedingungen (12) werden die mit (8) und (9) bestimmten Obergrenzen für die zu reservierenden Kapazitäten berücksichtigt.

3.2 Ein illustratives Beispiel zur Kapazitätskontingentierung

Der entwickelte Ansatz zur Kapazitätskontingentierung wird im Folgenden an einem einfachen Beispiel illustriert: Ein Unternehmen führt eine auftragsbezogene Endmontage von Produkten aus standardisierten Komponenten (assemble-to-order) durch. Es werden zwei Produkte $j = 1, 2$ betrachtet, welche in unterschiedlichen Marktsegmenten zu unterschiedlichen Preisen angeboten werden.²⁶ Aus Vereinfachungsgründen wird für die Produktionskoeffizienten $a_1 = a_2 = 1$ [KE/ME] angenommen. Bezüglich Produkt $j = 1$ gilt $d_1 = 1500$ [GE/ME] für den Stückdeckungsbeitrag und entsprechend $s_1 = 1500$ [GE/KE] für den relativen Stückdeckungsbeitrag. Für den Stückdeckungsbeitrag und den relativen Stückdeckungsbeitrag von Produkt $j = 2$ gilt $d_2 = 1000 = s_2$. Die gesamte, im Planungszeitraum verfügbare Kapazität beträgt 2200 [KE].

Die Nachfrage wird als normalverteilt angenommen, mit $N(\mu_1, \sigma_1) = N(1000, 200)$ und $N(\mu_2, \sigma_2) = N(900, 300)$. Das Unternehmen strebt in dem ersten Marktsegment (Produkt $j = 1$) einen Servicegrad von 80% ($\alpha_1 = 0,8$) und im zweiten Marktsegment (Produkt $j = 2$) einen Servicegrad von 90% an, d.h. $\alpha_2 = 0,9$.

Gemäß (8) ergibt sich $\hat{y}_1^* = F^{-1}(0,8)$ für Produkt $j = 1$ und $\hat{y}_2^* = F^{-1}(0,9)$ für Produkt $j = 2$, d.h. die Quantitäten der Produkte $j = 1$ und $j = 2$, für die eine entsprechende Kapazität reserviert werden soll. Ist die Nachfrage normalverteilt, können die angestrebten Produktquantitäten sowie die resultierenden Kapazitätsbedarfe ermittelt werden, indem auf die Standardnormalverteilung zurückgegriffen wird. Es gilt:²⁷

²⁶ So entwickelt z.B. Saatmann [53] einen Ansatz zur Segmentierung des Marktes für Neufahrzeuge. Auf Basis von Lieferzeit und Erwartungen hinsichtlich der Änderungsflexibilität in der Nachkaufphase lässt sich die Nachfrage in speziell bepreiste Teilssegmente aufteilen.

²⁷ Hierbei kann z_j als Sicherheitsfaktor und $z_j \cdot \sigma_j$ als Sicherheitsbestand interpretiert werden.

$$F(y_j) = F_{01}(z_j), \text{ mit } z_j = \frac{y_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad \text{bzw.} \quad y_j = \mu_j + z_j \cdot \sigma_j \quad (14)$$

Im Beispiel ergibt sich:

$$z_1^* = F_{01}^{-1}(0,8) = 0,84 \quad \text{und} \quad z_2^* = F_{01}^{-1}(0,9) = 1,28 \quad (15)$$

$$y_1^* = \mu_1 + 0,84 \cdot \sigma_1 = 1168 \quad \text{und} \quad y_2^* = \mu_2 + 1,28 \cdot \sigma_2 = 1284 \quad (16)$$

Da für die Produktionskoeffizienten $a_1 = a_2 = 1$ gilt, ergeben sich die notwendigen Kapazitäten zur Befriedigung von \hat{y}_j^* ($j = 1, 2$) mit $\hat{R}_1^* = 1168$ und $\hat{R}_2^* = 1284$. Mit diesen Werten kann das Modell (10) – (13) gelöst werden. Unter dem Ziel der Maximierung des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags ergeben sich Kapazitätskontingente von $c_1^* = 1168$ und $c_2^* = 1032$ [KE] bei einem erwarteten Gesamtdeckungsbeitrag von $E[DB^*] = 2784000$ [GE].

Geht ein Auftrag für eine bestimmte Preisklasse (d.h. für Produkt $j = 1$ oder $j = 2$) ein, muss für eine Auftragsannahme oder -ablehnung lediglich geprüft werden, ob von dem entsprechenden Kontingent eine ausreichende Restkapazität vorhanden ist. Es werden so genannte einfache Buchungslimits (vgl. Abschnitt 2) zu Grunde gelegt, d.h. Aufträge für das höherpreisige Produkt $j = 1$ können nicht auf reservierte Kapazitäten von Produkt $j = 2$ zugreifen. Dieses Vorgehen erscheint aus Servicegesichtspunkten – wie im nächsten Abschnitt diskutiert wird – im Rahmen der hier betrachteten kundenindividuellen Sachgüterproduktion zunächst sinnvoll.

4 Hemmnisse des Revenue Managements bei Auftragsfertigung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ein einfacher Ansatz der Kapazitätssteuerung entwickelt, der auf dem Konzept einfacher Buchungslimits basiert. Auf der Basis dieses Ansatzes lassen sich allgemein Anwendungsprobleme des Revenue Managements in der Sachgüterproduktion herausarbeiten.

Im obigen Beispiel ist zu erkennen, dass bei Produkt $j = 1$ der angestrebte Servicegrad von $\alpha_1^* = 0,8$ erfüllt wird (bzw. erfüllt werden kann), während – aufgrund der beschränkten Gesamtkapazität – bei Produkt $j = 2$ nur ein erwarteter Servicegrad von $\alpha_2^* = 0,67$ erreicht wird. Allgemein (17) und speziell im Beispiel (18) gilt:

$$\frac{c_j^*}{a_j} = y_j^*; \quad z_j^* = \frac{y_j^* - \mu_j}{\sigma_j}; \quad F_{01}(z_j^*) = \alpha_j^* \quad (17)$$

$$\begin{aligned} c_1^* = 1168; \quad c_2^* = 1032, \quad \text{bzw.} \quad y_1^* = 1168; \quad y_2^* = 1032 & \quad (18) \\ z_1^* = 0,84; \quad z_2^* = 0,44; \quad \text{bzw.} \quad \alpha_1^* = 0,8; \quad \alpha_2^* = 0,67 & \end{aligned}$$

Werden bei gegebener Kapazität die Servicegrade variiert, kann ein Bereich zulässiger (bezüglich der zur Verfügung stehenden Kapazität) Servicegradkombinationen bestimmt werden, wobei sämtliche Servicegradkombinationen, welche die Gesamtkapazität vollständig ausnutzen, auf dem effizienten Rand liegen (siehe Abbildung 4).²⁸

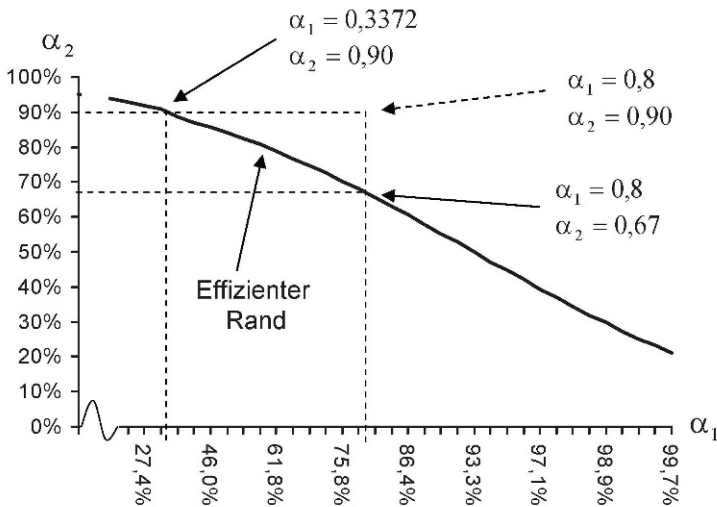


Abb. 4 Variation der Servicegrade bei knapper Gesamtkapazität.

Die angestrebte Servicegradkombination von $\alpha_1 = 0,8$ und $\alpha_2 = 0,9$ ist bei gegebener Kapazität von $C = 2200$ nicht erreichbar, sie liegt außerhalb des zulässigen Bereichs. Das Beispiel offenbart ein grundsätzliches Problem der Anwendung von Revenue Management in der kundenindividuellen Sachgüterproduktion. Im Gegensatz zu den typischen Anwendungsgebieten der Dienstleistungsindustrie (vgl. Abschnitt 1), entrichten in der Sachgüterproduktion die wichtigen Kunden (Key Accounts²⁹ wie z.B. Geschäftskunden) i.d.R. niedrigere Preise als weniger wichtige Kunden (z.B. Privatkunden). Bei kundenindividueller Sachgüterproduktion kann somit der Fall eintreten, dass der angestrebte Servicegrad eines Marktsegments bzw. einer Kundengruppe sich diametral zu dem angebotenen Stückpreis verhält. Eine Kapazitätskontingentierung unter dem Ziel der Maximierung des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags führt dann dazu, dass gerade bei den Key Accounts – auf-

²⁸ Ausgehend von einem Punkt auf dem effizienten Rand, kann – unter Beachtung der Kapazität – kein Servicegrad erhöht werden, ohne dass der jeweils andere reduziert werden muss.

²⁹ Kunden, die für die gegenwärtige und zukünftige Existenz des Unternehmens eine Schlüsselposition einnehmen und somit einen hohen Kundenwert besitzen.

grund der geringeren erzielbaren Stückdeckungsbeiträge – die angestrebten Servicegrade verfehlt werden. Es existiert somit ein Trade-Off zwischen den Servicezielen und den Gewinnzielen.

Zur Verdeutlichung dieser Problematik wird nochmals das obige Beispiel herangezogen. Es wird angenommen, dass es sich bei $j = 1$ und $j = 2$ um ein identisches Produkt handelt, welches unterschiedlichen Kundengruppen zu verschiedenen Preisen angeboten wird.³⁰ Hierbei wird $j = 1$ im Segment der Privatkunden zu einem höheren Stückpreis als $j = 2$ im Segment der Geschäftskunden angeboten. Der Kundenwert der Geschäftskunden ist für das betrachtete Unternehmen insbesondere aufgrund der höheren, im Laufe der Geschäftsbeziehung erzielbaren Gesamtumsätze größer als der Kundenwert der Privatkunden. Die folgende Tabelle 1 zeigt realisierbare, effiziente Servicegradkombinationen und die daraus resultierenden, erwarteten Gesamtdeckungsbeiträge. Es zeigt sich, dass mit steigendem Servicegrad bei den wichtigen Geschäftskunden der erwartete Gesamtdeckungsbeitrag sinkt.

Tabelle 1 Trade-Off zwischen Service- und Gewinnzielen.

Servicegradkombination ($\alpha_1; \alpha_2$)		Erwarteter Gesamtdeckungsbeitrag
$\alpha_1 = 0,8$	$\alpha_2 = 0,67$	$E[DB] = 2784000$
$\alpha_1 = 0,764$	$\alpha_2 = 0,7$	$E[DB] = 2772000$
$\alpha_1 = 0,726$	$\alpha_2 = 0,726$	$E[DB] = 2740000$
$\alpha_1 = 0,337$	$\alpha_2 = 0,9$	$E[DB] = 2658000$

Die aufgezeigte Problematik lässt es zunächst sinnvoll erscheinen, einfache Buchungslimits zu verwenden. Würden geschachtelte Buchungslimits (nested bookings limits) angewandt, könnten eingehende Aufträge für $j = 1$ (hoher Preis, niedriger Kundenwert) auch auf das Kapazitätskontingent von $j = 2$ (niedriger Preis, hoher Kundenwert) zugreifen. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass – abhängig von der tatsächlich eintretenden Nachfrage – der realisierte Servicegrad bei den Geschäftskunden tendenziell noch geringer ausfallen kann. Durch geschachtelte Buchungslimits werden jedoch potenzielle stochastische Ausgleichseffekte berücksichtigt, welche bei einfachen Buchungslimits unbeachtet bleiben. Es soll nochmals das obige Beispiel herangezogen werden. Es ergaben sich die Kapazitätskontingente von $c_1^* = 1168$ und $c_2^* = 1032$ [KE]. Werden geschachtelte Buchungslimits berücksichtigt, so ist das resultierende Ergebnis abhängig von der tatsächlich realisierten Nachfrage und dem dynamischen Auftragseingang. Es werden drei mögliche Nachfrageszenarien zu Grunde gelegt, mit y_1 als eingehende Aufträge für $j = 1$ (hoher Preis, niedriger Kundenwert) und y_2 als eingehende Aufträge von $j = 2$ (niedriger Preis, hoher Kundenwert): ($y_1 = 1000, y_2 = 1200$), ($y_1 = 1200,$

³⁰ So bietet Dell beispielsweise baugleiche Laptops den vier definierten Kundengruppen Privatanwender, kleine und mittelständische Unternehmen, Großkunden sowie öffentliche Auftraggeber zu unterschiedlichen Preisen an (vgl. www.dell.de).

$y_2 = 900$), $(y_1 = 1200, y_2 = 1200)$. Des Weiteren wird angenommen, dass die Aufträge für $j = 1$ zuerst eintreffen.

Bei geschachtelten Buchungslimits können eingehende Aufträge für $j = 1$ (hoher Preis, niedriger Kundenwert) auch auf das Kapazitätskontingent von $j = 2$ (niedriger Preis, hoher Kundenwert) zugreifen. Für die drei betrachteten Szenarien ergeben sich folgende erfüllte Aufträge: (1000; 1032), (1200; 900), (1200; 1000). Gerade im dritten Szenario fällt der Servicegrad bei den wichtigen Geschäftskunden aufgrund der Verwendung geschachtelter Buchungslimits zu gering aus.

Zur Überwindung der aufgezeigten Problematik existieren unterschiedliche Alternativen. Es können „umgekehrt geschachtelte Buchungslimits“ verwendet werden, d.h. Aufträge der niedrigen Preisklassen können auf die Kapazitätskontingente der höheren Preisklassen zugreifen. In Abhängigkeit des Auftragseingangsprozesses fallen die realisierten Servicegrade der wichtigen Kunden tendenziell höher aus. Unter den oben getroffenen Annahmen ergeben sich im Beispiel folgende erfüllte Aufträge: (1000; 1200), (1168; 900), (1168; 1032).

Auch können Kompromissmodelle verwendet werden. Hier bietet es sich an, untere Schranken für die angestrebten Servicegrade vorzugeben. Wird beispielsweise für $j = 2$ ein Mindestservicegrad von $\bar{\alpha}_2 = 0,7$ oder höher vorgegeben (angestrebt war $\alpha_2 = 0,9$), so wird die Nebenbedingung (13) für $j = 2$ modifiziert:

$$c_2 \geq \bar{R}_2 \tag{19}$$

mit $\bar{\alpha}_2 = 0,7$; $\bar{z}_2 = 0,52$; $\bar{y}_2 = \mu_2 + \bar{z}_2 \cdot \sigma_2$; $\bar{R}_2 = a_2 \cdot \bar{y}_2$

Des Weiteren kann als Kompromisszielfunktion auch die Maximierung des minimalen Servicegrades vorgegeben werden. Im Beispiel führt dies zu identischen erwarteten Servicegraden von $\alpha_1^* = \alpha_2^* = 0,726$. Durch solche Maßnahmen kann es gelingen, die Wichtigkeit einer Kundengruppe, unter Beibehaltung des Ziels der Maximierung des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags, zu berücksichtigen.

Zur Bewertung der hier angeführten Alternativen (einfache Buchungslimits, geschachtelte Buchungslimits, umgekehrt geschachtelte Buchungslimits, Kompromissmodelle) zur Überwindung bzw. Berücksichtigung des identifizierten Trade-Off zwischen Service- und Gewinnzielen bietet es sich an, eine umfassende Simulationsstudie durchzuführen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei einer kundenindividuellen Sachgüterproduktion wird der Leistungserstellungsprozess durch eingehende, angenommene Kundenaufträge initiiert. Damit resultiert eine dynamische, kundenorientierte, stochastische, operative Produktionsprogrammplanung. Bei kundenindividueller Sachgüterproduktion besteht die Aufgabe der Kapazitätssteuerung darin, unter Beachtung der verfügbaren knappen Kapazität und der erwarteten Nachfrage, so über die Annahme oder Ablehnung eingehender

Aufträge zu entscheiden, dass ein möglichst hoher Deckungsbeitrag erzielt wird. Aufgrund der Analogie zu den im Rahmen des Revenue Managements betrachteten Entscheidungssituationen, fokussierte der Beitrag auf die Entwicklung eines Ansatzes zur Kapazitätssteuerung bei Auftragsfertigung.

Die Analyse der Anwendungsvoraussetzungen von Revenue Management zeigt, dass das Konzept des Revenue Managements auf die kundenindividuelle Sachgüterproduktion übertragbar ist. Aufgrund der Kostenstruktur in der Sachgüterproduktion ist das Ziel der Umsatzmaximierung (Dienstleistungsproduktion) jedoch durch das Ziel der Maximierung des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags zu ersetzen.

Es wurde ein einfacher Ansatz der Kapazitätssteuerung entwickelt, der den Entscheidungsträger bei der zielgerichteten Festlegung der zu reservierenden Kapazitätskontingente unterstützt. Aufgrund der knappen Gesamtkapazität kann es zu einem Trade-Off zwischen Gewinn- und Servicezielen kommen. Bei kundenindividueller Sachgüterproduktion kann die Maximierung des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags dazu führen, dass bei den Key Accounts der angestrebte Servicegrad verfehlt wird. Der Entscheidungsträger muss diese Interdependenzen zwischen angestrebten Servicegraden und dem resultierenden, erwarteten Gesamtdeckungsbeitrag antizipieren.

Durch eine Sensitivitätsanalyse der Variation von Servicegraden kann zunächst ein potenziell vorliegender Trade-Off zwischen Service- und Gewinnzielen identifiziert werden. Durch die Anwendung von Kompromissmodellen kann diesem Trade-Off entgegen gewirkt werden. Ein zukünftiger Forschungsbedarf kann in einer geeigneten Integration des Kundenwerts in den hier entwickelten Ansatz der Kapazitätssteuerung bei kundenindividueller Sachgüterproduktion liegen. Des Weiteren leitet sich ein weiterer Forschungsbedarf aus der Bewertung der genannten Alternativen (einfache Buchungslimits, geschachtelte Buchungslimits, umgekehrt geschachtelte Buchungslimits, Kompromissmodelle) im Rahmen einer Simulationsstudie ab.

Schließlich ist noch auf eine Dynamisierung des entwickelten Ansatzes einzugehen. Im Sinne einer rollierenden Planung können Aufträge, die für eine Periode t eingehen, aber aufgrund nicht mehr vorhandener Kapazität des entsprechenden Kontingents abgelehnt werden müssten, für die Folgeperiode $t + 1$ eingeplant werden. Hierbei ist zunächst zu beachten, dass die dadurch resultierende spätere Lieferzeit vom Kunden akzeptiert werden muss. Des Weiteren können durch die Verschiebung eingehender Aufträge die Kapazitätskontingente in den Folgeperioden $t + 1$, $t + 2$, ... derart aufgebraucht werden, dass es zu einem durch die Kunden nicht mehr akzeptierbaren Aufschaukeln der Auftragsverschiebungen und der daraus resultierenden Lieferzeiten kommen kann. Es ist daher kritisch zu prüfen, z.B. im Rahmen einer Simulation mit unterschiedlichen Auftragseingangsszenarien, wie sich eine rollierende Planung auf den Auftragsannahme und -ablehnungsprozess auswirkt.

Anhang

Bestimmung der angestrebten Quantität \hat{y}_j^* der Produktgruppe j für die eine entsprechende Kapazität $\hat{R}_j^* = a_j \cdot y_j^*$ reserviert werden soll (vgl. [44, S. 525-535], [55, S. 385-387], [67, S. 274-275] und [56, S. 120]). Es gilt:

$$\begin{aligned} K(\hat{y}_j) &= k_j^L \cdot E[\max(\hat{y}_j - Y_j; 0)] + k_j^F \cdot E[\max(Y_j - \hat{y}_j; 0)] \\ &= k_j^L \cdot \int_{y_j=0}^{\hat{y}_j} (\hat{y}_j - y_j) f(y_j) dy_j + k_j^F \cdot \int_{y_j=\hat{y}_j}^{\infty} (y_j - \hat{y}_j) f(y_j) dy_j \end{aligned} \quad (20)$$

Durch Anwendung der Leibnizregel ergibt sich:

$$\frac{dK(\hat{y}_j)}{d\hat{y}_j} = k_j^L \cdot F(\hat{y}_j) - k_j^F \cdot (1 - F(\hat{y}_j)) \quad (21)$$

Daraus folgt die notwendige Optimalitätsbedingung:

$$\begin{aligned} k_j^L \cdot F(\hat{y}_j) - k_j^F \cdot (1 - F(\hat{y}_j)) &= 0 \\ \Leftrightarrow k_j^L \cdot F(\hat{y}_j) + k_j^F \cdot F(\hat{y}_j) - k_j^F &= 0 \\ \Leftrightarrow (k_j^L + k_j^F) \cdot F(\hat{y}_j) &= k_j^F \\ \Leftrightarrow F(\hat{y}_j) &= \frac{k_j^F}{k_j^L + k_j^F} \end{aligned} \quad (22)$$

Die hinreichende Bedingung für ein Minimum ist erfüllt:

$$\frac{d^2K(\hat{y}_j)}{d^2\hat{y}_j} = (k_j^L + k_j^F) \cdot f(\hat{y}_j) \geq 0 \quad (23)$$

Literaturverzeichnis

1. Balakrishnan, N., Sridharan, S.V., Patterson, J. W.: Rationing capacity between two products classes. *Decision Sciences* 27(2) (1996) 185–214
2. Bartodziej, P., Derigs, U.: On an experimental algorithm for revenue management for cargo airlines. In: Ribeiro, C.C., Martins, S.L. (Hrsg.): *Experimental and Efficient Algorithms*. Springer, Berlin (2004) 57–71
3. Barut, M., Sridharan, V.: Revenue management in order-driven production systems. *Decision Sciences* 2 (2005) 287–316
4. Belobaba, P.P.: Airline yield management: An overview of seat inventory control. *Transportation Science* 21(2) (1987) 63–73
5. Bitran, G.R., Gilbert, M.: Managing hotel reservations with uncertain arrivals. *Operations Research* 44 (1996) 35–49
6. Bitran, G.R., Mondschein, S.V.: An application of yield management to the hotel industry considering multiple day stays. *Operations Research* 43 (1995) 427–443

7. Boyd, E.A., Bilegan, I.C.: Revenue management and e-commerce. *Management Science* 49 (2003) 1363–1386
8. Bühler, W., Dick, R.: Stochastische Lineare Optimierung, Chance-Constrained-Modell und Kompensationsmodell. *ZfB, Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 43 (1973) 101–120.
9. Caldentey, R., Wein L.M.: Revenue management of a make-to-stock queue. *Operations Research* 54 (2006) 859–875
10. Campbell, K., Morlock, E.: Rail freight service flexibility and yield management, In: *Proceedings of the Annual Meeting – Transportation Research Forum.* (1994) 529–548
11. Carrol, W.J., Grimes, R.C.: Evolutionary change in product management: Experiences in the car rental industry. *Interfaces* 25(5) (1995) 84–104
12. Charnes, A., Cooper, W.W., Symonds, G.H.: Cost horizons and certainty equivalents: An approach to stochastic programming of heating oil. *Management Science* 4(3) (1958) 235–263
13. Charnes, A., Cooper, W.W.: Chance-constrained programming. *Management Science* 6(1) (1959) 73–79
14. Chatwin, R.E.: Multiperiod airline overbooking with a single fare class. *Operations Research* 46 (1998) 805–819
15. Chiang, W.-C., Chen, J.C.H., Xu, X.: An overview of research on revenue management: current issues and future research. *International Journal of Revenue Management* 1 (2007) 97–128
16. Ciancimino, A., Inzerillo, G., Lucidi, S., Palagi, L.: A mathematical programming approach for the solution of the railway yield management problem. *Transportation Science* 33 (1999) 168–181
17. Corsten, D., Gruen, D.: Stock-outs cause walkouts. *Harvard Business Review* 82(5) (2004) 26–28
18. Corsten, H., Stuhlmann, S.: *Yield Management – Ein Ansatz zur Kapazitätsplanung und -steuerung in Dienstleistungsunternehmen. Schriften zum Produktionsmanagement des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft der Universität Kaiserslautern, Nr. 18, Kaiserslautern (1998)*
19. Defregger, F., Kuhn, H.: Revenue management for a make-to-order company with limited inventory capacity. *OR Spectrum* 29(1) (2007) 137–156
20. Erlebacher, S.J.: Optimal and heuristic solutions for the multi-item newsvendor problem with a single capacity constraint. *Production and Operations Management* 9 (2000) 303–318
21. Friege, C.: Yield-Management. *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 25 (1996) 616–622
22. Geraghty, M.K., Johnson, E.: Revenue management saves national car rental. *Interfaces* 27(1) (1997) 107–127
23. Gruß, C.M.F.: *Revenue-Management in der Automobilindustrie: Vorgehenskonzept zur online Neuwagendistribution und Produktharmonisierung.* Gabler, Wiesbaden (2008)
24. Hadjinicola, G.C., Panayi, C.: The overbooking problem in hotels with multiple tour operators. *International Journal of Operations & Production Management* 17 (1997) 874 – 885
25. Harris, F.H., Pinder, J.P.: A revenue management approach to demand management and order booking in assemble-to-order manufacturing. *Journal of Operations Management* (13) (1995) 299–309
26. Helmedag, F.: *Preisdifferenzierung.* *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 30 (2001) 10–15
27. Ihde, G.B.: *Ertragsorientiertes Preis- und Kapazitätsmanagement für logistische Dienstleistungsunternehmen.* In: Bloech, J., Götze, U., Sierke, B.R A. (Hrsg.): *Managementorientiertes Rechnungswesen - Konzepte und Analysen zur Entscheidungsvorbereitung.* Wiesbaden (1993) 103–119
28. Jacob, H.: Zur optimalen Planung des Produktionsprogramms bei Einzelfertigung. *ZfB, Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 41 (1971) 495–516
29. Karaesmen, I., van Ryzin, G.: Overbooking with substitutable inventory classes. *Operations Research* 52 (2004) 83–104
30. Kasilingam, R.C.: Air cargo revenue management: characteristics and complexities. *European Journal of Operational Research* 96 (1996) 36–44

31. Kern, W.: Der Betrieb als Faktorkombination. In: Jacob, H. (Hrsg.): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 5. Auflage, Gabler, Wiesbaden (1988) 117–208
32. Kilger, W.: Optimale Produktions- und Absatzplanung. Entscheidungsmodelle für den Produktions- und Absatzbereich industrieller Betriebe. Westdeutscher Verlag, Opladen (1973)
33. Kimes, S.E.: Yield management: a tool for capacity constrained service firms. *Journal of Operations Management* 8 (1989) 348–363
34. Kimms, A., Klein, R.: Revenue Management im Branchenvergleich. *ZfB, Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Ergänzungsheft* 1/2005 (2005) 1–30
35. Klein, R.: Revenue Management: Quantitative Methoden zur Erlösmaximierung in der Dienstleistungsproduktion. *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis* 53 (2001) 245–259
36. Klein, R., Steinhardt, C.: *Revenue Management - Grundlagen und Mathematische Methoden*. Springer, Berlin (2008)
37. Kniker, T.S., Burman, M.H.: Applications of revenue management to manufacturing. In: *Proceedings of the Third Aegean International Conference on Design and Analysis of Manufacturing Systems*. Elsevier Science Publishers, Tinos (2001) 299–308
38. Koch, C.: Preisdifferenzierung eines regionalen Monopolisten: Das Beispiel Borussia Dortmund. *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 30 (2001) 285–288
39. Kolisch, R., Zatta, D.: Revenue-Management in der Sachgüterproduktion. *Marketing Journal* 12 (2006) 38–41
40. Kroll, K.M.: A new tool for manufacturers. *Industry Week* 248(9) (1999) 25–28
41. Kuhn, H., Defregger, F.: *Revenue Management in der Sachleistungswirtschaft*. Diskussionsbeiträge der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät Nr. 171, Katholische Universität Eichstätt/Ingolstadt (2005)
42. Kuhn, H., Defregger, F.: *Revenue Management in der Sachgüterproduktion*. *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 33 (2004) 319–324
43. Ladany, S.P.: Dynamic operating rules for motel reservations. *Decision Sciences* 7 (1976) 829–840
44. Lau, H.-S.: The newsboy problem under alternative optimization objectives. *Journal of Operational Research Society* 31 (1980) 525–535
45. Laux, H.: Auftragsselektion bei Unsicherheit. *ZfbF, Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 23 (1971) 164–180
46. Lieberman, V., Yechiali, U.: On the hotel overbooking problem – An inventory system with stochastic cancellations. *Management Science* 24(11) (1978) 1117–1126
47. Moon, I., Silver, E.A.: The multi-item newsvendor problem with a budget constraint and fixed ordering costs. *Journal of the Operational Research Society* 51 (2000) 602–608
48. Nieschlag, R., Dichtl, E., Hörschgen, H.: *Marketing*. 18. Auflage, Duncker und Humblot, Berlin (1997)
49. Rehkopf, S.: *Revenue Management-Konzepte zur Auftragsannahme bei kundenindividueller Produktion*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden (2006)
50. Rehkopf, S., Spengler, T.: Revenue Management in a make-to-order environment. In: Fleuren, H., den Hertog, D., Kort, P. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2004*. Springer Berlin (2005) 470–478
51. Riebel, P.: *Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung. Grundfragen einer markt- und entscheidungsorientierten Unternehmensrechnung*. 7. Auflage, Gabler, Wiesbaden (1994)
52. Rothstein, M.: An airline overbooking problem. *Transportation Science* 5(2) (1971) 180–192
53. Saatmann, M.: *Revenue Management in der deutschen Automobilwirtschaft – Voraussetzungen, Konzeption und Auswirkungen auf die Bedarfs- und Kapazitätsplanung in der automobilen Supply Chain*. Verlag Dr. Kovac, Hamburg (2008)
54. Schildbach, T., Ewert, R.: Preisuntergrenzen in sequentiellen Entscheidungsprozessen. In: Hax, H., Schröder, H.-H. (Hrsg.): *Zeitaspekte in betriebswirtschaftlicher Theorie und Praxis*. C. E. Poeschel Verlag, Stuttgart (1989)
55. Silver, E.A., Pyke, D.F., Peterson, R.: *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. 3rd Edition, Wiley & Sons, New York (1998)

56. Simchi-Levi, D., Chen, X., Bramel, J.: *The Logic of Logistics, Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management*. 2nd Edition, Springer, New York (2005)
57. Smith, B.C., Leimkuhler, J.F., Darrow, R.M.: Yield management at American airlines. *Interfaces* 22(1) (1992) 8–31
58. Specht, D., Groß, C.M.F.: Kontingentierungsansätze des Revenue Managements für produzierende Unternehmen. *Industrie Management* 21(5) (2005a) 57–60
59. Specht, D., Groß, C.M.F.: Revenue Management – Sind Ertragssteigerungen auch für produzierende Unternehmen möglich? *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100(4) (2005) 192–196
60. Specht, D., Groß, C.M.F.: Revenue Management – eine Strategie für die Produktion in der Automobilindustrie? In: Specht, D. (Hrsg.): *Strategische Bedeutung der Produktion*. Gabler, Wiesbaden (2007) 61–72
61. Spengler, T., Rehkopf, S., Volling, T.: Revenue management in make-to-order manufacturing – an application to the iron and steel industry. *OR Spectrum* 29(1) (2007) 157–172
62. Spengler, T., Rehkopf, S.: Revenue Management Konzepte zur Entscheidungsunterstützung bei der Annahme von Kundenaufträgen. *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung* 16 (2005) 123–146
63. Strasser, S.: The effect of yield management on railroads. *Transportation Quarterly* 50(2) (1996) 47–55
64. Talluri, K.T., van Ryzin, G.J.: *The Theory and Practice of Revenue Management*. Springer, New York (2005)
65. Talluri, K.T., van Ryzin, G.: A randomized linear programming method for computing network bid prices. *Transportation Science* 33(2) (1999) 207–216
66. Talluri, K.T., van Ryzin, G.J.: An analysis of bid-price controls for network revenue management. *Management Science* 44(11) (1998) 1577–1593
67. Thonemann, U.: *Operations Management, Konzepte, Methoden und Anwendungen*. Pearson Studium, München (2005)
68. Toh, R.S., Dekay, F.: Hotel room-inventory management. *Cornell Hotel & Restaurant Administration Quarterly* 43 (2002) 79–90
69. Tscheulin, D.K., Lindenmeier, J.: Yield-Management – Ein State-of-the-Art. *ZfB, Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 73 (2003) 629–662
70. Weatherford, L.R.: A tutorial on optimization in the context of perishable-asset revenue management problems for the airline industry. In: Yu, G. (Hrsg.): *Operations Research in the Airline Industry*. Kluwer Academic Publishers, Boston (1998) 68–100
71. Weatherford, L.R., Bodily, S.E.: A taxonomy and research overview of perishable-asset revenue management: yield management, overbooking and pricing. *Operations Research* 40 (1992) 831–844
72. Wiggershaus, J.: *Ein wertorientiertes Auftragsannahmeverfahren für das Revenue Management in der Sachgüterindustrie*. Verlag Dr. Kovac, Hamburg (2008)
73. Williamson, E.L.: *Airline Network Seat Control*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (1992)
74. Xylander, J.K.: *Kapazitätsmanagement bei Reiseveranstaltern – Entscheidungsmodelle zur Kontingentierung im Yield Management*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden (2003)
75. Zehle, K.O.: Yield-Management – Eine Methode zur Umsatzsteigerung für Unternehmen der Tourismusindustrie. In: Seitz, E., Wolf, J. (Hrsg.): *Tourismusmanagement und -marketing*. Verlag moderne Industrie, Landsberg, Lech (1991) 483–504

Marktorientierung im Supply Chain Management durch Produktionskompetenz am Beispiel der Lebensmittelindustrie

Markus Amann und Michael Eßig

Zusammenfassung Orientiert am Postulat der Markt- bzw. Kundenorientierung widmet sich der vorliegende Beitrag dem Management von Supply Chains unter besonderer Berücksichtigung von Produktionskompetenz. Hierzu wird Produktionskompetenz als komplexes Konstrukt über Dimensionen und Indikatoren operationalisiert und in das Supply Chain Management (SCM) unter Ausrichtung an den Funktionen des Netzwerkmanagement integriert. In diesem Zusammenhang wird Endkundenorientierung innerhalb des Management von Produktionskompetenz in Supply Chains insbesondere mit Hilfe der Conjoint-Analyse gewährleistet.

1 Problemstellung

Markt- bzw. Kundenorientierung gehört zu den meistgenannten Führungs- bzw. Managementkonzepten – und häufig zu den kaum konkretisierten respektive realisierten Ideen. Die Umsetzung von Marktorientierung wird zusätzlich erschwert, wenn sich industrielle Wertschöpfungsnetzwerke als Ganzes am Endkunden orientieren müssen, da meist nur Händler und/oder Endprodukthersteller direkten Zugang zum Verbraucher haben. Beispielsweise in der Lebensmittelindustrie, einer in Deutschland weitgehend hoch industrialisierten Branche, wird der Endkundenorientierung in Form der Gläsernen Produktion seit fast zwei Dekaden eine wichtige Bedeutung beigemessen [44]. Dem Verbraucher soll mit Hilfe der aus Politik und Hand-

Markus Amann

Universität der Bundeswehr München, Forschungszentrum für Recht und Management öffentlicher Beschaffung (FoRMöB), Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, GERMANY
E-mail: markus.amann@unibw.de

Michael Eßig

Universität der Bundeswehr München, Lehrstuhl Materialwirtschaft & Distribution, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, GERMANY
E-mail: michael.essig@unibw.de

werk/Industrie initiierten Gläsernen Produktion ein Einblick in die Herstellung qualitativ hochwertiger Lebensmittel gewährt werden, um so Bedenken der Konsumenten hinsichtlich einer möglichen gesundheitlichen Beeinträchtigung, die mit dem Verzehr von Nahrungsmitteln verbunden sein kann, von Beginn an auszuschließen [10]. Vor allem sind es Lebensmittelhersteller mit direktem Kundenkontakt (z.B. Fleischereien/Metzgereien), die die Gläserne Produktion als Vermarktungsinstrument einsetzen und dabei bewusst versuchen, dem Verbraucher ihre Kompetenzen im Bereich der Produktion zu demonstrieren [80]. Vielfach liegt der Fokus der Gläsernen Produktion jedoch ausschließlich auf der Ebene des Einzelunternehmens; die ganze Supply Chain hingegen bleibt dabei weitgehend unberücksichtigt [30].

Hieran soll der vorliegende Beitrag anknüpfen und zeigen, wie ein Management von Produktionskompetenz in (Food) Supply Chains an den Bedürfnissen des Endkunden ausgerichtet werden kann. Entsprechend widmet sich der folgende Abschnitt wesentlicher Grundlagen zum SCM bzw. Vorarbeiten zur Konzeptualisierung und Operationalisierung von Produktionskompetenz, bevor unter besonderer Berücksichtigung der Endkundenorientierung ein umfassender Ansatz für das Management von Produktionskompetenz in Supply Chains vorgestellt wird. Dabei kann vor allem die Conjoint-Analyse als Instrument der Marketingforschung innerhalb des vorgestellten Ansatzes den postulierten Endkundenbezug des SCM gewährleisten.

2 Grundlagen zur Marktorientierung im SCM sowie zur Produktionskompetenz

2.1 Markt- bzw. Endkundenorientierung im SCM

Grundsätzlich bedeutet Marktorientierung eine konsequente Ausrichtung aller Unternehmensentscheidungen an den Bedürfnissen der Kunden (Outside-in-Betrachtung) [43]. Somit kann Marktorientierung als übergeordnetes Verhaltensregulativ aufgefasst werden, das eine möglichst umfassende Erfüllung von Kundenanforderungen anstrebt. Hierzu ist insbesondere die Wahrnehmung und Beurteilung eines Unternehmens gegenüber potentiellen Konkurrenten aus Sicht des Endkunden ausschlaggebend. Das SCM als „set of approaches utilized to effectively integrate suppliers, manufacturers, warehouses, and stores, so that merchandise is produced and distributed at the right quantities, to the right locations, and at the right time, in order to minimize systemwide costs while satisfying service level requirements“ [62] versteht die Endkundenorientierung sogar als eine konkrete Zielkategorie neben Qualitätsverbesserungen, Zeit- und Kostenvorteilen [35].

2.2 Status quo zur Produktionskompetenz

Der Begriff der Produktionskompetenz wird durchaus unterschiedlich aufgefasst. Ein beispielhafter Literaturüberblick ausgewählter Publikationen zur Produktionskompetenz in Tabelle 1 verdeutlicht, dass das Konstrukt sowohl strategische als auch operative Aspekte in sich vereint. So wird Produktionskompetenz beispielsweise als „a potential source of sustainable competitive advantage“ [64] angesehen. Im Gegensatz dazu wird Produktionskompetenz auch als „knowledge and skills necessary to operate a plant“ [8] bzw. als Momentaufnahme der Performanz oder Effizienz der Produktion hinsichtlich der vorgegebenen Produktionsziele beschrieben [72].

Tabelle 1 Beispielhafte Konnotationen zur Produktionskompetenz.

Quelle	Definition von Produktionskompetenz
[14, S. 467]	„[P]roduction competence is [...] the function of the fit between business strategy and manufacturing structure“.
[16, S. 655f.]	Production competence is „the preparedness, skill, or capability that enables manufacturers to prosecute a product-market specific business strategy. [...] [W]e see competence as a variable rather than a fixed attribute. We suggest that competence can be rated on a continuous scale and that manufacturer’s inherent level of competence is numerically related to the company’s actual performance within its own industry“.
[33, S. 33]	„[T]he primary function of a manufacturing strategy is to guide the business in putting together the set of manufacturing capabilities that will enable it to pursue its chosen competitive strategy over the long term“.
[37, S. 6]	„Manufacturing competence is [...] the degree of consistency between the importance given to a capability and the firm’s strength with regard to that particular capability. [...] A firm’s manufacturing function is not competent if it lacks competitive capability on a variable which is considered important“.
[45, S. 227]	„The relations and interactions between these three fundamental aspects [processes, resources and strategies] describe the manufacturing capability of a company in order to support strategic and operational decisions“.
[64, S. 442]	„[P]roduction capability – the ability to use production processes to achieve the advantageous conversion of inputs into differentiated products – is a potential source of sustainable competitive advantage“.
[72, S. 642]	„Production competence measures only the degree to which manufacturing supports the firm’s business strategy; it does not consider the match or fit of the firm’s business strategy to its external, competitive environment“.

Das Begriffsverständnis des vorliegenden Beitrags fasst Produktionskompetenz als spezifisches, strategisches, d.h. auf Erfolgspotenziale abzielendes Wissen und Können im Bereich der Produktion auf, das bestimmt von der Koordination der Gesamtheit von Know-how, Technologie und Prozessen zur positiven Abgrenzung ge-

genüber Wettbewerbern aus Kundensicht sowie zur Beurteilung eigener, aber auch konkurrierender Produktionsleistungen befähigt [22]. Dabei ist Produktionskompetenz stets als komplexes Konstrukt zu klassifizieren, dessen Operationalisierung auf Dimensionen und Indikatoren basiert [4]. Abgesehen von den begrifflichen Differenzen können diverse Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen Ansätze zur Produktionskompetenz im Sinne von konstituierenden Merkmalen identifiziert werden (vgl. Tabelle 2).

Die Literaturanalyse zur Produktionskompetenz offenbart eine inhaltliche Anlehnung an die frühen Arbeiten von Skinner [63] und Wheelwright [74] zu den sogenannten Competitive Priorities der Produktion. Entsprechend baut die Operationalisierung der Produktionskompetenz hauptsächlich auf den Dimensionen Preis, Qualität, Lieferleistung und Flexibilität auf und kann über mehrere direkt messbare Indikatoren wie beispielsweise der Fehlerrate eines Produkts erfasst werden. Verständlicherweise konstituiert sich die Ausprägung und damit auch die Erfassung von Produktionskompetenz an verschiedenen Parametern wie beispielsweise am Produkt, der Branche oder auch der Struktur der Organisation bzw. der Supply Chain. „Different industries may require firms to develop different sets of competitive capabilities, and even within the same industry, firms can opt to compete on a unique set of capabilities“ [37]. Demnach sind die genannten Dimensionen von Produktionskompetenz eher als generische Kategorien mit einem breiten Interpretationsspielraum aufzufassen [27].

Exemplarisch sollen in Tabelle 3 Dimensionen und Indikatoren der Produktionskompetenz einer Lebensmittel-Supply Chain verdeutlicht werden. Die Auswahl basiert auf unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Arbeiten aus dem Bereich Food Supply Chain Management, in denen aus Endkundensicht jeweils relevante Variablen beim Lebensmittelkauf z.B. mittels Faktorenanalyse oder Conjoint Measurement bestimmt werden [39, 20, 71, 38]. So konstatieren z.B. Krystallis et al. [39], dass sich bei Fleisch die Faktoren Qualität aus den Indikatoren Frische bzw. Aussehen (Farbe, Textur) und Sicherheit aus den Variablen Herkunft respektive mikrobielle Unbedenklichkeit zusammensetzen [39]. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die genannten Dimensionen und ihre korrespondierenden Indikatoren eine Selektion darstellen bzw. jeweils situativ operationalisiert werden müssen. So wird beispielsweise Sicherheit in der Lebensmittelindustrie neben der Herkunft auch durch die Parameter Fütterung und Produktionsweise, Marke sowie Hersteller bzw. Verkaufsort determiniert [46].

Neben den Competitive Priorities als konstituierende Merkmale von Produktionskompetenz finden sich innerhalb der Mehrzahl der untersuchten Studien eine konkrete Interdependenz von Produktionskompetenz und Produktions- bzw. Unternehmensstrategie sowie deren mittel- respektive unmittelbarer Einfluss auf den Geschäftserfolg. Diese Wechselwirkung zwischen Produktions- und Wettbewerbsstrategie von Unternehmen bzw. ganzen Supply Chains verdeutlicht sich schließlich auch an der engen Verbindung zwischen Competitive Priorities und Dimensionen von Produktionskompetenz. Um dabei stets zwischen Akteurs- und Netzwerkebene unterscheiden zu können und zugleich dem Anspruch von Marktorientierung

Tabelle 2 Konstituierende Merkmale von Produktionskompetenz.

	Ahn et al. [1]	Berger und Diez [8]	Berry et al. [9]	Brown [12]	Choe et al. [14]	Cleveland et al. [16]	Corbett und van Wassenhove [17]	Dangayach und Deshmukh [18]	Hayes und Wheelwright [33]	Helper und Kiehl [34]	Kim und Arnold [37]	Leong et al. [41]	Molina und Bell [45]	Prahalad und Hamel [51]	Sheu und Laughlin [59]	Shi et al. [60]	Shi und Gregory [61]	Stanley et al. [62]	Upton und Macadam [70]	Vickery [72]	Walsh und Linton [73]	Wheelwright [75]	Wheelwright und Hayes [76]	Zahn [79]
Bezug zur Produktionsstrategie	X		X	X	X		X	X	X		X	X				X	X	X		X		X	X	
Einfluss auf Geschäftserfolg	X	X			X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Competitive Priorities (Bezeichnung)	X		X		X	X	X				X	X			X			X		X		X	X	
Qualität	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Preis/Kosten	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Lieferleistung	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		X	X	X	X	X	X	X	
Flexibilität	X		X	X		X	X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Innovativität							X	X	X		X	X						X		X			X	
Anpassungsfähigkeit						X						X						X		X				
Varietät									X		X	X			X									
Service											X								X					
Sicherheit																			X					
Akteursebene		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X
Netzwerkebene	X															X	X							

Ausdruck zu verleihen, etabliert Rudberg [53] im Netzwerkkontext den Begriff der Market Priorities.

Der Fokus der in Tabelle 2 aufgeführten Arbeiten liegt überwiegend auf der Wechselwirkung zwischen Produktionskompetenz, Wettbewerbsfähigkeit und Geschäftserfolg. Darüber hinaus birgt Produktionskompetenz aber insbesondere in Supply Chains zwei wesentliche, bislang weitgehend vernachlässigte Potenziale: Einerseits ist es wichtig, die Produktionskompetenz von Mitgliedern der Wertschöpfungskette bündeln und auf einander abstimmen zu können, um eine größtmögliche Erschließung von Wettbewerbsvorteilen zu gewährleisten. Bezogen auf die Mehr-Ebenen-Betrachtung des SCM [35] offenbart die in Tabelle 2 illustrierte Literaturanalyse, dass das Konstrukt bislang fast ausschließlich auf der Ebene des einzelnen, in der Regel in einer Supply Chain involvierten Akteurs untersucht wird. Ein unmittelbarer Supply Chain-Bezug (Netzwerkebene) wird nur von Ahn et al. [1] aufgeführt. Shi et al. [60] und Shi und Gregory [61] erwähnen beiläufig den Aspekt der Produktionskompetenz im Rahmen der Konfiguration von Produktionsnetzwer-

Tabelle 3 Ausgewählte Dimensionen und Indikatoren von Produktionskompetenz am Beispiel einer Lebensmittel-Supply Chain [27].

Dimension	Indikator
Kosten	Beschaffungskosten Verarbeitungskosten
Qualität	Fehlerfreiheit eines Produkts Frische eines Produkts Aussehen eines Produkts Geschmack eines Produkts
Lieferleistung	Akkurate Lieferung (richtige Menge, richtiges Produkt) Lieferzuverlässigkeit Verfügbarkeit Liefergeschwindigkeit Unversehrtheit der Lieferung Bestellaufwand
Flexibilität	Produktmodifikation (Hard-) Customization Produktwechsel Anpassung an Nachfrageschwankungen Anlaufgeschwindigkeit der Produktion
Service	Kundenbetreuung Kundeninformation (z.B. Nährwerte auf Verpackung) (Soft-) Customization
Sicherheit	Herkunft Chemische und mikrobielle Unbedenklichkeit eines Produkts

ken. Die Bedeutung von Produktionskompetenz auf der Ebene der Supply Chain (Netzwerkebene) wurde demnach, abgesehen von den genannten Ausnahmen, weitgehend unterschätzt.

Andererseits bleibt das Potenzial von Produktionskompetenz, den Endkunden in seiner Kaufentscheidung zu beeinflussen, gänzlich unbeachtet. Zu Beginn wurde bereits auf die anwendungsorientierte Relevanz von Produktionskompetenz im Kontext der Gläsernen Produktion verwiesen. Dennoch ist ein an den Kriterien der Marktorientierung ausgerichtetes Management von Produktionskompetenz in Supply Chains sowie dessen Einfluss auf den Endkunden als relativ unerforscht einzustufen [11]. In diesem Zusammenhang soll beispielhaft auf die hohe Anzahl unterschiedlicher Gütesiegel im Kontext der deutschen Lebensmittelindustrie verwiesen werden, wodurch beim Verbraucher vor allem Verunsicherung und Reizüberflutung hervorgerufen werden [6]. Einen Ausweg aus diesem Dilemma kann die aktive Kommunikation von Produktionskompetenz im Sinne eines Signals an den Endkunden darstellen.

In Anlehnung an die Funktionen des Netzwerkmanagement wird nachfolgend diskutiert, wie ein am Postulat der Marktorientierung ausgerichtetes Management

von Produktionskompetenz in Supply Chains gestaltet werden kann [67]. Entsprechend sollten Selektions-, Allokations-, Evaluations- und Regulationsfunktion des Netzwerkmanagement vor allem gezielt mit den im Kontext der Produktionskompetenz in Supply Chains priorisierten Produktionszielen (Competitive bzw. Market Priorities) abgestimmt werden.

3 Management von Produktionskompetenz in Supply Chains

Ein Management von Supply Chains mittels Produktionskompetenz kann – unter Beachtung der bereits genannten Einflüsse der Mehr-Ebenen-Betrachtung des SCM – eine postulierte Marktorientierung hinreichend über die Steuerung von Indikatoren und Dimensionen (Market bzw. Competitive Priorities) von Produktionskompetenz gewährleisten. Auf der Ebene des einzelnen, in die Supply Chain miteinbezogenen Unternehmens (Akteur) dienen die Competitive Priorities neben der Bestimmung von Produktionszielen indirekt auch zur Festlegung der angestrebten Leistungstiefe eines Akteurs (Make or Buy) [22]. Hingegen wird die Bestimmung von Determinanten der Kooperation (Cooperate) auf Supply Chain-Ebene (Netzwerk), d.h. zwischen den Netzwerkteilnehmern, durch die Einbeziehung von Market Priorities in die Funktionen des unternehmensübergreifenden Netzwerkmanagement (Selektion, Allokation, Evaluation und Regulation) ermöglicht [67]. Die institutionelle Zuständigkeit für das Management von Produktionskompetenz sollte sich hierbei insbesondere an der Form der Netzwerkführung ausrichten.

3.1 Management von Produktionskompetenz auf Akteursebene

Grundsätzlich muss sich ein Management von Produktionskompetenz auf Akteursebene an den Vorgaben der Produktionsstrategie orientieren [72]. Die Produktionsstrategie gibt Produktionsziele/Competitive Priorities sowie entsprechende Maßnahmen zu deren Erreichung für die jeweilige Unternehmung vor und determiniert damit den Auf- und Ausbau strategischer Kompetenzen zur Sicherung bzw. Förderung der Wettbewerbsfähigkeit des einzelnen Unternehmens [33]. Die Festlegung von Competitive Priorities wie Kosten, Qualität, Lieferleistung oder Flexibilität im Kontext der Produktionsstrategie bestimmt die Sollgrößen der Dimensionen und daraus abgeleitet der Indikatoren von Produktionskompetenz. Wiederum lassen sich Kompetenzen der Produktion im Sinne von spezifischem Wissen und Können mit Hilfe der Indikatoren und Dimensionen (Competitive Priorities) von Produktionskompetenz erfassen. Selbst mangelndes Wissen und Können, das eine erfolgreiche Erfüllung von Zielvorgaben erschwert, muss dabei ins Kalkül gezogen bzw. durch eine Externalisierung (Buy) kompensiert werden. So kann beispielsweise im Falle fehlender Kompetenzen auf eine Zusammenarbeit mit geeigneten Logistikdienstleistern zur Gewährleistung angestrebter Lieferleistungen vertraut werden. Selbst

kostengetriebene Aspekte bzw. Überlegungen zur Erhöhung der Flexibilität der Produktion lassen einen Rückgriff auf unternehmensexterne Leistungsangebote und damit die Kooperation mit geeigneten Netzwerkpartnern als sinnvoll erachten [67].

Die Hierarchie als vorherrschende Koordinationsform von Produktionskompetenz auf Unternehmensebene vereint und steuert relevante Fähigkeiten und Potenziale ihrer Organisationsmitglieder. Dabei erfolgt das Management von Produktionskompetenz im Unternehmen durch eine übergeordnete Instanz im Sinne einer „top-down command structure“ [68]. Vor diesem Hintergrund wird die Produktion als Primärfunktion unmittelbar mit dem Erfolg eines Unternehmens assoziiert, die Produktionsstrategie – und daraus abgeleitet auch die Produktionskompetenz – ist das wesentliche Element der Unternehmensstrategie [63, 76]. Schließlich stellt die Hierarchie innerhalb der Mehrheit der in Tabelle 2 abgebildeten Arbeiten das prägende Moment der Produktionsstrategie hinsichtlich der Produktionskompetenz auf Unternehmensebene dar (z.B. [64, 72, 14, 37, 17, 18, 76]).

Daneben lassen sich vereinzelt Überlegungen zu einer heterarchisch gesteuerten Produktionskompetenz auf Unternehmensebene indirekt aus Konzepten zur Modularisierung der Produktion ableiten, die sich insbesondere durch hohe Kunden- und Prozessorientierung bzw. flache Hierarchien auszeichnen [9]. Als Beispiele können die Kompetenzzelle [5] auf der Akteursebene bzw. das Paradigma der Neuen Zentralisierung aufgeführt werden [78, 23]. Mit Hilfe der Modularisierung soll Agilität im Sinne einer höheren Anpassungsfähigkeit an geänderte Kundenwünsche gefördert werden, wobei das Modul an sich als Teil eines Gesamtsystems respektive eines Portfolios marktrelevanter Kompetenzen betrachtet werden kann [77]. Die Einführung eines modularen Produktionssystems kann zur Steigerung der Produktionskompetenz beitragen [45]. Damit befähigen Advanced Manufacturing Technologies (z.B. Flexible Manufacturing Systems- oder Computer-Integrated Manufacturing-Technologien) Unternehmen, bei vergleichsweise geringen Kosten, flexibel und schnell auf Nachfrageänderungen zu reagieren sowie gleichzeitig als offenes System hinsichtlich der Generierung bzw. Nutzung von Innovationen und Kompetenzen agieren zu können [40].

3.2 Management von Produktionskompetenz auf Supply Chain-Ebene

Generell erfordert ein Management von Produktionskompetenz auf der Ebene der Supply Chain eine Orientierung am komplexen Verständnis der Netzwerksteuerung [67]. Die Produktionskompetenz einer Supply Chain wird wesentlich von der Supply Chain-Strategie als abgestimmtes Bündel von Maßnahmen zur gezielten und nachhaltigen Entwicklung und Nutzung von Erfolgspotenzialen innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette determiniert [55]. Die Supply Chain-Strategie fokussiert folglich nicht nur auf die Erzielung kurzfristiger operativer Effizienz, sondern vor allem auf die dauerhafte Hebung von Erfolgspotenzialen durch den Auf- und Ausbau von Wettbewerbsvorteilen, die wiederum mit Hilfe entsprechender Maßnah-

men(bündel) zu gewährleisten sind [2]. Die Supply Chain an sich ist stark aufgaben- respektive produktorientiert [26], wodurch auch die Supply Chain-Strategie unter anderem an dem zu erstellenden Produkt ausgerichtet sein muss, um eine optimale Balance zwischen Kundennutzen und Supply Chain-Kosten erzielen zu können [53]. Demnach verfolgt die Supply Chain-Strategie bestimmte Zielsetzungen, die mit Hilfe von konkreten Maßnahmen erreicht werden sollen [55].

Qualität, Kosten, Lieferleistung, Flexibilität oder Service als mögliche Ziele (Market Priorities) der Supply Chain-Strategie können in ein hierarchisches Zielsystem eingeordnet werden, woraus sich ein Leitziel und mehrere nachrangige Subziele ergeben [47]. Grundsätzlich kann eine Supply Chain-Strategie hinsichtlich ihrer Leitziele die Maximierung des Endkundennutzens und/oder die Minimierung der Supply Chain-Kosten verfolgen [55]. Das jeweilige Leitziel muss stets auf das zu erzeugende Produkt bzw. den Produkttyp der Supply Chain abgestimmt sein (Strategic Fit [55]) und wird durch die Implementierung des hierzu adäquaten Supply Chain-Designs als Maßnahme zur Zielerreichung realisiert. Ergänzend ist Postponement als die Wahl des spätest möglichen Zeitpunkts der Differenzierung bzw. Individualisierung von Produkten in der Supply Chain für ein Leagile Supply Chain-Design (Mischform aus den Extremen Agilität/Responsiveness und Schlankheit) und damit auch für die Supply Chain-Strategie von besonderer Wichtigkeit [49]. Unter Berücksichtigung von Markt, Produkt und Struktur des Produktionssystems als die drei grundlegenden Entscheidungskriterien für die Wahl der Supply Chain-Strategie werden Art und Umfang des Postponement innerhalb des Supply Chain-Designs bestimmt [49]. Erfordert die Struktur des Produktionssystems beispielsweise die Realisierung größtmöglicher Skaleneffekte kann Massenproduktion als sinnvoll erachtet werden. Besteht hingegen eine volatile Produktnachfrage kann das damit verbundene Risiko durch Postponement erheblich reduziert werden. Bezogen auf den Lebenszyklus eines Produkts empfehlen Pagh und Cooper [49] Postponement vor allem in den späten Phasen (Reife und Rückgang). Eine Orientierung an einzelnen Phasen des Produkt-Lebenszyklus begegnet der starken Vereinfachung der Produktklassifizierung im Modell von Fischer [26]. Abbildung 1 zeigt eine Kategorisierung verschiedener Branchen mit Hilfe der Differenzierung nach Nachfrage (Einführung für innovative Produkte, Wachstum und Reife für funktionale Produkte) sowie nach Supply Chain-Typen (effizient, leagile und agil). Reife Produkte können zusätzlich nach Komplexität und Einfachheit unterschieden werden [15]. Somit sollte sich das Supply Chain-Design in der Lebensmittelindustrie an den Kriterien der Effizienz bzw. Funktionalität der Produkte ausrichten [26, 42]. Die Festlegung des Supply Chain-Designs wird in Abhängigkeit von der Produktklassifizierung (funktionale vs. innovative Produkte bzw. prognostizierbare vs. nicht prognostizierbare Produkte in Bezug auf die Nachfrage) getroffen werden [26, 2].

Für funktionale Produkte (z.B. Lebensmittel) wird empfohlen, vor allem die Effizienz der Supply Chain in den Vordergrund zu stellen, im Gegensatz zu innovativen Produkten. Werden Produkte anhand festgelegter Kriterien, wie z.B. schwankende, schwer zu prognostizierende, saisonale Nachfrage, kurze Produkt-Lebenszyklen oder der Bedarf kurzer Durchlaufzeiten als innovativ identifiziert, postuliert Fisher [26] die Wahl einer bedarfsgesteuerten (Responsive) Supply Chain.

Abb. 1 Demand-Supply-Matrix [15].

	Market Qualifiers	Market Winners
Agile Supply Chain	Qualität Kosten Lieferleistung	Service
Lean Supply Chain	Qualität Lieferleistung Service	Kosten

Die Bestimmung des an der Produktklassifizierung ausgerichteten Supply Chain-Designs korreliert wie bereits erwähnt mit den Market Priorities der Supply Chain-Strategie im Sinne eines Zielsystems (Leitziel und untergeordnete Subziele). Kostenoptimierung respektive gesteigerter Endkundennutzen beeinflussen als Leitziel(e) wesentlich die Subziele der Supply Chain-Strategie, die insgesamt in Abhängigkeit von dem jeweiligen Produkttyp bzw. des entsprechenden Supply Chain-Designs in Market Winners und Market Qualifiers unterteilt werden [42]. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass sich die Bezeichnung Market Winner bzw. Market Qualifier aus der Unterscheidung der Begriffe Order Winner und Order Qualifier im Kontext der Produktionsstrategie ableitet [36]. Abbildung 2 veranschaulicht, dass in bedarfsgesteuerten bzw. agilen Supply Chains Service (gesteigerter Endkundennutzen im weitesten Sinne) als Leitziel dominiert. Hierbei werden die Erfüllung von Lieferleistungs-, Qualitäts- oder Kostenkriterien aus Endkundensicht als notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingungen hinsichtlich der Kaufentscheidung klassifiziert. Im Gegensatz dazu erweisen sich effiziente Supply Chains als primär vom Kostenfokus geprägt, d.h. die Attribute Qualität, Lieferleistung und Service tragen lediglich zur Konkurrenzfähigkeit bei, stellen jedoch nicht das entscheidende Kaufargument dar.

Eine Übertragung auf das Management von Produktionskompetenz in Supply Chains erfordert eine differenzierte Betrachtung. Nachfolgend soll dies exemplarisch an der Fleischindustrie mit einem Umsatz von 33,6 Mrd. Euro in 2006 als einer der bedeutendsten Branchen der Lebensmittelindustrie in Deutschland und speziell am Bundesland Bayern verdeutlicht werden:¹ Die Produktionsstufen Zucht, Erzeugung, Aufzucht und Mast innerhalb von Fleisch-Supply Chains sind eher polyzentrisch strukturiert, d.h. von einer Vielzahl von als eingetragene Vereine oder Genossenschaften organisierten Erzeugergemeinschaften [56]. Im Gegensatz dazu erfolgt

¹ Innerhalb der Fleischindustrie nimmt Bayern eine gesonderte Stellung ein, da hier absolut rund 26% aller Betriebe des deutschen Fleischerhandwerks und relativ die meisten Verkaufsstellen mit 52 je 100.000 Einwohner angesiedelt sind [65, 21].

Abb. 2 Market Winners und Market Qualifiers in Lean bzw. Agile Supply Chains [42].

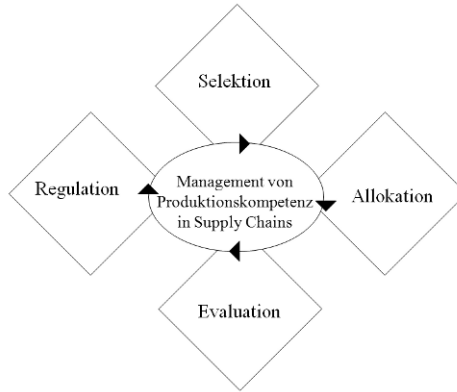
	Einführung	Wachstum	Reife	
			Komplexe Produkte	Einfache Produkte
Effiziente SC				Lebensmittel Pharmazeutika
Lean SC		Computer	Automobile	
Agile SC	Mode			

die Steuerung nachfolgender Produktionsstufen wie Schlachtung, Verarbeitung und Absatz eher hierarchisch, d.h. geführt vom fokalen Unternehmen bzw. dem Handel oder Fleischereien/Metzgereien [32]. Bedingt reicht auch eine eher hierarchische Steuerung durch den Handel bis zu den Mastbetrieben, vor allem beim Abschluss langfristiger Lieferverträge zwischen Mastbetrieben und Handel.

Fokussiert auf die letzten Stufen der vorgestellten Fleisch-Supply Chain wird ein Netzwerkmanagement im funktionalen Sinne innerhalb der vorliegenden Arbeit als eine wesentliche Prämisse des Management von Produktionskompetenz identifiziert, wodurch eine kontextabhängige Steuerung von Produktionskompetenz in Supply Chains gewährleistet werden kann [67]. Nachfolgend gehen die Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.3 näher auf die in Abbildung 3 dargestellten Funktionen des Netzwerkmanagement ein.

3.2.1 Selektion und Allokation von Produktionskompetenz in Supply Chains

Die Ziele (Market Priorities) innerhalb der Supply Chain-Strategie (z.B. Kosten, Qualität, Lieferleistung, Flexibilität oder Service) finden entsprechend innerhalb der Funktionen des Netzwerkmanagement unmittelbare Berücksichtigung: Die Selektionsfunktion evaluiert beispielsweise mögliche bzw. bestehende Netzwerkunternehmen (z.B. Schlachthäuser oder industrielle Fleischverarbeitungsbetriebe) nicht nur hinsichtlich ihrer Intentionen, sondern insbesondere hinsichtlich ihrer Kompetenzen zur Gewährleistung der Erreichung der aus der Supply Chain-Strategie abgeleiteten Ziele [67]. Oft werden Bewertungskriterien im Kontext der Lieferantenauswahl in operative (produktbezogene) Leistungsmerkmale (z.B. Qualität, Kosten) und in potenzialorientierte Leistungsmerkmale des Zulieferers (z.B. Innovations-, Flexibilitätspotenzial) unterschieden [50].

Abb. 3 Funktionen des Management von Produktionskompetenz in Supply Chains [67].

Die Allokationsfunktion innerhalb des Netzwerkmanagement erstreckt sich vor allem auf die Verteilung von Aufgaben, Ressourcen und Zuständigkeiten in der Supply Chain [67]. Im Kontext des Management von Produktionskompetenz in Supply Chains bedeutet dies, dass Aufgaben und Zuständigkeiten entsprechend der individuellen Ressourcen und Kompetenzen der Netzwerkakteure zur adäquaten Realisierung der durch die Supply Chain-Strategie vorgegebenen Market Priorities alloziert werden. Neben der Fach- und Prozesskompetenz als Komponenten von Produktionskompetenz zur Erfüllung vorgegebener Market Priorities gewinnen im Netzwerkkontext zunehmend sogenannte Interaktionskompetenzen (kooperatives bzw. integratives Wissen und Können) an Bedeutung [19]. Damit wird den Mitgliedern einer Supply Chain – abgesehen von technischen Fertigkeiten zur Herstellung eines Produkts – die Fähigkeit zur Zusammenarbeit bzw. Integration im Sinne von Exploration und Exploitation von Kompetenz abverlangt. Die Vernetzung und damit auch die Fähigkeit zur Verknüpfung von Produktionskompetenz in der Supply Chain bedarf dieser Second-Order- bzw. Komplementaritätskompetenzen. Die Qualität der Kompetenzvernetzung wirkt sich dabei maßgeblich auf die Wettbewerbsfähigkeit der Supply Chain aus [7, 19]. Vor diesem Hintergrund gilt es unter anderem, die in der Supply Chain aus komplementären Basen neu entstehenden, kooperativen und zugleich im Netzwerk verteilten Kompetenzen im Kontext der Produktionskompetenz adäquat zu steuern [24]. Die Form der Netzwerkführung übt nicht nur auf die Market Priorities, sondern auch auf die Allokation von Second-Order- bzw. Komplementaritätskompetenzen einen entscheidenden Einfluss aus. Beispielsweise tendieren hierarchisch geführte Netzwerke eher zur Zentralisierung von Second-Order-Kompetenzen [66].

Im Supply Chain-Kontext von Produktionskompetenz ermöglichen relationale Komponenten die Entwicklung und Gestaltung kooperativer Fähigkeiten zwischen Supply Chain-Mitgliedern. Integrative Aspekte der Produktionskompetenz beziehen sich hingegen eher auf die Dislozierung von Produktionskompetenz im Netzwerk [48].

3.2.2 Evaluation von Produktionskompetenz in Supply Chains

Die Evaluationsfunktion ist auf die Erfassung von Produktionskompetenz in Supply Chains konzentriert und dient damit der Sicherstellung der Zielerreichung, d.h. der Realisierung der innerhalb der Supply Chain-Strategie vorgegebenen Market Priorities [28]. Eine Erfassung von Produktionskompetenz in Supply Chains kann beispielsweise durch numerische wie auch durch graphische/verbale Messinstrumente erzielt werden, exemplarisch sei hier auf die Berechnung von Produktionskompetenz-Scores oder den Einsatz von Produktionskompetenz-Portfolios verwiesen [25]. Um jedoch eine hinreichende Endkundenorientierung gewährleisten zu können, sollten Instrumente der Marketingforschung in die Evaluation von Produktionskompetenz in Supply Chain integriert werden [54]. Da in der Regel eine Diskrepanz zwischen Kundenwahrnehmung und der Einschätzung des Herstellers hinsichtlich der Wichtigkeit der Indikatoren von Produktionskompetenz besteht [37], muss die Kundenwahrnehmung getrennt von der Eigenwahrnehmung betrachtet werden.

Insbesondere die Conjoint-Analyse kann eine Erfassung der Endkundenwahrnehmung gewährleisten [29]. Unter der Voraussetzung, dass nur wahrnehmbare Produktmerkmale erfasst werden bzw. dass eine Gültigkeit der Aussagen nur innerhalb der vorgegebenen Spannweiten vorliegt, kann die Conjoint-Analyse als ein geeignetes Instrumentarium zur Erhebung der Wahrnehmung von Produktionskompetenz betrachtet werden. Hierzu gewährleistet die Conjoint-Analyse als kompensatorisches Beurteilungsmodell eine valide Abbildung menschlichen Urteilsverhaltens [58].

Die Conjoint-Analyse ermöglicht die Aufdeckung der relativen Wichtigkeiten der Eigenschaften. Dabei wird unter den Befragten eine gleiche Wahrnehmung der Attribute vorausgesetzt, dennoch kann der errechnete Nutzen sowie die hieraus abgeleitete Wichtigkeit zwischen den Teilnehmern erheblich differieren. Gemäß dem generellen Vorgehen der Conjoint-Analyse wurden im Rahmen der nachfolgend exemplarisch dargestellten Untersuchung unterschiedliche hypothetische Beurteilungsobjekte (Stimuli) basierend auf den für die Kaufentscheidung relevanten Eigenschaften generiert und Befragten zur ganzheitlichen Bewertung vorgelegt. In diesem Zusammenhang wurde die persönliche Befragung als Erhebungsmethode gewählt, wobei ein Fragebogen als Erhebungsinstrument diente. Auf der Grundlage dieser Globalbewertung konnte anschließend der Anteil (Teilnutzenwert) ermittelt werden, den jede Variable von Produktionskompetenz zum subjektiv wahrgenommenen Gesamtnutzen eines Fleischprodukts beiträgt. Um die kognitiven Fähigkeiten von Probanden nicht zu überfordern, empfehlen Green und Srinivasan [29], im Rahmen der Profilmethode als Erhebungsdesign max. fünf Eigenschaften bzw. nicht mehr als 20 Stimuli zu verwenden.

Mit Hilfe zweier Studierendenbefragungen ($n=19$ bzw. $n=82$) wurden die ausgewählten Dimensionen genutzt, um deren Bedeutung beim Konsum von Fleisch aus Verbrauchersicht zu erfassen.² Die Erhebung erfolgte dabei in zwei zeitlich

² Entgegen den bekannten Defiziten von Studierendenbefragungen [69] wurde im Rahmen der empirischen Studie bewusst eine Studierendenbefragung gewählt, da der Konsum von Fleisch über fast alle Bevölkerungsschichten hinweg ein nahezu alltägliches, relativ triviales Phänomen

Tabelle 4 Eigenschaften und Eigenschaftsausprägungen.

Dimension/Eigenschaft	Eigenschaftsausprägung
Preis	1 2,50€/100g
	2 3,00€/100g
	3 3,50€/100g
Qualität	1 Bild 1
	2 Bild 2
	3 Bild 3
Flexibilität	1 vielseitig verwendbar
	2 begrenzt verwendbar
Sicherheit	1 ohne Herkunftsangabe
	2 mit Herkunftsangabe

voneinander getrennten Schritten. Aufbauend auf der Auswertung des Pretests (Schritt eins) wurden die Stimuli der Hauptbefragung (Schritt zwei) angepasst.³ In Ergänzung zu geschlossenen Fragen mit je nur einer Antwortmöglichkeit zur Person bzw. zum Konsumverhalten kam bei der Frage zur Conjoint-Analyse jeweils eine Rangreihung zum Einsatz. Die Wahl der Objektattribute (Eigenschaften) zur Conjoint Design-Bestimmung bei der Befragungen stützt sich auf die in Tabelle 3 bzw. mittels Literaturstudium identifizierten und beim Kauf von Lebensmitteln als relevant erachteten Indikatoren von Produktionskompetenz.⁴ Dabei wurde stets versucht, die Anzahl der Eigenschaften bzw. Eigenschaftsausprägungen und damit auch der Stimuli möglichst gering zu halten (vgl. Tabelle 4). Im Gegensatz zu den Eigenschaftsausprägungen von Qualität, die optisch anhand von drei Bildern dargestellt wurden, erfolgte eine verbale Erläuterung der restlichen Eigenschaftsausprägungen (vgl. Anhang A). Bezüglich der Ausprägungen der untersuchten Attribute in Hinblick auf die Beurteilungsobjekte unterstellt die Conjoint-Analyse bei allen Befragten eine vollständige und korrekte Wahrnehmung, bzw. dass alle Eigenschaften relevant, vom Hersteller beeinflussbar, realisierbar, kompensatorisch und

darstellt. Die Ziehung einer repräsentativen Stichprobe, die valide die Grundgesamtheit abbilden kann, ist hierdurch jedoch kaum möglich. In Bezug auf die Wirkung von Produktionskompetenz fehlen zudem erforderliche Kenntnisse über die Zusammensetzung der relevanten Käufergruppe. So ist z.B. zu vermuten, dass Produktionskompetenz als Signal zur Reduzierung von Unsicherheit beim Lebensmittelkauf nur für eine sensibilisierte, gut situierte Käuferschicht geeignet ist.

³ Innerhalb des Pretests (n=19) wurden die Eigenschaften Preis, Qualität, Lieferleistung und Flexibilität als relevante Eigenschaften beim Kauf von Rindfleisch abgefragt. In der Haupterhebung (n=82) wird Sicherheit als Herkunftsangabe anstelle von Lieferleistung berücksichtigt.

⁴ Grundsätzlich können aus Kundensicht relevante Eigenschaften durch quantitative (Faktorenanalyse) und qualitative Forschungsmethoden (z.B. Fokusgruppeninterview, In-depth oder problemzentriertes Interview) bestimmt werden [3]. Im Rahmen der vorliegenden empirischen Studie wird mittels Sekundäranalyse auf bestätigte Ergebnisse anderer Forschungsarbeiten zurückgegriffen [39, 20, 71, 38, 27].

voneinander unabhängig sind.⁵ Zudem dürfen die betrachteten Attribute keine Ausschlusskriterien darstellen und müssen in ihrer Anzahl begrenzt sein. Den vier Eigenschaften werden die in Tabelle 4 aufgeführten Eigenschaftsausprägungen zugeordnet, woraus ein asymmetrisches Design hervorgeht. Die Erhebung mittels Profilmethode berücksichtigt in diesem Fall Empfehlungen von Green und Srinivasan [29] bezüglich der Obergrenze der zu beurteilenden Stimuli und greift folglich auf ein reduziertes (fraktioniertes) Design zurück. Mit Hilfe von SPSS wurde ein reduziertes Design von neun Stimuli generiert, das sich durch zwei zusätzliche Holdout-Karten (Prüffälle) zu insgesamt elf Produktkarten ergänzt. Die Probanden wurden gebeten, jede Produktkarte mit einem Rang zu versehen, der dessen Präferenz wiedergibt (von eins für eine besonders hohe Präferenz bis elf für eine besonders niedrige Präferenz), entsprechend ist diese Methode der Rangverteilung zuzuordnen [3].

Das Ziel der Conjoint-Analyse im Kontext der vorliegenden Untersuchung ist die Ermittlung der Bedeutung der einzelnen Indikatoren des Konstrukts beim Kauf von Rindfleisch. Folglich liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf der Bestimmung der relativen Wichtigkeit der Eigenschaften, die aus den entsprechenden Teilnutzenwerten abgeleitet werden kann.⁶ Im Rahmen der Analyse der Bedeutung der Komponenten von Produktionskompetenz sind die individuellen Auswertungen im Gegensatz zur aggregierten Auswertung von nachgeordnetem Interesse. Die Ergebnisse der gemeinsamen Conjoint-Analyse, dargestellt in Tabelle 5, verdeutlichen, dass Qualität beim Kauf von Rindfleisch von den Konsumenten mit Abstand am bedeutungsvollsten eingestuft wird. Hingegen können Preis und Sicherheit als in etwa gleich wichtig interpretiert werden. Dabei attestierten die Holdout-Karten eine sehr hohe interne Validität der Messung (Pearson-r: 0,999, Sig. 0,000).

Tabelle 5 Wichtigkeit relevanter Eigenschaften beim Kauf von Rindfleisch.

Attribut	Relative Wichtigkeit
Qualität	49,51
Preis	21,96
Sicherheit	18,08
Flexibilität	10,45
Σ	100,00

Folglich messen Verbraucher beim Kauf von Rindfleisch dem Attribut Qualität weit mehr Bedeutung bei als dem Preis. Dieses Resultat wird schließlich auch durch die Studie von Röhr et al. [52] gestützt. Erstaunlich daran ist, dass Kunden zwar die Qualität als wichtigste Eigenschaft einschätzen, zugleich aber nachgewiesen werden

⁵ Die geforderte Unabhängigkeit von Eigenschaften kann als weitestgehend erfüllt angesehen werden, da beispielsweise bessere Qualität, höhere Sicherheit oder Flexibilität nicht unbedingt mit einem höheren Preis eines Produkts verbunden sind, beispielsweise bei innovativen Produktionsverfahren.

⁶ Ergänzend zeigt Anhang B die Teilnutzenschätzungen der SPSS-Auswertung.

konnte, dass Konsumenten nicht in der Lage sind, die Qualität von Fleisch a priori zu beurteilen [31].

Somit liegt das Resultat der zur Erfassung der Bedeutung einzelner Komponenten von Produktionskompetenz im Rahmen der durchgeführten Conjoint-Analyse im Widerspruch zu den Ergebnissen von Mason-Jones et al. [42] bzw. Abbildung 2. Bei Rindfleisch als Lebensmittel und somit als einem funktionalen Produkt dominiert nicht der Kostenfokus, sondern Qualität die Kaufentscheidung. Entsprechend sollte eine Ausrichtung des Supply Chain-Design auf die Kundenwahrnehmung erfolgen. Bezogen auf das Management von Produktionskompetenz in Supply Chains könnte neben Qualität eine gezielte Kommunikation relativ wichtiger Eigenschaften wie Preis und Sicherheit die Wahrnehmung von Produktionskompetenz beim Endkunden fördern.

3.2.3 Regulation von Produktionskompetenz in Supply Chains

Die Regulationsfunktion dient zur Entwicklung bzw. Durchsetzung formeller und informeller Vorgaben hinsichtlich der Kooperation zwischen den Mitgliedern einer Supply Chain [67]. Bezogen auf das Management von Produktionskompetenz in Supply Chains werden innerhalb der Regulationsfunktion – beeinflusst durch die Form der Netzwerkführung – Determinanten der Zusammenarbeit zwischen Supply Chain-Mitgliedern festgelegt. Neben einer permanenten Regulation von Netzwerkbeziehungen bedarf es insbesondere der kontinuierlichen Abstimmung von Aktivitäten zwischen den Supply Chain-Akteuren. Diese Aktivitäten sind vor allem mit den Market Priorities der Supply Chain-Strategie zu vereinbaren, wodurch die hohe Interdependenz von Competitive Priorities der Produktionsstrategie des jeweiligen Einzelunternehmens und den Market Priorities der übergreifenden Supply Chain-Strategie besonders evident wird [1, 53]. Folglich besteht nicht nur ein Zusammenhang zwischen den Funktionalstrategien (z.B. Produktionsstrategie) der einzelnen Supply Chain-Mitglieder und deren Unternehmensstrategie, sondern auch eine Wechselwirkung zur unternehmensübergreifenden Supply Chain-Strategie. Da Produktionskompetenz eng mit der Produktionsstrategie verflochten ist [14], soll an dieser Stelle vornehmlich der Zusammenhang zwischen Produktionsstrategie und Supply Chain-Strategie analysiert werden. Diesbezüglich kann in Supply Chains nach zwei grundsätzlichen Arten der Interdependenz, hier bezeichnet als Dominanz- und Äquivalenzansatz, differenziert werden.

- *Dominanzansatz*

Auf Akteursebene wurde bereits in Abschnitt 3.1 auf den dominierenden Einfluss der Produktionsstrategie gegenüber Funktionalstrategien innerhalb der Unternehmensstrategie hingewiesen. Entsprechend kann auch auf Supply Chain-Ebene eine Dominanz der Produktionsstrategie gegenüber anderen Funktionalstrategien existieren, d.h. die Supply Chain-Strategie weist einen hohen Bezug zur Produktion und damit auch zur Produktionsstrategie auf [57]. Entsprechend wird im Falle hierarchischer Supply Chain-Strukturen die Supply Chain-Strategie (bzw. daraus abgeleitet die anvisierte Produktionskompetenz der Supply Chain) ein-

schließlich der Wahl des Supply Chain-Designs überwiegend vom fokalen Unternehmen vorgegeben, wonach sich Führung und Steuerung der Supply Chain weitgehend gemäß hierarchischer Grundsätze vollziehen [67, 66]. Obwohl das Netzwerk führende Unternehmen den relevanten Markt, einschließlich Art und Inhalt der Strategie, mit der dieser Markt zu bearbeiten ist, wesentlich vorgibt, bleibt zu einem gewissen Grad der polyzentrische Charakter von Netzwerken erhalten [66]. Die von der fokalen Unternehmung geführten Netzwerkunternehmen sind folglich in einem bestimmten Maß in die Entwicklung der Supply Chain-Strategie mit eingebunden, die strategische Metakoordination obliegt jedoch der Netzwerkführung.

Daneben ist zumindest in Produktionsnetzwerken denkbar, dass unter der Voraussetzung eher heterarchisch geprägter Supply Chain-Strukturen eine kollektive Supply Chain-Strategie aus den individuellen Produktionsstrategien gleichberechtigter Supply Chain-Mitglieder emergiert [56]. Produktionsnetze mit hoher Kundenorientierung sind insbesondere im Bereich innovativer Wertschöpfung anzusiedeln [78]. Eine heterarchische Struktur der Wertschöpfungskette kann durch die Vernetzung autonomer, selbstorganisierender Wertschöpfungseinheiten gewährleistet werden, die sich stets am Kunden bzw. dem zu lösenden Problem ausrichten sollten. Im Gegensatz zu strategischen Netzwerken zeichnen sich selbstorganisierte Netzwerke durch das Fehlen einer fokalen Unternehmung aus, hierdurch sind selbstorganisierte Netzwerke in „erheblich höherem Maße auf Selbstbestimmung aller beteiligten Unternehmen angewiesen“ [13]. Kompetenznetze bzw. Kompetenz-Cluster repräsentieren ein illustratives Beispiel für eine hierarchielose Zusammenarbeit rechtlich (und weitgehend auch wirtschaftlich) unabhängiger Unternehmen in Produktionsnetzwerken zur Förderung von Innovativität und Effektivität der Kooperation [78].

Zugleich vereinen Kompetenznetze bzw. Kompetenz-Cluster die bereits dargestellten Überlegungen zur Ko-Kompetenz respektive zur kooperativen Kernkompetenz: Eine Zusammenarbeit der Netzwerkunternehmungen im Rahmen der Entwicklung respektive Sicherung kooperativer Wettbewerbsvorteile soll einerseits der Entwicklung gemeinsamer Kompetenzen aus den komplementären Kompetenzbasen der einzelnen Kooperationspartner und andererseits dem kollektiven Zugang zu Kompetenzen aller Netzwerkmitglieder dienen [24, 7].

- *Äquivalenzansatz*
Werden Funktionalstrategien innerhalb der Supply Chain-Strategie nicht von einer einzelnen Funktionalstrategie, wie beispielsweise der Produktionsstrategie dominiert, kann vom Äquivalenzansatz gesprochen werden. Entsprechend gewinnen innerhalb der Supply Chain-Strategie andere Funktionalstrategien wie beispielsweise die Marketing- oder Beschaffungsstrategie gegenüber der Produktionsstrategie an Bedeutung [57]. Dabei ist im Falle des Äquivalenzansatzes strikt auf eine Kohärenz von Unternehmens- bzw. Funktionalstrategien aller Supply Chain-Mitglieder mit der Supply Chain-Strategie zu achten, d.h. die Abstimmung zwischen den Market Priorities der Supply Chain und den Competitive Priorities der einzelnen Supply Chain-Mitglieder muss sowohl auf der Ebene der Unternehmensstrategie als auch auf der Ebene der Funktionalstrategi-

en gewährleistet sein [1]. Die Form der Netzwerkführung spielt in diesem Zusammenhang eher eine untergeordnete Rolle, allenfalls wird hierdurch determiniert, ob eher die Funktionalstrategien des fokalen Unternehmens oder eher die Emergenz der Funktionalstrategien aller Supply Chain-Unternehmen die Supply Chain-Strategie beeinflussen.

4 Diskussion der Ergebnisse

Insgesamt kann Kunden- bzw. Marktorientierung als Zielkategorie des SCM durch ein Management von Produktionskompetenz in Supply Chains gewährleistet werden. Dieses orientiert sich an den Funktionen des Netzwerkmanagement. Selektion, Allokation, Evaluation und Regulation von Produktionskompetenz in Supply Chains können mit Hilfe der Market Priorities sichergestellt werden und sind situativ durch adäquate Instrumente wie z.B. die Conjoint-Analyse zu ergänzen. Wenngleich der vorgestellte Ansatz für ein Management von Produktionskompetenz in Supply Chains stark an der Lebensmittelindustrie ausgerichtet und beispielhaft hierin überprüft wurde, muss die Möglichkeit der Übertragung auf weitere Branchen erst geprüft werden. Jedenfalls konnte am Beispiel von Fleisch mittels Conjoint-Analyse gezeigt werden, dass Kunden für dieses funktionale Produkt nicht den Preis, sondern die Qualität als kaufentscheidendes Kriterium beurteilen. Dabei kann die Kommunikation von für den Verbraucher wichtigen Indikatoren von Produktionskompetenz ein Signal zu dessen Unsicherheitsreduzierung beim Kauf darstellen.

Der unmittelbare Anwendungsbezug von Produktionskompetenz in Supply Chains wurde im Rahmen des vorliegenden Beitrags an der Gläsernen Produktion von Lebensmitteln verdeutlicht. In der betrieblichen Praxis wird die Gläserne Produktion bislang überwiegend auf der Ebene des Akteurs verortet, eine unternehmensübergreifende Betrachtung wird größtenteils vernachlässigt. Für Hersteller ist die Umsetzung einer Gläsernen Produktion fast immer mit baulichen Veränderungen am Produktionsstandort verbunden, um Verbrauchern entsprechende Einblicke in Produktionsprozesse zu gewährleisten, jedoch ohne dabei die Abläufe bzw. hygienischen Auflagen/Vorschriften zu konterkarieren. Auf unternehmensübergreifender (Supply Chain-)Ebene ist eine Umsetzung entsprechender Besichtigungsmöglichkeiten umso schwerer umsetzbar, je größer die tatsächliche geographische Ausdehnung der Supply Chain ist. Folglich sollten insbesondere auf Supply Chain-Ebene kommunikative (ggf. multimediale) Maßnahmen, die sich auf die Produktionskompetenz der Supply Chain beziehen, zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Anhang A

Fragebogen zum Konsum von Fleisch

Geschlecht weiblich männlich
 Alter _____ Jahre

1. Welchen Stellenwert hat für Sie der Genuss von Fleischprodukten?

hoher Stellenwert niedriger Stellenwert

1 2 3 4 5

2. Wie oft kaufen Sie Fleischprodukte ein (Anzahl der Einkäufe pro Woche)?

5x 4x 3x 2x 1x

1 2 3 4 5

3. Wo kaufen Sie Ihre Fleischprodukte i.d.R. ein?

Metzger, Supermarkt, Discounter, direkt beim Erzeuger

4. Wie oft kaufen Sie Lebensmittel ein, abgesehen von Restaurantbesuchen?

5x 4x 3x 2x 1x (jeweils pro Woche)

1 2 3 4 5

5. Beim Einkauf von Lebensmitteln achten Sie besonders auf

	stimme ich voll zu	stimme ich gar nicht zu
(a) Nährwert	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 5
(b) Zusatzstofffreiheit	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 5
(c) Herkunft	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 5
(d) Markenprodukte	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 5
(e) Convenience	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 5

6. Trotz aktueller Lebensmittelskandale möchten Sie nicht auf den Konsum von Rindfleisch verzichten. Vor diesem Hintergrund sollen Sie bitte Ihre Kaufentscheidung anhand der Eigenschaften Preis, Aussehen, Herkunftsangabe und Verwendbarkeit von Rindfleisch fällen. Zur Auswahl stehen Ihnen hierzu 11 fiktive Eigenschaftskombinationen, die Sie bitte mit Ihrer persönlichen Rangliste von 1 (hohe Präferenz) bis 11 (niedrige Präferenz) versehen.

3,50 €/100g
Bild 1
ohne Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

3,50 €/100g
Bild 3
mit Herstellerangabe
begrenzt verwendbar

Rang Nr. __

3,00 €/100g
Bild 1
mit Herstellerangabe
begrenzt verwendbar

Rang Nr. __

3,50 €/100g
Bild 2
mit Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

3,00 €/100g
Bild 3
ohne Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

3,00 €/100g
Bild 2
mit Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

2,50 €/100g
Bild 2
ohne Herstellerangabe
begrenzt verwendbar

Rang Nr. __

2,50 €/100g
Bild 1
mit Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

2,50 €/100g
Bild 3
mit Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

2,50 €/100g
Bild 1
ohne Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

2,50 €/100g
Bild 2
ohne Herstellerangabe
vielseitig verwendbar

Rang Nr. __

Erläuterungen:

mit Herstellerangabe bedeutet, dem Kunden ist zum Zeitpunkt des Kaufs die Herkunft des Produktes bzw. der Name des Produzenten bekannt

vielseitig verwendbar bedeutet, dass sich das Produkt z.B. sowohl zum Kurzbraten als auch für Schmorgerichte eignet

begrenzt verwendbar drückt aus, dass sich das Produkt bspw. nur zum Kurzbraten oder nur für Schmorgerichte eignet 2

Darstellung der **Bilder 1-3** siehe Seite 3

Bild 1:



Bild 2:



Bild 3:



Anhang B

Nutzen			
		Nutzenschätzung	Standardfehler
Preis	2,50€/100g	0,365	0,052
	3,00€/100g	0,036	0,052
	3,50€/100g	- 0,401	0,052
Qualität	Bild 1	1,717	0,052
	Bild 2	0,088	0,052
	Bild 3	-1,805	0,052
Sicherheit	mit Herstellerangabe	0,759	0,039
	ohne Herstellerangabe	- 0,759	0,039
Flexibilität	vielseitig verwendbar	0,229	0,039
	begrenzt verwendbar	- 0,229	0,039
	(Konstante)	4,679	0,041

Literaturverzeichnis

1. Ahn, H.-S., Jung, H.-D., Ahn, B.-H., Rhee, S.-K.: Supply chain competitiveness and capabilities of constituent firms: An exploratory study of the Korean home appliance industry. *Supply Chain Management* 4(5) (1999) 242–253
2. Appelqvist, P.: Order winners, order qualifiers and supply chain strategies – A comparison. In: Seuring, S., Müller, M., Goldbach, M., Schneidewind, U. (Hrsg.): *Strategy and Organization in Supply Chains*. Springer, Heidelberg (2003) 197–210
3. Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R.: *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*, 11. Aufl. Springer, Berlin (2006)
4. Bagozzi, R.P., Fornell, C.: Theoretical concepts, measurements, and meaning. In: Fornell, C. (Hrsg.): *A Second Generation of Multivariate Analysis*, 2. Aufl. Greenwood Publishing Group, New York (1982) 24–38
5. Baumann, A.: *Kompetenzzellenbasierte regionale Produktionsnetze*, Dissertation der Technischen Universität Chemnitz. Chemnitz (2000)
6. Bech-Larsen, T., Grunert, K.G.: Konsumentenentscheidung bei Vertrauenseigenschaften: Eine Untersuchung am Beispiel des Kaufes von ökologischen Lebensmitteln in Deutschland und Dänemark. *Marketing Zeitschrift für Forschung und Praxis* 23(3) (2001) 188–197
7. Bellmann, K.: Produktionsnetzwerke – ein theoretischer Bezugsrahmen. In: Wildemann, H. (Hrsg.): *Produktions- und Zuliefernetzwerke*. TCW, München (1996) 47–63
8. Berger, M., Diez, J.R.: Technological capabilities and innovation in Southeast Asia: Results from innovation surveys in Singapore, Penang and Bangkok. *Science, Technology & Society* 11(1) (2006) 109–148
9. Berry, W.L., Hill, T., Klompmaker, J.E.: Aligning marketing and manufacturing strategies with the market. *International Journal of Production Research* 37(16) (1999) 3599–3618
10. Bodmer, U., Horváth, L.: Gläserne Produktion von Fleisch unter Berücksichtigung von Informationstechnologien. *Zeitschrift für Agrarinformatik* 4(10) (2002) 54–60
11. Braun, D.J.: Suppliers making profit. *Foundry Trade Journal* 177(3601) (2003) 10–12
12. Brown, S.: New evidence on quality in manufacturing plants: A challenge to lean production. *Production and Inventory Management Journal* 39(1) (1998) 24–29
13. Burr, W.: Koordination durch Regeln in selbstorganisierenden Unternehmensnetzwerken. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 69(10) (1999) 1159–1179
14. Choe, K., Booth, D., Hu, M.: Production competence and its impact on business performance. *Journal of Manufacturing Systems* 16(6) (1997) 409–421
15. Cigolini, R., Cozzi, M., Perona, M.: A new framework for supply chain management: conceptual model and empirical test. *International Journal of Operations & Production Management* 24(1) (2004) 7–41
16. Cleveland, G., Schroeder, R.G., Anderson, J.C.: A theory of production competence. *Decision Sciences* 20(3) (1989) 655–668
17. Corbett, C., Van Wassenhove, L.: Trade-offs? What trade-offs? Competence and competitiveness in manufacturing strategy. *California Management Review* 35(4) (1993) 107–122
18. Dangayach, G.S., Deshmukh, S.G.: Implementation of manufacturing strategy: A select study of Indian process companies. *Production Planning & Control* 12(1) (2001) 89–105
19. Danneels, E.: The dynamics of product innovation and firm competences. *Strategic Management Journal* 23(12) (2002) 1095–1121
20. De Carlos, P., García, M., De Felipe, I., Briz, J., Morais, F.: Analysis of consumer perceptions on quality and food safety in the Spanish beef market: a future application in new product development. Presented Paper at the 11th Congress of the EAAE (European Association of Agricultural Economics), Copenhagen (2005)
21. Deutscher Fleischer-Verband e.V.: *DFV-Geschäftsbericht 2007*. Frankfurt a.M. (2008)
22. Djabarian, E.: *Die strategische Gestaltung der Fertigungstiefe: Ein systemorientierter Ansatz am Beispiel der Automobilindustrie*. Gabler, Wiesbaden (2002)
23. Drumm, H.J.: Das Paradigma der Neuen Dezentralisation. *Die Betriebswirtschaft* 56(1) (1996) 7–20

24. Duschek, S.: Kooperative Kernkompetenzen – Zum Management einzigartiger Netzwerkressourcen. *Zeitschrift für Führung und Organisation* 67(4) (1998) 230–235
25. EBig, M., Amann, M.: Bedeutung von Produktionskompetenz im Supply Chain Management: Ein Food Supply Chain-Beispiel. In: Bogaschewsky, R., EBig, M., Lasch, R., Stölzle, W. (Hrsg.): *Supply Management Research: Aktuelle Forschungsergebnisse 2008*. Gabler, Wiesbaden (2009) 105–125
26. Fisher, M. L.: What is the right supply chain for your product? A simple framework can help you figure out the answer. *Harvard Business Review* 75(2) (1997) 105–116
27. Garvin, D.A.: Manufacturing strategic planning. *California Management Review* 35(4) (1993) 85–106
28. Gomm, M., Trumpfheller, M.: Netzwerke in der Logistik. In: Pfohl, H.-C. (Hrsg.): *Netzkompetenz in Supply Chains: Grundlagen und Umsetzung*. Gabler, Wiesbaden (2004) 43–65
29. Green, P.E., Srinivasan: Conjoint analysis in consumer research: issues and outlook. *Journal of Consumer Research* 5(2) (1978) 103–123
30. Grenzdörffer, G., Korduan, P.: Informationsmanagement und Konzepte des Precision Farming als Beitrag zur „Gläsernen Produktion“ im Pflanzenbau. *Rostocker Agrar- und Umweltwissenschaftliche Beiträge* 9 (2001) 243–252
31. Grunert, K.G.: Food quality and safety: consumer perception and demand. *European Review of Agricultural Economics* 32(3) (2005) 369–391
32. Gurrath, P.: *Vom Erzeuger zum Verbraucher: Fleischversorgung in Deutschland*, Ausgabe 2008, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2008)
33. Hayes, R.H., Wheelwright, S.C.: *Restoring our competitive edge: competing through manufacturing*. Wiley, New York (1984)
34. Helper, S., Kiehl, J.: Developing supplier capabilities: market and nonmarket approaches. *Industry and Innovation* 11(1/2) (2004) 89–107
35. Heusler, K.F.: *Implementierung von Supply Chain Management: Kompetenzorientierte Analyse aus der Perspektive eines Netzwerkakteurs*. Gabler, Wiesbaden (2004)
36. Hill, T., *Manufacturing Strategy: The Strategic Management of the Manufacturing Function*, 2. Aufl., London (1993)
37. Kim, J.S., Arnold, P.: Manufacturing competence and business performance: a framework and empirical analysis. *International Journal of Operations and Productions Management* 13(10) (1992) 4–25
38. Krystallis, A., Ness, M.: Consumer preferences for quality foods from a South European perspective: a conjoint analysis implementation on Greek olive oil. *International Food and Agribusiness Management Review* 8(2) (2005) 62–91
39. Krystallis, A., Chrysoschoioidis, G., Schloderer, J.: Consumer-perceived quality in ‚traditional‘ food chains: the case of the Greek meat supply chain. *Appetite* 48(1) (2007) 54–68
40. Lei, D., Goldhar, J.D.: Knowledge and organizational properties of CIM technology. *International Journal of Manufacturing, Technology and Management* 4(1/2) (2002) 134–157
41. Leong, G.K., Snyder, D.L., Ward, P.T.: Research in the process and content of manufacturing strategy. *OMEGA The International Journal of Management Science* 18(2) (1990) 109–122
42. Mason-Jones, R., Naylor, B., Towill, D.R.: Engineering the agile supply chain. *International Journal of Agile Management Systems* 2(1) (2000) 54–61
43. Meffert, H.: *Marketing – Entwicklungstendenzen und Zukunftsperspektiven*. *Die Unternehmung* 53(6) (1999) 409–432
44. *Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg: Gläserne Produktion: Natürlich aus Baden-Württemberg*. Schwäbisch Gmünd (1992)
45. Molina, A., Bell, R.: A manufacturing model representation of a flexible manufacturing facility. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B* 213 (3) (1999) 225–246
46. Müller, M.J., Röhr, A.: *Transparenz im Informationsfluss: Kommunikation von Lebensmittelsicherheit aus Sicht der Fleisch verarbeitenden Betriebe*. *Fleischwirtschaft* 83(9) (2003) 89–89

47. Naylor, J.B., Naim, M.M., Berry, D.: Leagility: integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics* 62(1/2) (1999) 107–118
48. Ojasalo, J.: Key network management. *Industrial Marketing Management* 33(3) (2004) 195–205
49. Pagh, J.D., Cooper, M.C.: Supply chain postponement and speculation strategies: how to choose the right strategy. *Journal of Business Logistics* 19(2) (1998) 13–33
50. Pampel, J.: *Kooperation mit Zulieferern: Theorie und Management*. Wiesbaden (1993)
51. Prahalad, C.K., Hamel, G.: The core competences of the corporation. *Harvard Business Review* 68(3) (1990) 79–91
52. Röhr, A., Lüddecke, K., Drusch, S., Müller, M.J., von Alvensleben, R.: Food quality and safety – consumer perception and public health concern. *Food Control* 16(8) (2005) 649–655
53. Rudberg, M.: Linking competitive priorities and manufacturing networks: a manufacturing strategy perspective. *International Journal of Manufacturing, Technology and Management* 6(1/2) (2004) 55–80
54. Sanders, N.R.: Bridging the gap between methodological camps in supply chain management. *Journal of Supply Chain Management* 45(1) (2009) 49–51
55. Schnetzler, M., Sennheiser, A., Schönsleben, P.: A decomposition-based approach for the development of a supply chain strategy. *International Journal of Production Economics* 105(1) (2007) 21–42
56. Schönberger, W.: *Die Analyse der Wertschöpfungskette Schweinefleisch unter den Aspekten des Supply Chain Management*, Dissertation der Technischen Universität München. München (2007)
57. Schroeder, R.G., Anderson, J.C., Cleveland, G.: The content of manufacturing strategy: an empirical study. *Journal of Operations Management* 6(4) (1986) 405–415
58. Schubert, B.: *Entwicklung von Konzepten für Produktinnovationen mittels Conjointanalyse*. Poeschel, Stuttgart (1991)
59. Sheu, C., Laughlin, J.L.: Integrating marketing and manufacturing functions through focused manufacturing design. *Integrated Manufacturing Systems* 7(6) (1996) 16–23
60. Shi, Y., Gregory, M., Naylor, M.: International manufacturing configuration map: a self-assessment tool of international manufacturing capability. *Integrated Manufacturing Systems* 8(5) (1997) 273–282
61. Shi, Y., Gregory, M.: International manufacturing networks – to develop global competitive capabilities. *Journal of Operations Management* 16(2/3) (1998) 195–214
62. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E.: *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies*. Irwin/McGraw-Hill, Boston (2000)
63. Skinner, W.: *Manufacturing – missing link in corporate strategy*. *Harvard Business Review* 47(3) (1969) 136–145
64. Stanley, L., Fawcett, S.E., Smith, S.R.: Production capability in international operations: the impact of planning and information support. *Journal of Managerial Issues* 8(4) (1996) 440–456
65. Statistisches Bundesamt: *Konsumausgaben privater Haushalte nach Verwendungszweck, auf den Internetseiten des Statistischen Bundesamts* <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Inlandsprodukt/Tabellen/Content75/KonsumausgabenVerwendung,templateId=renderPrint.psm1>
66. Sydow, J.: *Strategische Netzwerke: Evolution und Organisation*. Gabler, Wiesbaden (1992)
67. Sydow, J.: *Management von Netzwerkorganisationen: Zum Stand der Forschung*. In: Sydow, J. (Hrsg.): *Management von Netzwerkorganisationen*, 4. Aufl. Gabler, Wiesbaden (2006) 387–472
68. Thompson, G.F.: *Between Hierarchies & Markets: The Logic and Limits of Network Forms of Organization*. Oxford University Press (2003)

69. Tschelin, D.K., Blaimont, C.: Die Abhängigkeit der Prognosegüte von Conjoint- Studien von demographischen Probanden-Charakteristika. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 63(8) (1993) 839–847
70. Upton, D.M., Macadam, S.E.: Why (and how) to take a plant tour. *Harvard Business Review* 75(5/6) (1997) 97–106
71. Valeeva, N.I., Meuwissen, M.P.M., Oude Lansink, A.G.J.M., Huirne, R.B.M.: Improving food safety within the dairy chain: an application of conjoint analysis. *Journal of Dairy Science* 88(4) (2005) 1601–1612
72. Vickery, S.K.: A theory of production competence revisited. *Decision Sciences* 22(4) (1991) 635–643
73. Walsh, S., Linton, J.D.: The competence pyramid: a framework for identifying and analysing firm and industry competence. *Technology Analysis & Strategic Management* 13(2) (2001) 165–177
74. Wheelwright, S.C.: Reflecting corporate strategy in manufacturing decisions. *Business Horizons* 21(1) (1978) 57–66
75. Wheelwright, S.C.: Manufacturing strategy: defining the missing link. *Strategic Management Journal* 5(1) (1984) 77–91
76. Wheelwright, S.C., Hayes, R.H.: Competing through manufacturing. *Harvard Business Review* 63(1) (1985) 99–109
77. Wildemann, H.: Der Wertbeitrag der Produktion – Entwicklungspfade von Produktionssystemen. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 74(4) (2004) 385–404
78. Wirth, S.: Wertschöpfung durch Kernkompetenz. In: Hossner, R. (Hrsg.): *Logistik Jahrbuch 2002*. Düsseldorf (2002) 21–26
79. Zahn, E.: Produktion als Wettbewerbsfaktor. In: Corsten, H. (Hrsg.): *Handbuch Produktionsmanagement: Strategie – Führung – Technologie – Schnittstellen*. Gabler, Wiesbaden (1994) 241–258
80. Zerbini, F., Golfetto, F., Gibbert, M.: Marketing of competence: exploring the resource-based content of value-for-customers through a case study analysis. *Industrial Marketing Management* 36(6) (2007) 784–798

A Hybrid Algorithm for the Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem with Setup Carry-over

Marco Caserta, Adriana Ramirez, Stefan Voß and Romualdo Moreno

Abstract We present a hybrid algorithm for the multi level capacitated lot sizing problem with setup carry-over. The problem is an extension of the classical capacitated lot sizing problem. The inclusion of setup carry-over implies that the setup state of a machine can be extended over two, or more, consecutive periods. The proposed algorithm is based upon a hybrid approach, where a metaheuristic, an LP solver and a dynamic programming scheme are iteratively used within a Lagrangean framework. Finally, three repair heuristics aimed at finding feasible solutions in the neighborhood of an incumbent, infeasible solution, are presented. The algorithm is tested on 480 benchmark instances from the literature and promising results are obtained, both in terms of solution quality and computational time.

1 Introduction

The *multi level capacitated lot sizing problem* (MLCLSP) is a well-known lot sizing problem with applications in production systems where setup times are significant [2, 14]. As an example, consider the case where operations require specialized manufacturing processes such as customer adapted orders or small batch jobs. This problem can also be seen as part of the theoretical basis for material requirements calculations (mrp) [2, 16]. Often standard mrp software does not comprehensively consider the limited resources availability when dealing with lot sizing, and conse-

Marco Caserta · Stefan Voß

Institute of Information Systems, University of Hamburg, Von-Melle-Park 5, 20146 Hamburg, GERMANY

E-mail: {marco.caserta, stefan.voss}@uni-hamburg.de

Adriana Ramirez · Romualdo Moreno

Telecommunications and Systems Engineering Department, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, SPAIN

E-mail: {adriana.ramirez, romualdo.moreno}@uab.cat

quently fails in producing capacity-feasible plans. On the other hand, capacitated lot sizing allows to capture both the demand explosion and capacity constraints.

The MLCLSP is an extension of the *capacitated lot sizing problem* (CLSP) [9, 15]. In the CLSP, multiple items (products) must be produced following a known bill of material (BOM). The objective is to find an optimal production plan that minimizes production, setup, and inventory costs, and delivers optimal lot sizes and production periods for each product where external demands (volume) are given for predefined periods. When an item is produced, machine (resource) capacity, which is limited, is consumed. When there is a change of production from one item to another, it is also necessary to account for setup costs as well as setup times. Incurring setup times means reducing the available machine capacity. Lastly, whenever there is an excess of production over the current demand in a given period for a specific item, inventory is built up and, consequently, inventory holding costs must be paid.

This work deals with the *multi level capacitated lot sizing problem with setup carry-over* (MLCLSP-CO), also called MLCLSP with linked lotsizes [2, 14, 10]. The MLCLSP-CO introduces some scheduling information into classical lot sizing. Whenever an item is produced over two consecutive periods on the same machine, its setup in the second period can be discounted, under the assumption that its setup state is “carried over” the two periods. This implies that a partial scheduling is introduced, i.e., which item is produced as the last one in the first period and the first one in the second period is established [9]. Under the “small bucket vs. big bucket” classification [14, 10, 13], the MLCLSP-CO combines the characteristics of both big- and small-bucket models. The presented MLCLSP-CO is a big-bucket model [14, 13], but it allows to carry-over one setup state from one period to the next, including the precise setup state description provided by the small-bucket formulation. The MLCLSP-CO, being an extension of the standard CLSP, is NP-hard [7].

2 Problem Formulation

The following notation is used to formulate the MLCLSP-CO. We are going to produce $j = 1, 2, \dots, J$ on $m = 1, 2, \dots, M$ machines during $t = 1, 2, \dots, T$ periods. Moreover, $\Gamma(m)$ indicates the sets of items produced on machine m and $\Lambda(j)$ and $\Psi(j)$ are the set of predecessors and successors of item j , respectively.

Parameters:

- f_{jt} setup cost of item j in period t
- c_{jt} unitary production cost of item j in period t
- h_{jt} unitary holding cost of item j in period t
- tp_{jt} unitary resource usage of item j in period t
- ts_{jt} setup time of item j in period t
- b_{mt} capacity of resource m in period t
- d_{jt} external demand of item j in period t
- γ_{ij} number of units of item i required to produce one unit of item j

Z big number

\hat{s}_j physical inventory of item j at the beginning of the planning horizon

Decision variables:

x_{jt} binary setup variable for item j in period t

ω_{jt} binary setup carry-over variable for item j at the beginning of period t

y_{jt} production quantity (lot size) of item j in period t

s_{jt} inventory of item j at the end of period t

Assuming a lead time of one period, a mixed integer programming (MIP) formulation for the MLCLSP-CO is the following:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J [c_{jt}y_{jt} + f_{jt}(x_{jt} - \omega_{jt}) + s_{jt}h_{jt}] \quad (1)$$

s.t.

$$s_{jt-1} + y_{jt} = s_{jt} + d_{jt} + \sum_{k \in \Psi(j)} \gamma_{jk}x_{kt+1} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T-1 \quad (2)$$

$$s_{jT-1} + y_{jT} = s_{jT} + d_{jT} \quad j = 1, \dots, J \quad (3)$$

$$s_{j0} = \hat{s}_j - \sum_{k \in \Psi(j)} y_{k1}, \quad j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \Gamma(m)} (tp_{jt}y_{jt} + ts_{jt}(x_{jt} - \omega_{jt})) \leq b_{mt} \quad m = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$y_{jt} \leq Zx_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \Gamma(m)} \omega_{jt} \leq 1 \quad m = 1, \dots, M, t = 2, \dots, T \quad (7)$$

$$\omega_{jt} \leq x_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 2, \dots, T \quad (8)$$

$$\omega_{jt} \leq x_{jt-1} \quad j = 1, \dots, J, t = 2, \dots, T \quad (9)$$

$$Z(2 - \omega_{jt} - \omega_{jt+1}) + 1 \geq \sum_{i \in \Gamma(m)} x_{it} \quad t = 2, \dots, T, m = 1, \dots, M, j \in \Gamma(m) \quad (10)$$

$$\omega_{j1} = 0 \quad j = 1, \dots, J \quad (11)$$

$$y_{jt}, s_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$x_{jt}, \omega_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (13)$$

The MLCLSP-CO model presented in this work is based on some models from the literature, particularly [2, 14, 10, 13]. It captures the following features:

- There are a total of J items with a deterministic, discrete period-demand volume. The demand must be satisfied on time. The time horizon T is finite, and divided in t discrete periods. Each item j is produced on a specific machine m . Each machine m has limited period-capacity. Each product j is assigned to only one machine m .
- The production of each unit of an item j requires a constant processing time. Every time the production level (lot size) of an item j in a period t is greater than

zero, a setup takes place for the item in the specific period (6). A binary variable x_{jt} takes value 1 when a setup of item j in period t is scheduled. Consequently, a setup cost and a setup time must be taken into account. Setup times and costs are defined per item j and period t , i.e., ts_{jt} and f_{jt} , respectively.

- Whenever an item is produced in two consecutive periods, it is possible to extend its production at the beginning of the next period without necessarily implying a new setup. To capture this, we use binary variables ω_{jt} . For $\omega_{jt} = 1$ it is assumed that item j is the first one to be produced in period t and the setup state of the machine is carried over from period $t - 1$, i.e., item j is the last one to be produced in period $t - 1$. Therefore, a setup carry-over can only be allowed if there is a setup in the previous period (9), and if there is a setup in the current period t (9). Consequently, a setup carry-over could never take place in the first period (11).
- For each machine m , no more than one setup carry-over per period t is allowed (7). Constraint (10) indicates that if a setup of a machine m is carried over from $t - 1$ to t , and further to $t + 1$, then no setup must take place in period t , i.e., all other items in $\Gamma(m)$ can not be produced in period t .
- The objective function minimizes production, setup, and inventory costs. A product j incurs setup costs if its setup status is $x_{jt} = 1$ and there is no setup carry-over ($\omega_{jt} = 0$).
- Constraints (2)–(4) reflect the inventory balance equations. Constraint (3) reflects the inventory balance at the end of the time horizon and (4) reflects the initial inventory that covers the external demand in the first period ($t = 1$).
- Constraint (5) guarantees that lot sizes and setup times do not exceed the capacity limit of each machine m in each period t .

3 Lagrangean Relaxation

Dualizing capacity constraints (5) of the MLCLSP-CO with a set of Lagrangean multipliers gives a relaxation of the original problem, in a fashion similar to what is proposed in, e.g., [8, 15, 14]. Let us indicate with $\mathbf{u} \in \mathbb{R}_+^{M \times T}$ the set of Lagrangean multipliers used to relax constraint (5). The Lagrangean problem, therefore, is:

$$\text{MLCLSP-CO}(\mathbf{u}): \left\{ \begin{array}{l} \min z = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j \in \Gamma(m)} (y_{jt} (c_{jt} + u_{mt} t p_{jt}) \\ \quad + (x_{jt} - \omega_{jt}) (f_{jt} + u_t t s_{jt}) + s_{jt} h_{jt}) - \sum_{m=1}^m \sum_{t=1}^T u_{mt} b_{mt} \\ \text{s.t.} \\ (2), (3), (4), (6), \dots, (13) \end{array} \right.$$

Given a set of multipliers, problem MLCLSP-CO(\mathbf{u}) is heuristically solved via the *cross entropy* scheme presented in Section 4. Note that, since problem MLCLSP-

CO(\mathbf{u}) is solved heuristically, we cannot guarantee that the corresponding objective function value is a valid lower bound for MLCLSP-CO.

In order to find the tightest lower bound for MLCLSP-CO, we solve the Lagrangean dual problem, defined as:

$$L_D(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{u} \in \mathbb{R}_+^{M \times T}} \{\text{MLCLSP-CO}(\mathbf{u})\}$$

Problem $L_D(\mathbf{u})$ is a linear problem in \mathbf{u} that is solved to approximation via subgradient optimization by generating a sequence of $\{\mathbf{u}^k\}$ values, with $k = 0, 1, 2, \dots$, until a desired degree of convergence is achieved. As we cannot guarantee to find \mathbf{u}^* , such that the objective function values of MLCLSP-CO and MLCLSP-CO(\mathbf{u}^*) are identical, we aim at finding near-optimal Lagrangean multipliers, so that the solution of MLCLSP-CO(\mathbf{u}) is feasible, or almost feasible, to the original problem. It is a well known fact that, within the context of Lagrangean relaxation theory, good feasible solutions to the original problem can frequently be obtained by perturbing nearly feasible solutions to the Lagrangean problem [6]. For this reason, at each iteration of the subgradient algorithm we apply a greedy scheme aimed at quickly modifying the (infeasible) Lagrangean solution to reach a solution feasible to MLCLSP-CO. More details about the greedy scheme are presented in Section 6.

For the subgradient optimization we use the formula of Held and Karp [6]:

$$u_{mt}^{k+1} = \max \left\{ u_{mt}^k + \lambda \frac{\sigma_t(\mathbf{u}^k)}{\|\sigma(\mathbf{u}^k)\|^2}, 0 \right\}, t = 1, \dots, T \quad (14)$$

where λ is the step size parameter, and $\sigma(u_{mt}^k) = \sum_{j \in \Gamma(m)} (tp_{jt}y_{jt} + ts_{jt}x_{jt}) - b_{mt}$ is the component mt of the subgradient, with $m = 1, \dots, m$ and $t = 1, \dots, T$.

The Lagrangean multipliers vector \mathbf{u}^0 is initialized as

$$u_{mt}^0 = \frac{\sum_{j \in \Gamma(m)} (tp_{jt}(d_{jt} + \sum_{k \in \Psi(j)} d_{kt+1}) + ts_{jt})}{b_{mt}}, \quad m = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (15)$$

such that u_{mt}^0 is somehow proportional to the ‘‘pressure’’ for using the whole amount of capacity in a given period on a given machine in order to satisfy both external and internal demands. Step size λ is updated after every $p = 20$ iterations, utilizing the best and worst lower bound information obtained during the last p iterations. More details about the Lagrangean scheme for lot sizing are provided in [3].

4 Cross Entropy Method for the MLCLSP-CO

The *cross entropy method* (CE) has been presented by [4] and its application to the CLSP has been proposed by [3]. The CE can be used to generate a population of size N of binary matrices X_1, \dots, X_N , which, in the context of MLCLSP-CO(\mathbf{u}),

identifies the periods in which each item has a scheduled production. Given one of such matrices, we generate a vector ω indicating for each machine the carry-over policy. Once the setup and carry-over policies have been established, the remaining problem is a simple LP problem that can easily be solved to optimality. Therefore, the corresponding production lots \mathbf{y} and inventory levels \mathbf{s} are obtained. Thus, using the Lagrangean problem MLCLSP-CO(\mathbf{u}), an objective function value can be associated to each set $(X_i, \omega_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{s}_i)$, with $i = 1, \dots, N$.

Let us define a probability matrix $P = \{p_{jt}\}$, where p_{jt} is the probability that a setup is scheduled for item j in period t . In order to exploit the stochastic nature of the proposed approach, we generate a *population* of X_i and ω_i of size N , all drawn under the same initial probability matrix P . Inspired by the spirit of the CE, we then use the “maximum likelihood estimator” method to generate a new probability matrix P^1 that better describes the best individuals of the current population. Therefore, we update the set of probabilities p_{jt} in order to reflect how likely it is that, in a high-quality solution, a setup of item j in period t is scheduled. Once a new probability matrix P^1 is obtained, a new population of size N can be drawn under such matrix. This process of “probability matrix update” and “population generation” can be iterated until either the P matrix converges to a binary matrix (therefore, the process converges to a unique solution) or a pre-specified maximum number of iterations has been reached.

The “maximum likelihood estimator” method is used to modify probabilities p_{jt} in such a way that the new stochastic matrix better reflects the chances of obtaining high quality solutions. Let us assume that, based upon the current stochastic matrix P^k , we have generated a population of size N , i.e., X_1, \dots, X_N . Let us now find, within the current population, the objective function value of the $(1 - \rho)\%$ quantile, i.e., the value γ for which $\rho\%$ of the population has a better objective function value and $(1 - \rho)\%$ of the population has a worse objective function value.

We modify the probability matrix using the following updating rule:

$$\hat{p}_{jt} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{jt}^i \times I_{\{f(X_i) \leq \gamma\}}}{\rho N} \quad (16)$$

where x_{jt}^i indicates component (j, t) of matrix X_i , $f(X_i)$ is the objective function value of the i^{th} solution $(X_i, \omega_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{s}_i)$, and $I_{\{f(X_i) \leq \gamma\}}$ is the indicator function, whose value is 1 if $f(X_i) \leq \gamma$ and 0 otherwise.

Remark. As pointed out by [4], in order to prevent the CE from converging too fast to a suboptimal solution, a *smoothing factor* α (typically $0.7 \leq \alpha \leq 0.9$) could be used in the update rule. Therefore, to foster a more thorough exploration of the solution space, at each iteration k we use the following update rule:

$$p_{jt}^{k+1} = \alpha \hat{p}_{jt} + (1 - \alpha) p_{jt}^k. \quad (17)$$

Remark. Given a setup plan X_i generated under a certain probability matrix P , we use the following mechanism to define a carry-over plan: Let us consider ma-

chine m and period t ($m = 1, \dots, M; t = 2, \dots, T$). Let us indicate with $\mathcal{K}(m, t)$ the set of items processed on machine m for which, with respect to X_i , a setup is scheduled in periods $t - 1$ and t . We randomly select one of the items in $\mathcal{K}(m, t)$ with a probability proportional to the savings induced by the carry-over, i.e., a probability proportional to the fixed cost associated to each item in $\mathcal{K}(m, t)$. Once such item is selected, e.g., item j , we set $\omega_{jt} = 1$ only if one of the two conditions hold:

- (i) $\omega_{jt-1} = 0$; or
- (ii) $\sum_{k=1}^J x_{kt-1}^i = 1$.

The solution obtained using the CE can be further improved by applying a dynamic programming scheme. In the next section, we present a dynamic programming recursion for the MLCLSP-CO and illustrate how the scheme can be modified in the spirit of the *corridor method* to enhance its usability when it comes to dealing with large instances of the problem.

5 A Dynamic Programming Algorithm for the MLCLSP-CO

In this section we present a *dynamic programming* (DP) scheme for the MLCLSP-CO. In the following, let us indicate with n (rather than J), the total number of items. Let us identify with $\mathbf{s}_t = (s_{1t}, \dots, s_{nt})$ the state variables that indicate the inventory level for each item j in a given period t . In addition, we indicate with $\mathbf{y}_t = (y_{1t}, \dots, y_{nt})$ the decision variables that identify the lot size of item j in period t . Similarly, the binary variables $\mathbf{x}_t = (x_{1t}, \dots, x_{nt})$ account for the setup of each item j in each period t , where x_{jt} takes value 1 if the corresponding $y_{jt} > 0$, and 0 otherwise. Finally, the binary variables $\omega_t = (\omega_{1t}, \dots, \omega_{nt})$ are used to account for setup carry-over of each item j in each period t .

Let us first sort the items according to the BOM structure, $\{< 1 >, \dots, < n >\}$, i.e., we indicate with item $< 1 >$ the end product (item without successors), and with item $< n >$ the item without predecessors. In the following, we simply indicate these items with $1, \dots, n$.

Let us consider the recursive DP equations of period T , i.e., the last period of the planning horizon (we require $\mathbf{s}_{T+1} = \mathbf{0}$):

- state variable $\mathbf{s}_T = (s_{1T}, \dots, s_{nT})$, with $s_{jT} = 0, \dots, d_{jT}$
- decision variable $\mathbf{y}_T = (y_{1T}, \dots, y_{nT})$, with $y_{jT} = d_{jT} - s_{jT}$
- objective function

$$f_T(\mathbf{s}_T) = \begin{cases} \infty, & \text{if } \exists m : \sum_{j \in \Gamma(m)}^n t p_{jT} y_{jT} + t s_{jT} x_{jT} > b_{mT} \\ \sum_{j=1}^n (f_{jT} x_{jT} + c_{jT} y_{jT}), & \text{if } \sum_{j \in \Gamma(m)}^n (t p_{jT} y_{jT} + t s_{jT} x_{jT}) \leq b_{mT}, \forall m \end{cases}$$

With respect to periods $t = T - 1, \dots, 1$, all items are processed in the order given by the BOM. Therefore, we have:

- state variable $\mathbf{s}_t = (s_{1t}, \dots, s_{nt})$, with $s_{jt} = 0, \dots, \sum_{\tau=t}^T \left(d_{j\tau} + \sum_{k \in \Psi(j)} \gamma_{jk} d_{k\tau+1} \right)$;
- decision variable $\mathbf{y}_t = (y_{1t}, \dots, y_{nt})$, with $y_{jt} = y_{jt}^{\min}, \dots, y_{jt}^{\max}$, where:

$$y_{jt}^{\min} = \max \left\{ 0; d_{jt} + \sum_{k \in \Psi(j)} y_{kt+1} - s_{jt} \right\},$$

$$y_{jt}^{\max} = \sum_{\tau=t}^T \left(d_{j\tau} + \sum_{k \in \Psi(j)} \gamma_{jk} d_{k\tau+1} \right) - s_{jt}$$

- balance equation $s_{jt+1} = s_{jt} + y_{jt} - d_{jt} - \sum_{k \in \Psi(j)} \gamma_{jk} y_{kt+1}$

Note that, once y_{jt} is determined, s_{jt+1} can be determined via the balance equation and, therefore, the corresponding y_{jt+1} can be derived. Consequently, if items are processed in the order established by the BOM, all terms of the balance equation can be computed.

- objective function

$$f_t(\mathbf{s}_t) = \begin{cases} \min_{\mathbf{y}_t, \mathbf{w}_{t+1}} \left\{ \sum_{j=1}^n f_{jt} x_{jt} + c_{jt} y_{jt} + h_{jt} s_{jt} - f_{jt+1} w_{jt+1} + f_{t+1}(\mathbf{s}_{t+1}) \right\}, \\ \quad \text{if } \sum_{j \in \Gamma(m)} t p_{jt} y_{jt} + t s_{jt} x_{jt} \leq b_m, \quad m = 1, \dots, M, \\ \infty, \\ \quad \text{if } \exists m : \sum_{j \in \Gamma(m)} t p_{jt} y_{jt}^{\min} + t s_{jt} x_{jt} > b_m, \end{cases}$$

where

$$w_{jt+1} = \begin{cases} 1, & \text{if there is a carry-over of item } j \text{ from period } t \text{ to period } t+1, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

The optimal solution to the MLCLSP-CO is

$$\min_{\mathbf{s}_1} \{f_1(\mathbf{s}_1)\}. \quad (18)$$

It is worth noting, though, that the number of states to be visited is $\mathcal{O}(T\bar{d}^n)$, where \bar{d} is a measure of the average demand level per item per period, T is the number of periods and n is the number of items, which becomes prohibitively large even for small values of n .

We will now illustrate how the *corridor method* philosophy can be exploited to make the use of the DP algorithm viable when dealing with realistic size instances of the MLCLSP-CO.

The *corridor method* (CM) is a hybrid metaheuristic proposed by [12]. The central idea of the CM is the use of a (possibly exact) method to solve smaller “versions” of the original optimization problem, i.e., to find the optimal solution on a limited portion of the solution space. Given a problem P belonging to the class of NP-hard problems, a very large solution space \mathcal{X} , and an exact method M that could be used to solve problem P to optimality if \mathcal{X} were not too large, we receive as input an incumbent solution $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$. The CM defines a “corridor” around the incumbent solution by imposing exogenous constraints on P and, therefore, by cutting out portions of the solution space \mathcal{X} . The nature of the exogenous constraints is problem and method specific; however, ideally, the resulting neighborhood built around \mathbf{x} , i.e., $\mathcal{N}(\mathbf{x})$, should be such that it could be explored in (pseudo) polynomial time using method M .

Let us consider how the CM can be applied to the MLCLSP-CO(\mathbf{u}). In the following, let us indicate with \mathcal{X} the problem feasible space, while we indicate with M the DP algorithm described above. Let us suppose that we are given an incumbent solution $(\mathbf{x}^I, \mathbf{y}^I, \mathbf{s}^I, \omega^I)$ (not necessarily feasible.) We build a neighborhood around the *state trajectory* of \mathbf{s}^I . Let us consider first a single period t , with $t \in \{1, \dots, T\}$. The state variable s_{jt} indicates the level of inventory of item j in period t .

Consequently, the state vector in period t is given by $\mathbf{s}_t^I = (s_{1t}^I, \dots, s_{nt}^I)$. In a similar fashion, the state vector of the incumbent solution is $\mathbf{s}^I = (\mathbf{s}_1^I, \dots, \mathbf{s}_T^I)$.

We define a “corridor” around \mathbf{s}^I as the neighborhood

$$\mathcal{N}(\mathbf{s}^I) = \{ \mathbf{s} \in \mathcal{S} : |s_{jt} - s_{jt}^I| \leq \delta, j = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T \}, \quad (19)$$

where δ is the corridor width and \mathcal{S} indicates the set of all state vectors and depends on the balance constraint equations (2)–(4).

The proposed DP scheme takes as input an incumbent solution. Therefore, it is paramount to develop a scheme aimed at producing a diversified set of initial solutions, around which the corridor is built. For this reason, the intertwined usage of the CE scheme of Section 4, to generate a pool of diverse incumbent solution, with the CM presented in this section, to foster intensification around high quality solutions, allows to balance intensification with diversification of the overall algorithm.

6 Repair Heuristics

Owing to the fact that both the CE and the CM work on the Lagrangean problem, there is no guarantee that the obtained solution respects the capacity constraints. In this section, we present three *repair heuristics*, in the spirit of what is done in [8, 11, 14]. These heuristics are aimed at finding feasible solutions in the neighborhood of an incumbent, infeasible solution.

6.1 Heuristic Top-down Backward

Let us assume that, with respect to the incumbent solution, the capacity constraint is violated for at least one period and one machine, say, (m^*, t^*) , where m^* indicates the machine and t^* the period in which there is excess of production over capacity. Let us sort these pairs in increasing order of machine and period.

Given a pair (m^*, t^*) , the main idea of the heuristic top-down backward method is to move the excess of production from t^* to a previous period t' (in which there is spare capacity), where $t' < t^*$. In other words, the excess of production is moved *backward* in time such that the capacity constraint for t^* is respected. Therefore, in this approach, the fraction of production moved backward to period t' is held in inventory from $t' + 1$ up to t^* .

The order in which items are sorted is called *top-down*. Let us consider the example presented in Figure 1. The figure shows a BOM with five items produced over two machines. In the figure, items are represented by 1, 2, 3, 4, and 5, while machines correspond to A and B.

Whenever the capacity of a machine is not respected, items are sorted from items without predecessors to items without successors. With respect to Figure 1, if the capacity of machine A in t^* is not respected, items are sorted in the following order: first item 1, then 2, ending with 5. In the case of machine B, the order is: item 3 and then 4.

When moving the excess of production of a given item to t' , if there is no production of such item in t' and a new production is introduced, then a new setup is considered, too. We also consider the case in which the whole lot of an item is moved from t^* to t' : in such a case there is a saving of setup in period t^* for the given item. Once the excess of production is relocated, a setup carry-over is introduced whenever possible, i.e., without violating constraints (7)–(10).

Concerning the choice of the period in which the excess of production should be relocated, we use the following two approaches.

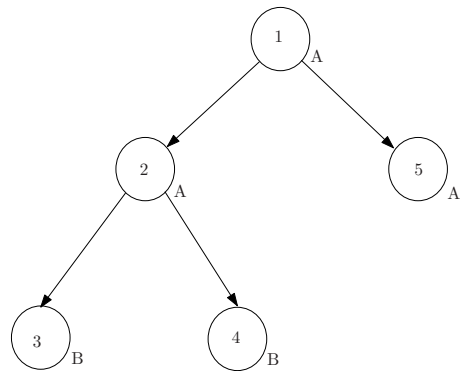


Fig. 1 BOM for one product with five items (1, 2, 3, 4, and 5) and two machines (A and B).

6.1.1 Left-right Approach

Spare capacity is checked from $t = 1$ onward to $t^* - 1$. The excess of production is assigned to the first period in which there is spare capacity. If in such period the spare capacity is not enough to cover the excess of production, the remaining excess of capacity is relocated to the next period in which a spare capacity is detected, and so on, until the entire excess of capacity is relocated.

If an item for which production is relocated has no predecessors, then t' can be any period with spare capacity from $t = 1$ up to $t^* - 1$. However, if the considered item has predecessors, then t' is bound by the production of other items of the BOM. If t_{pr} is the last period when one of the item's predecessors was produced, the excess of production can only be relocated from $t_{pr} + 1$ up to $t^* - 1$, where $t_{pr} < t^*$.

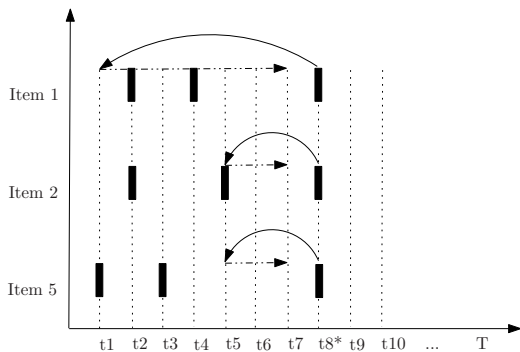


Fig. 2 Heuristic top-down backward, left-right approach. Example on machine A.

Figure 2 exemplifies the method. In the figure, the black rectangles indicate periods in which a given item is produced. Let us suppose that $t^* = 8$. Item 1 has no predecessor and items 2 and 5 are successors of item 1. With respect to item 1, its production could be relocated from period t^* to any period in the time window $1, \dots, 7$, as indicated by the dash-dot-dotted line. Items 2 and 5 have a predecessor (item 1), and, therefore, production could only be relocated from $t = 5$, i.e., $t_{pr} + 1$, up to $t = 7$, i.e., $t^* - 1$, in ascending order.

6.1.2 Right-left Approach

Spare capacity is checked from $t^* - 1$ back to $t = 1$. The excess of production is iteratively assigned to periods in which there is spare capacity, in descending order, from period $t^* - 1$ to period 1, until the whole excess of capacity is relocated.

If an item for which production is to be relocated has no predecessors, then t' can be any period with spare capacity from $t^* - 1$ back to $t = 1$. However, if the item has predecessors, then the excess of capacity can be relocated only to periods in the time window $t^* - 1, \dots, t_{pr} + 1$, where $t_{pr} < t^*$.

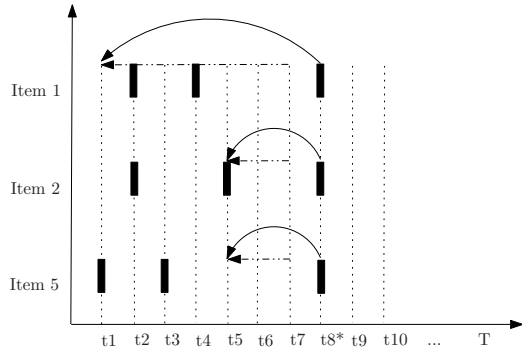


Fig. 3 Heuristic top-down backward, right-left approach. Example on machine A.

An example of this approach is shown in Figure 3. Item 1 has no predecessors and items 2 and 5 are successors of item 1. With respect to item 1, spare capacity can be checked from $t = 7$ (i.e., $t^* - 1$) backward to $t = 1$, as denoted by the dash-dot-dotted line. Items 2 and 5 are successors of item 1 and, therefore, production can be relocated only to periods with spare capacity in the time window $t^* - 1, \dots, t_{pr} + 1$, in descending order, i.e., periods 7, 6, and 5.

6.2 Heuristic Bottom-up Forward

This approach is based on the idea of moving the excess of production from t^* to future periods t' in which there is spare capacity, with $t' = t^* + 1, \dots, T$. Therefore, the excess of production is moved *forward* in time such that feasibility with respect to period t^* (and a given machine m) is restored.

The order in which items are sorted is *bottom-up* with respect to the BOM. In this approach, if the capacity of a machine in period t^* is not respected, items are sorted from items with no successors (end products) to items without predecessors (raw materials). With respect to Figure 1, if, e.g., the capacity constraint of machine A in period t^* is not satisfied, the items are sorted in the following order: first item 5, then 2, ending with 1. In the case of machine B the order is: item 4 and then 3.

The excess of production is, thus, moved forward in time. Time periods are examined to determine whether spare capacity is available, going from period $t^* + 1$ to $t = T$. The excess of production is then iteratively relocated to the first period with spare capacity in the time window $t^* + 1, \dots, T$, until feasibility is restored.

If the item for which production must be relocated has no successors, then such excess of production can be relocated in any period with spare capacity in the time window. However, if the item has successors, then the excess of production can be relocated to future periods as long as the demand of its successors is not affected. Therefore, if t_s is the first period in which one of the item's successors is going to

be produced, then the excess of capacity of the item can only be relocated in the “reduced” time window $t^* + 1, \dots, t_s - 1$, where $t^* < t_s$.

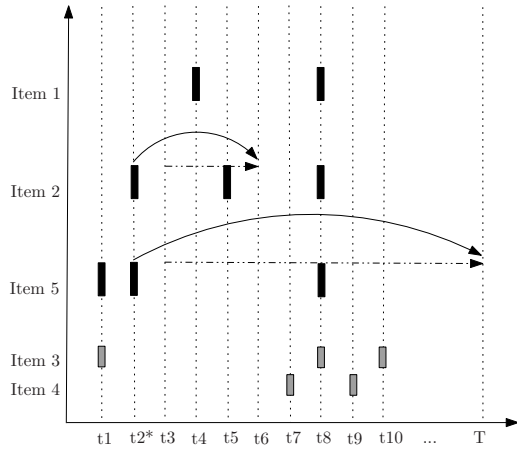


Fig. 4 Heuristic bottom-up forward. Example on machine A.

An example is presented in Figure 4. Item 5 has no successors, thus its production in periods t^* can be relocated to any period from $t^* + 1$ (i.e., period 3) to T (i.e., period 6). As previously mentioned, while moving (part of) a production lot of an item j from t^* to t' , a number of different cases can arise: (i) a new setup of item j could be introduced in period t' (if there was no production of item j in that period), (ii) the entire lot is moved from t^* and, therefore, the setup of item j in t^* can be discounted. Once the excess of production is relocated, a setup carry-over is introduced whenever possible, i.e., without violating constraints (7)–(10).

7 Overall Algorithm

In this section we present the overall algorithm, illustrating how the different ingredients of the proposed scheme are effectively intertwined to enhance the performance of the global scheme.

Algorithm `LotSizing()` presents the overall algorithm as a pseudocode. In the algorithm, `CE_Phase(u, N, ρ, α)` in line 4 indicates the CE described in Section 4, along with its algorithmic parameters. Consequently, we indicate with X^{CE} the best solution obtained by the CE. In line 5, `DP_Phase(u, XCE, δ)` refers to the “modified” DP scheme of Section 5, exploiting the corridor idea taking as incumbent solution the best solution found by the CE phase. The CM requires one algorithmic parameter, δ (the corridor width). The best solution found, either by the CE or the CM is provided as input to the repair mechanism described in Section 6, indicated by `Repair_Phase(X•)` in line 6, where X^\bullet indicates the best incumbent (infea-

sible) solution of the current iteration and X^F the feasible solution achieved. Finally, as described in line 7, the `Lagrangean_Update_Phase(\mathbf{u}, X^\bullet)` accounts for the update of the Lagrangean problem, guided by the subgradient optimization technique, as presented in Section 3.

The algorithm stops when `stopping_criteria()` becomes true, *i.e.*, when one of the following conditions is met: i) a maximum number of Lagrangean iterations is reached or ii) a maximum running time has been reached. Once the algorithm terminates, the best feasible solution found $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{w}^*)$ is returned.

Algorithm 1: `LotSizing()`

Require: problem instance

Ensure: best feasible solution found $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{w}^*)$

```

1: initialization of Lagrangean multipliers  $\mathbf{u}^0$                                 {Equation (15)}
2:  $t \leftarrow 1$                                                                 {global iteration counter}
3: while !stopping_criteria() do
4:    $X^{\text{CE}} \leftarrow \text{CE\_Phase}(\mathbf{u}^t, N, \rho, \alpha)$                             {stop after ce_iter iterations}
5:    $X^{\text{DP}} \leftarrow \text{DP\_Phase}(\mathbf{u}^t, X^{\text{CE}}, \delta)$                             {DP Scheme with Corridor}
6:    $X^F \leftarrow \text{Repair\_Phase}(X^\bullet)$                                         {feasible solution}
7:    $\mathbf{u}^{t+1} \leftarrow \text{Lagrangean\_Update\_Phase}(\mathbf{u}^t, X^\bullet)$                 {subgradient iteration}
8:    $t \leftarrow t + 1$                                                             {update iteration counter}
9: end while

```

8 Computational Results

In order to evaluate the quality of the proposed approach, we run the algorithm on benchmark instances from the literature. More specifically, we solve the first class of the instances of Tempelmeier et al. [14]. This class covers one general and one assembly product structure, 10 products, 3 resources, and 4 periods. A total of 480 instances are contained in this class. These instances have been downloaded from the author's web page, and recreated following the instruction provided by the authors themselves, as indicated in [14].

All computational experiments have been carried out on a 2.0 GHz Pentium 4 Workstation with 2Gb of RAM running Linux. The algorithm has been coded in C++ and compiled with the GNU g++4.3 compiler.

The values of the algorithmic parameters N , ρ , δ , and α have been determined using the response surface methodology [1], as presented in [3]. The LP problem of Section 4, *i.e.*, the problem obtained after fixing the setup and carry-over variables, is solved using the `Clp` module of the COIN-OR Library [5].

In Table 1 we summarize the computational results on these 480 benchmark instances. The first three columns describe the instances, in terms of number of items, number of periods and number of resources (e.g., machines), respectively. Columns four to six collect the results of the algorithm presented in [14]. Average deviation

from the optimal value, standard deviation (S.D.), and computational time are used to measure the algorithmic performance. We present the same set of results produced by our algorithm. The optimal value of each instance of the given class has been obtained using the Cbc module of the COIN-OR Library [5]. Therefore, for each instance of the class, the optimality gap

$$\gamma = \frac{z^H - z^*}{z^*},$$

is computed, where z^H is the heuristic solution found by the proposed algorithm, and z^* is the optimal solution provided by the branch and bound solver of the COIN library.

Instance Details			Tempelmeier et al.			Proposed Algorithm		
No. Items	No. Periods	No. Machines	Average.	S.D.	Time	Average.	S.D.	Time
10	4	3	1.39	0.59	0.15	1.02	0.34	1

Table 1 Results on first class of benchmark instances. Time measured in CPU seconds and averaged over 480 instances.

From the table we can confirm the robustness and the effectiveness of the proposed scheme in dealing with this class of instances of the MLCLSP-CO. A more thorough evaluation of the proposed algorithm is planned to be achieved by running it on other classes of the benchmark library.

9 Conclusions

In this paper, we have presented a hybrid algorithm for the multi level capacitated lot sizing problem with setup carry-over, an extension of the classical capacitated lot sizing problem where a the carry-over of a setup status from one period to the next is allowed. Therefore, the obtained model captures, although partially, scheduling elements of the production problem.

The proposed algorithm makes use of techniques and ideas from the metaheuristic field, with the aim of striking the right balance between intensification and diversification, and from the mathematical programming field, to take into account and exploit some features of the mathematical structure of the problem itself.

The algorithm has been tested on a limited set of benchmark instances, more precisely, on class one of a larger set of benchmark instances from [14]. Preliminary results show that the algorithm is effective, both from the point of view of the solution quality as well as from the perspective of computational time.

References

1. Box, G., Wilson, K.: On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 13 (1951) 1–45
2. Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S., Tempelmeier, H.: Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *OR Spectrum* doi: 10.1007/s00291-008-0150-7 (2008)
3. Caserta, M., Quiñonez, E.: A cross entropy-Lagrangian hybrid algorithm for the multi-item capacitated lot-sizing problem with setups. *Computers & Operations Research* 36(2) (2009) 530–548
4. De Boer P., Kroese, D.P., Mannor, S., Rubinstein, R.Y.: A tutorial on the cross-entropy method *Annals of Operations Research* 134(1) (2005) 19–67
5. Lougee-Heimer, R.: The common optimization interface for operations research. *IBM Journal of Research and Development* 47(1) (2003) 57–66
6. Held, M., Karp, R.M.: The traveling salesman problem and minimum spanning tree: part II. *Mathematical Programming* 1 (1971) 6–25
7. Maes, J., McClain, J., Van Wassenhove, L.: Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics. *European Journal of Operational Research* 53 (1991) 131–148
8. Özdamar, L., Barbarosoglu, G.: An integrated Lagrangian relaxation-simulated annealing approach to the multi-level multi-item capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Economics* 68(3) (2000) 319–331
9. Quadt, D., Kuhns, H.: Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* 6(1) (2008) 61–83
10. Sahling, F., Buschkühl, L., Tempelmeier, H., Helber, S.: Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic. *Computers & Operations Research* 36(9) (2009) 2546–2553
11. Sambasivan, M., Yahya, S.: Heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot sizing problems with inter-plant transfers. *Computers & Operations Research* 32 (2005) 537–555
12. Sniedovich, M., Voß, S.: The corridor method: a dynamic programming inspired metaheuristic. *Control and Cybernetics* 35(3) (2006) 551–578
13. Suerie, C., Stadler, H.: The capacitated lot-sizing problem with linked lot sizes. *Management Science* 49(8) (2003) 1039–1054
14. Tempelmeier, H., Buschkühl, L.: A heuristic for the dynamic multi-level capacitated lotsizing problem with linked lotsizes for general product structures. *OR Spectrum* 31 (2009) 385–404
15. Tempelmeier, H., Destroff, M.: A Lagrangian-based heuristic for dynamic multilevel multi-item constrained lotsizing with setup times. *Management Science* 42(5) (1996) 738–757
16. Voß, S., Woodruff, D.L.: An introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain. 2nd edition, Springer, Berlin (2006)
17. Wolsey, L., Nemhauser, G.: *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley, Hoboken (1999)

Berücksichtigung von Lieferantenkrediten in der Bestellmengenplanung

Erik Hofmann

Zusammenfassung Der Beitrag setzt sich mit der Gewährung von Lieferantenkrediten im Kontext der Bestellmengenplanung auseinander. Dabei werden schwerpunktmäßig die Aufsätze von Wilson [41] sowie Arcelus und Srinivasan [2] diskutiert, in welchen das klassische Economic Order Quantities (EOQ) Modell um den Aspekt der Zahlungskonditionen erweitert wird. Die Ansätze werden anhand eigener Überlegungen nachvollzogen sowie kritisch auf ihre Korrektheit und Relevanz hin untersucht. Zudem werden Anknüpfungspunkte für Erweiterungen vorgestellt, worunter u.a. kooperative Verhandlungsstrategien fallen.

1 Problemstellung

Sobald Lieferungen nicht unmittelbar bei Übergabe der Waren durch den Abnehmer bezahlt werden, wird i.d.R. über die Einräumung einer Zahlungsfrist ein Lieferantenkredit gewährt. Dieser kann explizit zwischen den Geschäftspartnern vereinbart worden sein oder implizit durch das nicht sofortige Begleichen der Rechnung entstehen. Dabei kann ein Lieferantenkredit mit oder ohne Zinskosten verbunden sein. Bei verspäteten Zahlungen sind im Normalfall Verzugszinsen zu zahlen, die beispielsweise in Deutschland mit knapp über 8% über dem Basiszinssatz der Deutschen Bundesbank höher als normale Bankkreditzinsen ausfallen (www.basiszinssatz.de). Während bei längerfristigen Liefervertragskrediten der Effektivzinssatz meistens direkt in den Geschäftskonditionen vermerkt ist, ist dies bei der weit verbreiteten Form der Lieferantenkredite unter Skontoverzicht oftmals nicht der Fall, so dass hierbei die eigentlichen Kosten des Lieferantenkredits bei falscher Berechnung unterschätzt werden können [25, 11].

Erik Hofmann

Lehrstuhl für Logistikmanagement, Universität St.Gallen, Dufourstraße 40a, 9000 St. Gallen, SWITZERLAND

E-mail: erik.hofmann@unisg.ch

Insbesondere in Zeiten des wirtschaftlichen Abschwungs sowie einem allgemein knappen Liquiditätsniveau rücken Lieferantenkredite (wieder) zunehmend in das Zentrum des Interesses. Zwar stellt ein solcher „Kredit“ aus Sicht der Lieferanten ein Wettbewerbsinstrument dar, allerdings werden häufig diese „Finanzierungskosten“, welche durch den Zahlungsaufschub und die damit einhergehenden Opportunitätskosten durch die fehlenden, nicht ertragsgenerierend einsetzbaren liquiden Mittel entstehen, wiederum bei Preis- und Vertragsfestlegung an die abnehmenden Kunden weitergegeben [14]. Insgesamt ist davon auszugehen, dass in einer durchschnittlichen Gesamtbetrachtung damit auch vermeintliche „zinslose“ Lieferantenkredite den Abnehmern (indirekt) in Rechnung gestellt werden [42, S. 232f].

Abnehmer beanspruchen hauptsächlich deshalb diese Form der Fremdfinanzierung, da sie im Vergleich zu anderen Kreditarten relativ unkompliziert und formlos gewährt wird. So soll mit Hilfe unbezahlter Kreditoren die Kapitalbindung, welche durch gelagerte Waren sowie ausstehende Kundenforderungen besteht, überbrückt werden. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen mit Liquiditätsengpässen oder ungenügender Bonität für Geld- und Kapitalmarktkredite spielen Lieferantenkredite eine relevante Rolle [14, S. 186ff]. Da aber der verzinste Lieferantenkredit v.a. in Verbindung mit einem Skontoverzicht oftmals teurer als ein Bankkredit ist, sollte die Inanspruchnahme nicht per se, sondern lediglich nach Abwägung der Alternativen und Kosten erfolgen [31, S. 418f].

Generell bestimmt die Wettbewerbssituation auf der Anbieter- und Nachfragerseite die Vertragsgestaltung und damit die Vergabe sowie die entsprechenden Konditionen für Lieferantenkredite. So sind z.B. bei intensivem Anbieterwettbewerb vielfach Lieferantenkredite anzutreffen. Ähnliches gilt für Unternehmen mit ausreichend großer Marktmacht, welche längere Zahlungsziele ohne bzw. mit tiefen Zinskosten bei ihren Lieferanten durchsetzen können [30], was sich positiv auf das Umlaufvermögen auswirkt.

Denn schließlich sind Unternehmen im Zuge einer Shareholder Value-Orientierung [33] zunehmend angehalten, zur Wertsteigerung ein aktives Management der Positionen des Umlaufvermögens und der kurzfristigen, zinslosen Verbindlichkeiten zu betreiben, was als Working Capital Management bezeichnet wird. Das Working Capital Management aus Sicht eines einzelnen Akteurs hat zum Ziel, die Kapitalbindung in Beständen und Forderungen zu minimieren und den Mittelabfluß durch lange Zahlungsziele der Kreditoren zu verzögern, um die so freiwerdenden Mittel zur Innenfinanzierung zu verwenden und die Inanspruchnahme von Fremdkapital zu senken [16]. Konkret besteht das Working Capital Management aus den Bereichen Lieferanten-, Bestands-, Debitoren- und Risikomanagement, an denen die Unternehmensfunktionen bzw. -einheiten Einkauf, Produktion, Marketing, Finanzen, Logistik und Controlling mehr oder weniger stark beteiligt sind [34]. Eine Problematik besteht u. a. darin, dass die Optimierung der einzelnen Schrauben des Working Capital Managements zu Zielkonflikten führt [40, S. 16ff]: Denn beispielsweise führen niedrige Bestände zwar zu einer tieferen Kapitalbindung, aber wenn dadurch die Sicherheit von Kundenbelieferungen sinkt, gefährdet dies womöglich die Marktreputation des Unternehmens und letztlich dessen langfristigen Erfolg. Deshalb sind Unternehmen bestrebt, die einzelnen Felder integriert

zu betrachten, was beispielsweise durch die Berücksichtigung des Cash-to-Cash-Cycles erreicht werden soll [15, S. 83ff]. Dabei werden die einzelnen Felder des Working Capitals in drei miteinander verbundene Subprozesse unterteilt. Mit dem Order-to-Cash-Prozess wird dabei die Auftragsabwicklung bis zum Zahlungseingang, mit dem Forecast-to-Fulfill-Prozess die Umsatzplanung bis zur Leistungserstellung, sowie mit dem Procure-to-Pay-Prozess der Beschaffungsbedarf bis zur Zahlungsausführung abgedeckt und gesteuert.

Die Thematik der Lieferantenkredite ist dabei vor allem dem letzten Teilprozess zuzuordnen, da sich in diesem neben der konkreten Bestellmengenplanung auch das Lieferantenmanagement verorten lassen. Aus den skizzierten Zusammenhängen lassen sich nun die leitenden Forschungsfragen des vorliegenden Aufsatzes ableiten.

Forschungsfrage FF1: Wie lässt sich ein gewährter Lieferantenkredit in Form von Zahlungszielen aus Sicht eines abnehmenden Unternehmens in der Bestellmengenplanung (z.B. im klassischen EOQ-Modell) integrieren?

Um das Thema der Lieferantenkredite umfassend zu beleuchten, ist die abnehmerseitige Betrachtung um die Perspektive des Zulieferers zu erweitern. Schließlich verfolgt Letzterer damit eine bestimmte Zielsetzung: Er möchte den Abnehmer zum Kauf zusätzlicher Waren bewegen, wobei ihm nach [39] neben zahlreichen Marketing-Mix-Elementen u. a. eine Preisreduktion oder eine Verlängerung der von ihm gewährten Kreditfrist als Handlungsoptionen zur Verfügung stehen. Insbesondere die letzte Variante scheint von Interesse zu sein, da – wie bereits [20, 6] ausführen – dabei die Preise unverändert bleiben und so kein Druck auf Wettbewerber ausgeübt wird, die in einer Preisabwärtsspirale enden könnten. Falls der Zulieferer einen ausreichenden Zusatzbestand an Fertigwaren besitzt, kann er demnach versuchen, diesen an den Abnehmer über die Gewährung einer längeren Zahlungsfrist abzusetzen. Dabei stellt sich die Frage, nach welchem Entscheidungskalkül sich das abnehmende Unternehmen und nach welchem sich der Zulieferer verhält. Insgesamt ist zu erwarten, dass Effizienzsteigerungen über eine integrierte Betrachtung des Zulieferer-Abnehmer-Problems möglich sind [17]. Damit konstituiert sich die zweite Forschungsfrage dieses Beitrags.

Forschungsfrage FF2: Welche Entscheidungsmodelle liegen einer integrierten Zulieferer-Abnehmer-Beziehung im Kontext des klassischen EOQ-Modells unter Berücksichtigung von Lieferantenkrediten zu Grunde und wie lassen sich kooperative Verhandlungsstrategien darin bestimmen?

Zur Beantwortung der beiden Forschungsfragen wird folgendes Vorgehen gewählt: Nach der Einleitung erfolgt in Abschnitt 2 die Vorstellung und Diskussion des EOQ-Basismodells unter Beachtung von Lieferantenkrediten. Danach wird in Abschnitt 3 eine einfache Erweiterung um Lagerhaltungskosten vorgenommen (= Beantwortung *FF1*). Es werden zunächst Entscheidungsmodelle des Abnehmers und des Zulieferers getrennt voneinander hergeleitet, bevor eine integrierte Betrachtung sowie kooperative Lösung des Optimierungsproblems erfolgt (= Beantwortung *FF2*). Der Aufsatz schließt mit Abschnitt 4, in dem eine kritische Würdigung der Überlegungen vorgenommen sowie Anknüpfungspunkte für vertiefende Folgearbeiten gegeben werden.

2 Wilson-Basismodell mit Kapitalkosten

Wilson führt 1991 [41] in seinem Aufsatz „Supplier Credit in the Economic Order Quantity Model“ die Inanspruchnahme von Lieferantenkrediten durch das abnehmende Unternehmen in die Bestellmengenplanung ein. Ähnlich wie der Beitrag von [18] besitzt dieser Ansatz im Unterschied zu anderen Erweiterungen (z.B. [1, 8, 11]) einen eher allgemeingültigen Charakter. Er spiegelt die heute im Rahmen des Working Capital Managements übliche Praxis der Inanspruchnahme von Lieferantenkrediten in einfacher Form wider. Wie im klassischen Standard-EOQ-Modell spielen die Einstandskosten der Waren aus Sicht des Abnehmers bzw. die Verkaufspreise aus Sicht des Lieferanten für die Ermittlung der optimalen Bestellmenge (zunächst) keine Rolle. Deshalb wird diese Kostenkomponente vorerst vernachlässigt. Ferner werden im Grundmodell von [41] explizit keine Lagerkosten betrachtet, da sich Lieferantenkredite seiner Meinung nach lediglich über die gesamten Kapitalkosten auf die Bestellmenge auswirken.

Im Wilson-Basismodell werden die Gesamtkosten („total costs“ TC) eines abnehmenden Unternehmens (indiziert mit B für „buyer“) wie folgt konkretisiert:

$$\text{Gesamtkosten } (TC_B) = \text{Bestellkosten} + \text{Kapitalkosten} \quad (1)$$

Die Bestellkosten sind dabei zunächst äquivalent dem Standard-EOQ-Modell mit $S - D/Q$ definiert, wobei S für den Kostensatz pro Bestellvorgang und D für den Gesamtverbrauch pro Jahr in Stück stehen. Zudem lassen sich die zinsbedingten Kapitalkosten als Opportunitätskosten der Finanzierung der Lagerbestände interpretieren und ergeben sich aus:

$$\frac{H}{2} \cdot (Q - P) \cdot \frac{(Q - P)}{D} \cdot \frac{D}{Q} \quad (2)$$

wobei H = Kosten des gebundenen Kapitals je gelagertem Artikel, $1/2$ = Durchschnittsfaktor, P = abverkaufte Menge im Geltungszeitraum des Lieferantenkredits, D = Gesamtverbrauch pro Jahr in Stück, $Q - P$ = Teil der eigenfinanzierten Bestellung, $(Q - P)/D$ = Umschlagdauer für den eigenfinanzierten Teil des Bedarfes sowie D/Q = Umschlaghäufigkeit bzw. Anzahl der getätigten Bestellungen. Das vom Lieferanten gewährte Zahlungsziel taucht im Kontext von P auf, das sich ergibt zu $P = D - t/52$.

Die zinsbedingten Kapitalkosten lassen sich durch Umformungen in folgender Form kompakt darstellen:

$$\frac{H \cdot (Q - P)^2}{2 \cdot Q} \quad (3)$$

Somit sind die im Modell betrachteten Gesamtkosten des abnehmenden Unternehmens TC_B unter Berücksichtigung eines Lieferantenkredits definiert als:

$$TC_B = S \cdot \frac{D}{Q} + \frac{H \cdot (Q - P)^2}{2 \cdot Q} \quad (4)$$

Aus der Ableitung nach Q ergibt sich daraus folgende optimale Bestellmenge Q^* :

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot S \cdot D}{H} + P^2} \quad (5)$$

Der vorgestellte Ansatz beruht zunächst auf vereinfachenden Annahmen: Zwar finden Lieferung und Bezahlung nunmehr nicht zeitgleich statt, jedoch ist die Regelmäßigkeit von Bedarfsanfall und Bestellung nach wie vor eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Modells. Zudem ist festzuhalten, dass der Ansatz für den Fall $Q < P$ (Bestellmenge geringer als die abverkaufte Menge) keine adäquaten Ergebnisse liefert. Da die Nachfolgelieferung unmittelbar nach Abverkauf der vorherigen Bestellung eintrifft, kommt es zur zeitlichen Überlappung der Zahlungsziele zweier Lieferungen. Der verfügbare Lieferantenkredit wird nicht ausgeschöpft. Die Kapitalkosten sind in diesem Falle gleich 0. Rechnet man sie dagegen im Modell aus, sind sie umso größer, je kleiner Q in diesem Bereich ist, was nicht korrekt ist. In den nachfolgenden Berechnungen werden deshalb die Kapitalkosten bei $Q < P$ stets auf 0 gesetzt. Die Kosten lassen sich dann konkretisieren zu:

$$TC_B = \begin{cases} S \cdot \frac{D}{Q} + \frac{H \cdot (Q-P)^2}{2 \cdot Q} & \text{für } Q \geq P \\ S \cdot \frac{D}{Q} & \text{für } Q < P \end{cases} \quad (6)$$

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Verschiebung der kostenoptimalen Bestellmenge ceteris paribus in Abhängigkeit vom Zahlungsziel, wobei ein recht großes $S-H$ -Verhältnis gewählt wurde, um den Zusammenhang graphisch darstellen zu können. Wie zu sehen ist, ist die optimale Bestellmenge Q^* von der Höhe der bezogenen Menge im Geltungszeitraum des Kredits und damit wiederum von der Länge des Zahlungszieles abhängig. Nach diesen einführenden Überlegungen zum ursprünglichen Wilson-Modell, werden nun ausgewählte Komponenten des Ansatzes näher beleuchtet.

[41] führt bezüglich des Verhältnisses der beiden Terme in der Q^* -Formel an, dass der Lieferantenkredit umso bedeutsamer für die Höhe der optimalen Bestellmenge wird, je größer P im Verhältnis zum Term $(2 - S - D/H)$ ist. Jedoch sind seine Überlegungen aus folgenden Gründen nicht ganz nachvollziehbar: Erstens wird nicht erläutert, welche Kostenkomponenten beim Vergleich berücksichtigt werden. Die Vernachlässigung der Einstandskosten hat zwar keine Auswirkungen auf die Höhe von Q^* , sie beeinflusst jedoch die Basis für die Berechnung und damit die Höhe der prozentualen „Ersparnisse“. Gleiches gilt für die Wahl der weiteren Parameter.

Zweitens macht [41] die relative Ersparnis aus dem Lieferantenkredit an der mit dem Zahlungsziel normierten Umschlagdauer der Bestellung fest. Er versucht zu zeigen, dass die Einsparungen dann maximal werden, wenn das Verhältnis von S/H klein und die Umschlagdauern der optimal bemessenen Lieferungen infolgedessen kurz sind. Ferner behauptet er, die größten Ersparnisse seien dann zu erzielen, wenn die Umschlagdauer der Lieferung kleiner ist als die Länge des Zahlungszieles. Während der ersten Aussage prinzipiell gefolgt werden kann, ist der zweiten zu

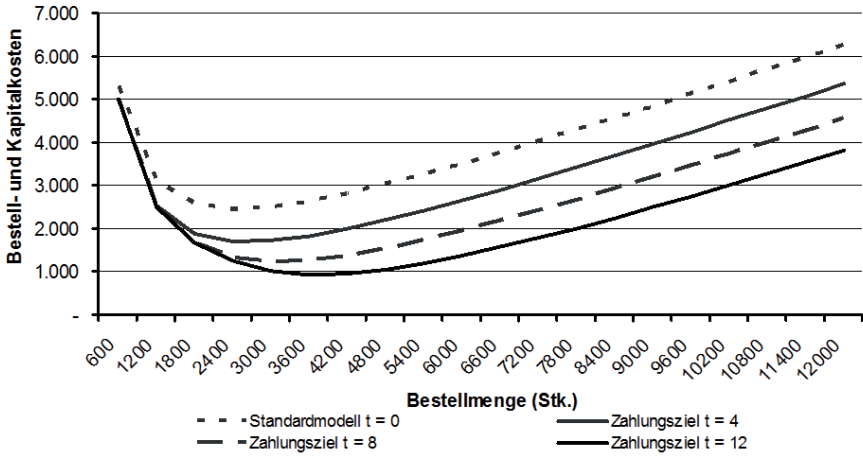


Abb. 1 Exemplarische Gesamtkosten des abnehmenden Unternehmens in Abhängigkeit vom Zahlungsziel.

widersprechen. Im einfachsten Fall ($S = 0$) gilt für das Modell:

$$Q^* = P \text{ bzw. } \frac{Q^*}{D^*} = \frac{t}{52} \tag{7}$$

Mit anderen Worten: die Umschlagdauer der Bestellung entspricht der Länge des Zahlungsziels. In Form eines Koeffizienten läßt sich der Sachverhalt wie folgt ausdrücken:

$$\frac{Q^*}{D^*} = 1 \tag{8}$$

Der Term $(2 - S - D/H)$ ist zwingend größer oder gleich 0. Bei $S > 0$ muss die Kennzahl aus Umschlagdauer und Zahlungsziel für Q^* deshalb größer sein als 1 statt kleiner. Mit anderen Worten, die Umschlagdauer der Bestellung hat länger zu sein als das Zahlungsziel. Dies ist auf den ersten Blick kontraintuitiv. Die Erklärung hierfür ist darin zu sehen, dass die Einsparungen aus der Inanspruchnahme des Lieferantenkredits die höheren Bestellkosten im Bereich $(Q/D)/(t/52) < (Q^*/D)/(t/52)$ nicht kompensieren können. Da das Standard-EOQ-Modell keine lineare Funktion von Q ist, wird im Falle $S > 0$ die maximale Ersparnis nicht im Punkt $Q^{*Wilson}$ liegen, aber im Bereich $(Q/D)/(t/52) > 1$.

Ein Vergleich zwischen dem Standardmodell und dem Ansatz von Wilson scheint durchaus sinnvoll, um die Bedeutung der Lieferantenkredite für die Kostenseite zu beleuchten. Zu diesem Zweck werden nun die variablen Gesamtkosten als Funktion der Umschlagdauer R ausgedrückt. Wenn

$$R = \frac{\frac{Q}{D}}{\frac{I}{52}} \quad (9)$$

dann gilt für das Standardmodell:

$$TC_B = f(R) = \frac{D \cdot S}{R \cdot P} + \frac{H \cdot R \cdot P}{2} \quad (10)$$

und für das erweiterte Modell:

$$TC_B = f(R) = \frac{D \cdot S}{R \cdot P} + \frac{H \cdot (R \cdot P - P)^2}{2 \cdot R \cdot P} \quad (11)$$

Dabei sei daran erinnert, dass das Standard-EOQ-Modell keinen Lieferantenkredit vorsieht. Deshalb kann die relative Ersparnis aus der Inanspruchnahme des Lieferantenkredits definiert werden als:

$$\Delta TC_B = \frac{(TC_{Standard} - TC_{Wilson})}{TC_{Standard}} \quad (12)$$

Damit ist zu konstatieren: Das Einsparungspotential aus der Inanspruchnahme von Lieferantenkrediten ist umso größer, je größer die Kapitalkosten in Relation zu den Bestellkosten (entspricht S/H klein) sind. Die Einsparungen erreichen ein Maximum im Bereich $R = 1$. Sind die Bestellkosten niedrig im Verhältnis zu den Kapitalkosten, ist die maximale Ersparnis bei $R = 1$ zu erzielen. Sind die Bestellkosten relativ hoch, ist die maximale Ersparnis bei einem höheren Koeffizienten zu lokalisieren. Da die bereits bekannte Relation zwischen Q^* und S/C aus dem Standardmodell auch für S/H gilt, läßt sich ferner schlußfolgern: Je attraktiver die Einsparungspotentiale aus dem Lieferantenkredit, also je kleiner S/H ist, umso geringer fällt die optimale Bestellmenge aus.

Wie bereits erwähnt, berücksichtigt das Wilson-Basismodell explizit keine Lagerkosten. Ferner berücksichtigt er auch nicht das Entscheidungskalkül des Zulieferers. Diesen Sachverhalten widmet sich der nächste Abschnitt.

3 Anknüpfungspunkte für eine erweiterte Betrachtung

3.1 Entscheidungsmodell des abnehmenden Unternehmens unter Berücksichtigung von Lagerkosten

Ein erster Anknüpfungspunkt für eine Erweiterung des Wilson-Basismodells besteht in der Berücksichtigung von Lagerkosten (Kosten der Lagerhaltung), welche im klassischen EOQ-Standardmodell explizit thematisiert werden. Die Kosten setzen sich nun wie folgt zusammen:

$$\text{Gesamtkosten} = \text{Bestellkosten} + \text{Kapitalkosten} + \text{Lagerkosten}$$

mit

$$TC_B = S \cdot \frac{D}{Q} + \frac{H \cdot (Q - P)^2}{2 \cdot Q} + C_r \cdot \frac{Q}{2} \quad (13)$$

Die erste Ableitung nach Q ergibt

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot S \cdot D + H \cdot P^2}{H + C_r}} \quad (14)$$

wobei C_r für den Lagerkostensatz unter Ausschluss der zinsbedingten Kapitalkosten steht.

Damit können die folgenden Aussagen getätigt werden:

1. Die Höhe von Q^* hängt von der Relation zwischen Bestellkosten und Kapital- sowie Lagerkosten ab. Je höher die letzten beiden sind, desto kleiner ist Q^* .
2. Die optimale Bestellmenge ist umso höher, je länger das eingeräumte Zahlungsziel ist.
3. Der Vergleich zum Wilson-Basismodell zeigt, dass die Lagerkosten die Effekte der Kapitalkosten verstärken. Mit anderen Worten, bei Berücksichtigung der Lagerkosten ist Q^* ceteris paribus geringer als im Basismodell. Abbildung 2 veranschaulicht diesen Zusammenhang.
4. Im Hinblick auf die Einsparungspotentiale kann die Erweiterung um die Lagerkosten gleichgesetzt werden mit einer Erhöhung des Nenners in der Relation S/H . Berücksichtigt man also die Lagerkosten, so sind die Bestellmengen, bei denen sich maximale Einsparungen erzielen lassen, kleiner als im Wilson-Basismodell.

Schon [17] und zahlreiche weitere Autoren, wie z.B. [4, 22, 27, 37], haben ausgeführt, dass sich im Rahmen einer integrierten Betrachtung des Zulieferer-Abnehmer-Problems im Kontext der Bestellmengenplanung zahlreiche Effizienzvorteile realisieren lassen (siehe ausführlich hierzu z.B. [38, S. 159ff]). Eine häufig gewählte Vorgehensweise zur Veranschaulichung der Effekte besteht dabei darin, zunächst die Entscheidungsmodelle des Abnehmers wie auch des Zulieferers separat voneinander zu konkretisieren und dann innerhalb eines kooperativen Ansatzes miteinander zu verknüpfen. Dieser Vorgehensvariante wird im Folgenden entsprochen, wobei

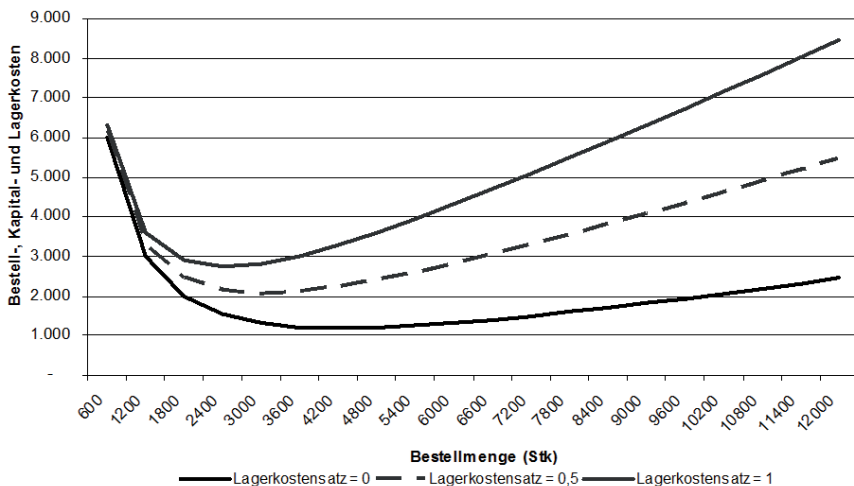


Abb. 2 Exemplarische Gesamtkosten des abnehmenden Unternehmens in Abhängigkeit des Lagerkostensatzes C_r .

insbesondere auf die Thematik des Lieferantenkredits unter Berücksichtigung des Verkaufs bzw. des Erwerbs einer Zusatzmenge eingegangen wird.

3.2 Entscheidungsmodell des abnehmenden Unternehmens unter Berücksichtigung des Erwerbs einer Zusatzmenge

Neben der Gewährung eines Preisnachlasses wird abnehmenden Unternehmen häufig ein erweiterter Lieferantenkredit von ihren Zulieferern als Kaufanreiz gegeben (z.B. [28, 6, 39]). Der Nutzen für den Abnehmer resultiert dabei aus adäquaten Lager- und den Finanzierungskosten der Beschaffung. Der Einkauf einer größeren Menge schlägt sich in erhöhten Lagerkosten, jedoch auch in geringeren Bestellkosten nieder. Für die Dauer der vom Lieferant gewährten Kreditperiode t können zudem die entsprechenden finanziellen Mittel anderweitig verwendet oder angelegt werden, was im Falle der Generierung eines Zusatzertrags insgesamt mit einer Senkung der Gesamtfinanzierungskosten einhergeht.

Bei der Modellierung des Entscheidungsmodells des Abnehmers wird in Analogie zu [2] mit folgenden Annahmen gearbeitet: Zunächst wird davon ausgegangen,

dass alle Wareneinheiten die Voraussetzung für den Kredit erfüllen. Ferner findet die Beschaffung der Zusatzmenge jeweils zu Beginn des Bestellzyklus statt, wenn der Lagerbestand bei Null ist. Weiterhin gelten die deterministischen Annahmen des einfachen Ein-Produkt-Modells: Also konstante und kontinuierliche Nachfrage, keine Unterdeckung sowie unendlich schnelle Lagerauffüllung sowohl beim abnehmenden Unternehmen wie auch beim Lieferanten. Das Bestellintervall beträgt bei einer solchen Zusatzmenge x/D . Als weitere Annahme gilt: Ob das Angebot für eine Zusatzmenge angenommen wird oder nicht, ist nicht durch Weiterverkaufserlöse des Abnehmers oder durch Produktionskosten des Lieferanten beeinflusst. Schließlich gilt $c = c_i + c_p/c_i$, wobei c_i die unveränderliche „investitionsbezogene“ Rate der Kapitalbindungskosten in Prozent des Stückpreises ausdrückt (indiziert mit i). Dabei wird zur weiteren Vereinfachung angenommen, dass der Stückpreis des Abnehmers, welcher gleich dem Verkaufspreis des Lieferanten entspricht, gleich 1 ist. Zudem entspricht c_p der „physischen“ Lagerkostenrate in Prozent (indiziert mit p).

In den Überlegungen von Arcelus [2] werden – wie im klassischen EOQ-Modell – zwei Kostenarten unterschieden: (1) „investment related costs“ (IC), welche sich auf die Finanzierung des Lagerbestands beziehen sowie (2) „physically oriented costs“ (PC), welche die Versicherung, Abwicklung und Einlagerung beinhalten. Im hier zu behandelnden Fall einer längeren Zahlungsfrist bezeichnen die IC des abnehmenden Unternehmens die Zinsen für die kurzfristige Finanzierung bzw. die Opportunitätskosten bei der Nutzung eigener Ressourcen. Sie stehen allerdings erst am Ende der Kreditperiode an. Die PC hingegen fallen bereits bei der Übernahme der Waren an.

Vor diesem Hintergrund besitzt das abnehmende Unternehmen zwei Stellschrauben: Einerseits die Anzahl zusätzlicher gekaufter Wareneinheiten x sowie andererseits das vom Zulieferer vorgegebenen bzw. verhandelbare Zahlungsziel t .

Zunächst seien die investitionsbezogenen Kosten betrachtet, die sich mit dem Kostensatz des Abnehmers c_i wie folgt ergeben:

$$IC_B = c_i \cdot (x + Q) \cdot \frac{(2 \cdot D \cdot t - x)}{2 \cdot D} \quad (15)$$

Es wird deutlich, dass die investitionsbezogenen Kosten nicht nur von der „zusätzlich“ geordneten Menge abhängig sind, sondern, dass die kreditbezogenen Einsparungen sich auf Q und die Zusatzmenge x aufteilen. Dabei ist zu beachten, dass Einsparungen auf x nur dann zu realisieren sind, wenn sie im ordentlichen Bestellzyklus vor Ablauf der Kreditperiode fällig wären. Wird diese Restriktion nicht erfüllt, führt eine Sonderbestellung zu einer Erhöhung der investitionsbezogenen Kosten.

Um die Veränderungen der „physischen“ Kostenkomponente herzuleiten, werden nun Lagerkosten bei ordentlichen Bestellzyklen mit den Kosten eines Zusatzkaufs verglichen. Die anfallenden Kosten bei „regulären“ Bestellungen resultieren aus:

$$c_p \cdot (2 \cdot Q + x) \cdot \frac{(x + Q)}{2 \cdot D} \quad (16)$$

Bei einer Zusatzbestellung von $Q+x$ entstehen bei Kaufabschluß weitere Kosten in der Höhe von $c_p \cdot (Q+x)$, woraus folgende Kosten resultieren:

$$c_p \cdot (x+Q) \cdot \left[\frac{(x+Q)}{D} - t \right] \quad (17)$$

Die Differenz der dargestellten Kostenblöcke ergibt schließlich die Veränderung der lagerbezogenen Kosten für das abnehmende Unternehmen bei einem Zusatzkauf:

$$PC_B = \frac{-c_p \cdot x \cdot (x+Q)}{2 \cdot D} \quad (18)$$

Durch die Annahme, dass lagerbezogene Kosten zu Beginn des Bestellzyklus fällig werden, ist die Veränderung der Lagerhaltungskosten unabhängig von der gewährten Kreditperiode.

Im Modell wird ferner davon ausgegangen, dass dem Abnehmer pro Bestellzyklus Kosten S entstehen. Um Q zu decken bestellt das abnehmende Unternehmen in Zeitintervallen von Q/D . Bei der Beschaffung einer Zusatzmenge $(Q+x)$ wird jedoch die Periode zum nächsten Bestellvorgang verlängert, weshalb sich über den im Modell betrachteten Zeitraum $(Q+x)/D$ die Anzahl an Bestellvorgängen von $(Q+x)/Q$ auf 1 reduziert. Daraus resultieren folgende Einsparungen:

$$\frac{S \cdot x}{Q} = \left(\frac{x}{D} \right) \cdot \left(\frac{S \cdot D}{Q} \right) = \frac{x \cdot (c_i + c_p) \cdot Q}{2 \cdot D} \quad (19)$$

Wie zu erkennen ist, sind die eingesparten Bestellkosten einzig abhängig von der Höhe der Bestellmenge. Die Kreditperiode beeinflusst die Veränderung der Bestellkosten nicht. Durch die Aufsummierung der einzelnen Kosteneffekte bei Durchführung eines Zusatzkaufs zeigt sich wiederum die Abhängigkeit von t und x . Die gesamte nutzenbezogene Veränderung des abnehmenden Unternehmens ergibt sich zu:

$$\Delta TC_B = t \cdot c_i \cdot (x+Q) - \frac{((c_i + c_p) \cdot x^2)}{2 \cdot D} \quad (20)$$

Abbildung 3 stellt den skizzierten Zusammenhang zwischen Kreditperiode bzw. Zusatzmenge und der Nutzenveränderung des Abnehmers exemplarisch dar.

Wie aus der Abbildung zu sehen ist, wächst der Nutzen des Abnehmers mit steigender Kreditperiode an. Dies ist zunächst intuitiv zu erwarten, da eine ausgedehnte Kreditperiode es dem Abnehmer erlaubt, den fälligen Kaufbetrag erst zu einem späteren Zeitpunkt zu überweisen.

Bei fixiertem Zahlungsziel t ist das abnehmende Unternehmen bei der Entscheidung für oder gegen einen Zusatzkauf mit dem Zielkonflikt konfrontiert, dass einerseits die Bestellkosten mit steigender Zusatzmenge x abnehmen, aber andererseits zusätzliche Lagerkosten entstehen. Für den Abnehmer gilt es also, beide Effekte zu beachten, denn: Bei gegebenem Kreditperiode t und steigender Zusatzmenge x erreicht die Funktion bei einem adäquaten Verhältnis aus Bestell- und Lagerkosten ein Maximum bevor der zusätzliche Nutzen durch den Zusatzkauf wieder abnimmt.

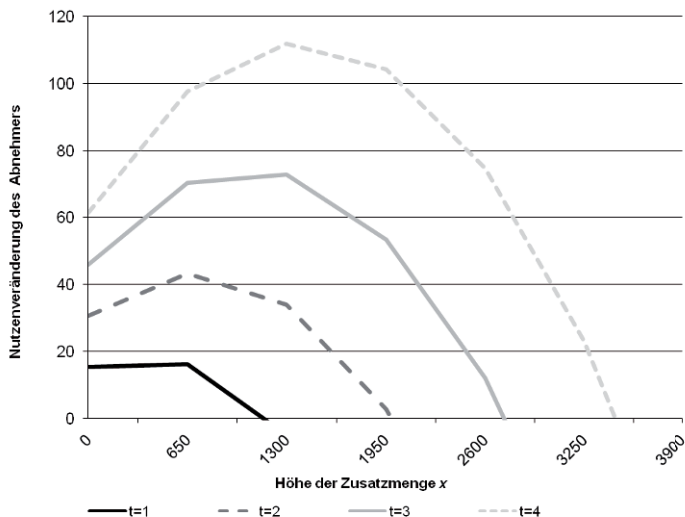


Abb. 3 Nutzenveränderung des abnehmenden Unternehmens in Abhängigkeit der bezogenen Zusatzmenge x bei verschiedenen Kreditperioden t .

Das abnehmende Unternehmen wird, solange ΔTC_B positiv ist, ($\Delta TC_B > 0$) bereit sein, einem Zusatzkauf zuzustimmen. Für eine gegebene Zusatzmenge x maximiert der Abnehmer seinen Nutzen, indem er die Zahlung so weit wie möglich hinauszögert, spricht seine Kreditperiode t so weit wie möglich ausdehnt. Bei fixierter Kreditperiode t wird er hingegen bereit sein, die Sondermenge x zu erhöhen, solange die Veränderung seiner Inventarkosten positiv bleibt ($\Delta TC_B > 0$).

3.3 Entscheidungsmodell des Zulieferers

Aus Sicht von Lieferanten (indiziert mit V für „vendor“) stellt sich prinzipiell die Frage, wie sie größtmögliche Warenmengen an abnehmende Kunden veräußern können. Neben der Gewährung von Preisnachlässen bietet das Einräumen einer längeren Zahlungsfrist eine Variante, mögliche Abnehmer dazu zu bewegen, zusätzliche Warenmengen zu beziehen (z.B. [13, 1]).

Für die Modellierung des Entscheidungsmodells aus Sicht des Zulieferers soll zunächst – ähnlich wie für den Abnehmer – Folgendes für die relevanten Kostensätze gelten: $v = v_i + v_p/v_i$, wobei die investitionsbedingten Kosten des Lieferanten v_i als Prozentsatz des Verkaufspreises bemessen werden (indiziert mit i). Dabei wird zur weiteren Vereinfachung ein Verkaufspreis von 1 angenommen. Zudem entspricht v_p der „physischen“ Lagerkostenrate in Prozent (indiziert mit p). Zudem wird unterstellt, dass der Lieferant einen ausreichend hohen Lagerbestand

im Warenausgangs- bzw. Fertigwarenlager hat. Die maximale überschüssige Verkaufsmenge wird mit $Q_{\bar{u}}$ bezeichnet. Im vorliegenden Fall wird zudem davon ausgegangen, dass Lieferungen auf Rechnung erfolgen, was zur Folge hat, dass der Zulieferer ausstehende Debitoren selbst finanzieren muss [7, S. 1274ff].

Bei der Realisierung solcher Verkäufe unter Berücksichtigung von Lieferantenkrediten bestehen nach [2] primär zwei Stellschrauben für einen Zulieferer: (1) Die Anzahl zusätzlich verkaufter Wareneinheiten x sowie (2) die Länge des gewährten Zahlungsziel t .

Um die optimale Kombination von Menge und Kreditperiode zu bestimmen, hat sich der Zulieferer dabei mit dem Zielkonflikt einer zeitnahen Umsatzrealisierung, was einer Senkung der Umsatzfinanzierungskosten entspricht, und der schnellen Senkung der Bestandskosten auseinanderzusetzen. Beim Gewähren eines zusätzlichen Zahlungsaufschubs an das abnehmende Unternehmen verlängert sich der Zeitraum bis Zahlungseingang um die Kreditperiode t . Um die Veränderung der Finanzierungskosten zwischen der unveränderten Geschäftspolitik (linearer Abbau der „Fertigwarenbestände“ über die Zeit) und eines Zusatzverkaufs mit gewährten Lieferantenkredit zu quantifizieren, sollen deshalb zunächst die entsprechenden Ertragsfunktionen hergeleitet werden.

Da der Bedarf des Abnehmers bei einem „Zusatzverkauf“ über einen längeren Zeitraum gedeckt ist, wird angenommen, dass sich die Periode bis zum nächsten Bestellzyklus von Q/D auf $(x+Q)/D$ verlängert. Dies führt dazu, dass im Modell ein verlängerter Bestellzyklus zugrunde gelegt wird. Aus den diskutierten Punkten ergeben sich sodann folgende Erträge bei einem Zusatzverkauf:

$$v_i \cdot (x+Q) \cdot \left[\frac{(x+Q)}{D} - t \right] \quad (21)$$

Dem steht bei einer unveränderten Geschäftspolitik folgender Ertrag gegenüber:

$$v_i \cdot (2 \cdot Q + x) \cdot \frac{(x+Q)}{2 \cdot D} \quad (22)$$

Die Differenz der letzten beiden Funktionen stellt die „investitionsbedingte“ Ertragsveränderung bei der Realisierung eines Zusatzverkaufs dar:

$$IC_V = v_i \cdot (x+Q) \cdot \frac{(x-2 \cdot D \cdot t)}{2 \cdot D} \quad (23)$$

Aus der Formel sieht man, dass IC_V negativ von der Kreditperiode t und positiv von der Größe der abgesetzten Sondermenge x abhängt.

Weiterhin spielen die Kosten der physischen Lagerung ebenfalls eine wichtige Rolle in der Entscheidungsfindung des Zulieferers. Im Modell wird davon ausgegangen, dass bei einem Zusatzverkauf die zusätzliche Menge x zu Beginn des Bestellzyklus abgesetzt wird und somit keine weiteren Kosten einer physischen Lagerung entstehen. Ist der Überbestand des Lagers in der Höhe von x nicht via Zusatzverkauf abzusetzen, so wird dieser linear über die regulären Bestellzyklen abgebaut. Dabei entstehen dem Zulieferer über die betrachtete Periode $(Q+x)/D$ folgende Kosten:

$$PC_V = v_p \cdot x \cdot \frac{(x + Q)}{2 \cdot D} \quad (24)$$

PC_V hängt dabei von der Höhe der im Zusatzverkauf abgesetzten Menge ($Q + x$) ab. Die aktuelle Größe des Lagerüberbestandes $Q_{\bar{u}}$ hat demnach keinen Einfluß auf die Kostenfunktion. Dies scheint plausibel zu sein, da der Zulieferer - egal bei welchem Geschäftsergebnis - für den betrachteten Zeitraum jederzeit in Besitz der Menge ($Q_{\bar{u}} - x$) ist.

Kombiniert man nun die finanzierungs- und lagerbezogenen Kostenveränderung bei der Realisierung eines Zusatzverkaufs, so ist festzustellen, dass x und t die relevanten Faktoren bei der Entscheidungsfindung des Zulieferers sind. Formal resultiert die Kombination in folgender Gesamtveränderung für den Lieferanten:

$$\Delta TC_V = v_i \cdot (x + Q) \cdot \left(\frac{x \cdot (v_i + v_p)}{2 \cdot D \cdot v_i} - t \right) \quad (25)$$

Abbildung 4 stellt diesen Zusammenhang zwischen Kreditperiode und veräußerter Zusatzmenge sowie der Nutzenveränderung beispielhaft dar.

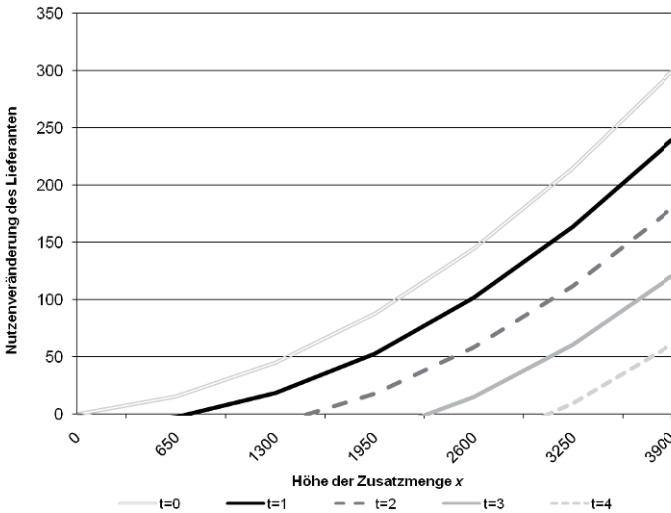


Abb. 4 Nutzenveränderung des Zulieferers in Abhängigkeit der veräußerten Zusatzmenge x bei verschiedenen Kreditperioden t .

Die Abbildung zeigt, was intuitiv zu erwarten ist: Die Gesamtveränderung von ΔTC_V ist negativ korreliert zur gewährten Kreditperiode. Sobald x und damit die Größe der Bestellung fixiert ist, bleibt als einzige Stellschraube die Kreditperiode t , welche der Zulieferer aufgrund der zu finanzierenden Debitorenposition minimieren möchte. Der gleichen Logik folgend ist die Veränderung von ΔTC_V positiv

abhängig von der zusätzlichen Bestellmenge. Daraus folgt, dass bei einer festgelegten Kreditperiode die für den Lieferanten entstehenden Finanzierungskosten bekannt sind. Um seinen Nutzen zu maximieren, wird er nun versuchen, die Zusatzbestellmenge zu erhöhen. In Verhandlungen mit dem Abnehmer wird der Zulieferer nun indifferent gegenüber alternativen Lösungen sein, solange seine Nutzenveränderungen positiv ausfallen.

Bezüglich der Kreditperiode besteht ein Optimum aus Lieferantensicht im Bestehen auf eine Begleichung der Kosten unmittelbar bei Auslieferung. Bei wachsender Kreditperiode und konstanter Verkaufsmenge wird der Zulieferer solange das Angebot akzeptieren, bis ΔTC_V negativ wird ($\Delta TC_V < 0$). Daraus resultiert eine maximale Kreditperiode aus Lieferantensicht von $x \cdot v / 2 \cdot D$.

Bei konstant gehaltener Kreditperiode minimiert der Lieferant die lagerbezogenen Kosten, indem er die zusätzliche Verkaufsmenge möglichst hoch hält. Natürliches Maximum stellt der „Fertigwarenüberbestand“ (Q_{ii}) dar. Bei einer Zusatzmenge von $x \leq Q_{ii}$ ist der Zulieferer nur solange bereit, das Geschäft abzuschließen, als dass ΔTC_V positiv bleibt ($\Delta TC_V > 0$). Dies ist der Fall für alle $x > 2 \cdot D \cdot t / v$.

3.4 *Gemeinsames Entscheidungsmodell bei kooperativer Verhandlungsstrategie*

Nach dem die Entscheidungsmodelle des abnehmenden Unternehmens sowie des Zulieferers getrennt von einander untersucht worden sind, erfolgt nun eine gemeinsame Betrachtung, um kooperative Lösungsbandbreiten aufzuzeigen, die sowohl für das abnehmende Unternehmen als auch für den Lieferanten akzeptabel sind. Dabei erlangt die Koordination in der Supply Chain eine besondere Bedeutung [3].

Vergleicht man zunächst die analytisch ermittelten Grenzwerte der individuellen Entscheidungsmodelle, so wird ersichtlich, dass die Maxima von ΔTC_V und ΔTC_B für die jeweilige Gegenpartei keine adäquate Lösung darstellen. Um eine pareto-optimale Lösung zu erreichen sind – der Wille beider Akteure vorausgesetzt – Informationen bezüglich jeglicher Kostenblöcke vollständig offen zu legen. Diese Annahme ist Voraussetzung für die Diskussion bezüglich möglicher kooperativer Verhandlungsergebnisse im Folgenden. Denn für eine vorgegebene Kreditperiode t , wird die Höhe der Extrabestellmenge x nur so groß sein, wie es für das abnehmende Unternehmen akzeptabel ist, und so klein sein, wie der Lieferant bereit ist sie anzubieten. Innerhalb dieses Intervalls sind damit beide Parteien über die Auftragsannahme dahingehend indifferent, dass bei gegebenem t oder x keiner der Akteure einen Verlust erleiden wird.

Im Weiteren soll untersucht werden, wie sich das Intervall bei einer nicht konkret vorgegebenen Extrabestellmenge x oder Kreditperiode t verhält unter der Voraussetzung, dass beide Parteien indifferent zur Auftragsannahme stehen. Dabei müssen folgende Bedingungen vorliegen:

$$0 \leq x_{ov} \leq x \leq x_{ob} \quad \text{sowie} \quad 0 \leq t_{ob} \leq t \leq t_{ov} \quad (26)$$

wobei x_{ov} für die untere und x_{ob} für die obere Grenze der Zusatzmenge bei gegebenen t sowie t_{ob} für die untere und t_{ov} für die obere Kreditperiodengrenze bei gegebenen x stehen. Diese Grenzen sind so ausgelegt, dass es für keine der beiden Parteien zu negativen Nutzenveränderungen kommt ($TC_V = TC_B = 0$). Folglich wird jedes t oder x , welches ausserhalb dieser Grenzen liegt, für zumindest eine Partei zu nachteiligen Effekten führen. Nach einer entsprechenden Umformung erhält man:

$$x \cdot (c - v) < v \cdot Q \text{ für ein gegebenes } t \quad (27)$$

sowie

$$t \cdot (c - v) < v^2 \cdot Q / 2 \cdot D \text{ für ein gegebenes } x \quad (28)$$

Da v , Q und D stets positiv sind, ist die Formel für $(c - v) < 0$ stets erfüllt. Denn damit erfüllt jede beliebige $x - t$ -Kombination die aufgestellten Gleichungen. Zudem gibt es für den Fall, dass die Kosten des Lieferanten grösser als die des Abnehmers sind, keine Intervallslösung. Sollte jedoch $(c - v) > 0$ sein, so resultiert folgende Intervallslösung:

$$0 \leq x \leq x_0 \leq \frac{Q \cdot v}{(c - v)} \text{ bzw. } 0 \leq t \leq t_0 \leq \frac{Q \cdot v^2}{2 \cdot D \cdot (c - v)} = \frac{x_0 \cdot v}{2 \cdot D} \quad (29)$$

Mit diesen Einschränkungen kann (für den Fall $(c - v) > 0$) das maximale Verhandlungsintervall für den Lieferanten und das abnehmende Unternehmen bestimmt werden. Dabei sind nun nicht mehr die Extrabestellmenge x bei gegebener Kreditperiode t gesucht bzw. umgekehrt, sondern die $x - t$ -Kombinationen, bei denen beide Geschäftsparteien indifferent gegenüber der Vertragsannahme sind. Einfach nachvollziehbar ist dies anhand der Ausprägung von $TC_V = TC_B = 0$.

Nachdem für die gegebenen Kosten der beiden Parteien das Verhandlungsintervall bestimmt wurde, gilt es nun, relevante Handlungsszenarien durchzuspielen. Dabei ist insbesondere die Aufteilung der möglichen Gewinne von Bedeutung. Bei der kooperativen Verhandlungsstrategie sei der Gewinn nach gegenseitig bereitwilligem Einverständnis aufgeteilt. Der Profit Sharing Ratio α beschreibt dabei wie viel Prozent des Gesamtgewinns $H = \Delta TC_B + \Delta TC_V$ an das abnehmende Unternehmen geht. Dementsprechend ist $(1 - \alpha)$ der Gewinnanteil des Zulieferers:

$$(1 - \alpha) \cdot \Delta TC_V = \alpha \cdot \Delta TC_B \quad (30)$$

Setzt man für TC_V und TC_B die entsprechenden Formeln ein, folgt:

$$\alpha = \frac{2 \cdot D \cdot t \cdot (x + q) \cdot c_i - x^2 \cdot (c_i + c_p)}{(v_i + v_p - c_i - c_p) \cdot x^2 + 2 \cdot D \cdot t \cdot (x + Q) \cdot (c_i - v_i) + x \cdot Q \cdot (v_i + v_p)} \quad (31)$$

Im Weiteren kann gezeigt werden, dass sich der ausserordentliche Output x^* , der den kombinierten Gewinn maximiert, aus

$$x^* = \min \left\{ \frac{Q \cdot v}{2 \cdot (c - v)}, Q_{\ddot{u}} \right\} \quad (32)$$

ergibt. Dabei resultiert auch die optimale Kombination aus t und α mit:

$$(t^*, \alpha^*) = [t_{ov} \cdot (x^*), 1] \quad \text{wenn} \quad \frac{\partial H}{\partial t} > 0 \tag{33}$$

sowie

$$(t^*, \alpha^*) = [t_{oc} \cdot (x^*), 0] \quad \text{wenn} \quad \frac{\partial H}{\partial t} < 0 \tag{34}$$

Somit entsteht je nach Struktur zwischen c und v bzw. zwischen c_i und v_i ein Optimum für die kooperativen Verhandlungsstrategien. Der mögliche Lösungsraum für diese ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Kooperative Verhandlungsstrategien.

	$c > v$	$c \leq v$
	$x^* \quad Q \cdot v / 2 \cdot (c - v)$	$Q_{\ddot{u}}$
$c_i > v_i$	$t^* \quad t_{0v}(x^*) = Q \cdot v^2 / 4 \cdot D \cdot (c - v)$	$t_{0v}(x^*) = Q_{\ddot{u}} \cdot (v / 2 \cdot D)$
	$\alpha^* \quad 1$	1
	$x^* \quad Q \cdot v / 2 \cdot (c - v)$	$Q_{\ddot{u}}$
$c_i < v_i$	$t^* \quad t_{0b}(x^*) = c \cdot Q \cdot v^2 / [4 \cdot D \cdot (c - v) \cdot (2 \cdot c - v)]$	$t_{0b}(x^*) = Q_{\ddot{u}}^2 \cdot c / [2 \cdot D(Q_{\ddot{u}} + Q)]$
	$\alpha^* \quad 0$	0

Anmerkungen:

$c_i > v_i$ bedeutet, dass $\partial H / \partial t > 0$ und damit ist $t \rightarrow t_{ov}(x^*)$ die obere Grenze.

$c_i < v_i$ bedeutet, dass $\partial H / \partial t < 0$ und damit ist $t \rightarrow t_{ob}(x^*)$ die untere Grenze.

$c > v$ bedeutet, dass $\partial H(t^*) / \partial x = 0$ sowie $\partial^2 H(t^*) / \partial x^2 > 0$, woraus x^* folgt.

$c \leq v$ bedeutet, dass $\partial H(t^*) / \partial x > 0$ und somit ist $x^* \rightarrow Q_{\ddot{u}}$ die obere Grenze.

Aus den kooperativen Verhandlungsstrategien ist zu konstatieren: Falls $c_i < v_i$ wird der Gewinn vollständig dem Lieferanten gutgeschrieben ($\alpha = 0$). Wenn $c_i > v_i$, wird der Gewinn vollständig dem abnehmenden Unternehmen zugeordnet ($\alpha = 1$). Diese beiden Ergebnisse sind unabhängig von c und v . Im Weiteren entsteht – abhängig der Konstellation von c , v , c_i und v_i – jeweils eine Extremlösung, in der entweder der Abnehmer oder der Lieferant den gesamten Gewinn zugeteilt bekommt. An dieser Stelle ist nochmals zu betonen, dass trotz dem Fakt, dass lediglich eine Partei den gesamten Gewinn zugeschrieben bekommt, der andere Akteur stets indifferent gegenüber der Auftragsannahme ist, obwohl sie schlechter gestellt wird.

4 Kritische Würdigung und Ausblick

Eine relevante Erkenntnis aus dem EOQ-Standardmodell besteht darin, dass zur Minimierung der Gesamtkosten die Bestände nicht minimiert, sondern optimiert werden. Die vorgestellten Modelle von [41] und [2] folgen diesem Prinzip, bauen jedoch auf stark vereinfachenden Annahmen auf.

Problematisch scheint zunächst die unvollständige Präsentation der Modelle zu sein, wie etwa bei [41] insbesondere die Vernachlässigung des wesentlichen Kostenelements der Einstandskosten. Zwar spielen diese für die Ermittlung der kostenoptimalen Menge keine Rolle, aber zum Abschätzen der relativen Ersparnis aus den vorgeschlagenen Maßnahmen sind sie zwingend in die Betrachtung einzubeziehen. Darüber hinaus wurde herausgearbeitet, dass der Schlußfolgerung Wilsons', dass die optimale Umschlagdauer bei $Q < P$ liegt, nicht zu folgen ist.

Als Problembereich im Modell von [2] ist weiterhin der komplette Austausch jeglicher Informationen zu nennen, denn nur so kann die vorgeschlagene Interaktion gelingen. Ob die beiden Akteure aber dazu bereit sein werden, ist in der Praxis zumindest in Frage zu stellen. Ferner ist zweifelhaft, inwieweit der „Vorteilstransfer“ zwischen den Geschäftspartnern tatsächlich umzusetzen ist, wohlwissend dass in der unternehmerischen Praxis meist von asymmetrischen Machtverhältnissen auszugehen ist. Weitere Schwachstellen sind die Beschränkung auf eine Single-Sourcing Strategie sowie die Annahme einer konstanten Nachfrage.

Ferner stellt die für den Einsatz des EOQ-Modells in der Praxis erforderliche Datenerhebung oft eine unterschätzte Herausforderung dar. Einerseits läßt sich das Modell nur auf Basis von Activity Based Costing- bzw. Prozesskosten-Systemen einfach implementieren, über welches viele Unternehmen nicht verfügen. Andererseits ist die Identifikation relevanter Kostengrößen für die Modellerstellung häufig problematisch [32, S. 31].

Schließlich scheint – aufgrund fehlender aktueller Fallbeispiele in der einschlägigen Literatur – die Optimierung der Bestellmengen in der Wahrnehmung der Entscheidungsträger aktuell eine geringere Rolle zu spielen als andere Lösungen, wie etwa die Übernahme der Lagerhaltung durch die Lieferanten im Rahmen eines Vendor Managed Inventory (VMI)-Ansatzes oder das Gewähren von Preisnachlässen bei Abnahme von Zusatz- bzw. Großmengen [5]. Dabei scheint gerade die Gewährung von Lieferantenkrediten in solchen Supply Chain-Beziehungen vielversprechend zu sein, die einerseits für die involvierten Akteure von hoher Relevanz sind und sich andererseits durch gegenseitiges Vertrauen und Offenheit auszeichnen. In solchen Konstellationen können unternehmensübergreifende Supply Chain Finance-Ansätze zum Vorteil aller implementiert werden, ohne die Organisation des Waren-/Materialflusses zu verändern, wie dies beispielsweise bei der Realisierung des VMI-Konzeptes notwendig wäre [23].

Die praktische Relevanz des erweiterten EOQ-Modells unter Berücksichtigung von Lieferantenkrediten könnte daher weiterhin entlang folgender Fragen vertieft untersucht werden: Besteht in Anbetracht der Probleme bei der Datenerhebung ein ausgewogenes Kosten-Nutzen-Verhältnis bei der Optimierung statt Minimierung der Bestellmengen, wenn bei attraktiven Einsparungspotentialen die optimalen Bestellmengen klein sind im Verhältnis zum Gesamtbedarf?

Interessant wären zudem Modifikationen, die auf die Flexibilisierung der Bedarfe eingehen und Bezugsrisiken oder die Verderblichkeit von Waren berücksichtigen. Der Warenverderblichkeit wurde bereits mehrfach in wissenschaftlichen Modellerweiterungen Rechnung getragen. Beispielsweise fügen [10] den Überlegungen einen zeitabhängigen Verderblichkeitsfaktor hinzu. In einer anderen Modellerwei-

terung wird die Relevanz von Lieferantenkrediten im Zusammenhang mit verderblichen Gütern untersucht [9, S. 719ff]. Auch spezifische Branchenanwendungen sind wünschenswert. Für die Lebensmittelindustrie beispielsweise ist die Modifikation von [29] erweiterbar, die den Zusammenhang zwischen dem Distributionssystem (Distribution direkt an die Verkaufspunkte oder indirekt über Zwischenhändler) sowie den Bestellmengen und -häufigkeiten analysieren. Spezifische Weiterentwicklungen sind ebenfalls in der Automobilindustrie denkbar. Für diese Branche spricht, dass die Planungs- und Beschaffungszyklen relativ lange sind und somit die Bestellmengen über mehrere Jahre konstant bleiben. Anknüpfungspunkte für potenzielle Erweiterungen, wie beispielsweise die Integration des Just-in-Time-Konzepts unter Berücksichtigung von Lieferantenkrediten, finden sich beispielsweise bei [43].

Weiterhin sollten die Kosten des Bestellprozesses auch auf Lieferantenseite mit einbezogen, das Inventar des Abnehmers zu Beginn der Bestellung nicht auf Null gesetzt sowie ein Default-Risiko berücksichtigt werden. Anregungen hierzu finden sich beispielweise bei [26], die in ihrem Ansatz eine Warenunterdeckung (Shortage) zulassen. Weiterhin entwickelte [35] eine Variante, in der eine Lead Time mit einberechnet wird. Auch die Möglichkeit Zinsen in die Berechnung mit einzubeziehen ist zu vertiefen. Auf der Basis der DCF-Methode präsentieren [36] ein Modell welches die gewährte Kreditperiode in drei Teile gliedert. Wird die Rechnung im ersten zeitlichen Abschnitt der Periode bezahlt, so fallen keine Zinsen an, bei einer Begleichung in einem zweiten Abschnitt sind zusätzlich Zinsen in der Höhe IC_2 zu entrichten, danach steigt der Zinssatz auf IC_3 ($IC_3 > IC_2$).

Schließlich sollten die Überlegungen zu Lieferantenkrediten in der Bestellmengenplanung um eine stochastische Nachfrage erweitert werden. Anknüpfungspunkte hierzu finden sich u.a. bei [21].

Literaturverzeichnis

1. Aggarwal S.P., Jaggi C.K.: Ordering policies of deteriorating items under permissible delay in payments. *Journal of the Operational Research Society* 46 (1995) 658–662
2. Arcelus F.J., Srinivasan G.: Delay of payments for extraordinary purchases. *The Journal of the Operational Research Society* 44(8) (1993) 785–795
3. Arshinder K.A., Deshmukh S.G.: Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics* 115 (2008) 316–335
4. Banerjee A.: A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. *Decision Sciences* 17 (1986) 292–311
5. Bernstein F., Chen F., Federgruen A.: Coordinating supply chains with simple price schemes: The role vendor-managed inventories. *Management Science* 52(1) (2006) 1483–1492
6. Blattberg R.C., Eppen G.D., Lieberman J.: A theoretical and empirical evaluation of price deals for consumer nondurables. *Journal of Marketing* 45(1) (1981) 116–129
7. Buzacott J.A., Zhang R.Q.: Inventory management with asset-based financing. *Management Science* 50(9) (2004) 1274–1292
8. Chang C.T.: An EOQ model with deteriorating items under inflation when supplier credits linked to order quantity. *International Journal of Production Economics* 88 (2004) 307–316
9. Chang C.T., Ouyang L.Y., Teng J.T.: An EOQ model for deteriorating items under trade credits. *Journal of the Operational Research Society* 56 (2005) 719–726

10. Chaudhuri K.S, Manna S.K.: An economic order quantity model for deteriorating items with time-dependent deterioration rate, demand rate, unit production cost and shortages. *International Journal of Systems Science* 31(8) (2001) 1003–1009
11. Chung K.-J., Huang T.-S.: The optimal retailer's ordering policies for deteriorating items with limited storage capacity under trade credit financing. *International Journal of Production Economics* 106(1) (2007) 127–145
12. Chung K.-J., Lin S.-D., Yen G.-F.: The complete proof on the economic order quantity under conditions of permissible delay in payments. *Journal of the Operational Research Society* 59 (2008) 1142–1144
13. Davis R.A., Gaither N.: Optimal ordering policies under conditions of extended payment privileges. *Management Science* 31 (1985) 499–509
14. Evans J., Koch T.: Surviving chapter 11: Why small firms prefer supplier financing. *Journal of Economics and Finance* 31(2) (2007) 186–206
15. Farris II M.T., Hutchinson P.D.: Measuring cash-to-cash performance. *The International Journal of Logistics Management* 14(2) (2003) 83–91
16. Garcia-Teruel P.J., Martinez-Solano P.: Effects of working capital management on SME profitability. *International Journal of Managerial Finance* 3(2) (2007) 164–177
17. Goyal S.K.: An integrated inventory model for a single supplier-single customer problem. *International Journal of Production Research* 15(1) (1976) 107–111
18. Goyal S.K.: Economic order quantity under conditions of permissible delay in payments. *Journal of the Operational Research Society* 36 (1985) 335–338
19. Goyal S.K., Gupta Y.P.: Integrated inventory models: the buyer-vendor coordination. *European Journal of Operational Research* 41 (1989) 261–269
20. Haley C.W., Higgins H.C.: Inventory policy and trade credit financing. *Management Science* 20 (1973) 464–471
21. Halskau Ø.: EOQ models for postponed payment of stored commodities. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 33(8) (2003) 686–700
22. Hill R.M.: The single-vendor single-buyer integrated production-inventory model with a generalised policy. *European Journal of Operational Research* 97 (1997) 493–499
23. Hofmann E.: Supply chain finance: some conceptual insights. In: Lasch R., Janker C.G. (Hrsg.): *Logistik Management – Innovative Logistikkonzepte*. Gabler, Wiesbaden (2005) 203–214
24. Huang Y.-F.: Optimal retailer's ordering policies in the EOQ model under trade credit financing. *Journal of the Operational Research Society* 54 (2003) 1011–1015
25. Huang Y.-F.: Optimal retailer's replenishment policy for the EPQ model under the supplier's trade credit policy. *Production Planning & Control* 15(1) (2004) 27–33
26. Jamal A.M.M., Sarker B.R., Wang S.: An ordering policy for deteriorating items with allowable shortage and permissible delay in payments. *Journal of Operational Research Society* 48 (1997) 826–833
27. Landeros R., Lyth D.M.: Economic-lot-size models for cooperative interorganizational relationships. *Journal of Business Logistics* 10(2) (1989) 146–158
28. Lee H.L., Rosenblatt M.J.: A generalized quantity discount pricing model to increase supplier's profits. *Management Science* 32(9) (1986) 1177–1185
29. Miliotis P., Pramataris K.: The impact of collaborative store ordering on shelf availability. *Supply Chain Management: An International Journal* 13(1) (2008) 49–61
30. Paul S., Wilson N.: The determinants of trade credit demand: Survey evidence and empirical analysis. *Journal of Accounting – Business & Management* 14 (2007) 96–116
31. Perridon L., Steiner M.: *Finanzwirtschaft der Unternehmung*, 14. Aufl. Vahlen, München (2007)
32. Piasecki D.: Optimizing economic order quantity. *IIE Solutions* 33(1) (2001) 30–39
33. Rappaport A.: *Creating shareholder value: A guide for managers and investors*. Free Press, New York, NY (1998)
34. Scherr F.C.: *Modern working capital management: Text and cases*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1989)

35. Shah N.H.: Probabilistic order level system with lead time when delay in payments is permissible. *TOP* 5(2) (1997) 297–305
36. Shah N.H., Gor A.S., Soni H.: An EOQ model for progressive payment scheme under DCF approach. *Asia-Pacific Journal of Operational Research* 23(4) (2006) 509–524
37. Sharafali M., Co H.C.: Some models for understanding the cooperation between the supplier and the buyer. *International Journal of Production Research* 38(15) (2000) 3425–3449
38. Tempelmeier H.: *Bestandsmanagement in Supply Chains*. Books on Demand GmbH, Norderstedt (2005)
39. Teng J.T.: On the economic order quantity under conditions of permissible delay in payments. *Journal of the Operational Research Society* 53 (2002) 915–918
40. Wildemann H.: *Asset Management und Working-Capital-Controlling*. München: TCW Transfer-Centrum (2007)
41. Wilson J.M.: Supplier credit in the economic order quantity model. *International Journal of Operations & Production Management* 11(9) (1991) 64–71
42. Wöhe G., Bilstein J.: *Grundzüge der Unternehmensfinanzierung*, 8. Aufl. Vahlen, München (1998)
43. Wu M., Low S.P.: Economic order quantity (EOQ) versus just-in-time (JIT) purchasing: An alternative analysis in the ready-mixed concrete industry. *Construction Management & Economics* 23(4) (2005) 409–422

Identifikation von Ablauffamilien zur Integration flussorientierter Fertigungsstrukturen in der Halbleiterproduktion

Sophia Keil, Rainer Lasch, Arthur Deutschländer, Harald Heinrich und Germar Schneider

Zusammenfassung Sehr kurze Produktlebenszyklen und ein starker Preisverfall fordern von Unternehmen der High Tech Branche hohe Innovationsgeschwindigkeit und kurze Markteinführungszeiten. Kurze Durchlaufzeiten ermöglichen durch kurze Lernzyklen einen erfolgreichen Serienanlauf. Flussorientierte Fertigungsorganisationen führen zu kurzen Durchlaufzeiten und werden seit vielen Jahrzehnten mit großem Erfolg z.B. in der Automobilindustrie eingesetzt. Im Gegensatz hierzu sind nahezu alle weltweit bekannten Fabrikationsstätten für die Chip-Herstellung auch heute noch nach dem Verrichtungsprinzip organisiert. Die räumliche und organisatorische Zusammenfassung gleichartiger Maschinen ermöglicht zwar eine gute Nutzung der Ressourcen für die Prozessentwicklung und Produktion, nachteilig sind jedoch die hohen Bestände, langen Durchlaufzeiten und geringe Termintreue. Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung des Flussprinzips und eine materialflussgerechte Reorganisation der Fertigung ist die Identifikation von Produkten mit identischen bzw. ähnlichen Fertigungsabläufen und ihre Zusammenfassung zu

Sophia Keil

Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Logistik, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, GERMANY
Infineon Technologies Dresden GmbH, Königsbrücker Straße 180, 01099 Dresden, GERMANY
E-mail: sophia.keil@infineon.com

Rainer Lasch

Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Logistik, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, GERMANY
E-mail: rainer.lasch@tu-dresden.de

Arthur Deutschländer

Fachhochschule Stralsund, Fachbereich Maschinenbau, Lehrstuhl Förder-, Handhabungs- und Montagetechnik, Zur Schwedenschanze 15, 18435 Stralsund, GERMANY
E-mail: arthur.deutschlaender@fh-stralsund.de

Harald Heinrich · Germar Schneider

Infineon Technologies Dresden GmbH, Königsbrücker Straße 180, 01099 Dresden, GERMANY
E-mail: {harald.heinrich,germar.schneider}@infineon.com

Ablauffamilien. Schwerpunkt des Beitrags ist die Vorstellung eines auf der Clusteranalyse basierenden Verfahrens zur Identifikation von Ablauffamilien.

1 Einleitung

Für mehr als 40 Jahre wurde die Halbleiterindustrie bestimmt durch das sogenannte „Moore’s Law“¹, dem Streben nach immer leistungsfähigeren Bauelementen mit verkleinerten Strukturbreiten. Die Technologiebeherrschung und -verbesserung hat nicht an Bedeutung verloren. Eine neue Herausforderung stellt allerdings die Verkürzung der Produktionsdurchlaufzeiten dar, was auf der Advanced Semiconductor Manufacturing Konferenz 2007 unter dem Credo „Technology is no longer king“ zusammengefasst wurde. Diese Forderung ergibt sich, da jede Einführung einer neuen Generation von integrierten Schaltkreisen die Produktionsdurchlaufzeit um bis zu 30% erhöht [57]. Eine kontinuierliche Verkleinerung der Strukturbreiten der Halbleiterbauelemente führt zu einer steigenden Komplexität der Produkte, wobei die Anzahl der Prozessschritte stark zunimmt.

Die Durchlaufzeit eines Halbleiterbauelementes kann heute 15 Wochen und mehr betragen. Es sind bis zu 1000 unterschiedliche Arbeitsschritte und 100 verschiedene Fertigungsanlagen notwendig. Mehr als 83% der Durchlaufzeiten umfassen unproduktive Transport-, Speicher-, Handhabungs- und Wartezeitvorgänge [65, 71, 61].

Folgen langer Durchlaufzeiten können neben hohen Beständen und einer schlechten Liefertreue insbesondere verspätete Markteinführungen neuer Produkte sein. Dies hat eine Untersuchung von Serienanläufen der Halbleiterindustrie gezeigt [37]. Kurze Durchlaufzeiten ermöglichen durch kurze Lernzyklen eine schnelle Verbesserung der Ausbeute neuer Produkte. Sie stehen daher in enger Wechselbeziehung zu einem erfolgreichen Serienanlauf und kurzen Markteinführungszeiten. Vor dem Hintergrund des starken Preisverfalls von Speicherchips und der hohen Innovationsgeschwindigkeit der Halbleiterindustrie sind ein erfolgreicher Serienanlauf und eine schnelle Time-to-Market die entscheidenden Wettbewerbsfaktoren.

Die Ursachen langer Durchlaufzeiten liegen wie eingangs beschrieben in der starken Technologieorientierung der Halbleiterindustrie begründet. Die Konzentration auf die Miniaturisierung der Strukturbreiten hat die Entwicklung der Fertigungsstätten, ausgehend von einem experimentierenden Laborbetrieb der 60er Jahre zum modern produzierenden Fabrikbetrieb behindert [20]. Fabrikationsstätten für die Chip-Herstellung sind auch heute noch fast ausnahmslos nach dem Verichtungsprinzip (Werkstattprinzip) organisiert [59, S. 37], [69, S. 20], [7, S. 22].

¹ Dieses Gesetz basiert auf einer empirischen Beobachtung, die Gordon Moore, Mitbegründer der Firma Intel, 1965 machte. Jedes Jahr verdoppelt sich die Anzahl der Transistorfunktionen pro Chip [52]. Die Kosten pro Transistor werden dabei halbiert. Seit 1975 hat sich die Verdopplung der Chip-Komplexität verlangsamt und fand in einem Zeitintervall von eineinhalb Jahren statt. Daher sagte Moore für die folgende Zeit eine Verdopplung innerhalb von zwei Jahren voraus [53]. Das heißt, alle zwei Jahre muss eine vollkommen neue Generation von integrierten Schaltkreisen (IC’s) auf Basis kleinster Strukturbreiten am Markt sein.

Die räumliche und organisatorische Zusammenfassung gleichartiger Technologien ermöglicht zwar eine gute Nutzung der Ressourcen für die Prozessentwicklung und Produktion, nachteilig sind jedoch die hohen Bestände, langen Durchlaufzeiten und geringe Termintreue.

In der Halbleiterfertigung sind neuartige Fertigungsorganisationsformen erforderlich, die ein schnelles Umsetzen von Innovationen fördern. Gerade für bestehende Fabriken mit 200mm-Wafer²-Technologie sind Maßnahmen zur Verbesserung der Fertigungsorganisation und des Materialflusses von hoher Bedeutung, um eine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber State-of-the-Art Fabriken mit 300mm-Wafer-Technologie sicherzustellen. Ca. 90% aller Halbleiterfabriken produzieren auf Basis der 200mm-Wafer-Technologie [64]. Die Fertigungsstrukturplanung bietet gute Ansätze der Produktivitätssteigerung und kann die Erschließung hoher Rationalisierungspotenziale ermöglichen.

Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung des Flussprinzips und eine materialflussgerechte Reorganisation der Fertigung in der Halbleiterindustrie stellt die Identifikation von Ablauffamilien dar. Eine Ablauffamilie beinhaltet Produkte, deren Produktionsabläufe, identisch bzw. weitgehend ähnlich sind. Aus diesem Grund wird im Rahmen des Beitrags eine auf der Clusteranalyse basierende Methode zur Identifikation von Ablauffamilien entwickelt. Der Beitrag gliedert sich in zwei Hauptkapitel. In Kapitel 2 werden ausgehend von einem Überblick über die Besonderheiten der Halbleiterfertigung Restriktionen herausgearbeitet, die eine flussorientierte Gestaltung von Halbleiterfabriken behindern. Anschließend werden Entwicklungstendenzen hin zu flussorientierten Fertigungsstrukturen in der Halbleiterindustrie aufgezeigt. Kapitel 3 beinhaltet eine Darstellung des Standes der Forschung zu Verfahren und Werkzeugen der Familienbildung. Vor der Beschreibung des Verfahrens zur Bildung von Ablauffamilien erfolgt dessen Einordnung in eine ganzheitliche Planungsmethode zur flussorientierten Gestaltung von Produktionsstätten mit Verrichtungsprinzip. Das Kapitel endet mit der Anwendung des Verfahrens am Beispiel der Halbleiterindustrie. Der Beitrag schließt in Kapitel 4 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Fertigungsorganisation der Halbleiterindustrie

2.1 Besonderheiten der Halbleiterfertigung

Zwischen den Merkmalen von Produktionsprozessen können empirisch ermittelte Zusammenhänge hinsichtlich der Organisationsform aufgezeigt werden. Bei der Produktion von großen Stückzahlen für den anonymen Markt ist vor dem Hin-

² Wafer sind dünne Siliciumscheiben. Sie stellen das Rohmaterial für die Herstellung von IC's dar. Wafer der 200mm-Wafer-Technologie haben einen Durchmesser von 200 mm. State-of-the-Art ist die Herstellung mittels Wafer mit einem Durchmesser von 300 mm, was einer Flächenerhöhung um den Faktor 2,25 (quadratisch) entspricht. Damit kann eine höhere Anzahl von Chips auf einem Wafer hergestellt werden.

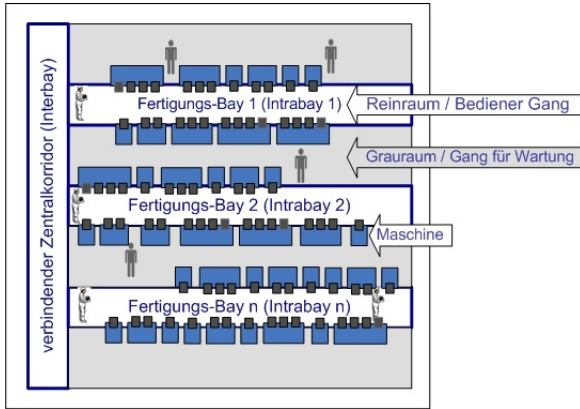


Abb. 1 Bay-Chase-Prinzip.

tergrund wirtschaftlicher Forderungen weitgehend das Flussprinzip vorherrschend. Je mehr sich ein Übergang zu kundenspezifischen Serienprodukten vollzieht, desto zweckmäßiger ist eine Produktionsstruktur nach dem Verrichtungsprinzip [76, S. 40]. Bemerkenswert ist, dass der beschriebene Zusammenhang für die Halbleiterindustrie nicht zutrifft. Wie oben ausgeführt, sind Halbleiterfabriken fast ausnahmslos nach dem Verrichtungsprinzip organisiert, obwohl Produkte, wie z.B. Speicherbausteine in Großserienfertigung hergestellt werden.

Die meisten Halbleiterfabriken sind entsprechend des „Bay-Chase-Prinzips“ (s.a. Abbildung 1) aufgebaut [59, S. 37], [75]. Hier sind die verschiedenen Fertigungsbereiche (Fertigungs-Bay's) in einer Art „fingerähnlichen“ Struktur räumlich und organisatorisch getrennt nebeneinander angeordnet. Innerhalb eines Fertigungsbereiches befinden sich in der Regel Fertigungsanlagen einer Prozesstechnologie (z.B. Lithographie-, Ätz- oder Reinigungsanlagen). Dies entspricht der am weitesten verbreiteten Anordnung nach dem so genannten Farm-Layout. Die Fertigungs-Bays sind mit einem Zentralkorridor verbunden. Im Kontext von Materialflusssystemen werden die Fertigungs-Bays als Intrabays bezeichnet und der Zentralkorridor als Interbay. Zwischen den Fertigungs-Bays befinden sich sogenannte Grauräume, in denen die Wartung der Fertigungsgeräte erfolgt.

Die Gründe für das Vorherrschen des Verrichtungsprinzips lassen sich auf die hohe Innovationsgeschwindigkeit des Halbleitermarktes, ökonomische Bedingungen und Besonderheiten der Halbleiterfertigung zurückführen. Die hohe Innovationsgeschwindigkeit des Halbleitermarktes und sehr kurze Produktlebenszyklen führen zu häufigen technologischen Änderungen der Produkte und einem permanenten Bedarf an Veränderungen des Produktionsprozesses. Das Verrichtungsprinzip mit Farm-Layout weist eine hohe Flexibilität gegenüber diesen Veränderungen auf und kann leicht um neue Anlagen erweitert werden. Darüber hinaus fördert das Verrichtungsprinzip die mit der hohen Innovationsgeschwindigkeit verbundene Forderung nach effizienten Lernprozessen, da Experten der jeweiligen Prozesstechnologie an einem Ort konzentriert sind.

Integrierte Schaltkreise werden in Reinräumen hergestellt. Die Luft ist temperatur- sowie feuchtigkeitsstabilisiert und weist eine sehr geringe Anzahl von Partikeln auf. Herausfordernde Faktoren bei der Gestaltung von Halbleiterfabriken sind eine sehr komplexe Medienversorgung sowie auch spezifische chemische Anforderungen und Sicherheitsanforderungen. Dies verursacht hohe Konstruktions- und Raumkosten. Eine State-of-the-Art Fabrik mit 300mm-Wafer-Technologie kann Investitionskosten von bis zu drei Mrd. US-\$ verursachen. 85% dieser Kosten werden durch die Anlagen zur Herstellung von IC's verursacht [47]. Die Aufstellung der Anlagen nach dem Verrichtungsprinzip ermöglicht eine Vereinfachung der Medienversorgung (z.B. gleiche Gasanschlüsse durch gleiche Anlagen in einem Bereich) sowie eine hohe Maschinendichte und ist daher gekennzeichnet durch einen geringen Raumbedarf.

Der komplexe Herstellprozess der Halbleiterfertigung ist durch eine hohe Anzahl von Fertigungsschritten und durch eine zyklische Arbeitsablauffolge gekennzeichnet. Die Herstellung von Logik-Bausteinen kann beispielsweise bis zu 1000 Prozessschritte erfordern. Die IC's sind hierbei aus bis zu 30 Layern³ (Schichten) aufgebaut. Entsprechend der Layer-Anzahl eines Halbleiters müssen bestimmte Fertigungsbereiche daher mehrfach durchlaufen werden.⁴ In einer klassischen Fließfertigung müssten für eine wiederholte, funktionsgleiche Bearbeitung identische Maschinen mehrfach installiert werden, wenn vorausgesetzt wird, dass jeder Auftrag nur einmal auf jeder Maschine einzulasten ist. Hier erweist sich das Verrichtungsprinzip im Hinblick auf den Reinraumflächenbedarf und die Investitionskosten als vorteilhafter. Die Organisation der Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip und die sich zyklisch wiederholenden Prozessschrittfolgen führen allerdings zu einem hohen Vernetzungsgrad und einer hohen Komplexität der Materialflussbeziehungen.

Aus den Besonderheiten der Halbleiterfertigung ergeben sich gleichzeitig Restriktionen für die Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen (Kapitel 2.2).

2.2 Restriktionen der Übertragbarkeit und Voraussetzungen für die Anwendung des Flussprinzips

Restriktionen für die Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen in der Halbleiterindustrie sind [36]:

- eine hohe Frequenz technologischer Änderungen der Produkte,
- eine hohe Variation in den Prozesszeiten bei unterschiedlichen Verrichtungen (Dauer im Bereich von Sekunden für Messprozesse und mehrere Stunden für Ofenprozesse), so dass die Leistungsabstimmung erschwert wird,

³ Ein Layer ist definiert durch die Zusammenfassung der erforderlichen Prozessschritte zwischen zwei Photo-Arbeitsschritten.

⁴ Zur Beschreibung dieser Besonderheiten der Halbleiterfertigung mit Blick auf den Prozess- und Materialfluss wurde von Kumar [42] der Begriff Re-entrant-Linie, d.h. Wiedereintrittslinie geprägt.

- häufig geringe Prozessstabilität bei der Herstellung von Produkten auf Basis neuester Strukturbreiten,
- sehr komplexe Maschinen mit anspruchsvollen Anforderungen an Wartung, hoher Ausfallgefahr und spezifischer Medien- und chemischer Versorgung,
- die Nutzung derselben Anlagen für F&E und Produktion sowie
- das Fehlen geeigneter Planungsmethoden, die einen zielgerichteten Übergang vom Verrichtungs- zum Flussprinzip in der Halbleiterindustrie ermöglichen.

Insbesondere ein hoher Reifegrad von Einzelprozessen und eine hohe Prozessstabilität sind wichtige Voraussetzungen für die Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen. Organisationsprinzipien entsprechend dem Flussprinzip haben einen erheblichen Mehraufwand an Planung und Investition, daher sollte der technologische Aufwand nicht aufgrund einer unausgereiften Produktion des Erzeugnisses häufigen Änderungen unterworfen werden. Dies gilt insbesondere, wenn von Änderungen die räumliche und zeitliche Folge von Arbeitsgängen betroffen sind.

Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Möglichkeit der räumlichen Konzentration verschiedener Arbeitsverrichtungen. Für die Anwendung des räumlichen Flussprinzips ist es erforderlich, dass der Bearbeitungsprozess an unmittelbar aufeinander folgenden Arbeitsplätzen durchführbar ist. Ausrüstungen (Hilfsmittel und Maschinen) sollten am Arbeitsplatz konzentrierbar sein [2, S. 481]. Für neu gebaute Fabriken ist dies möglich unter der Voraussetzung der Identifikation von Ähnlichkeiten im Fertigungsablauf der Erzeugnisse. In bestehenden Halbleiterfabriken ergeben sich jedoch Restriktionen aufgrund sehr hoher Umstellkosten und bereits installierter spezifischer Medientechnik der Fertigungsanlagen in den Fertigungs-Bays. In bestehenden Halbleiterfabriken kann daher eher das zeitliche Flussprinzip mit einer Abstimmung von vor- und nachgelagerten Prozessen angewendet werden [20]. Hierbei erschweren jedoch die hohen Variationen in den Einzelprozesszeiten eine Harmonisierung vor- und nachgelagerter Prozessschritte. Die vorgenannten Gründe behindern die Einführung eines klassischen Flussprinzips mit der Anordnung der Anlagen entsprechend des technologisch oder organisatorisch bedingten Produktionsflusses in bestehenden Halbleiterfabriken, insbesondere aus wirtschaftlichen Aspekten.

Aus den derzeitigen Veröffentlichungen [58] und Diskussionen auf internationalen Tagungen [40] ist zu erkennen, dass das primäre Ziel der Halbleiterhersteller eine Verkürzung der Durchlaufzeit ist. Die vorgeschlagenen Maßnahmen umfassen ein breites Spektrum, wie z.B. Losgrößenverkleinerung oder Rüstzeitminimierung. Tiefgreifende Veränderungen, wie die Einführung flussorientierter Fertigungsstrukturen werden nur in sehr wenigen Unternehmen in Betracht gezogen [66]. Diese starke Zurückhaltung im Hinblick auf flussorientierte Fertigungsstrukturen ist auch auf die geringen Erfahrungen mit dem Flussprinzip in der Halbleiterindustrie zurückzuführen.

Auf Seite der Anlagenhersteller sind erste Tendenzen hinsichtlich eines Strebens in Richtung einer flussorientierten Struktur bei der Firma Blueshift zu erkennen. Meulen entwickelt sogenannte „Linear, Linkable Process Tools“ (s.a. Abbildung 2), welche eine Integration verschiedener Anlagentypen und integrierte Messungen ermöglichen soll [49].

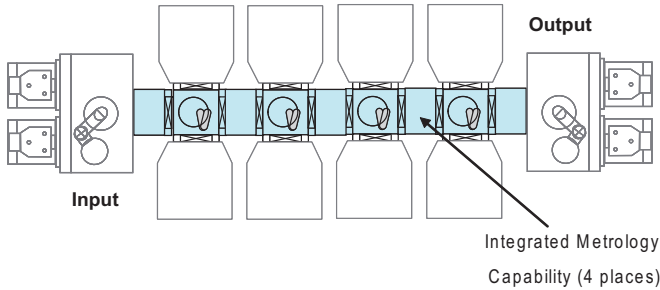


Abb. 2 Linear, Linkable Process Tools [49].

Um den flussorientierten Gedanken in der Halbleiterindustrie zu etablieren, schlagen die Autoren ein schrittweises Vorgehen über das Gruppenprinzip (Kapitel 2.3) hin zum Flussprinzip vor.

2.3 Entwicklungstendenzen zu flussorientierten Strukturen

Eine Literaturstudie zeigt, dass nur drei Gruppen von Autoren alternative, auf dem Gruppenprinzip basierende Organisationsformen für die Halbleiterindustrie untersuchen:

- „Work Cell Manufacturing System“ [25],
- „Cellular Layouts“ [29, 30, 23] und
- „Layer-based layout approach“ [14].

Diese Gruppen von Autoren schlagen vor, dass verschiedene Anlagen, die zur Herstellung eines Layers erforderlich sind, in einem Bereich gruppiert werden sollen. Die Autoren zeigen die Vorteile in Bezug auf kürzere Durchlaufzeiten und niedrigere Bestände im Vergleich zum Verrichtungsprinzip auf. Leider geben sie keine Empfehlungen, wie diese aufeinander folgenden Prozessschritte ermittelt werden können.

Ein weiterer Lösungsansatz zur Reduzierung der Materialflusszeit ist der Einsatz so genannter Clustertools. Diese können im weiteren Sinne der Organisation nach dem Gruppenprinzip zugerechnet werden. Sie zählen seit den 90er Jahren zu einem besonderen Maschinentyp in der Halbleiterfertigung. In einem Cluster-Tool sind mehrere aufeinander folgende Prozessschritte in einer Fertigungsanlage integriert, die bisher in separaten Anlagen ausgeführt wurden [36]. Ein Cluster-Tool ist demnach gekennzeichnet durch eine flussorientierte Organisation innerhalb einer baulichen Einheit und die Wiederholung gleicher oder ähnlicher Fertigungssequenzen. Aufgrund der technologischen Komplexität, einzelne Bearbeitungsverfahren in einem Cluster-Tool zu integrieren, finden sie bis auf eine Verbreitung in den Bereichen der Lithographie und dem chemisch-mechanischen Polieren in State-of-the-Art Fabriken keine flächendeckende Anwendung in der Halbleiterindustrie.

Insgesamt ist festzustellen, dass alternative Vorschläge zur Fertigungsstrukturierung einer Halbleiterproduktionsstätte vorhanden sind. Sie beinhalten aber keine systematisch-methodische Vorgehensweise, die einen Übergang vom Verrichtungs- zum Flussprinzip ermöglicht. Trotz der Vorteilhaftigkeit gruppentechnologiebasierter Organisationsvorschläge dominiert in der Praxis das Verrichtungsprinzip [16].

Da die Strukturbreiten der Halbleiterprodukte immer weiter verkleinert werden, stellt ein Transport der Materialien ein zunehmendes Qualitätsrisiko durch eine Gefahr der Kontamination der Produkte beim Transport dar. Für die Zukunft der Halbleiterherstellung ist es daher nicht nur aus Sicht der Durchlaufzeit, sondern auch aus Sicht der Ausbeute der Fertigung von hoher Bedeutung, flussorientierte Fertigungsstrukturen zu etablieren. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der Ausbeute und der Durchlaufzeit besteht. Je länger sich die Produkte im Herstellprozess befinden, desto geringer ist auch die zu erwartende Ausbeute [61].

Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung des Flussprinzips und eine materialflussgerechte Reorganisation der Fertigung ist die Identifikation von Produkten mit identischen bzw. ähnlichen Fertigungsabläufen und deren Zusammenfassung zu Familien. Ausgehend von einem Überblick über die in der Literatur bekannten Lösungsansätze zur Familienbildung wird das Verfahren zur Bildung von Ablauffamilien mittels Clusteranalyse vorgestellt.

3 Bildung von Ablauffamilien mittels Clusteranalyse

3.1 Ablauffamilie

Ziel der Bildung von Produktfamilien ist die Strukturierung der im Produktionsprogramm enthaltenen Produkte mit Hilfe von Ähnlichkeitskriterien. Dies ist eine Voraussetzung für die Integration flussorientierter Fertigungsstrukturen. So ist die Anordnung verschiedenartiger Maschinen in einem flexiblen Fertigungssystem entsprechend des Gruppenprinzips in der Kleinserienfertigung wirtschaftlich, wenn sich bei verschiedenen Produkten ein ähnlicher Fertigungsablauf ergibt. Fertigungsaufträge verschiedenartiger Produkte werden dann zu so genannten Scheinserien zusammengefasst. Damit werden größere Auftragsstückzahlen geschaffen und so die Auslastung flussorientierter Fertigungsstrukturen sichergestellt [76, S. 175].

Gliederungsmerkmale zur Strukturierung der herzustellenden Produkte sind hauptsächlich Form, Funktion und Fertigungsablauf [76, S. 175]. Im Folgenden soll eine Gliederung anhand der Fertigungsabläufe erfolgen und Ablauffamilien identifiziert werden. Eine *Ablauffamilie* besteht aus einer Zusammenfassung von ähnlichen Fertigungsabläufen, im Folgenden auch Prozessabläufe genannt. Hierbei handelt es sich um Teilabläufe des gesamten Herstellprozesses, die mit gleichen oder ersetzenden Anlagentypen abgearbeitet werden. Länge und Reihenfolgebeziehungen der Fertigungsabläufe von Prozessablauffamilien sind ähnlich. Darüber hinaus werden

nur solche Prozessabläufe bei der Familienbildung berücksichtigt, die häufig bei einer hohen Anzahl von Produkten mit großer Produktionsmenge auftreten.

3.2 Lösungsansätze zur Produktfamilienbildung und Kapazitätszuordnung

Die Ähnlichkeitsbildung hat ihren Ursprung in der Teilefertigung. Ihr wird bereits seit den 50er Jahren erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt. Grundlegende Arbeiten stammen von Mitrofanow [51], Burbidge [10, 11] und Ham [27].⁵ Ausgehend von den Grundgedanken dieser Pioniere wurde bis heute eine sehr hohe Anzahl an Lösungsansätzen und Verfahren zur Planung gruppentechnologischer Fertigungsprinzipien entwickelt. Diese können in beschreibende Verfahren, Multivariate Analysemethoden, Methoden des Operations Research sowie weitere Verfahren gegliedert werden.⁶

Die in den 50er und 60er Jahren entwickelten *beschreibenden Verfahren* beinhalten die sogenannte Eyeball-Methode, Klassifizierungssysteme⁷ und die Teileflussanalyse [10, 11].

Methoden des Operation Research, deren Entwicklung in den 70er Jahren begann und welche bis heute in der Entwicklung sind, lassen sich weiter untergliedern in:

- Verfahren der statischen und dynamischen Optimierung [60, 74, 4]
- graphentheoretische Verfahren [43, 67] sowie
- heuristische Verfahren wie Tabu Search [46, 1], Simulated Annealing [15, 77] und Genetische Algorithmen [34, 56, 70].

Weitere Verfahren sind Methoden der Fuzzy Mathematik [78, 44], neuronale Netze [81, 62], Ameisenalgorithmen [68] und Entropie-Modelle [79].

Zu den *Multivariaten Analysemethoden*, welche im Wesentlichen in den 80er Jahren entwickelt worden sind, zählen:

- Array-basierte Clusterung, wie Bond Energy Analysis [48], Rank Order Clustering 1 und 2 (ROC) [38, 39], Modified Rank Order Clustering (MODROC) [13], Direct Clustering Analysis [12], Occupancy Value Methode [35], Jacobs Algorithmus [33], Hamilton Path Heuristik [5]
- multidimensionale Skalierung [17] sowie die
- klassische Clusteranalyse [26].

Lösungsansätze der exakten mathematischen Optimierung stoßen bei Praxisproblemgrößen häufig an Grenzen [31]. Heuristische Verfahren wie Tabu Search, Simulated Annealing, Genetische Algorithmen oder die zu den weiteren Verfahren

⁵ Im angelsächsischen Raum werden Arbeiten zur Planung gruppentechnologischer Fertigungsstrukturen in der Regel unter dem Begriff „Cellular Manufacturing“ veröffentlicht.

⁶ Weitere Gliederungsvorschläge sind [3, 54] zu entnehmen.

⁷ Einen Überblick über die Vielzahl der entwickelten Systeme geben [41].

zählende Fuzzy Mathematik und neuronale Netze liefern zwar hinreichend genaue Ergebnisse, jedoch ist ihre Effizienz gemessen an der CPU-Zeit gering [3]. Insgesamt besteht Forschungsbedarf, die zahlreichen Lösungsansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für praktische Problemgrößen, ihrer Effizienz und Effektivität sowie Ergebnisgüte weiter zu vergleichen.

Ziel der Clusteranalyse ist es, eine umfangreiche Menge von Elementen durch Bildung von Klassen zu strukturieren. Objekte, die derselben Klasse zugeordnet werden, sollen sich dabei möglichst ähnlich sein. Hingegen sollen Objekte verschiedener Klassen sich möglichst deutlich unterscheiden [6, S. 261]. Die umfangreichsten Entwicklungen zur Verbreitung des Einsatzes der Clusteranalyse zur Fertigungsstrukturplanung sind in den 80er und 90er Jahren erfolgt. Auch in heutigen Entwicklungen hat die Clusteranalyse nicht an Bedeutung verloren (vgl. [26, 19, 55]) und sich als Instrument zur Ähnlichkeitsbildung etabliert [76, S. 189]. Bei den bekannten Systemen wird die Klassenbildung auch heute häufig anhand von geometriebezogenen Merkmalen der Werkstücke, wie z.B. Länge oder Durchmesser eines Werkstücks, durchgeführt [19, 55]. Bei einer Identifizierung von Ablauffamilien müssen jedoch andere Merkmale für die Clusterung herangezogen werden. Darüber hinaus beziehen sich viele Lösungsansätze der Clusterung auf eine Neuordnung der Produkte-Maschinen-Matrix. Dies ist eine Möglichkeit, Beziehungen zwischen den herzustellenden Produkten und den eingesetzten Maschinen herzustellen und diese zu visualisieren. In dieser Darstellung wird jedoch nicht berücksichtigt, in welcher Reihenfolge die Produkte die Maschinen in Anspruch nehmen, was für die Bildung von Ablauffamilien von hoher Bedeutung ist.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die zahlreichen Lösungsansätze zur Planung gruppentechnologischer Fertigungsstrukturen im Wesentlichen auf die simultane bzw. sequentielle Lösung der zwei Teilprobleme:

- (a) Bildung von Produktfamilien, sowie
- (b) Zuordnung der Produktfamilien zu Kapazitäten

konzentrieren. Eine ganzheitliche Planungsmethode, welche einen zielgerichteten Übergang vom Verrichtungs- zum Flussprinzip ermöglicht, fehlt jedoch [31]. Daher besteht für die zukünftige Forschung Bedarf, bestehende Methoden in ganzheitliche Planungsmethoden einzubetten und um Fragestellungen wie die Planung des Maschinen-Layouts, des Materialflusses, der Arbeitsorganisation sowie der Produktionssteuerung zu erweitern.

Um diesem Bedarf gerecht zu werden, wird eine vierstufige Planungsmethode zur flussorientierten Gestaltung von Fabriken mit Verrichtungsprinzip entwickelt (Kapitel 3.3). Die Bildung von Ablauffamilien ist als ein Planungsschritt in die Methode eingebettet. Als Werkzeug für die Bildung von Ablauffamilien wird die Clusteranalyse ausgewählt, da sie als Verfahren zur Fertigungsstrukturplanung erfolgversprechende Ansätze und Entwicklungsmöglichkeiten bietet. Vor allem die Möglichkeit der gleichzeitigen Betrachtung aller Fertigungsabläufe von Arbeitsplänen unterschiedlicher Produkte und deren Strukturierung bei freier Wahl der Merkmale und gleichzeitigem Heranziehen aller Merkmale zur Klassenbildung zählen zu den Vorzügen der Clusteranalyse. Da auch die Ergebnisgüte der Clusteranalyse im

Vergleich zu anderen Verfahren als am höchsten eingestuft wird [24], kann sie als Werkzeug zur Identifizierung von Ablauffamilien herangezogen werden.

3.3 Planungsmethode zur flussorientierten Gestaltung von Fabriken

Zur Erschließung der Anwendung des Flussprinzips für Unternehmen mit verrichtungsorientierten Fertigungsstrukturen wird eine vierstufige Planungsmethode entwickelt. Diese wird im Folgenden kurz vorgestellt, um eine bessere Einordnung der Bildung von Ablauffamilien, welche den Schwerpunkt des Beitrags bildet, in den Planungsprozess zur flussorientierten Gestaltung bestehender Fabriken zu ermöglichen.

Die Planungsmethode besteht aus den vier Hauptschritten:

1. Bildung von Ablauffamilien (AF),
2. Schaffung logistikgerechter Fertigungsabläufe der AF,
3. Leistungsabstimmung der AF und
4. materialfluss- und steuerungstechnische Verkettung der AF.

Schritt 1 beinhaltet die im Kapitel 3.4 ausführlich behandelte Bildung von AF, auf die daher an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

In *Schritt 2* werden in Analogie zum Business Reengineering alle Prozessschritte der AF hinterfragt und die technisch-wirtschaftlichen Gestaltungsmöglichkeiten bestimmt. Die Arbeitsablauffolgen der AF werden zunächst hinsichtlich ihres Durchlaufes im realen Fabrikbetrieb beurteilt. Hierbei ist z.B. die Anordnung der Maschinen im realen Layout der Fabrik von Bedeutung. Gerade in bestehenden Halbleiterfabriken ist eine Umstellung der Fertigungsanlagen aus wirtschaftlichen Gründen nahezu ausgeschlossen. Eine Möglichkeit ist, die Produktionsabläufe der AF an bestehende Fabrikstrukturen anzupassen und logistikgerecht zu gestalten, z.B. durch einen Tausch von Fertigungsschritten. Durch ein Business Reengineering der Arbeitsablauffolge in Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung kann eine Arbeitsablauffolge der AF entwickelt werden, die den materialflusstechnischen Anforderungen bezüglich eines kontinuierlichen Arbeitsablaufes unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Anforderungen entspricht. Damit sind die wesentlichen Voraussetzungen für eine Standardisierung und Materialflussautomatisierung von AF erarbeitet.

Schritt 3 der Planungsmethode beinhaltet die kapazitative und zeitliche Leistungsabstimmung der einzelnen Fertigungsschritte der AF. Damit ein quasi-kontinuierliches „Fließen“ der Materialien in der Produktion ermöglicht wird, ist ein leistungsmäßig abgestimmter Fertigungsrhythmus von vor- und nachgelagerten Arbeitsoperationen der AF erforderlich.

In der Halbleiterfertigung sind Arbeitselemente zu definierten Arbeitsumfängen aus technologischen Gründen in Prozessanlagen zusammengefasst und nicht mehr

zergliederbar. Daraus ergibt sich häufig ein großer Unterschied in den Ausführungszeiten; beispielsweise erfordern Messprozesse einige Minuten und Ofenprozesse mehrere Stunden. Ein Taktabgleich ist daher nur über technologische sowie organisatorische Maßnahmen möglich. Beispielsweise sei die Verkürzung der Bearbeitungszeiten, als technologische Maßnahme genannt. Zu den organisatorischen Maßnahmen zählt eine Veränderung der Kapazitäten und Losgrößen.

Schritt 4 kommt eine besondere Bedeutung zu, da die Anwendung des „klassischen“ Flussprinzips mit der direkten räumlichen Anlagenanordnung entsprechend der Fertigungsschritte der AF in bestehenden Halbleiterfabriken aus Kostengründen nicht möglich ist [20, 36]. Somit ist nur die Anwendung eines zeitlichen Flussprinzips unter Berücksichtigung einer Leistungsabstimmung (*Schritt 3*) möglich. *Schritt 4* umfasst:

- eine Auslegungsplanung hinsichtlich Art und Gestaltung der Materialflusssysteme,
- die Einbeziehung von Verfahren der Routenoptimierung und
- Strategien zur Variabilitätsreduzierung der Materialflussfunktionen Fördern und Handhaben.

Das vorherrschende Verrichtungsprinzip wird mit einer Steuerung der Fertigungsaufträge entsprechend des zeitlichen Flussprinzips überlagert. Somit werden die den identifizierten AF zugehörigen Fertigungsanlagen räumlich nicht entsprechend des Fertigungsablaufes nebeneinander angeordnet, sie werden jedoch entsprechend des zeitlichen Flussprinzips gesteuert.

In Kapitel 3.4 erfolgt nun eine ausführliche Darstellung von *Schritt 1*, Bildung von AF, der vierstufigen Methode zur flussorientierten Gestaltung von Fabriken mit Verrichtungsprinzip.

3.4 Verfahren zur Bildung von Ablauffamilien mittels Clusteranalyse

Für die Bildung von AF wurde ein dreistufiges Verfahren mit den Schritten Vorbereitung, Durchführung und Auswertung entwickelt. Hierbei wird die Clusteranalyse als Werkzeug verwendet.

Die *Vorbereitung* beinhaltet die Teilschritte:

- Vorstrukturierung des Produktspektrums,
- Einlesen von Informationen und Filtern,
- Kodierung der Arbeitspläne und
- Extrahieren von Arbeitsablaufsequenzen.

Zunächst ist eine Strukturierung des Produktspektrums erforderlich. Dies kann mit Hilfe der ABC- und PQ-Analyse [2, S. 309] erfolgen. Es sollten nur die Produkte mit hoher Bedeutung für das Unternehmen als Eingangsgrößen der Clusteranalyse verwendet werden.

Der Ablauf zur Herstellung eines Produktes ist im Arbeitsplan dokumentiert und somit Grundlage für die Bildung von AF. Die in den Arbeitsplänen vorhandene verbale bzw. numerische Informationsdarstellung eignet sich nicht für eine Auswertung mit Hilfe der Clusteranalyse. Daher werden die Arbeitspläne beim Einlesen der Informationen kodiert. Die Kodierungsnummern werden aufsteigend aus dem Bereich der natürlichen Zahlen vergeben. In Arbeitsplänen ist häufig eine Vielzahl von Informationen dokumentiert. Da nicht alle Informationen für die Clusteranalyse von Bedeutung sind, werden diese gefiltert. Für die Analyse werden die Informationen zu Prozessschritt und Maschinentyp benötigt. Nach der Kodierung des Arbeitsplanes sind Untersuchungsobjekte der Clusteranalyse zu bilden. Hierzu werden Ablaufsequenzen (Arbeitsablauffolgen), von der für den spezifischen Anwendungsfall zu bestimmenden Länge (s.a. Kapitel 3.5), aus dem Arbeitsplan extrahiert. Zur Extrahierung von Ablauffolgen der Länge 4 bis 5 wird der Arbeitsplan (AP) vom ersten bis zum letzten Fertigungsschritt zuerst mit einem „Fenster“ der Länge 4 durchlaufen, anschließend mit einem Fenster der Länge 5, wie Abbildung 3 zeigt.

AP	Sequenz (4'er)	Sequenz (5'er)
0	0 1 2 5	0 1 2 5 4
1	1 2 5 4	1 2 5 4 5
2	2 5 4 5	2 5 4 5 7
5	5 4 5 7	5 4 5 7 8
4	4 5 7 8	4 5 7 8 9
5	5 7 8 9	5 7 8 9 2
7	7 8 9 2	
8		
9		
2	AP = kodierter	

Abb. 3 Extrahieren von Arbeitsablauffolgen der Länge 4 bis 5.

Nachdem die erste Sequenz der Länge 4 erzeugt wurde, im Beispiel „0_1_2_5“ (Abbildung 3), wandert das Fenster einen Fertigungsschritt weiter und erzeugt die 2. Sequenz „1_2_5_4“ der Länge 4. Die erzeugten Ablaufsequenzen bilden die Untersuchungsobjekte der Clusteranalyse.

Der *Durchführungsschritt* beinhaltet die im Folgenden weiter ausgeführten Teilschritte:

- Erstellung einer Rohdatenmatrix und Bestimmung von Merkmalen,
- Bestimmung Distanzmaß und Erstellung Distanzmatrix,
- Auswahl Fusionierungsalgorithmus und Fusionierung und
- Bestimmung der optimalen Clusteranzahl.

Den Ausgangspunkt der Clusteranalyse bildet eine *Rohdatenmatrix* mit k Objekten, die durch j Variablen beschrieben werden. Die im Vorbereitungsschritt extrahierten Ablaufsequenzen sind die k Untersuchungsobjekte, die aufeinander folgende Fertigungsschritte repräsentieren und keine quantitative Aussagekraft haben.

Erst die Beschreibung durch j metrische, quantifizierbare *Merkmale* ermöglicht die Bestimmung von Unterschieden zwischen den k Objekten mittels eines Proximitätsmaßes. Als Merkmale für die Beschreibung der Ablaufsequenzen werden die vergebenen Zahlen der kodierten Fertigungsschritte verwendet. Diese werden durch die zwei Untermerkmale

- Häufigkeit des kodierten Fertigungsschrittes (H) und
- Mittelwert der Position des kodierten Fertigungsschrittes (P)

beschrieben.

Bei einem Arbeitsplan mit 700 Fertigungsschritten werden ca. 150 bis 200 Zahlen für die Kodierung vergeben. Da eine Zahl durch deren Häufigkeit und Mittelwert der Position repräsentiert wird, können bis zu 400 Merkmale entstehen.

Abbildung 4 zeigt eine Rohdatenmatrix für ein kleines Beispiel mit fünf Arbeitsablauffolgen. Spalte 1 beinhaltet die Ablaufsequenzen und die weiteren Spalten 2 bis 11 zeigen die Häufigkeit und den Mittelwert der Position der in den Ablaufsequenzen enthaltenen Zahlen. Bei der Sequenz „1_1.2“ beispielsweise kommt der Fertigungsschritt, welcher durch die Zahl 1 kodiert ist, mit einer Häufigkeit H1 von 2 vor. Die Zahl 1 steht an Position 1 und Position 2 und kommt zweimal vor. Der Mittelwert der Position P1 errechnet sich somit durch $(1+2)/2=1,5$.

Merkmal/ Sequenz	1		2		3		4		5	
	H1	P1	H2	P2	H3	P3	H4	P4	H5	P5
1_1	2	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0
1_1.2	2	1,5	1	3	0	0	0	0	0	0
1_2.1	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0
4_5.4	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2
3_4_5	0	0	0	0	1	1	1	2	1	3

Abb. 4 Rohdatenmatrix.

Im zweiten Schritt der Clusteranalyse erfolgen die *Auswahl eines Distanzmaßes* und die *Berechnung der Distanzmatrix*. In der praktischen Anwendung stellen bei metrischen Skalen Minkowski-Metriken oder L_p -Normen weit verbreitete Distanzmaße dar [6, S. 272ff]. Im Verfahren wird die Euklidische Distanz (L_2 -Norm) genutzt, da sie die Verwendung verschiedener Fusionierungsalgorithmen erlaubt. Die Auswahl eines *Fusionierungsalgorithmus* und die *Fusionierung* bilden den 3. Schritt der Clusteranalyse. Da Schritt 2 (Auswahl Distanzmaß und Erstellung Distanzmatrix) und Schritt 3 (Auswahl Fusionierungsalgorithmus und Fusionierung) der Clusteranalyse in der Literatur ausführlich behandelt sind, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet [6, S. 261–321]. Als Clusteralgorithmen stehen hierarchische und partitionierende Verfahren zur Verfügung. Partitionierende Verfahren gehen von einer gegebenen Klassenanzahl aus. Da in dem Anwendungsfall der Clustering von Arbeitsablauffolgen keine Annahmen über die Klassenanzahl getroffen werden können, wird ein hierarchisches Verfahren angewendet [6, S. 281].

Für ein Klassifikationsproblem mit kugelförmiger Klassenstruktur und disjunkten Klassen wird die Anwendung der agglomerativen Verfahren Ward, Complete Linkage und Centroid empfohlen [8, S. 61]. Eine Untersuchung von Bergs [9] hat

gezeigt, dass das Ward-Verfahren im Vergleich zu anderen Algorithmen in den meisten Fällen sehr gute Partitionen bildet und die Objekte den Klassen „richtig“ zuordnet. Das Ziel des Ward-Verfahrens ist es, diejenigen Gruppen zu vereinigen, die die Streuung in einer Klasse möglichst wenig erhöhen. Dadurch werden homogene Cluster gebildet. Aus diesem Grund wird das Ward-Verfahren genutzt. Mit Hilfe des Elbow-Kriteriums kann eine optimale Clusteranzahl bestimmt werden [6, S. 307]. Zur Bestimmung des Elbow-Kriteriums wird die Fehlerquadratsumme gegen die entsprechende Cluster-Anzahl in einem Koordinatensystem abgetragen. Wenn die Fehlerquadratsumme bei der Fusionierung von zwei Clustern stark ansteigt, bildet sich ein „Ellenbogen“ heraus (Abbildung 5).

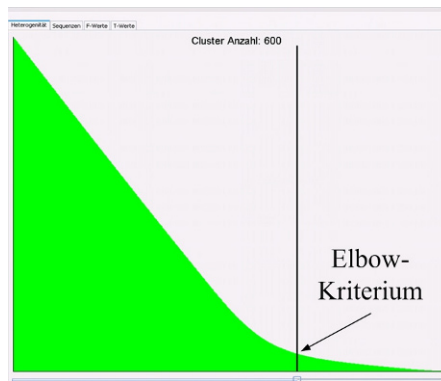


Abb. 5 Elbow-Kriterium.

Dieser zeigt an, dass sich im Vergleich zu vorhergehenden Fusionen der stärkste Heterogenitätszuwachs herausbildet und die optimale Clusteranzahl im vorletzten Fusionierungsschritt erreicht war.

Die *Auswertung* beinhaltet die zwei Teilschritte:

- Beurteilung der Güte der Clusterlösung durch F- und T-Werte und
- Bildung von Komplexabläufen.

Die Beurteilung der einzelnen Cluster erfolgt anhand von F- und T-Werten [6]. F-Werte dienen zur Beurteilung der Homogenität der Klassen. T-Werte hingegen können zur Charakterisierung der Cluster herangezogen werden. Anhand der T-Werte kann beurteilt werden, welche Fertigungsschritte für die Bildung der Cluster besonders ausschlaggebend waren. Diese werden anschließend für die Bildung der Komplexarbeitsablauffolge herangezogen.

Für jede Klasse wird eine Komplexarbeitsablauffolge gebildet. Diese Vorgehensweise entspricht dem Vorgehen von Mitrofanow [51], der die Bildung von Komplexteilen vorgeschlagen hat. Ein Komplexteil ist ein theoretisches Teil, das durch Zusammensetzen aller in den ausgeführten realen Teilen der Komplexteile-Familie vorkommenden Formelemente in einem einzigen Teil entsteht. Eine *Komplexar-*

beitsablauffolge hingegen ist ein theoretischer Fertigungsablauf, in dem alle Fertigungsschritte (FS) der Arbeitsablauffolgenvarianten einer Klasse vorkommen.

Die Komplexabläufe der einzelnen Klassen werden anschließend im zweiten Schritt in weiteren Arbeitsplänen gesucht und nach der Häufigkeit ihres Auftretens in den Arbeitsplänen sortiert. Die Abläufe, welche mit hoher Häufigkeit in Arbeitsplänen verschiedener Produkte vorkommen und deren Klasse sich durch eine hohe Homogenität auszeichnet, werden in Schritt 2, Schaffung logistikgerechter Fertigungsabläufe der AF (s.a. Kapitel 3.3), weiter betrachtet.

Das beschriebene Verfahren zur Bildung von AF kann branchenübergreifend von Industrieunternehmen angewendet werden. Einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein von Grunddaten (Arbeitsplan zur Herstellung der Produkte mit dazugehörigen Maschinentypen für einzelne Fertigungsschritte) im Excel- oder csl-Format (comma separated list). Das beschriebene Verfahren wurde in eine Software überführt, die in der Programmiersprache JAVA erstellt ist. Die Software ist auf jedem PC mit Windows Betriebssystem lauffähig.

Im Folgenden wird die Anwendung des Verfahrens am Beispiel der Halbleiterfertigung erläutert.

3.5 Anwendung der Planungsmethode zur flussorientierten Gestaltung von Fabriken am Beispiel der Halbleiterindustrie

Es werden die Schritte 1 und 2 der in Kapitel 3.3 beschriebenen Planungsmethode zur flussorientierten Gestaltung von Fabriken mit Verrichtungsprinzip am Beispiel der Halbleiterindustrie vorgestellt. Auf eine Darstellung der Schritte 3 und 4 wird verzichtet, da der Schwerpunkt des Beitrags auf der Bildung von AF liegt.

Schritt 1: Bildung von Ablauffamilien (AF)

Vorbereitung

Die Arbeitspläne (AP) liegen als Klartext-Dateien im csl-Format vor und enthalten eine Vielzahl von Informationen. Da nicht alle Informationen für die Clusteranalyse von Bedeutung sind, kann der Benutzer die relevanten Informationen spaltenweise einlesen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Spalten Objekt, Kurztitel und Anlagentyp (s.a. Abbildung 6).

In der Spalte Objekt wird angegeben, ob es sich um das Prozessziel (Unit Process Target, Abk. UPT) oder die zu diesem Ziel gehörigen Einzelprozessanweisungen (EPA) handelt. Ein neuer Fertigungsschritt wird immer mit dem Prozessziel (UPT) eingeleitet. Die Zeilen unterhalb einer UPT-Zeile beinhalten die Einzelprozessanweisungen. Sind mehrere EPA vorhanden, kann der Fertigungsschritt mit verschiedenen ersetzenden Anlagentypen oder so genannten Rezepten, welche auf Anlagen installiert sind, durchgeführt werden. Der Kurztitel ist eine abgekürzte Form des Fertigungsschrittes mit zusätzlichen Angaben, z.B. zur Dauer der Reinigung.

Halbleiterbauelemente werden während der Fertigung sehr häufig gemessen. Da diese Messschritte zu großen Unschärfen innerhalb von Arbeitsablauffolgen führen,

Objekt	WS_Op er	Kurztitel	Rezept	Bereich	Anlagentyp	Kodierung
UPT	1020	STWZZZ001		Linecontrol				1
EPA	1020	STWZZZ001 A	NOT REQUIRED	Linecontrol	NOT APPLICABLE			
UPT	1025	LSBNOT008		Linecontrol				2
EPA	1025	LSBNOT008 A	MARK	Linecontrol	WAFERLASE ULTRA			
UPT	1100	CLWOHM082		Reinigen				3
EPA	1100	CLWOHM082 A	SC12M009	Reinigen	CFM			
EPA	1100	CLWOHM082 B	SC121100	Reinigen	AWP			
EPA	1100	CLWOHM082 C	SCAB1100	Reinigen	AWP			
UPT	1110	TEGZZZ177		Defektdichte messung				4
EPA	1110	TEGZZZ177 A	NAS_SUBSTRAT 007UM	Defektdichte messung	KLA-TENCOR SP1			
UPT	2831	CLWDHM026		Reinigen				3
EPA	2831	CLWDHM026 A	DSC12VH3	Reinigen	AWP			
EPA	2831	CLWDHM026 B	DSC12VH3	Reinigen	FFWPS			
UPT	2800	OXDHCL061		FUR2				5
EPA	2800	OXDHCL061 A	P_XD140_100A	FUR2	AVP 8000			

Abb. 6 Arbeitsplanausschnitt und Kodierung.

hat der Benutzer die Möglichkeit, diese Schritte beim Einlesen der Informationen herauszufiltern.

Mit Hilfe der Filterfunktion (s.a. Abbildung 5) können Informationen, die den gleichen Inhalt enthalten, zu einer Information vereinigt werden. Die Zeilen fünf bis acht in Abbildung 6 repräsentieren einen Fertigungsschritt, der mit ersetzenden Anlagentypen und Rezepten durchgeführt werden kann. Mit Hilfe der Filterfunktion, können z.B. die drei ersten Zeichen des Kurztitels „CLW“ eingelesen werden, was zu einer Vereinigung der Information und einer Kodierung mit der Zahl 3 führt. Die Zeilen 11-13 beinhalten den gleichen Kurztitel „CLW“. Der Fertigungsschritt 11 kann wie Fertigungsschritt 5 ebenfalls mit dem Anlagentyp „AWP“ durchgeführt werden. Zusätzlich ist ein weiterer Anlagentyp „FFWPS“ für den Fertigungsschritt qualifiziert. Nach Absprache mit Produktentwicklern kann auch Fertigungsschritt 5 mit diesem Anlagentyp „FFWPS“ bearbeitet werden. Damit erhalten beide Fertigungsschritte die Kodierung mit der Zahl 3. Die Kodierung 3 beinhaltet demnach einen Reinigungsschritt, der durch den Kurztitel „CLW“ repräsentiert ist und mit den Anlagentypen „CFM“, „AWP“ und mit der zusätzlich in die Menge aufgenommenen „FFWPS“ durchgeführt werden kann. Sobald im Arbeitsplan wieder ein Reinigungsschritt auftritt, der mit einem dieser Anlagentypen durchgeführt werden kann, wird dieser ebenso mit der Zahl 3 kodiert. Ist ein zusätzlicher Anlagentyp qualifiziert, wird dieser in die Informationsmenge aufgenommen.

Die Kodierungsnummern in Abbildung 4 werden aufsteigend aus dem Bereich der natürlichen Zahlen vergeben. Nach der Kodierung des Arbeitsplanes werden Ablaufsequenzen extrahiert. Der Benutzer hat die Möglichkeit, die gewünschte Länge der zu untersuchenden Ablaufsequenzen einzustellen. Abbildung 7 zeigt ein Fenster zum Einlesen und Filtern von Arbeitsplaninformationen. Bei einem Arbeitsplan mit 700 Schritten werden bei einer Voreinstellung der Längen von z.B. 4 bis 25 insgesamt 15103 zu untersuchende Sequenzen gebildet.

Halbleiterfabriken haben häufig sogenannte Batch-Öfen im Einsatz ihrer Fertigung. Dort werden vier bis fünf Fertigungslose zu einem Verbund zusammengefasst und gemeinsam prozessiert. Die Prozessdauer kann mehrere Stunden betragen. Diese Ofen-Schritte erschweren durch lange Prozesszeiten die Einführung eines zeitlichen Fließprinzips mit einer Leistungsabstimmung von vor- und nachgelagerten

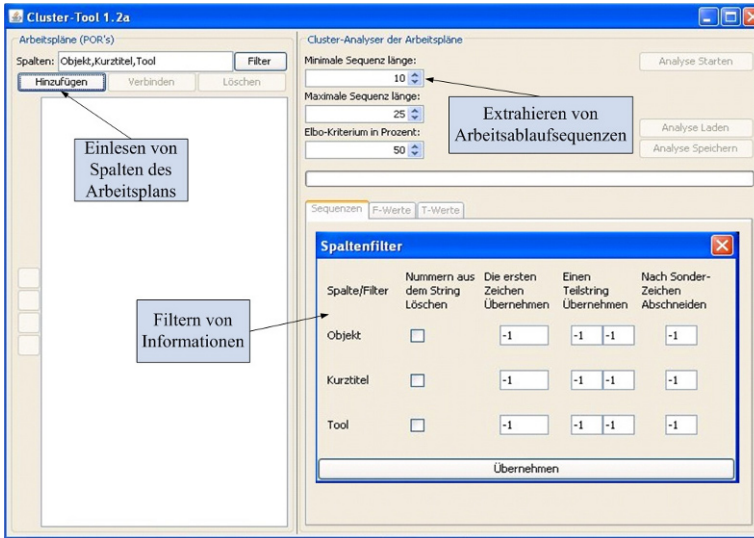


Abb. 7 Fenster zum Einlesen und Filtern von Informationen aus dem Arbeitsplan.

Prozessschritten. Die Ofenschritte treten ca. alle 15 bis 20 Prozessschritte in den Arbeitsplänen auf. Ziel sollte es sein, die Ablauffolgen zwischen diesen Fertigungsschritten zu ermitteln. Deswegen wird für die Einführung einer abschnittswisen Fließfertigung empfohlen, Sequenzen der Länge 15-20 zu generieren.

Die *Durchführung* der Clusteranalyse erfolgt mit dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Ward-Verfahren. Bei der beispielhaften Auswertung von Arbeitsplänen mit 900 Fertigungsschritten wurden, bei einer Voreinstellung von Sequenzen der Länge 10 bis 11, mit Hilfe des Elbow-Kriteriums insgesamt 600 Klassen gebildet. Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse. Im markierten Cluster-Nr. 1195 sind Ausschnitte von sechs Arbeitsablauffolgen enthalten, welche durch ihre Kurztitel repräsentiert sind.

Da die Klassenbildung von der gewählten Voreinstellung der Länge der Sequenzen und von den Arbeitsplänen abhängt, liegt der Schwerpunkt der Darstellung auf der methodischen Vorgehensweise zur Auswertung der Ergebnisse. Für jede Klasse wird eine *Komplexarbeitsablauffolge* gebildet.

Abbildung 9 zeigt eine Komplexarbeitsablauffolge für das Cluster-Nr. 1195. In den sechs Varianten der Arbeitsablauffolgen einer Klasse kommen die in Cluster 1195 (Abbildung 8) ermittelten Fertigungsschritte (durch Haken gekennzeichnet) der Komplexarbeitsablauffolge

„ETWDY_DDXZW_IDWZA_MSRZZ_DDXZW_IDWZA_MSDPT_
MSNZZZ_SPLPOP_DDXZW_IDWZA_ECXLOP“

in unterschiedlicher Ausprägung vor. Wie auch anhand der T-Werte ermittelt werden kann, waren die FS 1,4,6,8,9,12 für die Bildung des Clusters maßgebend.

Schritt 2: Schaffung logistikgerechter Fertigungsabläufe der AF

Heterogenität						Sequenzen	F-Werte	T-Werte
Object								Cluster
MSLZZZ MSTZZZ LISFV COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPDDT								1184
DISPZZ IDWZZZ LISFV COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPDDT								1184
CLWDSF LISFVQ COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPVIA ETWDDF								1185
LISFVQ COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPVIA ETWDDF MSLZZZ								1185
LISFVL COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPVIA ETWDDF MSLZZZ								1185
IDWZZZ LISFVL COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPVIA ETWDDF								1185
LISFPC COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPOHM STPRES MSLZZZ								1186
IDWZZZ LISFPC COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPOHM STPRES								1186
LISFCA COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPSAC STPRES MSLZZZ								1187
CLWOHM LISFCA COOZZZ MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT ETPSAC STPRES								1187
MSLZZZ INFFOT INMFOT INSRES MEALOT IMFVTZ IMBVTZ STPRES CLWPIR CLWOHM								119
ETWDY	MSRZZ	IDWZA	MSBDPT	SPLPOP	ECXLOP	Ausschnitt der Fertigungsschritte (FS) im Cluster Nr. 1195		
ETWDY	MSRZZ	IDWZA	MSBDPT	MSNZZZ	SPLPOP			
ETWDY	MSRZZ	IDWZA	MSBDPT	MSNZZZ	SPLPOP			
ETWDY	MSRZZ	IDWZA	MSBDPT	MSNZZZ	SPLPOP			
ETWDY	DDXZW	IDWZA	MSRZZ	IDWZA	SPLPOP			
ETWDY	MSRZZ	DDXZW	IDWZA	SPLPOP	ECXLOP			
DDPZZZ DISPZZ DDPZZZ INSZZZ DISPZZ DDPZZZ DISPZZ IDWZZZ ECCOP ANDMET								1199

Abb. 8 Ausschnitt Ergebnisse zur Klassenbildung.

Fertigungsschritte (FS) der Komplexarbeitsablauffolge												
Komplex AAF	FS 1	FS 2	FS 3	FS 4	FS 5	FS 6	FS 7	FS 8	FS 9	FS 10	FS 11	FS 12
ETWDY	DDXZW	IDWZA	MSRZZ	DDXZW	IDWZA	MSBDPT	MSNZZZ	SPLPOP	DDXZW	IDWZA	ECXLOP	
APA 1												
APA 2												
APA 3												
APA 4												
APA 5												
APA 6												

AAf = Arbeitsablauffolge
FS = Fertigungsschritt

Abb. 9 Komplexarbeitsablauffolge.

Die ausgewählten Arbeitsablauffolgen der AF werden zunächst hinsichtlich ihres Durchlaufes im realen Fabrikbetrieb beurteilt. Hierbei ist z.B. die Anordnung der Maschinen im realen Layout der Fabrik und deren Anzahl von Bedeutung. Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt der in Cluster 1195 identifizierten Ablauffolge mit sechs Fertigungsschritten (FS 1,4,6,8,9,12) der Komplexarbeitsablauffolge) und der Anordnung der zur Abarbeitung des Fertigungsablaufes zugehörigen Fertigungsanlagen im Fabriklayout. Der Transport zwischen den Anlagen erfolgt durch einen an der Reinraumdecke befindlichen Stetigförderer. Be- und Entladevorgänge erfolgen in 200mm-Halbleiterfabriken hauptsächlich manuell. Nur vereinzelt finden Industrieroboter Anwendung [20].

Wie oben ausgeführt ist in bestehenden Halbleiterfabriken eine Umstellung der Fertigungsanlagen aus wirtschaftlichen Gründen nahezu ausgeschlossen. Eine Möglichkeit ist, die Produktionsabläufe der AF an bestehende Fabrikstrukturen anzupassen und logistikgerecht zu gestalten, z.B. durch einen Tausch von Fertigungsschritten. Abbildung 11 zeigt die Überführung der AF (Abbildung 10) in eine logistikgerechte Ablauffolge. Durch ein Business Reengineering der Arbeitsablauffolge in Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung konnte Fertigungsschritt 3 eliminiert werden. Ein Tausch von FS 4 und FS 8 ermöglichte eine deutliche Reduzierung der Transportzeit. Diese deterministischen Abläufe sollten anschließend

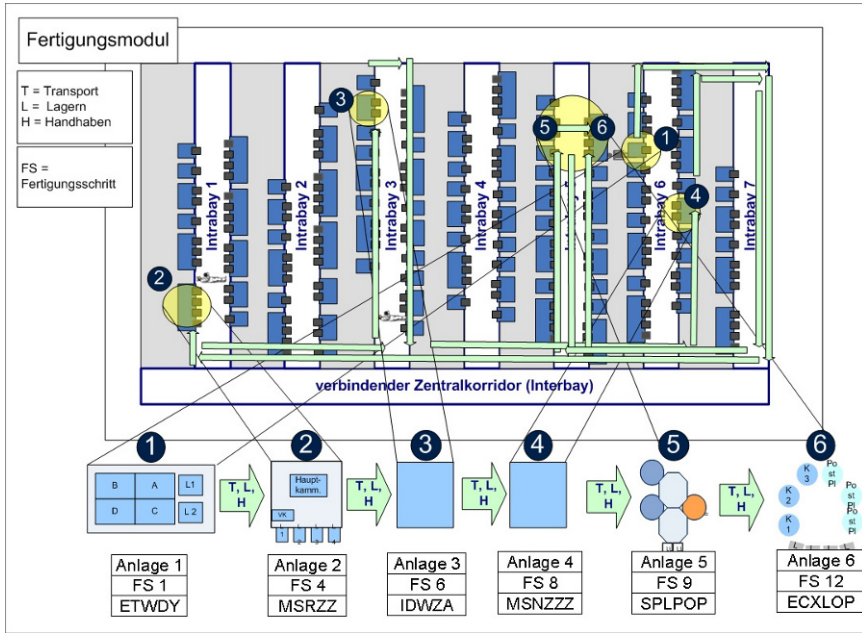


Abb. 10 Analyse der AF im realen Fabrikbetrieb.

in Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung standardisiert und als Bausteine für die Entwicklung von zukünftigen Produkten verwendet werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Auswertung zahlreicher Arbeitspläne zeigte, dass eine hohe Anzahl ähnlicher Arbeitsabläufe innerhalb verschiedenster Halbleiterprodukte existiert. Besonders der Bereich der Kupfermetallisierung der Halbleiterbauelemente, d.h. die Verdrahtung der einzelnen Transistoren, weist hohe Ähnlichkeiten auf. Damit sind die Voraussetzungen für die Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen in der Halbleiterfertigung gegeben. Bemerkenswert ist, dass Ähnlichkeiten zwischen verschiedensten Produkten existieren, was eine Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen auch für eine Klein- und Mittelserienfertigung ermöglicht.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um das Ziel kurzer Durchlaufzeiten in der Halbleiterindustrie zu erreichen, ist ein Wandel der Fertigungsstrukturierung vom Verrichtungs- zum Flussprinzip notwendig. Dies erfordert einen tiefgreifenden Veränderungsprozess und Paradigmenwechsel aller Akteure der Supply Chain, vom Anlagenhersteller über den Bereich der Produktentwicklung bis zur Fertigung. Um den flussorientierten Gedanken auch für

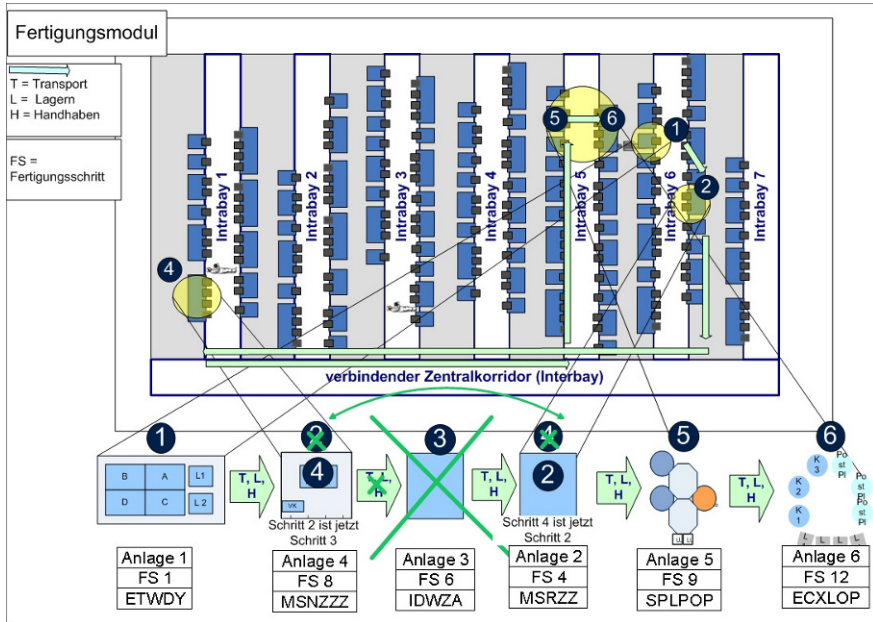


Abb. 11 Schaffung logistikgerechter AF und Standardisierung.

die Halbleiterindustrie zu erschließen, schlagen die Autoren ein schrittweises Vorgehen vom Gruppenprinzip hin zum Flussprinzip vor.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen sind Ähnlichkeiten im Fertigungsablauf verschiedener Produkte. Diese Voraussetzung kann als erfüllt betrachtet werden. Mit dem im Rahmen des Beitrags vorgestellten Verfahren wurden zahlreiche verschiedene Produkte eines Halbleiterherstellers untersucht und vorhandene AF identifiziert.

Dies kann allerdings nur als ein erster Schritt in Richtung Flussorientierung betrachtet werden. Soll für die identifizierten Abläufe das Gruppenprinzip eingeführt werden, sind eine Reihe weiterer Voraussetzungen zu schaffen und Veränderungen zu treffen. Daher ist das Verfahren zur Bildung von AF in eine vierstufige Planungsmethode zur flussorientierten Gestaltung von Fabriken mit Verrichtungsprinzip eingeordnet. Diese umfasst neben Schritt 1, Bildung von AF, Schritt 2, Schaffung logistikgerechter Fertigungsabläufe der AF, Schritt 3, Leistungsabstimmung der AF und Schritt 4 materialfluss- und steuerungstechnische Verkettung der AF. Schritte 1 und 2 wurden am Beispiel der Halbleiterindustrie erläutert. Nach der Identifikation der Abläufe werden diese hinsichtlich ihres Durchlaufes im realen Fabrikbetrieb beurteilt. Gerade in bestehenden Fabriken ist eine Umstellung der Fertigungsanlagen aus wirtschaftlichen Gründen nahezu ausgeschlossen. Ein möglicher Weg ist, die Produktionsabläufe der AF an bestehende Fabrikstrukturen anzupassen und logistikgerecht zu gestalten z.B. durch einen Tausch von Fertigungsschritten. Diese Abläufe sollten dann in Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung standardisiert

und als Bausteine für die Entwicklung von zukünftigen Produkten verwendet werden. Weiterhin haben bestehende Fabriken die Möglichkeit, das vorherrschende Verarbeitungsprinzip mit einer Steuerung der Fertigungsaufträge entsprechend des zeitlichen Flussprinzips zu überlagern. Damit ein quasi-kontinuierliches „Fließen“ der Materialien in der Produktion ermöglicht wird, ist ein leistungsmäßig abgestimmter Fertigungsrhythmus von vor- und nachgelagerten Arbeitsoperationen erforderlich. Darüber hinaus stellt die Gewährleistung der Stabilität der Produktionsprozesse und Anlagen eine zu schaffende Voraussetzung für die Anwendung flussorientierter Fertigungsstrukturen dar. Hier sind u.a. veränderte Instandhaltungsstrategien erforderlich.

Literaturverzeichnis

1. Adenso-Diaz B., Lozano S., Racero J., Guerrero F.: Machine cell formation in generalized group technology. *Computers & Industrial Engineering* 41 (2001) 227–240
2. Aggteleky, B.: *Fabrikplanung. Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung*. Carl Hanser Verlag, 2. Aufl., München, Wien (1990)
3. Ahi, A., Aryanezhad, M. B., Ashtiani, B., Makui, A.: A novel approach to determine cell formation, intracellular machine layout and cell layout in the CMS problem based on TOPSIS method. *Computers & Operations Research* 36 (2009) 1478 – 1496
4. Albadawi Z., Bashir H. A., Chen M.: A mathematical approach for the formation of manufacturing cells. *Computers & Industrial Engineering* 48 (2005) 3–21
5. Askin, R. G., Creswell, J. B., Goldberg, J. B., Vakharia, A. J.: A Hamiltonian path approach to reordering the part-machine matrix for cellular manufacturing. *International Journal of Production Research* 29 (1991) 1081–1100
6. Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W., Weiber, R.: *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 7. Aufl., Springer-Verlag, Berlin (1994)
7. Bader, U.: *Simulationsbaukasten für die Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung – Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme*. Dissertation Universität Stuttgart (2005)
8. Bausch, T., Opitz, O.: *PC-gestützte Datenanalyse mit Fallstudien aus der Marktforschung*. Verlag Franz Vahlen, München (1993)
9. Bergs, S.: *Optimalität bei Cluster-Analysen*, Dissertation Universität Münster, (1981)
10. Burbidge, J.-L.: Production Flow Analysis. *The Production Engineer*, 42(2) (1963) 742–750
11. Burbidge, J.-L.: The first step in planning group technology. *International Journal of Production Economics* 43 (1996) 261–266
12. Chan H.M., Milner D.A.: Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. *Journal of Manufacturing System* 1 (1982) 65–75
13. Chandrasekharan M.P., Rajagopalan R.: MODROC: an extension of rank order clustering for group technology. *International Journal of Production Research* 24 (1986) 1221–1233
14. Chang, C.-K., Chang, S.-K.: A layer based layout approach for semiconductors fabrication facilities. *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, Boston (1998)
15. Chen C., Cotruvo, N.A., Baek, W.: A simulated annealing solution for the cell formation problem. *International Journal of Production Research* 33 (1995) 2601–2614
16. Chung, J., Jang, J.: The Integrated Room Layout for a Semiconductor Facility Plan. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 20(4) (2007) 517–527
17. Dichtl, E., Schobert, R.: *Mehrdimensionale Skalierung – Methodische Grundlagen und betriebswirtschaftliche Anwendungen*. Verlag Vahlen, München (1979)
18. De Witte, J.: The use of similarity coefficients. *International Journal of production research* 18(4) (1980) 503–514

19. Deuse, J., Birkmann, S., Harms, T.: Einsatz der Clusteranalyse zur Nivellierung in der variantenreichen Kleinserie. *Industrie Management* 6 (2007) 45–48
20. Deutschländer, A., Brückner, G., Heinrich, H., Keil, S.: Materialflussautomatisierung unter Einsatz von Robotern in der Halbleiterfertigung mit 200 mm-Wafer-Technologie. In: Lasch, R., Janker, C.G. (Hrsg.): *Logistik Management*. DUV-Verlag, Wiesbaden (2005) 241–256
21. Freist, C., Granow, R.: Ähnlichkeitsuche mit Hilfe der Clusteranalyse. Teil 1: Grundlagen. *VDI-Zeitschrift* 124(11) (1982) 413–421
22. Freist, C., Granow, R.: Ähnlichkeitsuche mit Hilfe der Clusteranalyse. Teil 2: Das System CLASSIC. *VDI-Zeitschrift* 124(13) (1982) 487–495
23. Geiger, C.D., Hase, R., Takoudis, C.G., Uzsoy, R.: Alternative facility layouts for semiconductor wafer fabrication facilities. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part C* 20(2) (1997) 152–153
24. Göttker, A.: Untersuchung rechnergestützter Verfahren zur Teilefamilienbildung. Dissertation Universität Dortmund. Verlag TÜV Rheinland (1990)
25. Gul, R.S., Slama, M., Griffin, R., Holman, K.: A work cell manufacturing system for VLSI fabrication. *Electronic Manufacturing Technology Symposium, Fifteenth IEEE/CHMT International* (1993) 200–205
26. Hachicha, W., Masmoudi, F., Haddar, M.: Formation of machine groups and part families in cellular manufacturing systems using a correlation analysis approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (2008) 1157–1169
27. Ham, I.: *Introduction to Group Technology*. SME Tech. Paper MMR, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI (1976)
28. Hansmann, K.-W.: *Industrielles Management*. 8. Aufl., R. Oldenbourg Verlag, München (2006)
29. Hase, R., Takoudis, C.G., Uzsoy, R.: Cellular and reentrant layouts for semiconductor wafer fabrication facilities. *Electronics Manufacturing Technology Symposium, 'Low-Cost Manufacturing Technologies for Tomorrow's Global Economy', IEMT Symposium, Sixteenth IEEE/CPMT International, Proceedings* (1994) 112–118
30. Hase, R., Uzsoy, R., Takoudis, C.G.: Alternative facility layouts for semiconductor wafer fabrication facilities. *Electronics Manufacturing Technology Symposium* (1995) 384–388
31. Helber, S., Kuhn, H.: Planung von Produktionsinseln. *WiSt: Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 32(2) (2003) 76–82
32. Hesselmann, U.: *Werkstückanalyse auf Basis multivariater statistischer Verfahren*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 157. VDI-Verlag, Düsseldorf (1988)
33. Jacobs F. R.: *Computerized production flow analysis*. Whitehouse G.E. (Editor) *Soft cover software: 28 microcomputer programs for IEs and manager*. IE and Management Press, Georgia (1985) 61–67
34. Joines J. A.: *Manufacturing cell design using genetic algorithms*, Dissertation. Raleigh, NC: North Carolina State University, USA (1993)
35. Khator S. K., Irani S. A.: Cell formation in group technology: a new approach. *Computer Industrial Engineering* 12 (1987) 131–142
36. Keil, S., Lasch, R., Deutschländer, A., Heinlein, F., Heinrich, H., Schneider, G.: Flow production in semiconductor industry – a paradigm shift in IC-manufacturing. *XVIII International Symposium, Research-Education-Technology*, Gdansk, (2008)
37. Keil, S., Lasch, R., Deutschländer, A., Schneider, G.: Einfluss- und Erfolgsfaktoren auf den Ramp Up in der Halbleiterindustrie. In: Otto, A., Obermaier, R. (Hrsg.): *Logistikmanagement*, DUV (2007) 201–230
38. King J.R.: Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order-clustering algorithm. *International Journal of Production Research* 18 (1980) 213–232
39. King J.R., Nakornchai V.: Machine-component group formation in-group technology: review and extension. *International Journal of Production Research* 20 (1982) 117–133
40. Koshti, S., Ward, N.: Small lot manufacturing in semiconductor production. An answer to cycle time reduction. *Applied materials*. In: *5th Innovationsforum for Automation*, Dresden (2007)

41. Kuhnert, W., Werner, G.: EDV-gerechte Verschlüsselung. Grundlagen und Anwendung moderner Nummernsysteme. 2. Aufl., Forkel Verlag, Stuttgart (1981)
42. Kumar, P.R.: Re-entrant Lines. *Queueing Systems: Theory and Applications* 13 (1993) 87–110
43. Kusiak A., Chow W.: Decomposition of manufacturing systems. *IEEE Journal of Robotics and Automation* 4(5) (1988) 457–471
44. Li, J., Ding, Z.: Fuzzy cluster analysis and fuzzy pattern recognition methods for formation of part families. In: 16th North American Manufacturing Research Conference (NAMRC) (1988) 563–88
45. Liker, J.K.: *The Toyota Way*. McGraw-Hill, New York (2004)
46. Logendran R, Ramakrishna P.: Manufacturing cell formation in the presence of lot splitting and multiple units of same machine. *International Journal of Production Research* 33 (1995) 675–693
47. Mattrey, J.: Trends in fab design. Presentation, 4th ISMI (International Semiconductor Manufacturing Initiative) Symposium on Manufacturing Effectiveness. Austin, Texas (2007)
48. McCormick J.R., Schmitzer P.J., White T.W.: Problem decomposition and data reorganization by a clustering technique. *Operations Research* 20 (1972) 993–1009
49. Meulen, P.: Linear semiconductor manufacturing logistics and the impact on cycle time. 18th Annual IEEE/SEMI® Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (2007)
50. Meyersdorf, D., Tahizadeh, A.: Fab layout design methodology: case of the 300mm fabs. *Semiconductor International* 21(8) (1998) 187–196
51. Mitrofanow, S.P.: *Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie*. VEB Verlag Technik, Berlin (1960), Übersetzung des russischen Werkes von (1959)
52. Moore, G.E.: Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics* 38(8) (1965) 114–117
53. Moore, G.E.: Progress in digital integrated electronics. *International Electron Devices Meeting* 21 (1975) 11–13
54. Murugan, M., Selladurai, V.: Optimization and implementation of cellular manufacturing system in a pump industry using three cell formation algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35 (2007) 135–149
55. Nachtwey, A., Behrendt, A., Riedel, R.: Beherrschung der Variantenvielfalt mittels der Clusteranalyse. *ZWF, Jahrgang* 102, 7–8 (2007) 446–450
56. Onwubolu G.C., Mutingi M.: A genetic algorithm approach to cellular manufacturing systems. *Computers and Industrial Engineering* 39 (2001) 125–144
57. Peters, L.: Technology is no longer king. *Semiconductor International*, Juni (2007), <http://www.semiconductor.net/article/CA6454129.html>
58. Pillai, D.: The future of semiconductor manufacturing. *Factory integration breakthrough opportunities*. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13(4) (2006) 16–24.
59. Puffer, W.: *Technisch-ökonomische Effizienzbetrachtungen für die Halbleiterfertigung*. Dissertation, Technische Universität München (2007)
60. Purcheck G. F. K.: A linear programming method for the combinatorial grouping of an incomplete power set. *Journal of Cybernetics* 5 (1975) 51–76
61. Robinson, J. K.: Understanding and improving wafer fab cycle times. *Semiconductor Fabtech*, 16th Edition (2002) 63–65
62. Saidi-Mehrabadi, M., Safaei, N.: A new model of dynamic cell formation by a neural approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007) 1001–1009
63. Seifoddini, H.: Single linkage vs. average linkage clustering in machine cells formation applications. *Computers and Industrial Engineering* 16 (1989) 419–426
64. *Semiconductor Equipment and Materials International: World Fab Watch* (2008)
65. *Semiconductor Industry Association (SIA): The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) – Executive Summary* (Edition 2007), San Jose (2007)
66. Singer, P.: ASMC keynote: Success in lean manufacturing, *Solid State Technology*, Mai (2008)
67. Singh, N.: *System approach to computer-integrated design and manufacturing*. Wiley, New York (1996)

68. Spiliopoulos, K., Sofianopoulou, S.: An efficient ant colony optimization system for the manufacturing cells formation problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (2008) 589–597
69. Sturm, R.: Modellbasiertes Verfahren zur Online-Leistungsbewertung von automatisierten Transportsystemen in der Halbleiterfertigung. Dissertation Universität Stuttgart (2007)
70. Tavakkoli-Moghaddama, R., Aryanezhadb, M.B., Safaeib, N., Vaseia, M., Azaronc, A.: A new approach for the cellular manufacturing problem in fuzzy dynamic conditions by a genetic algorithm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 18 (2007) 363–376
71. The Information Network (TIN) Semiconductor Factory Automation: Technology Issues and Market Forecasts. New Tripoli (2003).
72. Tönshoff, H.-K.; Freist, C.; Hesselmann, U.: Verfahren zur Werkstückanalyse großer Datenmengen. *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung* 79(12) (1984) 598–603
73. Vakharia, A.J., Wemmerlöv, U.: A comparative investigation of hierarchical clustering techniques and dissimilarity measures applied to the cell formation problem. *Journal of Operations Management* 13 (1995) 117–138
74. Wang J.: Formation of machine cells and part families in cellular manufacturing systems using a linear assignment algorithm. *Automatica* 39 (2003) 1607– 1615
75. Weiss, M.: New twists on 300 mm fab design and layout. *Semiconductor International* 22(8) (1999) 103–104
76. Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., München, Wien (2008)
77. Xambre A.R., Vilarinho P.M.: A simulated annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines. *European Journal of Operational Research* 151 (2005) 434–446
78. Xu H., Wang H. P.: Part family formation for GT applications based on fuzzy mathematics. *International Journal of Production Research* 27(9) (1989) 1637–1651
79. Zhang, Z., Xiao, R.: Empirical study on entropy models of cellular manufacturing systems. *Progress in Natural Science* 19 (2009) 389–395
80. Zäpfel, G.: Taktisches Produktions-Management. 2. Aufl., R. Oldenbourg Verlag, München, Wien (2000)
81. Zolfaghari, O.T.H.S., Liang, M.: An objective guided ortho synapse Hopfield network approach to machine grouping problems. *International Journal of Production Research* 35(10) (1997) 2773–2792

Koordination der unternehmensübergreifenden Produktionsplanung mit variablen Optimierungszentren

Rainer Lasch und Gregor Schulte

Zusammenfassung Die bisherigen Veröffentlichungen zur unternehmensübergreifenden Produktionsplanung entwickeln Planungsverfahren, welche die beim Übergang von einer unternehmens- zu einer netzwerkweiten Produktionsplanung vorhandenen Kostensenkungspotenziale erschließen. Diese quantitativen Ansätze beachten die Schwierigkeiten, die beim Überschreiten von Unternehmensgrenzen entstehen, zumeist nicht ausreichend. Zu diesen Schwierigkeiten gehören beispielsweise Widerstände gegenüber der Weitergabe kritischer Informationen an andere Partner, opportunistisches Verhalten einzelner Partner oder die notwendigen Kompensationsregelungen zwischen den Partnern. Als weiteres Problem zeigt sich, dass fast alle bisherigen Ansätze auf lediglich zweistufige Netzwerke oder gar nur auf den Spezialfall eines Netzwerks mit exakt zwei Unternehmen anwendbar sind. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird ein neuer anwendungsorientierter Ansatz zur unternehmensübergreifenden Produktionsplanung vorgestellt, der diesen Schwierigkeiten und Problemen Rechnung trägt. Die mit dem neuen Ansatz zu erreichenden Kostensenkungspotenziale werden mit Hilfe von Rechnersimulationen untersucht.

1 Einleitung und Motivation

Die unternehmensübergreifende Produktionsplanung zieht ihre Berechtigung aus der Existenz eines Kostensenkungspotenzials beim Übergang von einer unternehmensweiten zu einer netzwerkweiten Planung. Dieses Potenzial basiert auf den gleichen Effekten wie das Potenzial beim Übergang von einer unternehmensintern einstufigen Planung zur unternehmensintern mehrstufigen Planung. Beim Überschrei-

Rainer Lasch · Gregor Schulte

Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Logistik, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, GERMANY

E-mail: rainer.lasch@tu-dresden.de , GregorSchulte@web.de

ten von Unternehmensgrenzen ergeben sich jedoch zusätzliche Schwierigkeiten bzw. Hindernisse, die einer Nutzung dieses Potenzials entgegenstehen. Dazu zählen insbesondere die Widerstände gegenüber der Weitergabe kritischer Informationen an andere Unternehmen, die Opportunismusproblematik (d.h. gezielte Aktionen einzelner Firmen zum Nachteil anderer) und die notwendigen Kompensationsregelungen zwischen den Unternehmen aufgrund der bei unternehmensübergreifender Planung möglichen Verluste einzelner Firmen. Jede Methode, die das oben genannte Potenzial nutzen möchte, muss all diese Problemfelder beachten. Wird auch nur ein wichtiges Problemfeld ignoriert, so ist nicht zu erwarten, dass die fragliche Methode die Zustimmung der Unternehmen eines Netzwerks findet. So z.B. kann man zwar eine Aufteilungsregel für den gemeinsamen Gewinn unter den Unternehmen vorschlagen, eine Anwendung dieser Regel ist jedoch praktisch ausgeschlossen, wenn dafür die Offenlegung sensibler, betriebsinterner Kosteninformationen notwendig ist.

Untersucht man die bislang in der Literatur bekannten quantitativen Ansätze zur unternehmensübergreifenden Produktionsplanung im Hinblick auf die Beachtung dieser Problemfelder, dann zeigen sich zumeist erhebliche Schwächen. Insbesondere bei den älteren statischen Ansätzen beschäftigen sich die Autoren i.d.R. mit der Ermittlung einer unternehmensübergreifenden Losgrößenformel zur Erreichung des Gesamtoptimums, ohne jedoch die K.O.-Kriterien für die Umsetzbarkeit in Form der Problemfelder zu beachten. Als Ausnahme kann die Arbeit von Sucky [29] genannt werden, der in seinem statischen Ansatz zur unternehmensübergreifenden Losgrößenplanung vollständig auf die Weitergabe sensibler Kosteninformationen verzichtet. Dieser Ansatz beschränkt sich jedoch auf Netzwerke mit nur zwei Unternehmen ohne komplexe interne Produktionsstruktur, so dass die analytischen Herleitungen für größere Netzwerke mit komplexen internen Produktionsstrukturen als problematisch zu betrachten sind. Bei den dynamischen Ansätzen von Ertoğral und Wu [11], Zimmer [33], Dudek [10] und Pibernik und Sucky [26] lassen sich verstärkt Bemühungen erkennen, um den oben genannten Problemfeldern Rechnung zu tragen. Doch auch diese Arbeiten berücksichtigen nicht alle Hindernisse umfassend in ihren jeweils propagierten Methoden. Vielmehr erfolgt eine Konzentration auf bestimmte Problemfelder, wogegen andere ausgeblendet oder nur teilweise gelöst werden. So z.B. kann die Arbeit von Dudek [10] einerseits weitgehend überzeugende Lösungen für das Problem der Informationsweitergabe vorweisen, da außer den (unkritischen) Bedarfsinformationen nur aggregierte Kostenunterschiede an andere Firmen weitergegeben werden. Andererseits modelliert dieser Ansatz jedoch die Kompensationsmechanismen zwischen den Firmen nicht explizit und kann dadurch das Opportunismusproblem nicht endgültig lösen. Für eine Modellierung heterarchisch koordinierter Liefernetzwerke wurden auch prototypische Ansätze im Bereich der Multi-Agenten-Systeme entwickelt.¹ Die meisten Ansätze beschränken sich jedoch auf die Modellierung linearer Lieferketten. Zäpfel und Strack [32] entwickelten ein agentenbasiertes Modell für ein allgemeines Logistiknetzwerk, das unter Verwendung der Metaheuristik Simulated Annealing Planlösungen verbes-

¹ Vgl. z.B. [4, 13, 28, 15].

sert. Als Planungsinformation werden lediglich die lokal bestimmten Bestellmengen über den Planungszeitraum an die Lieferanten weitergegeben; auf die Preisgabe sensibler Kostensätze wird verzichtet. Eine explizite Modellierung der Kompensationsregelungen zwischen den Partnern erfolgt jedoch nicht.

Man kann insgesamt feststellen, dass bislang kein statischer oder dynamischer Ansatz zur unternehmensübergreifenden Produktionsplanung sämtliche Problemfelder umfassend berücksichtigt. Hinzu kommt, dass fast alle bisherigen statischen und dynamischen Ansätze auf lediglich zweistufige Netzwerke oder gar nur auf den Spezialfall eines Netzwerks mit exakt zwei Unternehmen anwendbar sind. Zusammenfassend ist deshalb zu sagen, dass bislang zwar der Ausschöpfung des Kostensenkungspotenzials durch die unternehmensübergreifende Planung große Aufmerksamkeit geschenkt, dabei jedoch zu wenig auf eine breite Anwendbarkeit der jeweiligen Methode geachtet wurde (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1 Eigenschaften ausgewählter Ansätze mit dynamischem Bedarfsverlauf.

Modell	Planungskonzept	Informationsstand	Gewinnaufteilung	Anfälligkeit für Opportunismus	Netzwerkgröße
Ertogral/Wu [11]	sukzessiv (mit Zentrale)	gering	fixe Formel	hoch	unbegrenzt
Zimmer [33]	sukzessiv	mittel	flexible Verträge	mittel	1:1
Dudek [10]	sukzessiv	gering	verschiedene Formeln	je nach Formel mittel bis hoch	$m : m$
Pibernik/Sucky [26] ^a	sukzessiv	1) minimal 2) mittel	1) Verhandlung 2) automatisch	1) minimal 2) mittel	1:1

^a Pibernik/Sucky unterscheiden in ihrem Ansatz zwischen 1) gleich verteilter Macht und 2) ungleich verteilter Macht.

Aus diesem Grund wird bei der Konzeption des Ansatzes in der vorliegenden Arbeit eine andere Herangehensweise gewählt: Hauptziel ist nun nicht mehr eine möglichst gute Annäherung an das (nur theoretisch erreichbare) Kostenoptimum, sondern die umfassende Beachtung aller Problemfelder. Die erreichte Kostensenkung soll zwar immer noch möglichst groß sein, sie muss aber innerhalb des durch die Problemfelder abgesteckten Rahmens realisierbar sein. Dieser Rahmen lässt sich in Form folgender zentraler Forderungen zusammenfassen:

1. Strikte Reduzierung der an die Partner weitergegebenen Informationen auf un-kritische Bedarfsinformationen bzw. der damit verbundenen Informationen wie z.B. Durchlaufzeiten, Produktionskoeffizienten bzgl. Mehrfachverwendung etc.
2. Einbeziehung der Kompensationsmechanismen zwischen den Firmen als integralen Bestandteil in die Methode, um die Gewinnverteilung zu regeln und zugleich Opportunismus auszuschließen.

3. Bewahrung der Selbstständigkeit der Firmen, d.h. Beibehaltung der Entscheidungshoheit über alle für die Firma relevanten Vorgänge.
4. Erreichen eines finanziellen Vorteils für alle Firmen des Netzwerks. Nur wenn sich nach der Kompensation (Punkt 2) ein (spürbarer) Vorteil für jede Firma ergibt, so ist aufgrund ihrer Selbstständigkeit (Punkt 3) mit einer Akzeptanz der Methode zu rechnen.
5. Der vorgestellte Ansatz soll nicht nur auf kleine Netzwerke, sondern auf Netzwerke mit beliebiger Größe und allgemeinen Strukturen (mit linearen, konvergierenden und divergierenden Strukturelementen) anwendbar sein.

Aus diesen Forderungen folgt, dass jegliche Abläufe, Verfahrensschritte etc., die im Rahmen dieser Methode auszuführen sind, besonders einfach strukturiert sein müssen, um auch bei einer hohen Anzahl von teilnehmenden Firmen nicht in einer inakzeptabel hohen Prozesskomplexität zu resultieren.

Die Summe der aufgestellten Forderungen lässt vermuten, dass eine unter der Maßgabe der sich daraus ergebenden Einschränkungen entwickelte Methode nicht die gleiche Nähe zum (theoretischen) Gesamtoptimum erreicht, wie es solchen Ansätzen möglich ist bzw. war, die keine oder nur eine stark eingeschränkte Rücksicht auf die oben besprochenen Gegebenheiten der Realität nehmen bzw. nahmen. Zu beachten ist jedoch, dass in der hier betrachteten Situation mit selbstständigen Unternehmen die oben genannten Forderungen im Zuge der Einigung der Firmen eines Netzwerks auf eine konkrete Art der unternehmensübergreifenden Produktionsplanung nicht nur eine Wunschliste darstellen, sondern harte K.O.-Kriterien sind. Aus diesem Grund kann die geringe Kostensenkung eines (für die Firmen akzeptablen) Verfahrens letztlich der hohen Kostensenkung eines anderen (von den Firmen nicht akzeptierten) Verfahrens weit überlegen sein.

Auf welche Weise die genannten Forderungen in das hier vorgestellte Verfahren integriert werden und wie groß letztendlich die resultierende Kostensenkung ist, zeigen die folgenden beiden Kapitel. In Kapitel 2 wird als neuer Ansatz zur Produktionsplanung in einem Unternehmensnetzwerk die Methode variabler Optimierungszentren (MVOZ) vorgestellt. Dazu wird zunächst auf die Grundidee des Verfahrens eingegangen. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der ersten von zwei Phasen der MVOZ, der „Planungsphase“, in der alternative Pläne für das Unternehmensnetzwerk aufgestellt werden. Nachdem auf diese Weise das Potenzial der MVOZ ermittelt wurde, folgt die Beschreibung der zweiten Phase der MVOZ, der „Auswahlphase“. Diese Phase ist notwendig, um sich auf einen allgemein gültigen Gesamtplan für das Unternehmensnetzwerk zu einigen, damit das zuvor festgestellte Potenzial genutzt werden kann. Im darauf folgenden Kapitel 3 werden die Rechnersimulationen erläutert, die zur Feststellung des Verbesserungspotenzials der MVOZ durchgeführt wurden. Es wird auf die einfließenden Daten eingegangen sowie die Ergebnisse der Simulationen präsentiert und ausgewertet. Der Beitrag schließt mit einem zusammenfassenden Fazit in Kapitel 4, welches eine vergleichende Einordnung des neuen Ansatzes in Tabelle 1 vornimmt.

2 Produktionsplanung mit variablen Optimierungszentren

2.1 Grundidee des Verfahrens

Wenn auf die Übermittlung sensibler betriebsinterner Informationen verzichtet werden soll, kann die Produktionsplanungsaufgabe nicht für alle Firmen simultan gelöst werden. Die deshalb zwingend sukzessive Planung muss aber trotzdem nicht unbedingt in der traditionellen zeitlichen Reihenfolge Abnehmer-Lieferant erfolgen. Vielmehr kann es auch solche Machtbeziehungen geben, bei denen auch ein weiter (material)flussabwärts gelegenes Unternehmen (Lieferant) zuerst plant und der Abnehmer sich danach an die daraus entstehenden Vorgaben anpasst. In diesem Fall ist nicht mehr der Abnehmer, sondern der Lieferant das „Optimierungszentrum“ (OZ), d.h. das Unternehmen, das zuerst plant. Betrachtet man ein Netzwerk mit n Unternehmen, dann ermittelt jedes Unternehmen als Optimierungszentrum seinen individuellen optimalen Plan auf Basis der gegebenen Endkundennachfrage. Als Reaktion auf die optimalen Pläne aller anderen $n - 1$ Unternehmen ermittelt anschließend jedes Unternehmen im Netzwerk je einen Plan, so dass als Ergebnis n alternative Gesamtpläne für das Netzwerk vorliegen. Zu beachten ist, dass unter den Optimierungsfolgen nicht wiederum ein Führer auf der zweiten Stufe ausgewählt wird, da sonst die Anzahl der Pläne exponentiell ansteigt. Die einzige unkritische Information, die für ein solches Vorgehen zusätzlich benötigt wird, ist das Vorliegen der Endkundenbedarfe bei allen Partnern des Netzwerks. Der Plan des Optimierungszentrums stellt neben der Endkundennachfrage eine weitere Vorgabe dar.

In Abbildung 1 ist eine allgemeine Netzwerkstruktur mit sechs Unternehmen gegeben. Übernimmt Unternehmen U3 die Rolle des Optimierungszentrums, dann ergibt sich der folgende Ablauf:

- Unternehmen U3 plant auf der Grundlage der gegebenen Endkundenbedarfe zuerst und meldet die Vorgaben an U1, U4, U5 und U6 weiter (vgl. Netzwerk I)
- U5 (oder U1 oder U4) plant als zweites Unternehmen und meldet die Vorgaben an U6 weiter (vgl. Netzwerk II)
- U4 (oder U1, nicht aber U6) plant als drittes Unternehmen und meldet die Vorgaben an U2 und U6 weiter (vgl. Netzwerk III)
- U2 (oder U6, nicht aber U1) plant als viertes Unternehmen und meldet die Vorgaben an U1 weiter (vgl. Netzwerk IV)
- Abschließend planen U1 und U6

Da nicht nur U3, sondern jedes Unternehmen in diesem Netzwerk die Rolle des Optimierungszentrums übernehmen kann, ergeben sich in diesem Beispiel insgesamt sechs alternative Pläne.

Trotz der Erkenntnis der Möglichkeit eines anderen Optimierungszentrums ist jedoch noch unbekannt, welches der Optimierungszentren am vorteilhaftesten ist. Es bietet sich daher an, die Identität des Optimierungszentrums zu variieren, d.h. jedes Unternehmen optimiert einmal zuerst. Danach sind die so entstandenen alternativen Pläne zu vergleichen, um einen dieser Pläne zur Umsetzung auszuwählen.

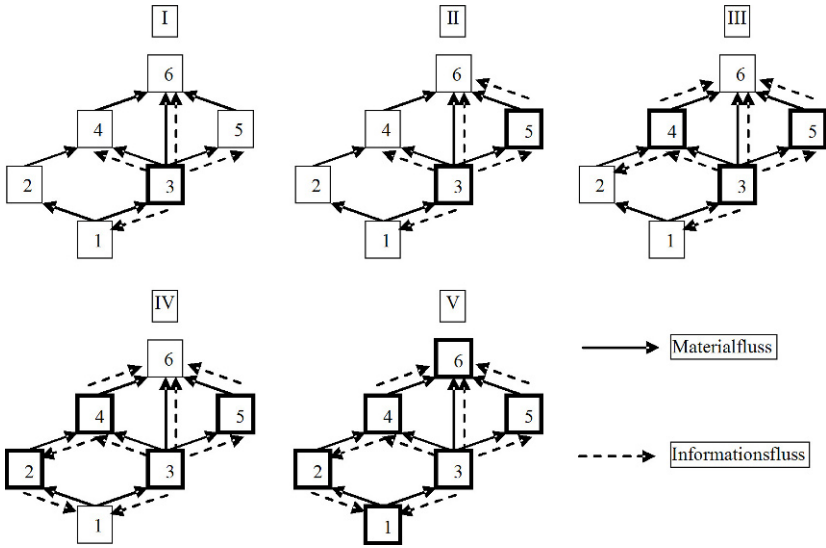


Abb. 1 Beispiel für die Planungsphase der MVOZ.

Dieses Vorgehen wird im Folgenden als „Methode variabler Optimierungszentren“ (MVOZ) bezeichnet. Abbildung 2 veranschaulicht die MVOZ anhand eines einfachen linearen Netzwerks mit drei Unternehmen. Das Verfahren ist auch auf allgemeine Netzwerkstrukturen anwendbar (vgl. Forderung 5 in Kapitel 1).

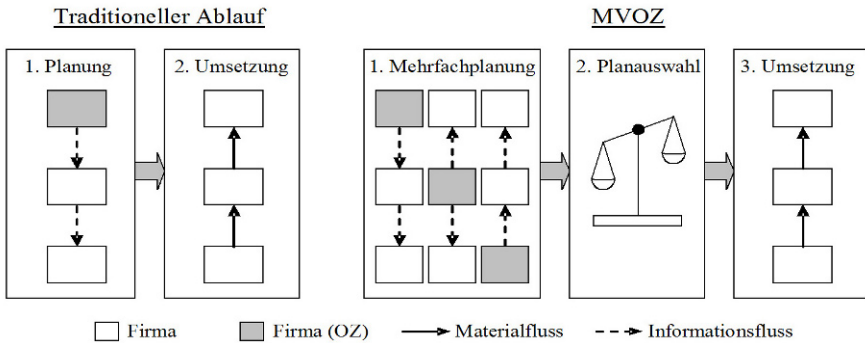


Abb. 2 Grundprinzip der MVOZ im Vergleich zur traditionellen Planung.

Wenn jeder Partner des Netzwerks einmal die Rolle des Optimierungszentrums übernimmt und alle anderen Unternehmen sich jeweils an die daraus entstehenden Vorgaben anpassen, dann liegen insgesamt so viele Pläne zur Auswahl vor, wie es Partner im Netzwerk gibt (n Alternativen). Besteht die oberste Ebene des Netzwerks, d.h. die Ebene mit Kontakt zu den Endkunden, aus mehr als nur einem Un-

ternehmen, dann ist die traditionelle Planung zusätzlich zu berücksichtigen, da die traditionelle Planung in solchen Netzwerken nicht identisch mit einem der n neuen Pläne ist – die MVOZ enthält dann $n + 1$ Alternativen.

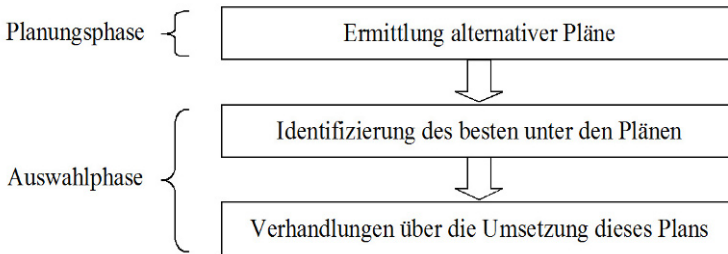


Abb. 3 Teilung der MVOZ in Planungs- und Auswahlphase.

Wie schon in Abbildung 2 zu erkennen war, folgt aus der nach der Bestimmung der alternativen Pläne notwendigen Auswahl unter diesen Plänen eine natürliche Zweiteilung der MVOZ. Die erste Phase, welche die Berechnung der n bzw. $n + 1$ Gesamtpläne enthält, wird im Folgenden „Planungsphase“ genannt. Die zweite Phase wird gemäß ihrer Hauptfunktion „Auswahlphase“ genannt. Da aufgrund der restriktiven Informationslage (kein Partner kennt die Kosten anderer Partner) keine herkömmliche Auswahl, bei der man gemeinsam unter Vorliegen aller Informationen entscheidet, möglich ist, wird die zweite Phase nochmals in einen Identifizierungs- und einen Verhandlungsschritt unterteilt (vgl. Abb. 3).

In den folgenden beiden Unterkapiteln 2.2 und 2.3 werden die Planungs- und die Auswahlphase der MVOZ jeweils detailliert erklärt.

2.2 Planungsphase der MVOZ

Der grobe Ablauf der ersten Phase ergibt sich relativ eindeutig aus ihrem bereits erklärten Grundprinzip in Abbildung 2. Die Einzelheiten sollen nun anhand eines verbal-formalen Schemas verdeutlicht werden, das die folgenden Variablen verwendet.

- F Menge der Firmen im Unternehmensnetzwerk
- n Anzahl der Firmen im Unternehmensnetzwerk ($n = |F|$)
- OZ Nummer des aktuellen Optimierungszentrums
- i, j Laufvariablen
- f_i Firma i
- A_i Menge der Abnehmer von Firma i im Unternehmensnetzwerk
- L_i Menge der Lieferanten von Firma i im Unternehmensnetzwerk
- U Menge aller Firmen, die noch nicht geplant haben

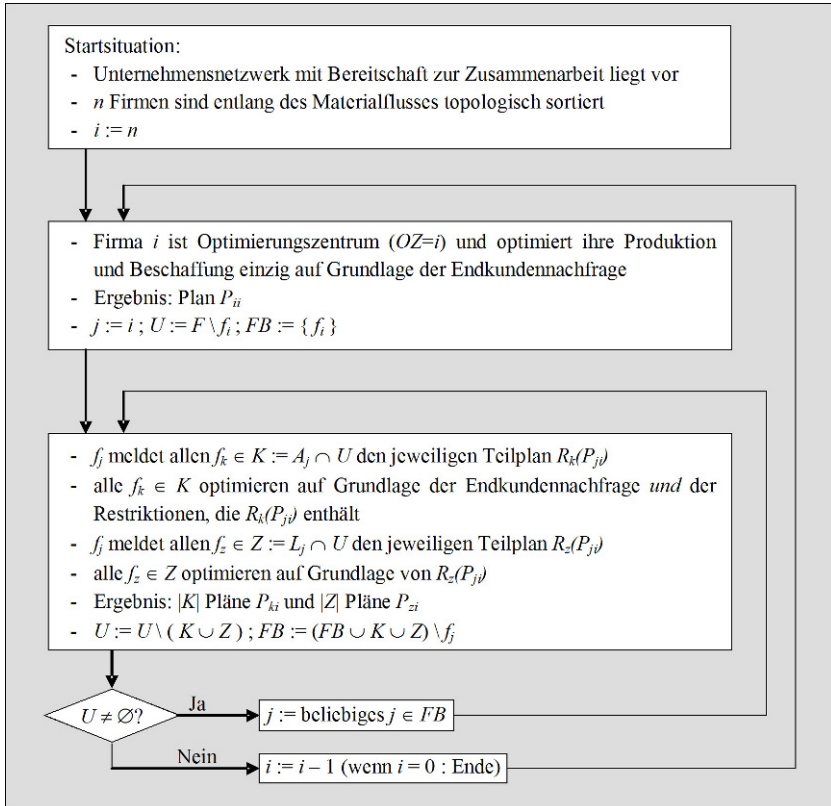


Abb. 4 Ablauf der Planungsphase der MVOZ.

- FB Menge aller Firmen i , die selbst bereits geplant haben, von deren Nachbarn $A_i \cup L_i$ jedoch möglicherweise eine Firma (oder mehrere) noch nicht geplant hat (haben)
- P_i Plan für eine Firma i , enthält alle Produktions- und Beschaffungsmengen dieser Firma für den Planungszeitraum
- P_{xy} Plan der Firma x bei Lage des Optimierungszentrums in y ($OZ = y$)
- $R_z(P_{xy})$ Für Firma z relevanter Teil des Plans P_{xy} (Liefermengen-Vorgaben für z)

Für einen Lieferanten L , der einen Abnehmer A nach dessen Vorgaben beliefert, entspricht $R_L(P_A)$ beispielsweise den Bestellmengen, die A an L übermitteln muss, wogegen $R_A(P_L)$ leer ist. Werden die Liefermengen jedoch vom Lieferanten festgelegt, ist $R_L(P_A)$ leer und $R_A(P_L)$ enthält die Vorgaben bezüglich der Bestellmengen, mit denen A planen soll.

Der gesamte Ablauf der Planungsphase der MVOZ ist in Abbildung 4 dargestellt. In jedem Durchlauf der übergeordneten Schleife (Laufvariable i) wird das Optimierungszentrum gewechselt und in jedem Durchlauf der untergeordneten Schleife (Laufvariable j) werden die Pläne der restlichen Firmen ermittelt.

Der Ablauf in Abbildung 4 ist formal nur für lineare und konvergierende Strukturen geeignet. Bei allgemeinen Strukturen ist in Ergänzung zur Abbildung 4 noch zu beachten, dass bei Vorliegen mehrerer finaler Firmen der traditionelle Gesamtplan gesondert ermittelt werden muss. Außerdem muss bei der Festlegung der Optimierungsreihenfolge im Anschluss an das Optimierungszentrum jegliche Situation vermieden werden, in der ein Unternehmen Vorgaben zugleich von der Lieferanten- und Abnehmerseite erhält. Diese beiden Aspekte sind zwar nicht im obigen Schema enthalten, lassen sich jedoch bei seiner tatsächlichen Anwendung auf ein konkretes Netzwerk einfach berücksichtigen.

2.2.1 Spezifizierung des Modells

Zum Zweck der späteren Simulation und Kostenberechnung ist das grundsätzliche Vorgehen aus Abbildung 4 nun noch detailliert auszugestalten. Das betrifft insbesondere die firmeninternen Optimierungsschritte. Im Folgenden wird angenommen, dass die Unternehmen das MLCLSP² („Multi-level Capacitated Lot Sizing Problem“) nutzen, um ihre Produktions- und Materialbestimmungen festzulegen. Hier wird eine bewusst einfach gehaltene Formulierung ohne Berücksichtigung von Rüstzeiten und Lagerbeschränkungen verwendet.³

Modell MLCLSP

T Planungszeitraumlänge [ZE]

Mengen:

J Menge der Produkte j (inklusive Materialien, Zwischen- und Endprodukte)

R Menge der Ressourcen r

N_j Menge der direkten Nachfolgerprodukte des Produkts j

Kostenwerte:

KL_j Lagerhaltungskostensatz von Produkt j [GE / (ZE * ME)]

KF_j Fixkostensatz von Produkt j [GE]

KZ_r Zusatzkapazitätskosten von Ressource r [GE / KE]

Sonstige Eingangsdaten:

E_{jt} Externer Bedarf der direkten Nachfolger für Produkt j in Periode t

K_{rt} Kapazität für Ressource r in Periode t [KE]

ZM_{rt} Maximal nutzbare Zusatzkapazität für Ressource r in Periode t [KE]

a_{rj} Bedarf von Produkt j an Ressource r [KE / ME]

b_{ij} Bedarf von Produkt j an Vorprodukt i [ME / ME] (Direktbedarfskoeffizient)

M sehr große Zahl als Ersatz für „unendlich“ [Einheit nach Bedarf]

² Vgl. z.B. [11, S. 933], [30, S. 205ff], [10, S. 30ff].

³ Für erweiterte MLCLSP-Varianten siehe ebenda.

Variablen:

x_{jt}	Produktionsmenge von Produkt j in Periode t (Losgröße) [ME]
l_{jt}	Lagermenge von Produkt j in Periode t [ME]
y_{jt}	Binärvariable = $\begin{cases} 0, & \text{falls } x_{jt} = 0 \\ 1, & \text{falls } x_{jt} > 0 \end{cases}$
z_{rt}	Genutzte Zusatzkapazität für Ressource r in Periode t [KE]
n_{rt}	Für Ressource r in Periode t benötigte, aber nicht durch ZM_{rt} abgedeckte Zusatzkapazität (Fehlkapazität)

Zielfunktion: Minimiere

$$\sum_{j \in J} \sum_{t=1}^T (KL_j \cdot l_{jt} + KF_j \cdot y_{jt}) + \sum_{r \in R} \sum_{t=1}^T (KZ_r \cdot z_{rt} + M \cdot n_{rt}) \quad (1)$$

Nebenbedingungen:

Lagerausgleich:

$$x_{jt} + l_{j,t-1} = E_{jt} + l_{jt} + \sum_{k \in N_j} b_{jk} \cdot x_{kt} \quad \forall j \in J, t = 1, \dots, T \quad (2)$$

Kapazitäten:

$$\sum_{j \in J} a_{rt} \cdot x_{jt} \leq K_{rt} + z_{rt} + n_{rt} \quad \forall r \in R, t = 1, \dots, T \quad (3)$$

Binärbedingung:

$$x_{jt} \leq y_{jt} \cdot M \quad \forall j \in J, t = 1, \dots, T \quad (4)$$

Lagerstart:

$$l_{j0} = 0 \quad \forall j \in J \quad (5)$$

Lagerende:

$$l_{jT} = 0 \quad \forall j \in J \quad (6)$$

Zusatzkapazitäten:

$$z_{rt} \leq ZM_{rt} \quad \forall r \in R, t = 1, \dots, T \quad (7)$$

Die Zielfunktion (1) minimiert die Summe aus Lagerhaltungs- und Fixkosten (erster Term) sowie den Zusatzkapazitätskosten (zweiter Term). Für die Registrierung kapazitätsmäßig unlösbarer Probleme fließt außerdem die Fehlkapazität ein, bewertet mit prohibitiv hohen Kosten (M , hier mit Einheit [GE]). Bei lösbaren Problemen hat M den Wert 0.

Gleichung (2) setzt die produzierte Menge x in Beziehung zum Lagerbestand und zu den für die Kunden (E) bzw. für Folgeprodukte (b) benötigten Mengen. Restriktion (3) erzwingt, wenn möglich, die Kapazitätseinhaltung. Aufgrund der

Kostenminimierung in der Zielfunktion erfolgt die Nutzung der Kapazitäten in der Reihenfolge K_{rt} (ohne zusätzliche Kosten), z_{rt} (zum Kostensatz KZ) und n_{rt} . Sobald ein n_{rt} größer als Null ist, ist das reale Problem unlösbar, da sich selbst mit vollständig genutzter Zusatzkapazität keine zulässige Lösung finden lässt. Damit das mathematische Problem trotzdem gelöst werden kann (wichtig für die Simulationen in Kapitel 3), wurden die Ausweichmöglichkeiten n_{rt} hinzugenommen. Ob das Praxisproblem lösbar ist, wird dann anhand der n_{rt} -Werte bzw. anhand der resultierenden Kosten ersichtlich. Die Binärbedingung (4) erzeugt aus den Losgrößen die Binärvariable y , die für die Berechnung der Summe der Fixkosten in der Zielfunktion notwendig ist. Gleichungen (5) und (6) stellen den Lagerleerstand zu Beginn und am Ende des Planungszeitraums sicher und trennen dadurch die Planungszeiträume voneinander ab. Liegen andere, bekannte Lageranfangs- bzw. -endbestände vor, sind natürlich diese zu verwenden. Bedingung (7) schließlich begrenzt die Zusatzkapazität nach oben hin. Diese Grenze ergibt sich z.B. aus mit der Gewerkschaft vereinbarten maximalen zusätzlichen Arbeitszeiten („Überstunden“) pro Periode.

Weiterhin ist noch zu betonen, dass in der Menge der Produkte (J) nicht nur die Zwischenprodukte und damit die Produktionsschritte enthalten sind, sondern auch die von den Lieferanten bezogenen Materialien und Vorprodukte. Die obige Variable „Fixkosten“ stellt deshalb bei diesen Produkten die fixen Kosten der Beschaffung dar. Auf diese Weise wird die Beschaffung als eine weitere Stufe in die mehrstufige Losgrößenplanung einbezogen. Bei allen anderen Produkten entspricht sie den Rüstkosten bzw. in gleicher Weise auftretenden Kosten.⁴

2.2.2 Erweiterung des Modells

Ein zentraler Punkt im Ablauf der MVOZ ist die Erzeugung und Weiterverwendung von Mengenvorgaben vom Lieferanten an den Abnehmer, also entgegen der traditionellen Richtung. Damit dies möglich ist, müssen zwei Erweiterungen vorgenommen werden.

Die erste Erweiterung betrifft den Abnehmer, der die Vorgaben empfängt. Die obige Variante des MLCLSP lässt sich zwar sowohl von der Firma, die aktuell als Optimierungszentrum agiert, als auch von jeder Firma, die als Optimierungsfolger (OF) von einem Abnehmer ihre Vorgaben erhält, verwenden. Im ersten Fall enthält E die Endkundenbedarfe (bzw. den für diese Firma relevanten Teil davon), im zweiten Fall die Bestellungen der abnehmenden Firma. Befindet sich die Firma dagegen aktuell in der Rolle eines Optimierungsfolgers, der seine Vorgaben von einem Lieferanten erhält, so ist das obige mathematische Modell zu erweitern:

Modell MLCLSP-OF:

(Variablen, Zielfunktion und Nebenbedingungen aus dem MLCLSP bleiben erhalten)

⁴ Zur Analogie der Auftragsmengenplanung in Beschaffung und Produktion siehe z.B. [14, S. 34].

Zusätzlich:

xug_{jt} Untere Grenze für die Produktionsmenge von Produkt j in Periode t

xog_{jt} Obere Grenze für die Produktionsmenge von Produkt j in Periode t

Liefervorgabe 1:

$$x_{jt} \geq xug_{jt} \quad \forall j \in J, t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$x_{jt} \leq xog_{jt} \quad \forall j \in J, t = 1, \dots, T \quad (9)$$

Für alle Produkte, die kein mit Lieferantenvorgaben belegtes Vorprodukt sind, nehmen xug bzw. xog den Wert 0 bzw. M an. Auf diese Weise bleiben ihre Produktionsmengen wie im Modell MLCLSP unbeschränkt. Liegen dagegen Lieferantenvorgaben vor, so nehmen xug und xog diese Vorgabewerte an, so dass $xug = xog$ gilt. Dadurch ergeben sich trotz erneuter Optimierung durch den Abnehmer genau die Bestellmengen $x = xug = xog$, die der Lieferant als Vorgabe übermittelt hatte. Zusätzlich enthält E weiterhin die Endkundenbedarfe, so dass Firmen, die das erweiterte Modell MLCLSP-OF verwenden, von zwei Richtungen determiniert werden: „von unten“ durch die Mengenvorgabe des Lieferanten und „von oben“ durch die Endkundennachfrage. Im Gegensatz zum Verbot des gleichzeitigen Vorliegens von Lieferantenvorgaben und Abnehmervorgaben ergeben sich hieraus jedoch keine unlösbaren Probleme: Da die Endkundenbedarfe noch nicht zusammengefasst wurden („Los für Los“) und deshalb im Unterschied zu den Lieferantenvorgaben keine Bündelung aufweisen können, ist die Lösbarkeit bei ausreichender Kapazität trotzdem gewährleistet.

Die zweite Änderung, die für die Liefervorgaben an den Abnehmer wichtig ist, betrifft den Lieferanten selbst, d.h. die Erzeugung der Liefervorgaben. Es ist nämlich nicht sofort ersichtlich, wie der Lieferant überhaupt die für ihn beste Lösung ermitteln soll. Auf jeden Fall braucht er Vorgaben, wie viel er bis zu jeder Periode produziert haben soll, damit die Endkundennachfrage erfüllt werden kann. Optimierte er jedoch einfach unter der Maßgabe des Endkundenbedarfs ohne weitere Anpassungen, dann würde dies bedeuten, dass die Lösung des MLCLSP nur unter denjenigen Lösungen, die auf eine Belieferung des Abnehmers mit dem Mengen-/Zeitgerüst des Endkundenbedarfs hinauslaufen, die beste darstellt. Die Absicht dieser Optimierung ist es jedoch, die allgemein beste Lösung für den Lieferanten zu finden, weshalb unbedingt auch andere Liefervorgaben möglich sein müssen (d.h. stärkere Losbündelungen als im Endkundenbedarf vorgesehen). Die entscheidende Änderung, um dies zu erreichen, ist die Verwendung von Null als Lagerhaltungskostensatz nach der finalen Maschine⁵ im entsprechenden MLCLSP in Kombination mit der Gleichsetzung der Liefervorgaben xug und xog für den Abnehmer mit den

⁵ Gemeint ist die direkt vor der Belieferung des Abnehmers liegende Lagereinheit des Lieferanten, d.h. im Normalfall diejenige nach der letzten Produktionsstufe des Lieferanten. Im Folgenden wird aus Vereinfachungsgründen angenommen, dass es stets die letzte Produktionsstufe ist. Andere interne Strukturen, d.h. die Belieferung des Abnehmers mit Zwischenprodukten, sind aber auch lösbar.

Produktionsmengen x dieser Maschine des Lieferanten. Dann entsprechen die Kosten des MLCLSP einer jeweils sofort nach der Fertigung erfolgenden Lieferung an den Abnehmer, d.h. das Endproduktlager des Lieferanten ist stets leer.⁶ Es lässt sich leicht zeigen, dass die für den Lieferanten optimale Lösung diese Eigenschaft haben muss, da jede andere Lösung durch die Einführung der sofortigen Lieferung verbessert werden könnte, d.h. die Kosten des Lieferanten ließen sich dadurch senken. Wenn auf diese Weise jegliche Lagerung im Endproduktlager des Lieferanten vermieden wird, so steht dem Lieferanten jede zulässige Bündelung des Endkundenbedarfs offen, obwohl er mit dem MLCLSP direkt auf den Endkundenbedarf (enthalten in E) hin optimiert.

Um die nun beschriebene Erweiterung des Grundmodells zusammenzufassen, ist in Abbildung 5 eine spezifischere Version des Grundmodells gegeben.

Zusätzliche Symbole/Variablen:

A_{ij} Teilmenge von A_i ; enthält die Abnehmer, die mit dem internen Produkt j beliefert werden ($j \in J$ der Firma i)

L_{ij} Teilmenge von L_i ; enthält den Lieferanten, der das interne Produkt j liefert

Analog zu Abbildung 4 gilt Abbildung 5 auch nur für lineare und konvergierende Netzwerkstrukturen. Eine Übertragung auf allgemeine Strukturen ist unter Berücksichtigung der unter Abbildung 4 genannten Aspekte wiederum möglich.

2.3 Die Auswahlphase der MVOZ

Nach einem kompletten Durchlauf der Planungsphase liegen n (bzw. $n + 1$) alternative Gesamtpläne vor, unter denen nun einer zur Umsetzung ausgewählt werden muss. Bevor es überhaupt zu Verhandlungen kommt, muss zunächst die Vorteilhaftigkeit von Verhandlungen bestätigt („verifiziert“) werden. Zunächst einmal wird die traditionelle Planung zur Rückfalllösung erklärt, auf die stets zurückgegriffen wird, wenn man sich auf keinen anderen Plan einigen kann.⁷ Es kann daher auch angenommen werden, dass die traditionelle Planung stets als Option im Raum steht, an der sich alle Neuerungsvorschläge messen müssen. Zur Verhandlung werden nicht die absoluten Kosten verwendet, sondern lediglich der Unterschiedsbetrag im Vergleich zur traditionellen Planung. Somit können diejenigen alternativen Pläne von den Verhandlungen ausgeschlossen werden, deren Gesamtkosten über denen der traditionellen Planung liegen. Für den Ausschluss all dieser nicht lohnenden Alternativen von den Verhandlungen sind nun zwingend die bislang privaten Kosten(unterschieds)informationen nötig. Gleichzeitig würde jedoch durch ihre Offenlegung die spätere Verhandlungsposition einiger Teilnehmer erheblich geschwächt

⁶ Genau genommen enthält es lediglich keine Produkte für den betrachteten Abnehmer. Hat die Firma noch weitere Abnehmer, sind deren Produkte nicht davon betroffen, insofern sie nicht auch ihre Vorgaben von diesem Lieferanten erhalten.

⁷ Falls aufgrund bestimmter Machtbeziehungen traditionell der Lieferant zuerst plant, dann ist diese Alternative durch die Variation des OZ mit berechnet worden und dient dann als Rückfalllösung.

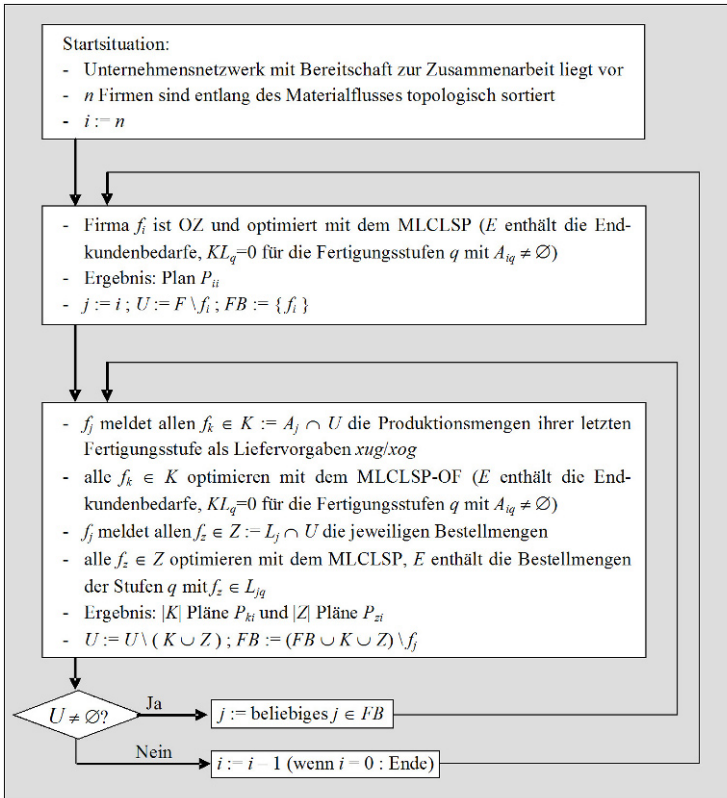


Abb. 5 Ablauf des spezifizierten Modells.

werden. Zur Lösung dieses Problems werden die Kostenunterschiedswerte der jeweils n Firmenpläne innerhalb der $n - 1$ (bzw. n) Gesamtpläne einer „Verifizierungsstelle“ mitgeteilt, die dann über die Vorteilhaftigkeit der Gesamtpläne entscheidet, ohne dass die Kosten der Firmen anderen Firmen mitgeteilt werden müssen. Um nun die absolute Verschwiegenheit dieser „Verifizierungsstelle“ sicherzustellen, kommen für diese Aufgabe keine menschlichen Aufgabenträger, sondern nur eine technische Lösung in Frage. Da durch diese technische Verifizierungsstelle mathematische Berechnungen durchgeführt werden müssen, liegt eine Realisierung als Rechnerprogramm nahe. Jede Firma müsste diesem Programm ihre $n - 1$ (bzw. n) Kostendifferenzen gegenüber der traditionellen Planung mitteilen. Damit die Firmen genug Vertrauen zur Sicherheit dieser Lösung haben, müssen sie überzeugt werden, dass die eingegebenen Informationen nicht weitergeleitet werden können. Dies wird u.a. durch folgende Maßnahmen unterstützt:

- Der Quellcode des Rechnerprogramms ist allen bekannt und kann durch jede beteiligte Firma jederzeit auf korrekte Funktionsweise überprüft werden.

- Das Programm unternimmt keine Speicherung der Daten nach Abschluss der Berechnungen.
- Der Standort des Rechners mit dem Programm liegt auf „neutralem Boden“ (z.B. bei einem Dienstleister ohne eigenen Zugriff auf den Rechner bzw. das Programm).
- Änderungen am Programm (oder am gesamten Rechner) können nur von allen Firmen des Netzwerks gemeinsam vorgenommen werden.

Aufgrund der besonders einfachen Natur der Berechnungen und der Ein- bzw. Ausgabedaten ist zu erwarten, dass das Programm sehr klein ist, eine hohe Transparenz aufweist und dadurch mit sehr geringem Aufwand auf einwandfreie Funktion hin überprüft bzw. gegen Manipulationsversuche geschützt werden kann. Durch die Realisierung als „nicht-menschlicher“ Aufgabenträger wird sichergestellt, dass die Informationen nicht weitergegeben werden.

Nachdem nun jede Firma ihre $n - 1$ (bzw. n) Werte eingegeben hat, kann die Verifizierungsstelle den Gesamtkostenvorteil bestimmen und nicht lohnende Alternativen ausschließen. Dieser Schritt wird als „Verifizierung“ bezeichnet, weil damit überprüft wird, ob die alternativen Pläne der MVOZ auch tatsächlich der traditionellen Planung überlegen sind. Ist dies der Fall, so wird die Identität des besten Optimierungszentrums (aber nicht dessen Kosten!) durch das Programm bekannt gegeben, damit die Firmen sich in Verhandlungen über die Umsetzung dieses Vorschlags einigen können. Ergibt die Verifizierung dagegen ein negatives Urteil, d.h. die traditionelle Planung kann nicht verbessert werden, so entfallen die Verhandlungen und die traditionelle Planung kommt (in diesem Planungszeitraum) zur Anwendung.

Als Resultat einer positiv ausgefallenen Verifizierung liegt allen Netzwerkpartnern eine einzelne Alternative vor, die in Summe über alle Firmenkosten besser ist als die traditionelle Planung und nun in die Verhandlungen eingeht. Die Verhandlungen sind einerseits nötig, weil dem dabei vorgeschlagenen Gesamtplan noch von allen Firmen zugestimmt werden muss. Bei dieser Abstimmung hat jede Firma ein Vetorecht, um die im Kapitel 1 erwähnte Selbstständigkeit zu erhalten. Andererseits sind allein schon deshalb Verhandlungen notwendig, um Kompensationszahlungen festzulegen, die diejenigen Firmen entschädigen, deren Kosten sich durch den für die Verhandlung identifizierten Gesamtplan im Vergleich zur traditionellen Planung erhöhen. Die Gewinner sind sich im Klaren darüber, dass der Alternativplan nur durch eine ausreichende Kompensation an die Verlierer zu realisieren ist, da sie selbst genauso handeln würden. Denn gerade weil die Firmen einen möglichst hohen individuellen Gewinn erreichen wollen, sind sie bereit, etwas von ihrer Kostendifferenz abzugeben – andernfalls kommt keine Einigung zustande und ihr individueller Gewinn beträgt Null. Die Frage der Akzeptanz einer Alternative verändert sich so in die Frage der Festlegung der Zahlungen. Wie jedoch Versuche in der experimentellen Spieltheorie zeigten, muss in der Realität eine weitere Bedingung erfüllt sein, damit der Zahlungsvektor immer akzeptiert wird: Die Teilnehmer dürfen nicht davon überzeugt sein, einen unverhältnismäßig kleinen Anteil vom „Kuchen“ zu erhalten. Fühlt sich ein realer Spieler unfair behandelt, dann verhindert er zuweilen eine Eini-

gung trotz eines für ihn echt positiven Gewinns.⁸ Da jeder zusätzliche Gewinn eines Spielers automatisch ein Verlust (bzw. vergebener Gewinn) für einen anderen Spieler in gleicher Höhe ist, handelt es sich durch den Konstanzsummencharakter nicht mehr um eine für die Spieltheorie interaktive Konfliktsituation, sondern lediglich um eine Forderung nach Umverteilung. Da bereits die Verhandlungsteilnehmer (alle n Firmen), der Verhandlungsgegenstand (die Höhe der Ein- bzw. Auszahlung jeder Firma) und die Rückfalllösung im Falle des Scheiterns der Verhandlungen (traditionelle Planung) feststehen, bestehen nur noch folgende Gestaltungsmöglichkeiten:

- Inhalt der Vorschläge der Verhandlungsteilnehmer,
- Art der Abgabe der Vorschläge,
- Einmaliger oder iterativer Charakter der Verhandlung.

Da kein anderes Mitglied des Netzwerks Einblick in die Kosten- und Gewinnsituation dieser Firma hat, können Vorschläge zur Zahlungshöhe, die eine bestimmte Firma leisten bzw. empfangen soll, hier nur durch diese Firma selbst eingebracht werden. Somit übermittelt jede Firma negative Zahlungen, d.h. Auszahlungen, wenn sie ein „Gewinner“ ist und positive Zahlungen, d.h. Einzahlungen, wenn sie ein „Verlierer“ ist. Wie groß der jeweilige Unterschied der Angebote bzw. Forderungen zu den tatsächlichen Kostendifferenzen ist, bleibt geheim, da es das Ziel ist, die genaue Höhe der individuellen Differenzen nicht preiszugeben. Für die Art der Abgabe der Angebote und Forderungen empfiehlt sich eine simultane Übermittlung, da erstens keine Reihenfolge festgelegt werden muss und sich zweitens aus der Gleichzeitigkeit der Vorschläge kein eindeutiges Verhandlungsergebnis ableiten lässt.⁹ Aufgrund der Tatsache, dass es für eine Firma nicht abschätzbar ist, wie kompatibel der eigene Vorschlag zu den Geboten bzw. Forderungen der anderen Firmen ist, sind mehrere Verhandlungsrunden notwendig. Während der gesamten Verhandlung kennt jedes Unternehmen nur die eigenen Kosten sowie die Zahlungsangebote bzw. -forderungen aller Partner im Netzwerk. Deckt nun in einer Verhandlungsrunde die Summe aller Zahlungsangebote die Summe aller Zahlungsforderungen ab, so ist eine Lösung erreicht und der von der Verifizierung vorgeschlagene Plan wird mit Hilfe der zuletzt vorgeschlagenen Zahlungen aller Unternehmen umgesetzt. Übersteigen die Kompensationsforderungen die Kompensationsangebote, muss eine weitere Verhandlungsrunde stattfinden, in der jeder Gewinner seinen Gebotsbetrag erhöhen und jeder Verlierer seine Forderung verringern sollte.

Vorteilhafte Verhandlungsregeln, auf die sich die Firmen bei Einführung der Methode einigen, könnten u.a. folgende Inhalte haben:

- Begrenzung der Rundenzahl auf einen Maximalwert, um den zeitlichen Umfang der Verhandlungen gering zu halten und zugleich abschätzbar zu machen,
- Vorschrift, dass jede Firma in jeder Runde ihr Gebot verbessern muss, um Wartespiele bzw. Blockaden zu vermeiden.

⁸ Vgl. [12, S. 300].

⁹ Vgl. [25, S. 192].

Kommt jedoch nach einer zuvor festgelegten Zahl von Verhandlungsrunden keine solche Einigung zustande, dann wird die traditionelle Planung angewendet – obwohl es eine überlegene Lösung gab. Ein Scheitern führt somit zu Opportunitätskosten für die Teilnehmer. Für solche Fälle kann man jedoch Lerneffekte bei den Beteiligten erwarten, da das Verhandlungsschema in jedem Planungszeitraum wiederholt wird.¹⁰ Gemäß der Spieltheorie fallen diese Verhandlungen in die Kategorie wiederholter Spiele, wodurch eine Lösung durch Reputationseffekte greifbarer wird. Die Partner kennen sich außerdem bereits, sie unterhalten schon einige Zeit erfolgreich Geschäftsbeziehungen zueinander. Dadurch ist das „Verhandlungsspiel“ in ein übergeordnetes wiederholtes Spiel einzuordnen, was ebenfalls den Druck auf die Spieler erhöht, die Verhandlungen mit einem Konsens abzuschließen.

Die direkte Verknüpfung der beiden Funktionen „Planfestlegung“ und „Kompensation“ im Rahmen der Verhandlung ist sehr vorteilhaft, da dadurch sichergestellt wird, dass jede Firma vom fraglichen Gesamtplan profitiert – sonst gibt es keine Zustimmung zum Plan. Die Verifizierung und die eigentliche Verhandlung stellen zwei bzgl. der Informationen weitgehend isolierte Schritte dar, d.h. die der Verifizierungsstelle gemeldeten Informationen müssen nicht mit dem in den Verhandlungen zur Abwägung der Gebote bzw. Forderungen verwendeten Kostenunterschiedswert übereinstimmen. Eine Falschmeldung (Betrugsversuch mit Gewinnabsicht) an die Verifizierungsstelle würde nur dann zu einem höheren Gewinn für eine Firma führen können, wenn dadurch eine andere Alternative zur Verhandlung käme. Da sich die Präferenzen jeder Firma bezüglich der Lage des Optimierungszentrums in Kosten ausdrücken lassen, kann es keinen Grund geben, warum die Realisierung einer Alternative (d.h. eines bestimmten Optimierungszentrums) von einer Firma bevorzugt wird, welcher nicht in den wahren Kosten ausgedrückt werden kann. Weiterhin ist das Ziel einer solchen Falschmeldung unklar. Ohne Kenntnis der Kostenunterschiedswerte der anderen Firmen können weder die durch die Verifizierungsstelle ermittelte Siegeralternative noch das Ergebnis der anschließenden Verhandlungen vorhergesagt werden.

Zusätzlich zu diesen rationalen Überlegungen, die man von jeder Firma erwarten würde, können folgende Maßnahmen (irrationale) Falschmeldungen noch unwahrscheinlicher machen:

- Jede Firma darf pro Planungszeitraum ihre $n - 1$ Werte nur einmal eingeben. Damit soll vermieden werden, dass eine Firma Mehrfachkorrekturen ihrer Werte vornimmt, bei denen der „grüne Bereich“ des Verifizierungsergebnisses ausgelotet wird.
- Allen Firmen muss vermittelt werden, dass durch falsche Werte, egal ob zu hoch oder zu niedrig, die Chance auf Realisierung der tatsächlich besten Alternative sinkt. Ganz im Sinne des Konzepts „Co-opetition“ ist zuerst durch Kooperation die beste Alternative zu finden und erst danach in den Wettbewerb um die Anteile daran zu treten.¹¹

¹⁰ Experimentell bestätigt wurde die Anpassung von Spielern an ein Verhandlungsspiel und ihre Mitspieler über die Zeit z.B. in [27, S. 327f].

¹¹ Vgl. zu „Co-opetition“ [6].

- Weiterhin muss den Firmen vermittelt werden, dass die Wirkung falscher Eingaben auf den eigenen Gewinn erst mit Hilfe von nicht verfügbaren Informationen (z.B. Kosten der anderen Teilnehmer) vorhergesagt werden kann. Potenziellen Trittbrettfahrern fehlen bei einer so restriktiven Informationslage, wie der hier vorliegenden, deshalb einfach die Mittel, die Folgen ihrer Manipulationsversuche genau abzuschätzen. Eine Firma kann daher nicht erkennen, ob ihr eine Falscheingabe Vor- oder Nachteile bringt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der hier vorgestellten Methode variabler Optimierungszentren kein bzw. kein großes Problem mit dem Wahrheitsgehalt der übermittelten Informationen besteht. Opportunistische Handlungen zum Nachteil anderer Firmen sind praktisch ausgeschlossen, da zwar jede Firma ihren Vorteil durchsetzen kann, aber nicht zum Nachteil anderer Firmen.

Der beschriebene Verhandlungsablauf wird im Folgenden an einem Netzwerk mit drei Partnern (F1, F2, F3) veranschaulicht. Ausgangspunkt ist eine Situation, in welcher der von der Verifizierung vorgeschlagene Plan mit Firma F2 als Optimierungszentrum für Firma F3 erhebliche Mehrkosten verursachen würde ($\Delta K_3 > 0$), die Firmen F1 und F2 dagegen von diesem Plan profitieren ($\Delta K_2 < \Delta K_1 < 0$, vgl. Tabelle 2). Alle Kostendifferenzen beziehen sich dabei auf die traditionelle Planung, die im Rahmen der MVOZ ebenfalls bestimmt wird.

Tabelle 2 Verhandlungsbeispiel – Ausgangssituation.

Kostendifferenzen	Tatsächliche Werte
K1	- 186 GE
K2	- 358 GE
K3	+ 281 GE
Summe	- 263 GE

Für die erste Verhandlungsrunde in Tabelle 3 soll angenommen werden, dass jede Unternehmung mindestens 50% ihres Gewinns abzugeben bereit ist bzw. eine entsprechende Überkompensation fordert. Da die Zahlungsvorschläge allen Partnern bekannt sind, ist auch die noch fehlende Summe von 85 GE bekannt. In den folgenden Runden in Tabelle 4 werden deshalb die Angebote entsprechend verbessert, um die Vorteile des fraglichen Plans überhaupt nutzen zu können.

Aufgrund des Zahlungsüberschusses in Runde 3 kann der Plan mit Firma F2 als Optimierungszentrum zum Vorteil aller umgesetzt werden. Der Überschuss von 6 GE wird noch aufgeteilt, was in Auszahlungen von 123 GE (F1) und 252 GE (F2) und einer Einzahlung von 375 GE (F3) resultiert. Aus diesen Zahlungen ergeben sich beim Vergleich mit Tabelle 2 letztendlich Gewinne von 63 GE (F1), 106 GE (F2) und 94 GE (F3).

Von der MVOZ können somit alle Partner profitieren, ohne sensible Daten auszutauschen – die Relation der Angebote im Rahmen der Verhandlung zu den wahren

Tabelle 3 Verhandlungsbeispiel – Runde Nr. 1.

Runde 1	Zahlungsvorschlag	prozentual
Zahlung F1	-93 GE	50%
Zahlung F2	-215 GE	60%
Zahlung F3	393 GE	-140%
Summe	85 GE	

Kosten bleibt geheim. Außerdem wird durch die Unkenntnis der Gewinne der anderen Firmen eventuellen Neidgefühlen vorgebeugt, was die Akzeptanz der erreichten Einigung erhöht.

Tabelle 4 Verhandlungsbeispiel – Runden Nr. 2 und Nr. 3.

Runde 2	Zahlungs- vorschlag	prozentual	Runde 3	Zahlungs- vorschlag	prozentual
Zahlung F1	-121 GE	65 %	Zahlung F1	-125 GE	67 %
Zahlung F2	-251 GE	70 %	Zahlung F2	-254 GE	71 %
Zahlung F3	379 GE	-135 %	Zahlung F3	373 GE	-133 %
Summe	7 GE		Summe	-6 GE	

3 Simulationsgestützte Quantifizierung des finanziellen Vorteils




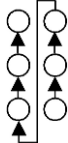
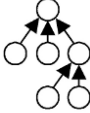
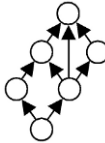
Im vorangegangenen Kapitel wurde auf die Vorteile der MVOZ im Hinblick auf die in Kapitel 1 aufgestellten Forderungen eingegangen. Fraglich ist nun noch, welchen durchschnittlichen finanziellen Vorteil die MVOZ überhaupt noch erbringen kann, wenn sie so weitgehend auf die Mittel der Zentralplanung (Informationsweitergabe, Weisungshierarchien etc.) verzichtet. Zu diesem Zweck wurde in einer umfangreichen Simulation der Kostenunterschied zwischen dem besten im Rahmen der MVOZ bestimmten Gesamtplan und der traditionellen Planung ermittelt. Zu beachten ist, dass die in Kapitel 2 beschriebene Verhandlungsphase und somit auch das Opportunismusproblem nicht Bestandteil der Simulation sein kann. Die für die Simulation verwendeten Netzwerke und die darin enthaltenen Produktionseinheiten können der Tabelle 5 entnommen werden.

Der festgelegte Simulationsumfang umfasst für die sechs Netzwerke sechs Kostenparameterbelegungen (2 Fixkosten-Varianten, je 3 Exemplare), drei verschiedene Auslastungsstufen und 18 Bedarfsreihen (3 Mittelwerte, je 2 Schwankungen, je 3 Exemplare), so dass sich insgesamt 1.944 Simulationsdurchläufe ergaben. Für

die Simulation wurde ein einzelner handelsüblicher Arbeitsplatz-Rechner verwendet. Der für die MLCLSP-Optimierungen genutzte Solver war Teil der LINGO-Software (Version 10). Alle anderen Schritte der MVOZ sowie die Ansteuerung des Solvers (Versorgung mit Daten und Weiterverwendung der Ergebnisse) wurden als selbsterstelltes Java-Programm realisiert. Die Rechenzeiten je Simulationsdurchlauf schwankten zwischen einigen Sekunden und einer Stunde und bestanden fast ausschließlich (> 99%) aus den Rechenzeiten des Solvers. Insgesamt ergab sich ein beträchtlicher Rechenaufwand, der in drei Monaten realisiert wurde. Die Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Da in Fällen, bei denen die traditionelle Planung bereits die bestmögliche Lösung ermittelt, kein Verfahren eine Verbesserung erzielen könnte, wurde zunächst das überhaupt vorhandene Gesamtpotenzial ermittelt. Potenzial für eine Verbesserung ist genau dann vorhanden, wenn die traditionelle Lösung (hier stets identisch mit $OZ = n$) nicht bereits das durch eine (in der Praxis nicht realisierbare) zentrale Planung erzielbare Gesamtoptimum getroffen hat. Hier wird angegeben, in wie vielen der 324 Simulationsläufe pro Netzwerk dies zutrifft. Das mittlere Potenzial errechnet sich aus der Differenz der Kostensumme von $OZ = n$ und dem Gesamtoptimum, bezogen auf die Kosten von $OZ = n$. Das Gesamtpotenzial gibt den Abstand der traditionellen Planung ($OZ = n$) vom Gesamtoptimum über alle realisierbaren Pläne an (z.B. UN3LIN: $2,40\% = 3,86\% * 202/324$). Bei den hier verwendeten Daten beträgt das Gesamtpotenzial 2,73% (obere Hälfte von Tabelle 6). Hinzu kommt noch das hier nicht quantifizierbare Potenzial durch ungültige Pläne, die im Rahmen der traditionellen Planung bei 12 Simulationsdurchläufen auftraten.

Tabelle 5 Netzwerke für die Simulationen.

Eigenschaft	UN3LIN	UN3KON	UN3ALG	UN6LIN	UN6KON	UN6ALG
Firmenzahl	3	3	3	6	6	6
Strukturart	linear	konvergierend	allgemein	linear	konvergierend	allgemein
Externe Struktur (Materialflüsse zwischen den Firmen)						
Gesamtzahl Produktionseinheiten	10	11	12	18	22	23

Eine Verbesserung wird hier „erreicht“ wenn mindestens ein $OZ < n$ ein besseres Gesamtergebnis über alle Firmen erzielt als $OZ = n$. Die Fallzahl wird hier in Bezug gesetzt zu der Fallzahl mit vorhandenem Potenzial. Die mittlere Verbesserung gibt für die Fälle mit Verbesserung den durchschnittlichen Kostenvorteil der

besten Lösung ($OZ < n$) gegenüber $OZ = n$ an. Der Gesamtvorteil ergibt sich aus dem gewichteten Mittelwert der Fälle mit Verbesserung (z.B. bei UN3LIN 4,14% in 134 Fällen) und der Fälle ohne Verbesserung (UN3LIN: 0% in 190 Fällen). Die Potenzialausschöpfung wird durch Division des erreichten Gesamtvorteils durch das jeweilige Gesamtpotenzial bestimmt.

Die zentrale Frage, welche durchschnittliche Ersparnis die MVOZ bewirken kann, ist daher mit 1,75% zu beantworten. Dieser auf den ersten Blick geringe Prozentsatz bezieht sich auf die Summe der Lagerhaltungs-, Rüst- und Überstundenkosten und kann daher bedeutende Kostensenkungen beinhalten. Der Wert von 1,75% ist weiterhin in Relation zum in den Simulationsdaten vorhandenen Potenzial (Abstand zum Gesamtoptimum) von nur 2,73% zu sehen. Die MVOZ konnte im Durchschnitt somit 64,1% des vorhandenen Potenzials nutzen (Tabelle 6, untere Hälfte), obwohl sie nur sehr eingeschränkten Gebrauch von firmen-internen Informationen macht. Zusätzlich konnten alle 12 ungültigen Pläne durch die MVOZ beseitigt werden, d.h. die MVOZ resultierte in jedem ihrer Durchläufe in einem erfüllbaren Plan hinsichtlich der verfügbaren Kapazitäten der Firmen. Aus der Summe dieser beiden Effekte folgt der Erwartungswert der Kostensenkung durch die MVOZ. Wie bei allen Simulationen gilt natürlich auch hier, dass die erzielte Ersparnis nur für die in der Simulation verwendete Datenbasis gilt.

Tabelle 6 Simulationsergebnisse.

Netzwerk	UN3LIN	UN3KON	UN3ALG	UN6LIN	UN6KON	UN6ALG	Gesamt
Potenzial vorhanden?	202 von 324 (62%)	215 von 324 (66%)	226 von 324 (70%)	262 von 324 (81%)	248 von 324 (77%)	149 von 324 (46%)	1302 von 1944 (67%)
Mittleres Potenzial	3,86%	3,67%	3,41%	7,03%	3,82%	1,23%	3,84%
Gesamtpotenzial	2,40%	2,43%	2,38%	5,69%	2,90%	0,56%	2,73%
Verbesserung erreicht?	134 von 202 (66%)	85 von 215 (40%)	53 von 226 (23%)	210 von 262 (80%)	170 von 248 (69%)	52 von 149 (35%)	704 von 1302 (54%)
Mittlere Verbesserung	4,14%	3,86%	4,23%	7,05%	4,44%	1,58%	4,22%
Gesamtvorteil	1,71%	1,00%	0,69%	4,57%	2,27%	0,25%	1,75%
Potenzialausschöpfung	71,3%	41,0%	29,1%	80,4%	78,2%	44,1%	64,1%

4 Zusammenfassung und Ausblick

Auf dem Gebiet der unternehmensübergreifenden Produktionsplanung gibt es bereits zahlreiche Ansätze, die sich der Ausschöpfung eines vorhandenen Kostensenkungspotenzials widmen. Wie jedoch gezeigt wurde, fehlt es bislang besonders an solchen Konzepten, die für mehr als zwei Netzwerkstufen geeignet sind und die Umsetzbarkeit der jeweils propagierten Methode betonen. Dazu gehört insbesondere die Wahrung der Interessen aller beteiligten Unternehmen. Mit der MVOZ wurde nun versucht, diesem Anliegen zu entsprechen – selbst wenn dadurch auf einen Teil der theoretisch möglichen Kostensenkung verzichtet werden musste.

Zu den Stärken der MVOZ gehört an erster Stelle die Achtung der Interessen der beteiligten Firmen. Sie bewahrt nicht nur in jedem Verfahrensschritt die Selbstständigkeit der einzelnen Netzwerkmitglieder, sondern verzichtet auch auf die Weiterleitung von kritischen Informationen an andere Firmen. Aus dieser Sparsamkeit der MVOZ im Bereich Informationsweitergabe ergibt sich eine zweite Stärke: Da kaum Informationen ausgetauscht werden, haben die Unternehmen weder sichere Ansatzpunkte, um die Planung zum eigenen Vorteil zu manipulieren, noch genug Kenntnisse über den Gewinnanteil anderer Firmen, um sich unfair behandelt zu fühlen. Weitere Stärken des Verfahrens sind die beliebige Netzwerkgröße und -form sowie ihr sehr einfacher Ablauf und ihre leichte Verständlichkeit – ein wichtiger Vorteil im zeitkritischen Alltag. Ordnet man die MVOZ in die Tabelle mit den Verfahren mit dynamischem Bedarfsmodell aus Kapitel 1 ein, dann lassen sich die Vorteile der MVOZ im Vergleich zu den bisherigen Ansätzen anhand der in Tabelle 7 gegebenen Kriterien erkennen.

Tabelle 7 Eigenschaften der Ansätze mit dynamischem Bedarfsverlauf inkl. MVOZ.

Modell	Planungskonzept	Informationsstand	Gewinnaufteilung	Anfälligkeit für Opportunismus	Netzwerkgröße
Ertogral/Wu [11]	sukzessiv (mit Zentrale)	gering	fixe Formel	hoch	unbegrenzt
Zimmer [33]	sukzessiv	mittel	flexible Verträge	mittel	1:1
Dudek [10]	sukzessiv	gering	verschiedene Formeln	je nach Formel mittel bis hoch	$m : m$
Pibernik/Sucky [26]	sukzessiv	1) sehr gering 2) mittel	1) Verhandlung 2) automatisch	1) sehr gering 2) mittel	1:1
MVOZ	sukzessiv	gering bis sehr gering	Verhandlung	sehr gering	unbegrenzt

Als Schwäche des Ansatzes mit variablen Optimierungszentren kann die Voraussetzung der Existenz eines eindeutigen Netzwerkes gesehen werden, das über einen gewissen Zeitraum hinweg stabil ist. Den an der MVOZ beteiligten Unternehmen

stehen zwar trotzdem andere, gleichzeitige Geschäftsbeziehungen offen, sie sollten jedoch alle darin übereinstimmen, dass das durch die MVOZ behandelte Netzwerk und dessen Produktions- und Lieferketten eine zentrale Rolle einnehmen. Andernfalls lässt sich der mit der MVOZ verbundene Koordinationsaufwand kaum rechtfertigen. Diese Eindeutigkeit des MVOZ-Netzwerks ist ein potenzieller Schwachpunkt der Methode, wenn einige Firmen verschiedene als gleichwertig empfundene Geschäftsbeziehungen in verschiedenen Netzwerken unterhalten. Hier könnten zukünftige Arbeiten ansetzen und Modelle für eine Multi-Netzwerk-Koordination entwerfen, um die Mehrfacheinbindung bestimmter Firmen explizit berücksichtigen zu können.

Literaturverzeichnis

1. Agrawal, A.K., Raju, D.A.: Improved joint economic lot size model for a purchaser and a vendor. In: Khan, M.K., Wright, C.S., Vhalley, R., Abdul-Hamid, Y.T. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing Processes, Systems, and Technologies (AMPST 96)*. Ipswich Book Company, Suffolk (UK) (1996) 579–587
2. Banerjee, A.: A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. In: *Decision Sciences* 17(3) (1986) 292–311
3. Banerjee, A.: On “A quantity discount pricing model to increase vendor profits”. In: *Management Science* 32(11) (1986) 1513–1517
4. Barbuceanu, M.; Fox, M.S.: The information agent: an infrastructure agent supporting collaborative enterprise architectures. In: *Third Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, Morantown, West Virginia. IEEE Computer Science Press (1994) 112–116
5. Bogaschewsky, R., Müller, H., Rollberg, R.: Kostenorientierte Optimierung logistischer Zulieferer-Abnehmersysteme. In: *Logistik Management* 1(2) (1999) 133–145
6. Brandenburger, A.M., Nalebuff, B.J.: *Co-opetition*. Doubleday Business, New York (1996)
7. Buscher, U.: *Kostenorientiertes Logistikmanagement in Metalogistiksystemen*. Gabler Verlag, Wiesbaden (2003)
8. Chatterjee, A.K., Ravi, R.: Joint economic lot-size model with delivery in sub-batches. In: *Opsearch (Journal of the Operational Research Society of India)* 28(2) (1991) 118–124
9. Corbett, C.J., de Groote, X.: A supplier’s optimal quantity discount policy under asymmetric information. In: *Management Science* 47(7) (2000) 881–893
10. Dudek, G.: *Collaborative planning in supply chains – A negotiation-based approach*. Springer, Berlin (2004)
11. Ertogral, K., Wu, S.D.: Auction-theoretic coordination of production planning in the supply chain. In: *IIE Transactions* 32 (2000) 931–940
12. Fees, E., Schumacher, C.: Zwischenbetriebliche Kooperationen. In: Jost, P.-J. (Hrsg.): *Spieltheorie in der BWL*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart (2001) 287–305
13. Fox, M.S.; Barbuceanu, M.; Teigen, R.: Agent-oriented supply-chain management, In: *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 12 (2000) 165-188
14. Francois, P.: *Flexible Losgrößenplanung in Produktion und Beschaffung*. Physica-Verlag, Heidelberg (2000)
15. Frey, D., Woelk, P.O.; Stockheim, T.; Zimmermann, R.: Integrated multi-agent-based supply chain management, In: *IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE-2003)*, Linz, Austria. (2003)
16. Goyal, S.K.: An integrated inventory model for a single supplier – single customer problem. In: *International Journal of Production Research* 15(1) (1976) 107–111

17. Goyal, S.K.: A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor: A comment. In: *Decision Sciences* 19(1) (1988) 236–241
18. Hofmann, C.: *Interdependente Losgrößenplanung in Logistiksystemen*. M & P Verlag für Wissenschaft und Forschung, Stuttgart (1995)
19. Hofmann, C.: *Interdependente Preis- und Beschaffungspolitik in Logistiksystemen*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft (ZFB)* 68(7) (1998) 745–764
20. Joglekar, P.N.: Comments on “A quantity discount pricing model to increase vendor profits”. In: *Management Science* 34(11) (1988) 1391–1398
21. Lal, R., Staelin, R.: An approach for developing an optimal discount pricing policy. In: *Management Science* 30(12) (1984) 1524–1539
22. Landeros, R., Lyth, D.M.: Economic-lot-size models for cooperative inter-organizational relationships. In: *Journal of Business Logistics* 10(2) (1989) 146–158
23. Lee, H.L., Rosenblatt, M.J.: A generalized quantity discount pricing model to increase supplier's profits. In: *Management Science* 32(9) (1986) 1177–1185
24. Monahan, J.P.: A quantity discount pricing model to increase vendor profits. In: *Management Science* 30(6) (1984) 720–726
25. Muthoo, A.: *Bargaining Theory with Applications*. Cambridge University Press (1999)
26. Pibernik, R., Sucky, E.: *Verhandlungsbasiertes Master Planning in Supply Chains*. In: *Die Betriebswirtschaft*, Heft 1/2008 (2008) 85–111
27. Roth, A. E.: Bargaining experiments. In: Kagel, J. W., Roth, A. E. (Hrsg.): *Handbook of experimental economics*. University Press, Princeton. (1995) 253–348
28. Sadeh, N.; Hildum, D.; Tseng, A.: MASCOT: An agent-based architecture for dynamic supply chain creation and coordination in the internet economy. *Production Planning and Control* 12(3) (2001) 212–223
29. Sucky, E.: *Koordination in Supply Chains – Spieltheoretische Ansätze zur Ermittlung integrierter Bestell- und Produktionspolitiken*. DUV, Wiesbaden (2004)
30. Tempelmeier, H.: *Material-Logistik – Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen*. 6. Auflage, Springer, Berlin (2006)
31. Toporowski, W.: *Unternehmensübergreifende Optimierung der Bestellpolitik – das JELS-Modell mit einem Intermediär*. In: *Schmalenbachs Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung (Zfbf)* 51 (1999) 963–989
32. Zäpfel, G., Strack, G.: *Heterarchische Plankoordination von Liefernetzwerken durch ein agentenbasiertes Modell*. In: Jacquemin, M., Pibernik, R., Sucky, E. (Hrsg.): *Quantitative Methoden der Logistik und des Supply Chain Managements*, Dr. Kovač (2006) 41–64
33. Zimmer, K.: *Koordination im Supply Chain Management: Ein hierarchischer Ansatz zur Steuerung der unternehmensübergreifenden Planung*. DUV, Wiesbaden (2001)

Dynamische Losgrößenplanung mit Wiederaufarbeitungs- und Entsorgungsoptionen

Christian Schwarz, Udo Buscher und Steffen Rudert

Zusammenfassung Dieser Beitrag erweitert ein in [12] entwickeltes dynamisch-diskretes deterministisches Losgrößenproblem unter Berücksichtigung wiederaufarbeitbarer Rückläufe. Hierfür besteht neben der Option der Wiederaufarbeitung und Lagerung nunmehr noch die Alternative der Verschrottung. Der hier vorgeschlagene Algorithmus weist keinen Anstieg der Komplexität auf und verbleibt bei $\mathcal{O}(T^4)$, obwohl sich der Anwendungsbereich des Modells durch die Generalisierung deutlich ausweitet.

1 Einleitung

Dynamische Losgrößenplanung fand aufgrund der Praxisrelevanz in der Literatur bis dato weitreichende Beachtung. Aber für dynamische Situationen der Kreislaufwirtschaft besteht immer noch ein großer Forschungsbedarf [5, 4].¹ Aus diesem Grund wird hier eine mögliche Ausprägung derartiger Probleme aufgegriffen und ein effizienter Lösungsalgorithmus vorgeschlagen.

In der Praxis treten Stoffkreisläufe dort auf, wo für Hersteller ein Zwang besteht, Altprodukte nach Gebrauch durch den Kunden zurückzunehmen oder aber wo die Verwertung abgenutzter Güter Wettbewerbsvorteile bedeutet. Ersteres lässt sich unter anderem bei Automobilen und Elektrogeräten und letzteres zum Beispiel bei Automobilersatzteilen beobachten. In den vergangenen Jahrzehnten haben sowohl der gesetzliche Druck als auch das Umweltinteresse der Kunden und die Anschaffungskosten für Rohstoffe stark zugenommen. Deshalb erweist sich die Integration

Christian Schwarz · Udo Buscher · Steffen Rudert
Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Industrielles Management, Technische Universität Dresden, DEUTSCHLAND
E-mail: christian.schwarz@tu-dresden.de, udo.buscher@tu-dresden.de, steffenrudert@gmx.de

¹ Vgl. auch den aktuellen Literaturüberblick in [7].

von Verwertungsaktivitäten der eigenen Produkte in die Fertigungsprozesse trotz der deutlich schwierigeren Planungssituation zusehends als attraktiv. Die Verknappung von Ressourcen sorgt für eine Beibehaltung dieses Trends und für einen auch in der Zukunft steigenden Bedarf der Unternehmen an Entscheidungshilfen.

Nach [13] sind derzeitige verschiedene Verwertungsformen bekannt. Das umfasst Reparatur, Überholung, Wiederaufarbeitung, Verwendung der Einzelteile und Recycling. So wie der Großteil der relevanten Literatur fokussiert dieser Beitrag auf die Wiederaufarbeitung, welche die Altprodukte in einen „so gut wie neu“-Zustand versetzt. Als Grund hierfür mag die in [3] aufgezeigte hohe Energie- und Materialeffizienz dieser Alternative gelten. Die „so gut wie neu“-Eigenschaft beinhaltet nicht nur eine zu neuproduzierten Gütern gleichwertige Leistung des wiederaufgearbeiteten Produkts, sondern auch identische Garantie- und Gewährleistungsmodalitäten, was deren Unterscheidung erübrigt.

Zur Modellierung dynamischer Probleme ließe sich neben dem hier gewählten zeitdiskreten auch der zeitstetige Ansatz heranziehen. Nach [10, S. 127] treten zeitstetige Situationen in der Realität allerdings nicht auf, lassen sich aber meist einfacher analysieren. Um eine größtmögliche Praxisnähe zu gewährleisten, priorisiert der Beitrag die diskrete Aufteilung des Planungshorizonts in Perioden. Für die Ermittlung der optimalen Lösung der dabei entstehenden gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsprobleme existieren bereits Standardverfahren wie zum Beispiel Branch & Bound. Da diese jedoch keine effizienten Algorithmen darstellen, fokussiert die einschlägige Literatur auf die Erforschung problemspezifischer effizienter Verfahren. Dieser Strategie schließt sich der vorliegende Beitrag an. Gleiches gilt in der linearen Optimierung für den Standardalgorithmus - den Simplexalgorithmus [14].

Das hier behandelte Modell erweitert eine in [12] diskutierte Planungssituation, bei der in jedem Fall alle eingehenden Rückläufe wiederaufzuarbeiten sind. Diese Annahme schränkt die Anwendung des dafür entworfenen Algorithmus in der Praxis ein. Eine Wiederaufarbeitung von Altprodukten setzt deren Absatzmöglichkeit am Markt voraus, was sich besonders am Ende des Lebenszyklus als problematisch erweisen kann. Aus diesem Grund bemerken Teunter et al. [12, S. 4380], dass die von ihnen untersuchte Problemstellung keine adäquate Modellierung für Situationen darstellt, bei denen Altprodukte am Ende des Planungshorizonts zu entsorgen sind. Um die Einsatzmöglichkeiten des Modells auf diese Gegebenheiten auszuweiten, stehen Untersuchungen bezüglich der Integration einer Schrottoption für zurückgekehrte Altprodukte im Fokus dieses Beitrags.

Der Aufbau dieser Arbeit gestaltet sich wie folgt: Nach der Vorstellung des Modells und der Parameter stehen Eigenschaften der optimalen Strategie im Vordergrund, die eine Eingrenzung des Lösungsraums bewirken. Diese Erkenntnisse führen schlussendlich zur Aufstellung eines effizienten Algorithmus. Der Aufsatz schließt mit weiterführenden Gedanken im letzten Abschnitt.

2 Modellierung und dynamisches Programm

Dieser Beitrag betrachtet ein dynamisches Losgrößenproblem mit wiederaufarbeitbaren Rückflüssen, die vom Markt in Periode t mit der Menge $u(t)$ zurückkehren und vom Hersteller entgegenezunehmen sind. Wie häufig in der Literatur dargestellt, bringt der Wiederaufarbeitungsprozess vom Kunden zurückgegebene Altprodukte in einen verkaufsfähigen Zustand zurück. Diese Maßnahme gilt als so perfekt, dass der Kunde nicht in der Lage ist, neuproduzierte und wiederaufgearbeitete Produkte zu unterscheiden. Demnach verkörpern derartig gefertigte Güter perfekte Substitute und der anstehende Bedarf $d(t)$ kann gleichsam mit beiden Produkttypen ohne Unterschiede befriedigt werden. Neben der Wiederaufarbeitung steht es dem Akteur jedoch auch frei, zurückgekehrte Altprodukte zu entsorgen oder zu lagern. Abbildung 1 verdeutlicht die sich daraus ergebende Planungssituation.

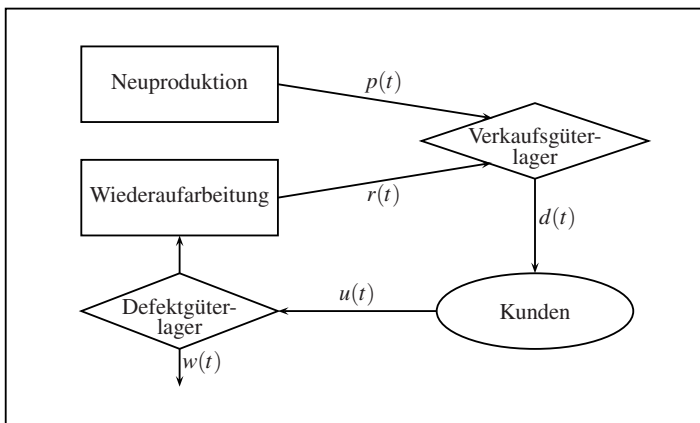


Abb. 1 Die Planungssituation.

Für weitere Untersuchungen ist die Einführung von Variablen notwendig, siehe Tabelle 1.

Im vorliegenden Beitrag fallen neben Kosten der Produktion, Wiederaufarbeitung, Entsorgung und Lagerhaltung auch gemeinsame Rüstkosten an. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Los komplett neu produziert, komplett wiederaufgearbeitet oder kombiniert gefertigt wird. Es entstehen in jedem Falle nur einmalig Rüstkosten der Höhe R . Derartige Planungssituationen treten nach [12] auf, wenn wiederaufzuarbeitende und neuzuproduzierende Güter identische Arbeitsschritte erfordern, wie es zum Beispiel bei der Fertigung von Kugellagern [1], Automaten [11] und anderen Produkten vorkommt.

Der Planungszeitraum T sei in gleich große Perioden unterteilt, die den Index t erhalten. Bei der praktischen Umsetzung können diese Perioden beispielsweise einen Monat, eine Woche, einen Tag oder eine frei definierte Zeitspanne umfassen. Wie in [2, S. 168] diskutiert, kann sich dies in der Praxis von Fall zu Fall unterschei-

Tabelle 1 Kostenparameter für das Zahlenbeispiel.

Variable	Erklärung
c_p	Produktionskosten pro Mengeneinheit [ME]
c_r	Wiederaufarbeitungskosten pro ME
c_w	Entsorgungskosten pro ME
$d(t)$	Bedarfsmenge in Periode t
h_v	Lagerhaltungskostensatz für verkäufliche Produkte pro ME pro Periode
h_u	Lagerhaltungskostensatz für Altprodukte pro ME pro Periode
$L_u(t)$	Lagerbestand an Altprodukten am Ende der Periode t
$L_v(t)$	Lagerbestand an verkäuflichen Gütern am Ende der Periode t
$p(t)$	Produktionsmenge in Periode t
$r(t)$	Wiederaufarbeitungsmenge in Periode t
R	Rüstkosten
t	Zeitindex
T	letzte Planungsperiode / Planungshorizont
$u(t)$	Rücklaufmenge an Altprodukten in Periode t
$w(t)$	Schrottmenge in Periode t

den. Innerhalb einer Periode treten die Ereignisse in folgender Reihenfolge auf. Die Rückläufe gehen im dafür vorgesehenen Lager ein. Nun findet die Produktion und Wiederaufarbeitung ohne jegliche zeitliche Verzögerung statt. Daran anschließend verlässt die nachgefragte Menge das Lager für verkäufliche Güter. Schlussendlich ist noch die Bewertung der Lagerbestände mit den entsprechenden Kostensätzen durchzuführen. Im gesamten Modell liegen deterministische Daten vor.

Bezüglich der Kostensätze geht dieser Beitrag entsprechend [6] und [12] von mengen- und zeitunabhängigen Parametern aus. Während die Entkoppelung von der Menge ohnehin aus Vereinfachungsgründen gebräuchlich ist, existieren Publikationen, die von der zweiten Annahme abweichen. Die hier gewählte Modellierung leitet sich aus praktischen Erwägungen ab. Verschiedene Kostensätze von einem Tag zum anderen oder gar von Stunde zu Stunde dürften sehr selten auftreten. Weiterhin sind im Folgenden keine Fehlmengen zugelassen. Ferner gelte $L_v(0) = L_v(T) = L_u(0) = L_u(T) = 0$. Da der hier vorgeschlagene Algorithmus problemlos praktisch relevante Anfangs- und Endbestände behandeln kann, stellt dies keine Beschränkung der Allgemeingültigkeit dar. Es erleichtert jedoch die Erläuterungen deutlich.

Das Planungsproblem ergibt sich nunmehr daraus, in jeder Periode die Mengen der Produktion, Wiederaufarbeitung und der Entsorgung so festzulegen, dass die Gesamtkosten des Planungshorizonts ein Minimum einnehmen. Dabei spielen noch

aus Entscheidungssicht mittelbar und aus Kostensicht unmittelbar aufgebaute Lagerbestände eine große Rolle.

Entsprechend dieser Ausführungen lässt sich das betriebswirtschaftliche Problem als dynamisches Programm formulieren.

$$\sum_{t=1}^T \left(\theta(t) \cdot R + h_v \cdot L_V(t) + h_u \cdot L_u(t) + c_p \cdot p(t) + c_r \cdot r(t) + c_w \cdot w(t) \right) \longrightarrow Min \quad (1)$$

$$\text{u.d.N.} \quad L_u(t) = L_u(t-1) + u(t) - r(t) - w(t) \quad (2)$$

$$L_V(t) = L_V(t-1) + p(t) + r(t) - d(t) \quad (3)$$

$$L_V(0) = L_u(0) = L_V(T) = L_u(T) = 0 \quad (4)$$

$$p(t) + r(t) \leq \theta(t) \cdot \sum_{m=t}^T d(m) \quad (5)$$

$$L_V(t), L_u(t), p(t), r(t), w(t) \geq 0 \quad (6)$$

$$\theta(t) \in \{0, 1\} \quad \forall t \quad (7)$$

Für das Programm gelte $c_p, c_r, c_w, h_v, h_u > 0$. Eine weitere praktische Annahme verkörpert

$$h_v > h_u \quad (8)$$

Dies resultiert einerseits aus der Wertsteigerung mittels Wiederaufarbeitung ([9] und [12]) und andererseits aus der vorsichtigeren Behandlungsweise verkäuflicher Produkte [6].

Weiterhin sollte sichergestellt sein, dass die Wiederaufarbeitung die kostengünstigere Fertigungsalternative darstellt. Andernfalls vereinfacht sich das Optimierungsproblem zur Produktionslosgrößenplanung ohne Wiederaufarbeitung. Wie schon in [6], [8] und [9] gewährleistet das Bedingung

$$c_p + c_w > c_r \quad (9)$$

Zunächst verfolgt der Beitrag aus Vereinfachungsgründen die Lösung des Spezialfalls $c_p = c_r$. Hierdurch erweisen sich anfallende Fertigungskosten als entscheidungsimmun und bedürfen keiner expliziten Betrachtung. Abschnitt 5 hebt diese Einschränkung auf und erläutert sich daraus ergebende Anpassungen der Lemmata und des Lösungsalgorithmus.

3 Eigenschaften der optimalen Strategie

Die optimale Lösung für Problem (1) - (7) zeichnet sich durch verschiedene Merkmale aus. Einige davon gleichen denen des Spezialfalls aus [12] und seien hier genannt.

Lemma 1 *Jede optimale Lösung erfüllt die Null-Lagerbestandsbedingung für das Lager der verkäuflichen Güter: Die Rüstung in Periode t kommt nur in Betracht, wenn das Lager der verkäuflichen Güter in der unmittelbar davorliegenden Periode $t - 1$ geräumt wird. Es gilt somit*

$$L_V(t-1) \cdot \theta(t) = 0 \quad \forall t. \quad (10)$$

Lemma 2 *In einem optimalen Programm wird zum Zeitpunkt k entweder nichts oder nur die Summe der vollständigen Bedarfe ab k produziert und/oder wiederaufgearbeitet. Das Fertigen von Teilbedarfen ist unzulässig. Es gilt somit für alle k und l mit $(1 \leq k \leq l \leq T)$*

$$p(k) + r(k) = \begin{cases} 0 & \text{für } L_V(k-1) > 0 \\ \sum_{t=k}^l d(t) & \text{für } L_V(k-1) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Lemma 3 *Bei Umsetzung der optimalen Strategie wird nur dann produziert, wenn das Lager der defekten Güter geräumt ist, das heißt*

$$L_u(t) \cdot p(t) = 0 \quad \forall t. \quad (12)$$

Die nun geltende Schrottoption berührt die grundlegenden Gedanken der Beweise aus [12] nicht.

Als Zustandsvariable und damit als Basis für den effizienten Algorithmus des Spezialfalls fungieren die möglichen Bestände des Lagers für Altprodukte. Die Menge MU_k^l enthält dabei alle möglichen Lagerbestände an defekten Gütern in Periode l , wenn in Periode k (mit $1 \leq k \leq l$) letztmalig gefertigt wurde. Die Menge MU^l hingegen umfasst alle möglichen Lagerbestände $L_u(l)$, unabhängig davon wann letztmalig eine Losauflage erfolgte. Demzufolge repräsentiert MU_k^l stets eine Teilmenge von MU^l . Mit den Ausdrücken

$$MU^l = \bigcup_{k=1}^l MU_k^l \quad (13)$$

$$MU_k^l = \bigcup_{e_m \in MU^{k-1}} \left[\left(e_m + u(k) - \sum_{t=k}^l d(t) \right)^+ + \sum_{t=k+1}^l u(t) \right] \quad (14)$$

lassen sich alle Elemente bestimmen. Das hochgestellte $+$ symbolisiert die Nichtnegativität, das heißt: sollte in der runden Klammer ein negativer Wert entstehen, so ist eine Null zurückzugeben.

Die Entsorgung eröffnet nunmehr die Möglichkeit zur direkten Steuerung des Lagerbestands der Altprodukte. Dadurch steigt die Menge der erreichbaren Werte von $L_u(l)$ und somit die Zahl der Elemente von MU^l beziehungsweise MU_k^l im Vergleich zum bisher verwendeten Lösungsansatz für den Spezialfall aus [12] stark an. Sowohl bei der Herleitung des Algorithmus als auch bei der Komplexitätsbetrachtung spielte das Wachstum der Menge MU^l eine zentrale Rolle. Mithin wird klar, dass die Lemmata 1 bis 3 nicht genügen können, um einen polynomialen Algorithmus für das hier untersuchte generalisierte Problem zu entwickeln, da sich die bislang definierte Menge MU^l als alleinige Grundlage ausschließt. Vielmehr bedarf es noch einer Einschränkung der infrage kommenden Schrottmengen beziehungsweise -zeitpunkte. Dieser Thematik widmen sich die nun folgenden Lemmata.

Lemma 4 *Bei Umsetzung der optimalen Strategie wird nur dann produziert, wenn in dieser Periode keine Entsorgung stattfindet, das heißt:*

$$w(t) \cdot p(t) = 0 \quad \forall t. \quad (15)$$

Nachdem Lemma 4 eine Verbindung zu den anderen Entscheidungsvariablen knüpft, sollen mit den beiden abschließenden Aussagen spezielle Einschränkungen bezüglich der reinen Entsorgungsstrategie entwickelt werden. Diese Lemmata beziehen sich einerseits allgemein auf den Entsorgungszeitpunkt und lassen andererseits Rückschlüsse auf die zu verschrottende Menge $w(t)$ zu.

Lemma 5 *Gebrauchte Güter, die im verbleibenden Zeitraum nicht mehr benötigt werden, sind unverzüglich zu entsorgen.*

Eine Begrenzung der Lagerdauer für defekte Güter, was Ziel des nächsten Lemmas darstellt, ermöglicht die Festlegung der Schrottmenge $w(t)$. Alle in diesem Zeitraum nicht wiederaufarbeitbaren Güter sind unverzüglich zu verschrotten.

Lemma 6 *Das Lagern von defekten Gütern vom Zeitpunkt des Eintreffens bis zu ihrer Wiederaufarbeitung darf maximal*

$$\Lambda = \left\lfloor \frac{c_w}{h_u} \right\rfloor \quad (16)$$

Perioden in Anspruch nehmen.

Im Folgenden gelte die Annahme

$$\Lambda \geq T. \quad (17)$$

Danach ist es auf jeden Fall lohnenswert, die Altprodukte bei Bedarf von der ersten Periode bis ans Ende des Planungshorizonts zu lagern. Besonders bei hochwertigen Gütern stellt eher ein fehlender Markt als das Vorliegen von Saisonalität den entscheidenden Entsorgungsgrund dar. Da ein hoher Wert des Produkts eine Grundvoraussetzung für Wiederaufarbeitungsaktivitäten bildet, decken die folgenden Ergebnisse die in der Praxis auftretenden Situationen weitestgehend ab. Die identifizierten Eigenschaften erlauben nun den Entwurf eines effizienten Algorithmus.

4 Der Lösungsalgorithmus

Beim Spezialfall aus [12] repräsentieren die Elemente von MU_k^l und MU^l den Zustandsbereich und damit die Basis für den Algorithmus. Aufgrund der Integration einer Entsorgungsoption geht der Zustandsbereich des hier behandelten generalisierten Problems weit darüber hinaus. Mit Hilfe der Lemmata 4 und 6 lässt sich dieser wieder einschränken. Als erstes seien dazu zwei weitere Mengen eingeführt. GU_l^m umfasst die verschiedenen Quantitäten an benötigten defekten Gütern am Anfang der Periode l , wenn in l für m mitgefertigt wird und von l bis zum Ende des Planungshorizonts keine Neuproduktion stattfinden soll. Im Unterschied dazu spielt bei der Menge GU_l die Periode m keine Rolle. Menge GU_l enthält somit alle Fehlbeträge an Altprodukten, um ab l eine reine Wiederaufarbeitungspolitik umsetzen zu können. Daher ist GU_l^m stets eine Teilmenge von GU_l . Zur Berechnung der gewünschten Größen von GU_l^m und GU_l können ähnlich wie bei MU_k^l und MU^l rekursive Formulierungen genutzt werden.

$$GU_l = \bigcup_{m=l}^T GU_l^m \quad (18)$$

$$GU_l^m = \bigcup_{e_g \in GU_{m+1}} \left[\left(\sum_{t=l}^m d(t) - u(l) \right) + \left(e_g - \sum_{t=l+1}^m u(t) \right)^+ \right]^+ \quad (19)$$

Die in [12] eingeführten Mengen MU^l beziehungsweise MU_k^l gehören weiterhin zum Lösungsraum. Ihre Elemente geben nun an, welche Lagerbestände $L_u(l)$ maximal, das heißt ohne jegliche Verschrottung, möglich sind und bilden den Ausgangspunkt zur Bestimmung der infrage kommenden $L_u(l)$ bei gegebenenfalls vorgenommener Verschrottung. All diese Werte fassen die Symbole MDU_k^l beziehungsweise MDU^l zusammen. Die Menge MDU_k^l beinhaltet damit alle den Lemmata 4 bis 6 genügenden möglichen Lagerbestände $L_u(l)$, wenn in k letztmalig vor l eine Losauflage geschieht. Entsprechend der zuvor verwendeten Notationen spielt bei MDU^l der letzte Rüstzeitpunkt keine Rolle.

MDU_k^l stellt damit eine Kombination aus MU_k^l und GU_{l+1} dar und berechnet sich mit

$$MDU_k^l = \bigcup \{e_g | e_g \leq \max e_m\} \cup \bigcup \{e_m | e_m \leq \max e_g\} \\ e_g \in GU_{l+1}; e_m \in MU_k^l. \quad (20)$$

Im ersten Teil der Gleichung erfolgt die Aufnahme aller Elemente von GU_{l+1} , die kleiner sind als das größte Element von MU_k^l , da dieser maximal mögliche Wert von $L_u(l)$ mittels Entsorgung auf die gewünschten Größen verringert werden muss. Der zweite Teil fügt die Elemente von MU_k^l hinzu, die den gewünschten maximalen Wert von $L_u(l)$ nicht erreichen. Hierbei erübrigt sich eine Verschrottung, da die spätere Wiederaufarbeitung deren Lagerung rechtfertigt, wenn die entsprechende Strategie, die zu diesem $\text{Max}\{e_g \in GU_{l+1}\}$ führt, Anwendung findet.

Die Obermenge MDU^l vereinigt erneut die Untermengen MDU_k^l . Es entsteht

$$MDU^l = \bigcup_{k=1}^l MDU_k^l. \quad (21)$$

Im Spezialfall aus [12] treten zwei Fälle bei den die Kosten beeinflussenden Ausgangslagerbeständen $L_u(k)$ auf. Es liegt entweder $L_u(k) = 0$ oder $L_u(k) > 0$ vor. Maßgebliche Komponenten von $L_u(k)$ sind der Lagerbestand am Anfang der Periode k , also $L_u(k-1)$ als ein Element von MU^{k-1} , und der Rückfluss $u(k)$. Weitere Differenzierungen erübrigen sich hier, da die Bestände des Altproduktlagers als nicht unmittelbar beeinflussbar angenommen werden und somit allesamt mögliche maximale Lagerbestände repräsentieren.

Nunmehr kommen aber auch Werte von $L_u(l)$ vor, die eventuell mittels Verschrottung Veränderungen erfuhren. Deswegen kann nun zusätzlich $L_u(l) < \sum_{t=k+1}^l u(t)$ entstehen. Ein weiteres Unterscheidungskriterium stellt die Herkunft der einzelnen Elemente e_d mit $e_d \in MDU_k^l$ und damit der Endzustände dar. Diese können laut Gleichung (20) aus den Untermengen GU_{l+1} oder MU_k^l stammen. Aber auch die Mengenzugehörigkeit der infrage kommenden Ausgangszustände j_o für jedes e_d sind von Belang, da möglicherweise $j_o = j_m \in MU^{k-1}$ oder $j_o = j_g \in GU_k$ gilt. Daraus ergeben sich für die Dynamische Optimierung typische und für die Rekursivität notwendige Kausalitäten zwischen den Ausgangs- und Endzuständen.

Zunächst stehen grundsätzliche Zusammenhänge der Vorgänger-Nachfolger-Beziehung der Zustände im Vordergrund. Es existieren vier Varianten:

I	$j_g \in GU_k$	\mapsto	$e_g \in GU_{l+1}$
II	$j_m \in MU^{k-1}$	\mapsto	$e_g \in GU_{l+1}$
III	$j_m \in MU^{k-1}$	\mapsto	$e_m \in MU_k^l$
IV	$j_g \in GU_k$	\mapsto	$e_m \in MU_k^l$

Bei den Fällen I und II genügen die Rückläufe, um den gewünschten Lagerbestand $L_u(l)$ zu erreichen. Jedoch unterscheiden sich dessen Vorgänger. Während in I ein gewünschter Bestand den Ausgangspunkt bildet, entsteht das Element e_g in II aus einem maximal möglichen $L_u(k-1)$. Bei den Varianten III und IV erlauben die Rückläufe lediglich einen maximal möglichen Bestand. Vorgänger können wiederum j_m und j_g sein. Allerdings ist Fall IV aufgrund Lemma 6 und Annahme (17) auszuschließen, wenn der Wert j_g durch Verschrottung zustande kommt. Denn hierbei wäre zu viel entsorgt worden. Tritt nämlich $e_m \in MU_k^l$ auf, so impliziert das nach Gleichung (20), dass der maximal mögliche Lagerbestand kleiner oder gleich dem gewünschten ist, was eine Verschrottung ausschließt. Diese Tatsache lässt sich zur Aufstellung eines Planungshorizont-Theorems nutzen. Ähnliches gilt bei III. Auch hier dürfen keine Schrottkosten anfallen.

Nach dieser ersten Unterteilung bleibt immer noch offen, welche Vorgänger jedes einzelne Element von MDU_k^l in der rekursiven Kostenfunktion hat. Diese Frage klärt sich im Folgenden für die Fälle I und II. Zunächst sei Möglichkeit I betrachtet, wobei gewünschte Lagerbestände sowohl den Vorgänger als auch den Nachfolger bilden.

Dabei werden alle Elemente in $e_g > \sum_{t=k+1}^l u(t)$ und $e_g \leq \sum_{t=k+1}^l u(t)$ unterschieden.

1. Fall

Gilt $e_g > \sum_{t=k+1}^l u(t)$, so muss der Bestand $L_u(k) > 0$ sein. Daraus lässt sich aufgrund des Lemmas 3 schließen, dass in k keine Produktion stattfindet und somit auch der Vorgänger dem gewünschten Lagerbestand entspricht, da keine Fehlmen- gen auftreten. Das gesuchte j_g berechnet sich also aus Ausdruck (19) mit

$$j_g = \left[e_g + \sum_{t=k}^l [d(t) - u(t)] \right]^+ . \quad (22)$$

Entsteht hierbei ein $j_g > 0$ so bedeutet dies, dass zu Beginn von k Altprodukte vorhanden sein sollten, weil die Rückläufe zwischen k und l allein nicht ausreichen, um den Bestand e_g zu erreichen. Da der gewünschte Lagerbestand j_g existieren muss, kommt es zu einer Lagerung von Rückläufen, die vor k ankamen, bis zur Pe- riode l . Deshalb ist die Entsorgung in diesem Zeitraum ausgeschlossen, wenn solch eine Datenkonstellation vorliegt. Andernfalls lässt sich die Schrottmenge solange reduzieren, bis $j_g = 0$ gilt. Die Funktion lautet

$$K_k^l(e_g) = K^{k-1}(j_g) + R + h_u \cdot \left[e_g(l-k+1) - \sum_{t=k+1}^l (t-k)u(t) \right] \\ + h_v \cdot \sum_{t=k+1}^l (t-k)d(t)$$

$$\text{für } \left(e_g \in GU_{l+1} | e_g > \sum_{t=k+1}^l u(t) \right) \\ \wedge \left(j_g \in GU_k | j_g = \left[e_g + \sum_{t=k}^l [d(t) - u(t)] \right]^+ > 0 \right). \quad (23)$$

Wenn die zweite Möglichkeit auftritt und der Ausdruck (22) $j_g = 0$ errechnet, impliziert das einen mindestens so großen Rückfluss $u(k)$, dass sowohl das Los $\sum_{t=k}^l d(t)$ aufgelegt als auch der Bestand e_g gebildet werden kann. Überschüssige Rückflüsse sind zu verschrotten. Wegen $e_g > \sum_{t=k+1}^l u(t)$ und Lemma 5 darf das abschließlich in Periode k geschehen. Das determiniert den Entsorgungszeitpunkt eindeutig. Die Schrottmenge $w(k)$ stellt die Differenz aus eintreffenden und benötigten Altprodukten dar. Somit errechnen sich die Kosten mit

$$K_k^l(e_g) = K^{k-1}(j_g) + R + h_u \cdot \left[e_g(l-k+1) - \sum_{t=k+1}^l (t-k)u(t) \right] \\ + h_v \cdot \sum_{t=k+1}^l (t-k)d(t) + c_w \cdot \left[\sum_{t=k}^l [u(t) - d(t)] - e_g \right]$$

$$\text{für } \left(e_g \in GU_{l+1} \mid e_g > \sum_{t=k+1}^l u(t) \right) \\ \wedge \left(j_g \in GU_k \mid j_g = \left[e_g + \sum_{t=k}^l [d(t) - u(t)] \right]^+ = 0 \right). \quad (24)$$

Damit schließt die Untersuchung zum ersten Fall mit $e_g > \sum_{t=k+1}^l u(t)$.

I. und II. Fall

Nun steht die Relation $e_g \leq \sum_{t=k+1}^l u(t)$ zur Diskussion. Dabei wird neben dem Fall I auch die zweite Vorgänger-Nachfolger-Beziehung, bei der ein maximal möglicher Bestand zu einem gewünschten führt, vollumfänglich betrachtet und abgeschlossen. Liegt $e_g \leq \sum_{t=k+1}^l u(t)$ vor, so genügt allein der Rückfluss zwischen $k+1$ und l , um den gewünschten Lagerbestand zu bilden. In den Vorperioden angekommene Altprodukte finden keine Verwendung nach l mehr, so dass diese Datenlage wegen Lemma 5 $L_u(k) = 0$ hervorbringt. Der gewünschte Bestand j_g bezieht sich somit lediglich auf die Daten der Periode k in der Form

$$j_g = \left[\sum_{t=k}^l d(t) - u(k) \right]^+. \quad (25)$$

Wie schon bei der Herleitung der Funktionen (23) und (24) separiert sich $j_g > 0$ und $j_g = 0$.

Aufgrund von Lemma 5 tritt bei $j_g > 0$ keine Verschrottung in Periode k auf. Liegt $e_g < \sum_{t=k+1}^l u(t)$ vor, ist die Entsorgung nach k obligatorisch. Im Gleichheitsfall entfällt sie. Ähnlich wie bei (24) beläuft sich die Schrottmenge auf die Differenz aus Ankommendem und Benötigtem, also auf $w = \sum_{t=k+1}^l u(t) - e_g$. Neben dieser Menge spielen nun auch die Schrottzeitpunkte eine Rolle. Die letzte Schrottperiode n zeichnet sich dadurch aus, dass die kumulierten Rückläufe erstmalig den Betrag w erreichen oder übersteigen. Der Ausdruck

$$n = \min \left[n \mid e_g \geq \sum_{t=n+1}^l u(t) \right] \quad (26)$$

legt den Zeitpunkt formal fest. Das bedeutet, dass in den vor n liegenden Perioden der Rücklauf vollständig entsorgt wird. In n direkt kann es sich jedoch unter Umständen nur um einen Bruchteil von $u(n)$ handeln, wenn (26) als Ungleichung erfüllt ist. In diesem Fall lagern erstmalig ab Periode n nach k aber vor l defekte Güter im dafür vorgesehenen Lager. Die erste Lagermenge $L_u(n)$ ergibt sich somit aus

$$\sum_{t=k+1}^n u(t) - w = e_g - \sum_{t=n+1}^l u(t). \quad (27)$$

Gilt für (26) der Gleichheitsfall, so resultiert daraus $L_u(n) = 0$, und $n + 1$ stellt die erste Lagerperiode dar. Bei dieser Datenkonstellation ist es möglich, den Fall II zu integrieren. Der Übergang von einem maximal möglichen zu einem gewünschten Lagerbestand kann nur durch die ausreichenden Rückflüsse zwischen $k + 1$ und l , das heißt bei $e_g \leq \sum_{t=k+1}^l u(t)$, realisiert werden. Dementsprechend kommen als Vorgänger von e_g nun auch alle $j_m \in MU^{k-1}$ infrage, die $j_m + u(k) \leq \sum_{t=k}^l d(t)$ erfüllen. Hierbei genügen die zur Verfügung stehenden Altprodukte, bestehend aus dem maximal möglichen Bestand j_m addiert mit dem Rückfluss in k , nicht oder gerade so, um das benötigte Los zu fertigen. Die genaue Größe und Mengenzugehörigkeit des Vorgängers und damit die eventuell entstehende und zu produzierende Fehlmenge spielt hierbei deshalb keine Rolle, weil $L_u(k) = 0$ vorliegt und der Bestand e_g ausschließlich aus Rückläufen nach k besteht. Daher kann das Element als Vorgänger gewählt werden, das bis $k - 1$ die minimalen Kosten verursacht. Die folgende Gleichung berücksichtigt diese Gedanken.

$$\begin{aligned}
 K_k^l(e_g) = & \left(\min_{\substack{j_m \in MU^{k-1} | j_m + u(k) \leq \sum_{t=k}^l d(t) \\ j_g \in GU_k | j_g = \sum_{t=k}^l d(t) - u(k) > 0}} \left[K^{k-1}(j_m), K^{k-1}(j_g) \right] \right) + R \\
 & + h_u \cdot \left[\left(e_g - \sum_{t=n+1}^l u(t) \right) (l - n + 1) + \sum_{t=n+1}^l (l + 1 - t) u(t) \right] \\
 & + h_v \cdot \sum_{t=k+1}^l (t - k) d(t) + c_w \cdot \left[\sum_{t=k+1}^l u(t) - e_g \right] \\
 \text{für } & \left(e_g \in GU_{l+1} | e_g \leq \sum_{t=k+1}^l u(t) \right) \\
 & \wedge \left(j_g \in GU_k | j_g = \left[\sum_{t=k}^l d(t) - u(k) \right]^+ > 0 \right) \quad (28)
 \end{aligned}$$

Ausdruck (28) berechnet die Kosten somit vollständig für Fall II, so dass sich weitere Untersuchungen bezüglich $j_m \mapsto e_g$ erübrigen. Im Gegensatz dazu erfordert der Fall I eine weitere Betrachtung.

Liefert nämlich der Ausdruck (25) den Wert $j_g = 0$, dann geht der Betrag des Überschusses in k über die Losgröße hinaus oder entspricht ihr. Deswegen kann eine Entsorgung in k nicht länger ausgeschlossen werden, wie es bei $j_g > 0$ der Fall war. Dies wirkt sich auf die Definitionen der Schrottmenge w , der letzten Schrotperiode n und der ersten Lagermenge aus. Bei allen dreien sind $u(k)$ und $\sum_{t=k}^l d(t)$ zu berücksichtigen. Bezüglich der Schrottmenge ergibt sich analog zu der von Gleichung (24) der Ausdruck $w = \sum_{t=k}^l [u(t) - d(t)] - e_g$. Darauf aufbauend definiert

$$n = \min \left[n \mid e_g \geq \sum_{t=n+1}^l u(t) \right] \tag{29}$$

die letzte Schrotperiode und schließlich

$$\sum_{t=k}^n u(t) - \sum_{t=k}^l d(t) - w = e_g - \sum_{t=n+1}^l u(t) \tag{30}$$

die erste Lagermenge. Zusammenfassend entsteht für diese Datenlage die folgende Kostenfunktion:

$$\begin{aligned}
 K_k^l(e_g) &= K^{k-1}(j_g) + R \\
 &+ h_u \cdot \left[\left(e_g - \sum_{t=n+1}^l u(t) \right) (l-n+1) + \sum_{t=n+1}^l (l+1-t)u(t) \right] \\
 &+ h_v \cdot \sum_{t=k+1}^l (t-k)d(t) + c_w \cdot \left[\sum_{t=k}^l [u(t) - d(t)] - e_g \right]
 \end{aligned}$$

für $\left(e_g \in GU_{l+1} \mid e_g \leq \sum_{t=k+1}^l u(t) \right)$

$$\wedge \left(j_g \in GU_k \mid j_g = \left[\sum_{t=k}^l d(t) - u(k) \right]^+ = 0 \right). \tag{31}$$

III. Fall

Beim Fall III stellt der Vorgänger eines maximal möglichen Bestands e_m ebenfalls einen maximal möglichen Bestand j_m dar. Wird durch Funktion (20) ein Bestand e_m in die Menge MDU_k^l integriert, so ist dieses Element sowohl Bestandteil von MDU_k^l als auch von MU_k^l . Auch hier lässt sich eine Unterscheidung in $e_m < \sum_{t=k+1}^l u(t)$ und $e_m = \sum_{t=k+1}^l u(t)$ treffen. Diese Aufspaltung war bereits Thema des Modells ohne Entsorgungsoption in [12]. Die da ermittelten Lösungen fügen sich hier mit ein, wobei zur Adaption an den Fall mit Entsorgungsoption die Elemente von j zu j_m und von e zu e_m abzuändern sind. Es entsteht

$$\begin{aligned}
 K_k^l(e_m) &= \left(\min_{j_m \in MU^{k-1} \mid j_m + u(k) \leq \sum_{t=k}^l d(t)} K^{k-1}(j_m) \right) + R \\
 &+ h_u \cdot \sum_{t=k+1}^l (l+1-t)u(t) + h_v \cdot \sum_{t=k+1}^l (t-k)d(t) \quad \text{für } e_m = \sum_{t=k+1}^l u(t) \tag{32}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_k^l(e_m) = & K^{k-1} \left(e_m + \sum_{t=k}^l [d(t) - u(t)] \right) \\
& + R + h_u \cdot \left[e_m(l-k+1) - \sum_{t=k+1}^l (t-k)u(t) \right] \\
& + h_v \cdot \sum_{t=k+1}^l (t-k)d(t) \quad \text{für } e_m \in MU_k^l \setminus \left[\sum_{t=k+1}^l u(t) \right]. \quad (33)
\end{aligned}$$

Damit schließen die Herleitungen der Kostenfunktionen. Für alle Elemente von MDU_k^l , die alle infrage kommenden Lagerbestände $L_u(l)$ repräsentieren, lassen sich die anfallenden Kosten eindeutig ermitteln. Bedingt durch die vorgenommenen Fallunterscheidungen existieren dazu sechs Funktionen.

Weiterführend müssen alle Kosten, die zum Lagerbestand e mit $e \in MDU^l$ führen, miteinander verglichen werden. Genau wie beim Modell ohne Entsorgungsoption existiert unter Umständen in jeder Untermenge MDU_k^l solch eine Größe. Die Funktion

$$K^l(e_d) = \min_{k \in \{1, \dots, l\} | e_d \in MDU_k^l} K_k^l(e_d) \quad \text{mit } e_d \in MDU^l \quad (34)$$

weist allen Elementen e_d einen eindeutigen Kostenwert zu und ermöglicht somit die rekursive Vorgehensweise für die folgenden Perioden. Eine weitere Reduktion der Zuordnungsdaten stellt

$$K^l = \min_{e_d \in MDU^l} K^l(e_d) \quad (35)$$

dar. Gleichung (35) verkörpert die minimal erreichbaren Kosten im Zeitraum $1 \leq t \leq l$ bei vernachlässigtem $L_u(l)$.

Damit liegen alle Berechnungsvorschriften vor. Der nun daraus abzuleitende Lösungsalgorithmus umfasst neun Schritte, wobei die Teile V bis IX das an die neue Planungssituation modifizierte Berechnungsprozedere aus dem Fall ohne Entsorgung integrieren. Speziell und vollständig neu sind die Berechnungen von I bis IV. Sie dienen ausschließlich der Ermittlung aller GU_l^m .

*** START DES ALGORITHMUS ***

- I. $GU_{T+1} = \{0\}$; $l = T$
- II. a. $m = l$
 - b. Bestimme GU_l^m mit (19).
 - c. Wenn $m = T$ dann gehe zu Schritt III, andernfalls $m = m + 1$ und weiter mit Schritt II (b).
- III. Berechne GU_l mit (19)
- IV. Wenn $l = 2$ dann gehe zu Schritt V, andernfalls $l = l - 1$ und weiter mit Schritt II.
- V. $MU^0 = \{0\}$; $MDU_0^0 = MDU^0 = \{0\}$; $K^0 = K^0(0) = 0$; $l = 1$

- VI. a. $k = 1$
 b. Bestimme MU_k^l mit (14).
 c. Berechne MDU_k^l mit (20).
 d. Ermittle $K_k^l(e_d)$ für alle Elemente von MDU_k^l mit (23), (24), (28), (31), (32) und (33).
 e. Wenn $k = l$ dann gehe zu Schritt VII, andernfalls $k = k + 1$ und weiter mit Schritt VI (b).
- VII. Berechne MU^l mit (13), MDU^l mit (21), $K^l(e_d)$ mit (34) und K^l mit (35).
- VIII. Wenn $l = T$ dann gehe zu Schritt IX, andernfalls $l = l + 1$ und weiter mit Schritt VI.
- IX. Die minimalen Kosten für den gesamten Planungshorizont K^T entsprechen K^l . Die optimalen Losgrößen ergeben sich nun aus den rückwärts zu ermittelnden Losauflageperioden.

*** ENDE DES ALGORITHMUS ***

Die Komplexität des Algorithmus bestimmt sich maßgeblich durch die Ordnung der Menge MDU_k^l . Diese setzt sich ihrerseits wegen (20) aus den Mengen MU_k^l und GU_{l+1} zusammen. Die Gesamtkomplexität des Algorithmus von $\mathcal{O}(T^4)$ resultiert aus der Aufwandsfunktion für GU_{l+1} mit $\frac{1}{2}[T - l]([T - l] - 1) + 1$ und der daraus resultierenden Ordnung von $\mathcal{O}(T^2)$ in Verbindung mit den Analysen in [12].

5 Weiterführende Erkenntnisse und Ausblick

Die wichtige Erweiterung des Aktionsraums um eine Entsorgungsmöglichkeit von Altprodukten entzieht dem Algorithmus des Spezialfalls die Grundlage. Der bislang abgeschlossene Zustandsbereich in Form der möglichen Lagerbestände $L_u(t)$ liegt nicht länger vor. Erst die Hinzunahme der Lemmata 4 bis 6 ermöglicht letztlich die entscheidende Begrenzung. Die Ermittlung des Algorithmus erwies sich zwar schwieriger als beim Fall ohne Entsorgung, der Aufwand des Verfahrens beläuft sich jedoch nach wie vor auf $\mathcal{O}(T^4)$. Somit führt die Generalisierung des Problems zu keiner Zunahme der theoretischen Komplexität beim Lösungsverfahren. Mithin sind die Algorithmen des Spezialfalls und der Verallgemeinerung bezüglich des Rechenaufwands als gleichwertig anzusehen, obwohl das Modell eine deutliche Ausweitung des Anwendungsbereichs in der Praxis darstellt.

Häufig ergeben sich durch den Abgleich der Mengen MU_k^l und GU_{l+1} zu MDU_k^l Vereinfachungen, die den Rechenaufwand bei verallgemeinerter Aufgabenstellung sogar unter den des Spezialfalls senken. Diese beruhen auf der Forderung $GU_{T+1} = 0$ und der gegenläufigen Entwicklung der Mengen MU_k^l und GU_{l+1} . Während sich MU_k^l mit wachsendem Zeitindex k ausdehnt, verkleinert sich GU_{l+1} mit fortschreitender Zeit. Damit kann der hier entwickelte Algorithmus als praktisch effizienter angesehen werden, als der des Spezialfalls.

Der entworfene Algorithmus hält eine einfache Erweiterung zur Integration von Produktions- und Wiederaufarbeitungskosten bereit. Lediglich Lemma 6 bedarf ei-

ner trivialen Anpassung. Bedingung (17) bleibt mit dem neuen Wert für Λ bestehen. Zur Bestimmung der bei jedem Zustand anfallenden minimalen Kosten nutzt das Verfahren die sechs Funktionen (23), (24), (28), (31), (32) und (33). Vier dieser Gleichungen bilden Fälle ab, bei denen eine reine Wiederaufarbeitung vorliegt. Entsprechend erweitern sich die Funktionen (23), (24), (31) und (33) um den Summanden

$$c_r \cdot \left[\sum_{t=k}^l d(t) \right].$$

Gleichung (32) deckt das Entstehen eines maximal möglichen Lagerbestands der Größe $\sum_{t=k+1}^l u(t)$ ab. Die Minimierungsvorschrift muss sich deshalb auch auf die mit variierendem j_m einhergehenden Fertigungskosten in der Form

$$\min_{j_m \in MU^{k-1} | j_m + u(k) \leq \sum_{t=k}^l d(t)} \left(K^{k-1}(j_m) + c_r \cdot \left[j_m + u(k) \right] + c_p \cdot \left[\sum_{t=k}^l d(t) - j_m - u(k) \right] \right) \quad (36)$$

erstrecken. Abschließend bleibt Kostenfunktion (28) zu betrachten. Als Vorgänger können sowohl Elemente von MU^{k-1} als auch aus GU_k auftreten. Bei $j_m \in MU^{k-1}$ ist ein gewisser Teil des Loses neuzuproduzieren, was bereits Ausdruck (36) abdeckt. Im Falle von $j_g \in GU_k$ erübrigt sich die Produktion und es fallen lediglich Wiederaufarbeitungskosten an. Zusammengefasst errechnet damit der Ausdruck

$$\min_{\substack{j_m \in MU^{k-1} | j_m + u(k) \leq \sum_{t=k}^l d(t) \\ j_g \in GU_k | j_g = \sum_{t=k}^l d(t) - u(k) > 0}} \left(K^{k-1}(j_m) + c_r \cdot \left[j_m + u(k) \right] + c_p \cdot \left[\sum_{t=k}^l d(t) - j_m - u(k) \right]; K^{k-1}(j_g) + c_r \cdot \left[\sum_{t=k}^l d(t) \right] \right) \quad (37)$$

die für diesen Zustand minimal anfallenden Vorgängerkosten. Alle anderen Komponenten und Abläufe lassen sich unverändert übernehmen.

Literaturverzeichnis

1. Barketau M.S., Cheng T.C., Kovalyov M.Y.: Batch scheduling of deteriorating reworkables. European Journal of Operational Research 189 (2008) 1317–1326
2. Bogaschewsky R.: Dynamische Materialdisposition im Beschaffungsbereich - Simulation und Ergebnisanalyse, Dissertationsschrift, Frankfurt am Main (1988)
3. Gerrard J., Kandlikar M.: Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on green innovation and vehicle recovery. Journal

- of Cleaner Production 15(1) (2007) 17–27
4. van den Heuvel W.: The Economic Lot-Sizing Problem: New Results and Extensions. Erasmus University Rotterdam (2006)
 5. Jans R., Degraeve Z.: Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research* 46(6) (2008) 1619–1643
 6. Kleber R.: *Dynamic Inventory Management in Reverse Logistics*. Springer, Berlin (2006)
 7. Li C., Liu F., Cao H., Wang Q.: A stochastic dynamic programming based model for uncertain production planning of re-manufacturing system. *International Journal of Production Research* (2009) to appear
 8. Minner S.: Multiple-supplier inventory models in supply chain management: A review. *International Journal of Production Economics* 81/82 (2003) 265–279
 9. Richter K., Sombrotzki M.: Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models. *European Journal of Operational Research* 121(2) (2000) 304–315
 10. Schneeweiß C.: *Dynamisches Programmieren*. Physica, Würzburg (1974)
 11. Steinborn J., Walther G., Spengler T.: Variantenvielfalt und Lebenszyklusbetrachtungen im Remanufacturing. Tagungsband des Workshops der GOR-Arbeitsgruppen „Entscheidungstheorie und –praxis“ und „OR im Umweltschutz“ vom 12. bis 14.03.2008, Shaker Wittenberg (2009)
 12. Teunter R.K., Bayindir Z.P., van den Heuvel W.: Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing. *International Journal of Production Research* 44(20) (2006) 4377–4400
 13. Thierry M., Salomon M., Van Nunen J., Van Wassenhove L.: Strategic Issues in Product Recovery Management, *California Management Review* 37(2) (1995) 114–135
 14. Zelewski S.: *Komplexitätstheorie: als Instrument zur Klassifizierung und Beurteilung von Problemen des Operations Research*. Vieweg, Braunschweig (1989)

Efficient Lower and Upper Bounds for the Multi-commodity Capacitated Multi-facility Weber Problem with Rectilinear Distances

M. Hakan Akyüz, Temel Öncan, and İ. Kuban Altınel

Abstract The capacitated multi-facility Weber problem is concerned with locating I capacitated facilities in the plane to satisfy the demand of J customers with the minimum total transportation cost of a single commodity. This is a nonconvex optimization problem and difficult to solve. In this work, we focus on a multi-commodity extension and consider the situation where K distinct commodities are shipped to the customers subject to capacity and demand constraints. Customer locations, demands and capacities for each commodity are known a priori. The transportation costs, which are proportional to the rectilinear distance between customers and facilities, depend on the commodity type. We first present three different equivalent mathematical programming formulations of the problem. Then we propose Lagrangean relaxation schemes for these formulations to obtain lower bounds on the problem. Upper bounds are produced by using an alternate location-transportation heuristic. Computational experiments on randomly generated test instances are also reported.

1 Introduction

The multi-facility Weber problem (MWP) is concerned with locating I uncapacitated facilities in the plane and allocating them to J customers in order to satisfy their demand at minimum total transportation cost when the customer locations and their demands are known. The objective function of the MWP is neither convex nor

M. Hakan Akyüz · Temel Öncan
Department of Industrial Engineering, Galatasaray University
Ortaköy, İstanbul, 34357, TURKEY
E-mail: {mhakyuz, ytoncan}@gsu.edu.tr

İ. Kuban Altınel
Department of Industrial Engineering, Boğaziçi University
Bebek, İstanbul, 34342, TURKEY
E-mail: altinel@boun.edu.tr

concave [8], which makes it hard to solve exactly. The MWP becomes the well-known Weber problem when the objective is to determine an optimal location of a single facility. In some situations, facilities may have capacity constraints, which gives rise to the capacitated multi-facility Weber problem (CMWP). As can be observed, in an optimal solution of the MWP each customer is served from the nearest facility, which is not true for the CMWP because of the capacity constraints. The demand of a customer can be satisfied from different facilities. In other words the CMWP, which is a multi-source problem, belongs to a class of difficult problems. Sherali and Nordai [14] have shown that it is NP-hard even if all customers are located on a straight line. In this work we consider the multi-commodity extension of the CMWP, i.e., the *multi-commodity capacitated multi-facility Weber problem* (MCMWP). This problem is concerned with the optimal location of I capacitated facilities in the plane in order to satisfy the demand of J customers for K commodities with road capacity constraints between facilities and customers. The MCMWP is a more realistic problem than the CMWP since facilities produce more than one type of commodity in practice. Moreover, we assume that, according to regulations, the total amount of commodities sent on a road connecting a facility with a customer should be smaller than the road capacity. These regulations may be legislative stipulations such as narrow straits, which have limitations on the size of ships that can pass, the restrictions on the total amount of hazardous materials that can be shipped, etc. For instance, there may be capacity and cost restrictions on the commercial transportation fleet of a company. Furthermore, business relationships (e.g., contracts) between suppliers and customers may also impose some limits on the total shipment amount. These situations are formulated with the *road capacity* constraints. Several versions of the MCMWP can be modelled depending on the distance function used. For example, one can model the MCMWP considering Euclidean, squared Euclidean, rectilinear, and ℓ_r distances (see e.g., [2]). In this study, we have only addressed the MCMWP with rectilinear distances (RMCWP).

There are several studies on the CMWP starting from the seminal work by Cooper [8] who has considered the CMWP with Euclidean distances (ECMWP). The solution procedures developed for the ECMWP can be generalized for the ℓ_r -distance function case with $1 < r \leq 2$. Two recent studies are [13, 3], in which exact and heuristic solution procedures are developed, respectively. In addition to the general ℓ_r -distance case, the CMWP with rectilinear distances (RCMWP) constitutes another research direction for which some encouraging exact solution schemes exist. Early studies [15, 17, 18] have attempted to solve the rectilinear distance CMWP (RCMWP). More recently, Sherali et al. [16] have developed a mixed-integer bilinear programming model and employed the reformulation linearization technique (RLT) by Sherali and Adams [12] to exactly solve the RCMWP within a branch and bound framework. The latest approach has been proposed by Aras et al. [4] who have developed a mixed-integer linear programming (MILP) formulation of the RCMWP. Their formulation is more efficient than the one proposed by Sherali et al. [16] because the latter requires an additional reformulation effort, which yields an equivalent MILP formulation with higher number of variables and constraints than the one proposed by Aras et al. [4]. Clearly, with the increasing number of

binary variables, the commercial software packages frequently fail to produce optimal solutions of the RCMWP in acceptable CPU times with their MILP formulation. Henceforth, the CPU times required for the optimal solution of the RCMWP are expected to be dramatic. Therefore, we believe that efforts to devise efficient lower and upper bounding approaches for the RCMWP arise to be useful.

In this work, we propose two new equivalent MILP formulations for the RCMWP. The proposed formulations are inspired from the MILP formulation by Aras et al. [4] for the RCMWP. Then, we develop Lagrangean relaxation (LR) schemes [10, 11] for these new RCMWP formulations. The upper bounds are derived by using the *multi-commodity* and *capacitated* alternate location allocation (MCALA) heuristic embedded within the LR procedure. The MCALA heuristic alternately solves the location problem and multi-commodity transportation problem obtained after the facility locations are initialized. The MCALA heuristic differs only in the transportation phase from the classical alternate location-transportation (ALT) heuristic by Cooper [8]. Note that the ALT is inspired from the famous alternate location-allocation (ALA) heuristic by Cooper [7].

The rest of this work is organized as follows. We present the formulation of the MCMWP for the general distance case and propose two equivalent MILP formulations for the RCMWP, in the next section. This is followed by Section 3 where we present the LR strategies to obtain the lower and upper bounding of the RCMWP, respectively. In Section 4, we report the computational results obtained on the randomly generated RCMWP test instances.

2 The Multi-commodity Capacitated Multi-facility Weber Problem with Rectilinear Distances

2.1 A Mathematical Programming Formulation

Let I , J and K stand for the number of facilities, customers and commodities, respectively. $\mathbf{a}_j = (a_{j1}, a_{j2})^T$ denotes the coordinates of customer j and q_{jk} represents the demand quantities of customer j for commodity k . The capacity of facility i for commodity k is given by s_{ik} and decision variable $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2})^T$ stands for the coordinates of facility i . The decision variable w_{ijk} denotes the amount of commodity k shipped from facility i to customer j . The parameter c_{ijk} is for the unit shipment cost per unit distance of commodity k shipped from facility i to customer j . Then the mathematical programming formulation of the MCMWP is as follows

$$\min \quad z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K w_{ijk} c_{ijk} d(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_j) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^J w_{ijk} = s_{ik} \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I w_{ijk} = q_{jk} \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K w_{ijk} \leq u_{ij} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$w_{ijk} \geq 0 \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \quad (5)$$

We assume that, according to regulations, the total amount of allocations on a road connecting facility i with customer j should not be larger than the given upper bound u_{ij} . These situations are formulated with the *road capacity* constraints (4). The constraints (2) make sure that each facility ships all its production. The constraints (3) guarantee that the demands of each customer is satisfied. This formulation assumes that the problem is balanced. In other words, it is assumed that $\sum_{j=1}^J q_{jk} = \sum_{i=1}^I s_{ik}$ holds for $k = 1, \dots, K$ and the equalities in (2) and (3) can be respectively replaced with “ \leq ” and “ \geq ” without changing the optimal solution of the problem. If the problem was not balanced, the total capacity of the facilities should be greater than or equal to the demand of customers for feasibility concerns and the problem could be transformed into a balanced form by using dummy customers each having zero transportation cost.

It can be easily shown that an optimal solution of the MCMWP always occurs at an extreme point of the polyhedron defined by (2)–(5), independent of the type of the function $d(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_j)$ used to measure the distance between facility i and customer j . Recall that, in this study, we only focus on the RCMWP, which is defined by considering the rectilinear distance function $d(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_j) = |x_{i1} - a_{j1}| + |x_{i2} - a_{j2}|$.

2.2 Equivalent Mathematical Programming Formulations

In their early work on the dominance and convexity in location theory, Wendell and Hurter [20] have shown that when the transportation cost is a nondecreasing, non-negative and lower-semicontinuous function of the distance function (i.e., a norm function, which depends on the customer locations), the optimal solution to the single facility (uncapacitated) location problem lies within the convex-hull of customer locations. Furthermore, in the rectilinear distance function case, the optimum facility location must be on the intersection points of the horizontal and vertical lines drawn on the customer locations. Hansen et al. [9] have extended these results to the multiple facilities case. Aras et al. [4] have used these two properties to devise an equivalent MILP formulation of the RCMWP. When the candidate facility locations

are selected on the intersection points of horizontal and vertical lines drawn on customer locations, it may be possible to compute the distances between customers and candidate facility locations, which are not infinitely many. This observation also constitutes the motivation behind the MILP formulation by Aras et al. [4]. Using the same observation we propose below two MILP formulations RMCMWP1 and RMCMWP2, which are equivalent to the RMCMWP.

We present a MILP formulation of the RMCMWP inspired by Aras et al. [4]. This formulation determines the facility locations from the candidate points, which are selected from the intersection points of the horizontal and vertical lines drawn on the customer locations within their convex hull. P denotes the number of these candidate facility locations. The allocation variables y_{ijkp} represent the amount of commodity k shipped from facility i located at candidate point p to customer j . The binary variables v_{ip} are equal to 1 when facility i is located at candidate point p . Parameters c_{ijkp} indicate the unit shipment cost of commodity k to customer j from facility i located at candidate point p . They are obtained as follows: $c_{ijkp} = c_{ijk}d(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}_j)$ where $d(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}_j) = |x_{p1} - a_{j1}| + |x_{p2} - a_{j2}|$, i.e., the rectilinear distance between candidate point p and customer j .

RMCMWP1:

$$\min z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P c_{ijkp} y_{ijkp} \tag{6}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^J y_{ijkp} = s_{ik} v_{ip} \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P y_{ijkp} = q_{jk} \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \tag{8}$$

$$\sum_{p=1}^P v_{ip} = 1 \quad i = 1, \dots, I \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P y_{ijkp} \leq u_{ij} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \tag{10}$$

$$y_{ijkp} \geq 0 \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \tag{11}$$

$$v_{ip} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, I; p = 1, \dots, P. \tag{12}$$

In the RMCMWP1, it is implicitly assumed that once the location of a facility is fixed, K types of commodities are shipped from that location to customers. However, in its current form of the RMCMWP1, it is not possible to decompose the problem with respect to commodities to obtain subproblems, e.g., RCMWP, for which exact solution procedures are devised. Fortunately, we can assume that each commodity of a facility is produced at different locations. Then, we can explicitly impose that each commodity's corresponding facility locations should be the same by adding a new constraint. In other words, rather than considering a facility to produce K

commodity types, K clones (i.e., copies) of each facility are created where each of which produces a single commodity. Then, all single commodity clones of a facility are forced to be located at the same location. The second formulation is as follows:

RMCMWP2:

$$\min z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P c_{ijkp} y_{ijkp} \tag{13}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^J y_{ijkp} = s_{ik} b_{ikp} \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \tag{14}$$

$$\sum_{p=1}^P b_{ikp} = 1 \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P y_{ijkp} = q_{jk} \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \tag{16}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P y_{ijkp} \leq u_{ij} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \tag{17}$$

$$b_{ikp} \leq v_{ip} \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \tag{18}$$

$$\sum_{k=1}^K (v_{ip} - b_{ikp}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, I; p = 1, \dots, P \tag{19}$$

$$\sum_{p=1}^P v_{ip} = 1 \quad i = 1, \dots, I \tag{20}$$

$$v_{ip} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, I; p = 1, \dots, P \tag{21}$$

$$b_{ikp} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \tag{22}$$

$$y_{ijkp} \geq 0 \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P. \tag{23}$$

where

$$b_{ikp} = \begin{cases} 1 & \text{if clone } k \text{ of facility } i \text{ is located at candidate point } p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{24}$$

and the rest of the notation is the same as in the RMCMWP1. In the RMCMWP2, constraints (18) ensure that clone k of facility i should not be opened at a candidate point p unless the original facility i is opened there. Constraints (19) together with (18) make sure that whenever the original facility i is located on candidate point p then all clones of facility i must also be located on candidate point p . Furthermore, constraints (19) also indicate that when facility i is not located on a candidate point p , any clone of that facility can be opened on p . Additionally, constraints (20) guarantee that a facility must be located at exactly one candidate point.

One can notice that when the problem is balanced, the constraints (9) and (15) are redundant for the RMCMWP1 and RMCMWP2, respectively. To see this, aggregate constraints (7) and (8) resulting in $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P y_{ijkp} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K q_{jk}$ and $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P y_{ijkp} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K s_{ik} \sum_{p=1}^P v_{ip}$. Because the left-hand sides of both equalities are the same, it follows that $\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K s_{ik} \sum_{p=1}^P v_{ip} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J q_{jk} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{ik}$ since the problem is balanced (i.e., $\sum_{j=1}^J q_{jk} = \sum_{i=1}^I s_{ik}$ for $k = 1, \dots, K$). The last equality is clearly satisfied if and only if $\sum_{p=1}^P v_{ip} = 1$ holds for $i = 1, \dots, I$. This is not necessarily true when the problem is unbalanced. The same idea can be similarly extended for the RMCMWP2.

3 Lagrangean Relaxation Approaches for the RMCMWP1 and RMCMWP2

In this section, inspired from the work by Aras et al. [4] on the RCMWP, we present the LR schemes for both the RMCMWP1 and the RMCMWP2, which can be decomposed in order to produce tractable subproblems within various LR strategies. We have basically applied two LR strategies.

The first one is to decompose the problem for each commodity by relaxing the road capacity constraints (17) and the cloning constraints (18) and (19) from the RMCMWP2. This strategy reduces to solving $K + 1$ subproblems where K of which are variants of the RCMWP and the $(K + 1)^{st}$ problem is a set partitioning problem (SPP). The strategy to decompose the problem into K single commodity subproblems is not suitable for the RMCMWP1 since the binary variables v_{ip} are common for each commodity and this prevents the RMCMWP1 to decompose over commodities.

Although the RMCMWP2 can now be decomposed into subproblems for each commodity, the higher the number of intersection points within the convex hull, the more difficult the Lagrangean subproblems. The subproblems require the solution of K variants of the RCMWP. This results in high computation times and reduces the efficiency of the LR scheme. According to our preliminary computational experiments we can say that although the first LR strategy can produce tight lower bounds, the required CPU times are not acceptable. Therefore, we do not report the results of the first LR strategy here.

Inspired by Aras et al. [4], the second LR strategy additionally relaxes the demand constraints. This scheme results in $I \times K$ continuous knapsack problems (CKP). The application of the second LR strategy to RMCMWP1 and RMCMWP2 is discussed below.

3.1 The RMCMWPI Case

When we relax demand constraints (8) and road capacity constraints (10) of the RMCMWPI and associate Lagrange multipliers β_{jk} and μ_{ij} respectively, we obtain the following Lagrangean subproblem

$$\min z_{LR1}(\beta, \mu) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (c_{ijkp} - \beta_{jk} + \mu_{ij})y_{ijkp} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \beta_{jk}q_{jk} \quad (25)$$

$$- \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \mu_{ij}u_{ij}$$

s.t. (7), (9), (11) and (12) (26)

Notice that the Lagrangean subproblem given by (25) and (26) can be decomposed for each facility for $i = 1, \dots, I$. Furthermore, the last two terms in (25) can be taken into account after we solve each subproblem since they are constant. As a result, the Lagrangean subproblems can be rewritten for each facility i for $i = 1, \dots, I$ as follows:

$$\begin{aligned} \min z_{LR1}^i(\beta, \mu) &= \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (c_{ijkp} - \beta_{jk} + \mu_{ij})y_{ijkp} \\ &\sum_{j=1}^J y_{ijkp} = s_{ik}v_{ip} \quad k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \\ &\sum_{p=1}^P v_{ip} = 1 \\ &y_{ijkp} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, P \\ &v_{ip} \in \{0, 1\} \quad p = 1, \dots, P \end{aligned}$$

Whenever we fix the location of a facility at a candidate point p^* we obtain the following problem for each facility

$$\begin{aligned} \min z_{LR1}^{i,p^*}(\beta, \mu) &= \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (c_{ijkp^*} - \beta_{jk} + \mu_{ij})y_{ijkp^*} \\ &\sum_{j=1}^J y_{ijkp^*} = s_{ik} \quad k = 1, \dots, K \\ &y_{ijkp^*} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \end{aligned}$$

$z_{LR1}^{i,p^*}(\beta, \mu)$ further decomposes into K CKPs since commodities are independent of each other. In other words, one can find the solution to the $\min z_{LR1}^{i,p^*}(\beta, \mu)$ simply by first sorting the costs $\tilde{c}_j = (c_{ijkp^*} - \beta_{jk} + \mu_{ij})$ for $j = 1, \dots, J$ and fixed k and then by sending maximum quantity of commodities that can be sent from a facility i . Note that fixing the location of a facility at p^* implies that $y_{ijkp} = 0$ for all other candidate points (i.e., $p = 1, \dots, P$ and $p \neq p^*$). Consequently, one can explicitly enumerate the solutions obtained for each candidate point and choose the minimum solution value as follows:

$$z_{LR1}^i(\beta, \mu) = \min_{p^*=1, \dots, P} \left\{ \begin{array}{ll} \min z_{LR1}^{i,p^*}(\beta, \mu) & \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^J y_{ijkp^*} = s_{ik} & k = 1, \dots, K \\ y_{ijkp^*} \geq 0 & j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \end{array} \right\}$$

Consequently, the Lagrangean lower bound can be obtained by computing $z_{LR1} = \sum_{i=1}^I z_{LR1}^i(\beta, \mu) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \beta_{jk} q_{jk} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \mu_{ij} u_{ij}$.

3.2 The RCMW2 Case

For the RCMW2 we associate Lagrange multipliers λ_{jk} , γ_j , δ_{ikp} and θ_{ip} with constraints (16), (17), (18) and (19), respectively. Then, we obtain the following Lagrangean problem:

$$\begin{aligned} \min_{z_{LR2}}(\lambda, \gamma, \delta, \theta) &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (c_{ijkp} - \lambda_{jk} + \gamma_j) y_{ijkp} & (27) \\ &+ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\delta_{ikp} - \theta_{ip}) b_{ikp} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\theta_{ip} - \delta_{ikp}) v_{ip} \\ &+ \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \lambda_{jk} q_{jk} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \gamma_j u_{ij} \\ \text{s.t.} & \quad (14), (15), (20), (21), (22) \text{ and } (23) & (28) \end{aligned}$$

Note that we can drop the last two terms in (27) since they are constant and the problem decomposes into $(I \times K) + 1$ subproblems as shown below:

$$\begin{aligned} \min z_{LR2}^{i,k}(\lambda, \gamma, \delta, \theta) &= \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P [(c_{ijkp} - \lambda_{jk} + \gamma_j)y_{ijkp} + (\delta_{ikp} - \theta_{ip})b_{ikp}] \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1}^J y_{ijkp} = s_{ik}b_{ikp} \quad p = 1, \dots, P \\ &\sum_{p=1}^P b_{ikp} = 1 \\ &y_{ijkp} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J; p = 1, \dots, P \end{aligned}$$

and

$$\min z_{LR2}^{(I \times K)+1}(\delta, \theta) = \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\theta_{ip} - \delta_{ikp})v_{ip} : (20), (21) \right\}$$

Note that each Lagrangean subproblem for $i = 1, \dots, I$, and $k = 1, \dots, K$ produces a CKP, which can be solved in polynomial time. That is, fixing one b_{ikp} to 1 results in a CKP and can be polynomially solved by first ordering the cost coefficients of the allocation variables and then assigning the maximum allocation quantity of the available capacity in that order to y_{ijkp} for all $j = 1, \dots, J$ and $p = 1, \dots, P$.

Moreover, all other b_{ikp} should be set to zero such that $\sum_{p=1}^P b_{ikp} = 1$ is satisfied since a facility could be opened in one candidate point p^* . This implies that $y_{ijkp} = 0$ holds for all $j = 1, \dots, J$ and $p = 1, \dots, P$ such that $p \neq p^*$. Hence, we obtain $I \times K$ subproblems

$$\min z_{LR2}^{i,k}(\lambda, \gamma, \delta, \theta) = \min_{p^*=1, \dots, P} \left\{ \min \left\{ \begin{aligned} &\sum_{j=1}^J [(c_{ijkp^*} - \lambda_{jk} + \gamma_j)y_{ijkp^*}] + \delta_{ikp^*} - \theta_{ip^*} \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1}^J y_{ijkp^*} = s_{ik}; y_{ijkp^*} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \end{aligned} \right\} \right\}$$

for all $i = 1, \dots, I$ and $k = 1, \dots, K$. The subproblem $\min z_{LR2}^{(I \times K)+1}(\delta, \theta)$ is also easy to solve by using the integrality property of its polytope and can be determined by solving its Linear Programming (LP) relaxation. Finally, the Lagrangean lower bound can be obtained by computing $z_{LR2} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I z_{LR2}^{i,k}(\lambda, \gamma, \delta, \theta) +$

$$z_{LR2}^{(I \times K)+1}(\delta, \theta) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \lambda_{jk}q_{jk} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \gamma_j u_{ij}.$$

3.3 The MCALA Heuristic

Once a feasible transportation plan is given, the MCMWP reduces to solving I Weber problems

$$\min_{\mathbf{x}_i} z = \sum_{j=1}^J c'_{ijk} d(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_j), \tag{29}$$

for each facility $i = 1, \dots, I$, each of which can be solved by Weiszfeld’s algorithm [19] and its generalizations [6]. Here, $c'_{ijk} = \sum_{k=1}^K w_{ijk} c_{ijk}$. Additionally, when the facility locations are known, the MCMWP reduces to the solution of the multi-commodity transportation problem (MTP). Consequently, it is possible to tailor the ALA heuristic by Cooper [7] in order to produce a feasible solution of the MCMWP. We first give a formal outline of this heuristic, which we call MCALA; then show how to embed it within the LR schemes described.

Algorithm 1 *MCALA Heuristic*

1. Locate the facilities at randomly selected points $x_i = (x_{i1}, x_{i2})^T$ for $i = 1, \dots, I$;
2. For each facility i and customer j calculate the distance $d(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_j)$ between them, and set the new unit transportation cost as $\hat{c} = c_{ijk} d(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_j)$;
3. Determine feasible allocations w_{ijk}^* by solving the MTP:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \hat{c}_{ijk} w_{ijk} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^J w_{ijk} = s_{ik} \quad i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \\ & \sum_{i=1}^I w_{ijk} = q_{jk} \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \\ & \sum_{k=1}^K w_{ijk} \leq u_{ij} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \\ & w_{ijk} \geq 0 \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K. \end{aligned}$$

4. Solve I Weber problems (29) to relocate I facilities;
5. Repeat steps 3 and 4 until either facility locations $x_i = (x_{i1}, x_{i2})^T$ for $i = 1, \dots, I$ or allocations w_{ijk}^* for $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, \text{ and } k = 1, \dots, K$ remain unchanged;

Although Algorithm 1 is described for the general distance case it can be used for the rectilinear distance as well (see, e.g., [1]). Once the Lagrangean subproblem is solved, the binary variables denoting the facility locations can be used to initialize the first step of the MCALA. After this initialization, the heuristic ends up with a feasible solution, which can be used as an upper bound within the subgradient procedure. The details of the computations are given in the next section.

4 Computational Experiments

In this section, we present the computational results obtained on randomly generated test instances. In order to compare the strengths of the RMCMWP1 and RMCMWP2, we first report the LP relaxation bounds. Then, we present the lower and upper bounds obtained with the LR scheme on 60 randomly generated test instances and compare them with the optimal solutions.

4.1 Comparison of LP Relaxations

Table 1 consists of the LP relaxation results obtained with the RMCMWP1 and RMCMWP2. The first column stands for the instances names denoted by $mc_i_j_k$ where i , j and k are for the number of facilities, number of customers and number of commodities, respectively. The test instances are first solved to optimality by CPLEX 11.0 MILP solver within a CPU time limit of 18 hours. For the instances marked with a “†” symbol, the time limit exceeded and we report the best solution values obtained at the end of 18 hours. At an average the RMCMWP1 requires less CPU time than the RMCMWP2. On the other hand, for the last instance with “‡” symbol, the RMCMWP2 yields a tighter lower bound than the one produced by the RMCMWP1. Hence, the optimum (or best) solutions for the test instances are presented in the second column. The third and fifth columns indicated by GAP(%) present the percent deviation of the LP relaxation bounds obtained with the RMCMWP1 and the RMCMWP2 from the optimum (or best) solution values, respectively. The formulae used is $100 \times (z^* - z_{lb})/z^*$ where z^* and z_{lb} denotes the optimum (or best) solution and LP relaxation lower bounds, respectively. The CPU times (in seconds) of the LP relaxations obtained with CPLEX 11.0 are given in the columns titled CPU for each formulation. Observe that the average percent deviations of the LP relaxation lower bounds obtained with the RMCMWP1 and the RMCMWP2 are 87.98% and 88.18% on average, respectively.

4.2 Comparison of LR Lower and Upper Bounds

We have applied the classical subgradient algorithm to obtain the Lagrangean lower bounds z_{LR1} and z_{LR2} as described by Beasley [5]. Lagrange multipliers are initially set to zero. The step size parameter π is initialized by 1 and halved at every 80 iterations in which an objective function value improvement can not be achieved. Note that, the LR procedure is computationally cheap and hence we preferred to perform a large number of iterations before halving the step size parameter π .

The upper bounds for the RMCMWP1 and RMCMWP2 are determined with the MCALA heuristic, which we have incorporated within the subgradient optimization procedure. At each subgradient iteration, the locations of facilities can be de-

terminated from Lagrangean subproblems. The binary variables v_{ip} indicate whether facility i is located at candidate point p . Furthermore, the locations of candidate points are known a priori since they are determined by the intersection points of horizontal and vertical lines drawn on fixed customer locations. As a result, since the values of binary variables v_{ip} are known from the solution of the Lagrangean subproblems one can initialize the MCALA heuristic with these facility locations and obtain an upper bound on the rectilinear distance problem. We compute the upper bounds at every 20 iterations of the subgradient procedure and the best upper bound is kept as the upper bound value of the rectilinear distance problem.

Table 2 presents the Lagrangean relaxation lower and upper bounds obtained with the RMCMWP1 and RMCMWP2, respectively. The first column stands for the instance names. The columns under MILP present the optimum (or the best) solutions and their CPU times (in seconds) obtained with the RMCMWP1 and the RMCMWP2. The lower and upper bound values obtained with the RMCMWP1 or the RMCMWP2 are given in columns titled z_{LR1} and z_{LR2} , respectively, with their CPU times (in seconds). LB(%) stands for the percentage deviation between the lower bound value obtained with the corresponding formulation and the optimum (or best) solution value reported in the fourth and seventh columns. The gaps LB(%) are calculated with $(z^* - z_{lb})/z^*$ where z^* is the optimum (or best) objective value and z_{lb} stands for the lower bound value obtained with the subgradient procedure. Similarly, UB(%) is calculated with $(z^{ub} - z^*)/z^*$ where z^* denotes the optimum (or best) solution value and z_{ub} is the upper bound value obtained with the MCALA heuristic within the subgradient procedure. Lastly, the CPU times (in seconds) required to obtain z_{LR1} and z_{LR2} are reported in columns six and nine.

It can be observed that the RMCMWP1 produces tighter lower bounds in shorter CPU times than the ones obtained with the RMCMWP2, on average. On the other hand, the opposite holds true for the upper bounds. The experimental results indicate that the LR procedures produce efficient and tight lower bounds compared to the lower bounds obtained with the LP relaxation strategy. The MCALA heuristic embedded within the LR procedure also yields promising performance.

5 Conclusion and Future Research

In this work we propose efficient LR approaches to the RMCMWP. For small instances the LR strategies produce optimal or close to optimal solutions. For large instances the proposed LR strategies produce good lower bounds in very short CPU times. Although the percent deviation from the optimum is still large we believe that the solution times will be advantageous when these LR strategies are used within a branch and bound framework.

Acknowledgements We would like to thank the referees for their constructive comments, which have improved the presentation of the paper. This work has been partially supported by Galatasaray

University Research Foundation with grants 07.402.014 and 09.402.005 and TÜBİTAK Research grant 107M462.

References

1. Akyüz, M.H., Öncan, T., Altinel, İ.K.: The multi-commodity capacitated multi-facility Weber problem: heuristics and confidence intervals. Research Paper No FBE-IE-11/2008-12, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Boğaziçi University, TÜRKİYE (2008)
2. Alpaydın, E., Altinel, İ.K., Aras, N.: Parametric distance functions vs. nonparametric neural networks for estimating road travel distances. *European Journal of Operational Research* 93(2) (1996) 230–243
3. Aras, N., Altinel, İ.K., Orbay, M.: New heuristic methods for the capacitated multi-facility Weber problem. *Naval Research Logistics* 54(1) (2007) 21–32
4. Aras, N., Orbay, M., Altinel, İ.K.: Efficient heuristics for the rectilinear distance capacitated multi-facility Weber problem. *Journal of the Operational Research Society* 59(1) (2008) 64–79
5. Beasley, J.E.: Lagrangean relaxation. In: Reeves, C.R. (ed.): *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. John Wiley & Sons Inc., New York (1993)
6. Brimberg, J., Love, R.F.: Global convergence of a generalized iterative procedure for the minisum location problem with L_p distances. *Operations Research* 41(6) (1993) 1153–1163
7. Cooper, L.: Heuristic methods for location-allocation problems. *SIAM Review* 6(1) (1964) 37–53
8. Cooper, L.: The transportation-location problem. *Operations Research* 20(1) (1972) 94–108
9. Hansen, P., Perreux, J., Thisse, F.: Location theory, dominance and convexity: Some further results. *Operations Research* 28(5) (1980) 1241–1250
10. Held, M., Karp, R.M.: The traveling salesman problem and minimum spanning trees. *Operations Research* 18 (1970) 1138–1162
11. Held, M., Karp, R.M.: The traveling salesman problem and minimum spanning trees: part II. *Mathematical Programming* 1 (1971) 6–25
12. Sherali, H.D., Adams, W.P.: *A reformulation-linearization technique for solving discrete and continuous nonconvex problems*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands (1999)
13. Sherali, H.D., Al-Loughani, I., Subramanian, S.: Global optimization procedures for the capacitated Euclidean and L_p distance multifacility location-allocation problem. *Operations Research* 50(3) (2002) 433–448
14. Sherali, H.D., Nordai, F.L.: NP-hard, capacitated, balanced p-median problems on a chain graph with a continuum of link demands. *Mathematics of Operations Research* 13(1) (1988) 32–49
15. Sherali, H.D., Shetty, C.M.: The rectilinear distance location-allocation problem. *AIIE Transactions* 9 (1977) 136–143
16. Sherali H.D., Ramachandran, S., Kim, S.I.: A localization and reformulation discrete programming approach for the rectilinear distance location-allocation problems. *Discrete Applied Mathematics* 49(1-3) (1994) 357–378
17. Shetty, C.M., Sherali, H.D.: Rectilinear distance location-allocation problem: A simplex based algorithm. In: *Extremal Methods and System Analysis*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 174, New York, Springer (1980) 442–464
18. Vaish, H., Shetty, C.M.: The bilinear programming. *Naval Research Logistics Quarterly* 23 (1976) 303–309
19. Weiszfeld, E.: Sur le point lequel la somme des distances de n points donnés est minimum. *Tôhoku Mathematics Journal* 43 (1937) 355–386
20. Wendell, R.E., Hurter, A.P.: Location theory, dominance and convexity. *Operations Research* 21(1) (1973) 314–320

Table 1 LP relaxation results for the RMCMWP1 and RMCMWP2.

Instance Name	Optimum	RMCMWP1		RMCMWP2	
	(Best)	GAP(%)	CPU	GAP(%)	CPU
mc_2.2.2	64	100.00	0.00	100	0.02
mc_2.2.3	464	100.00	0.02	100.00	0.00
mc_2.2.5	100	65.17	0.02	65.17	0.02
mc_2.4.2	797	99.03	0.02	99.03	0.00
mc_2.4.3	585	92.46	0.00	92.46	0.00
mc_2.4.5	2209	92.55	0.00	92.55	0.02
mc_3.5.2	1438	84.76	0.02	84.76	0.00
mc_3.5.3	572	99.97	0.02	99.97	0.02
mc_3.5.5	4701	61.71	0.03	61.71	0.05
mc_3.9.2	1817	100.00	0.03	100.00	0.05
mc_3.9.3	5997	89.35	0.06	89.35	0.08
mc_3.9.5	62706	96.79	0.09	96.79	0.16
mc_4.8.2	1566	97.93	0.02	97.93	0.02
mc_4.8.3	9923	85.72	0.05	85.72	0.08
mc_4.8.5	9420	72.94	0.06	72.94	0.13
mc_4.10.2	6437	89.62	0.03	89.62	0.06
mc_4.10.3	11507	92.16	0.08	92.16	0.14
mc_4.10.5	28142	79.20	0.16	79.20	0.31
mc_4.15.2	12424	97.39	0.33	97.39	0.41
mc_4.15.3	35807	92.37	0.61	92.37	0.97
mc_4.15.5	41685	92.67	1.67	92.67	3.34
mc_5.8.2	6250	93.68	0.03	93.68	0.06
mc_5.8.3	5551	100.00	0.06	100.00	0.09
mc_5.8.5	31353	76.84	0.16	76.84	0.31
mc_5.10.2	3928	86.69	0.06	86.69	0.06
mc_5.10.3	10064	71.85	0.09	71.85	0.14
mc_5.10.5	56300	79.51	0.22	79.51	0.38
mc_5.12.2	4316	99.11	0.22	99.11	0.24
mc_5.12.3	13947	94.53	0.39	94.53	0.56
mc_5.12.5	45687	74.10	1.00	74.10	1.66
mc_5.15.2	7784	99.78	0.34	99.78	0.45
mc_5.15.3	32833	91.87	1.67	91.87	2.31
mc_5.15.5	24186	89.19	1.75	89.19	3.42
mc_5.20.2	9813	99.82	1.30	99.82	1.69
mc_5.20.3	20461	98.41	1.72	98.41	2.44
mc_5.20.5	58846	87.77	22.61	87.77	55.62
mc_5.30.2	56665	98.93	8.84	98.93	8.44
mc_5.30.3	78443	87.60	20.20	87.60	29.73
mc_5.30.5	224750	86.17	61.47	86.17	255.24
mc_6.10.2	3082	98.29	0.08	98.29	0.08
mc_6.10.3	6427	71.45	0.13	71.45	0.17
mc_6.10.5	11459	61.50	0.33	61.50	0.45
mc_8.10.2	7004	87.83	0.11	87.83	0.13
mc_8.10.3	10420	93.03	0.20	93.03	0.30
mc_8.10.5	21288	67.34	0.42	67.34	0.86
mc_10.10.2	3601	79.70	0.14	79.70	0.22
mc_10.10.3	13564	87.79	0.28	87.79	0.41
mc_10.10.5	5390	89.59	0.64	89.59	1.75
mc_10.15.2	2878	91.38	1.08	91.38	1.45

Table 1 LP relaxation results for the RCMW1 and RCMW2 (continued).

Instance Name	Optimum (Best)	RCMW1		RCMW2	
		GAP(%)	CPU	GAP(%)	CPU
mc_10_15_3	6980	87.82	3.58	87.82	4.80
mc_10_15_5	13233	76.10	20.84	76.10	32.45
mc_10_20_2	10367	99.28	5.03	99.28	6.33
mc_10_20_3	5496	82.61	7.27	82.61	17.13
mc_10_20_5†	18080	99.98	42.78	82.57	367.32
mc_10_24_2	4182	66.77	280.96	99.91	69.56
mc_10_24_3	11103	99.55	75.97	87.48	178.23
mc_10_24_5	25276	85.91	440.60	74.33	1037.46
mc_10_30_2	21333	85.23	394.55	99.77	40.27
mc_10_30_3†	51096	87.30	1121.09	93.03	263.68
mc_10_30_5†‡	82881	82.64	929.59	82.64	1944.65
Average		87.98	57.52	88.18	72.27

Table 2 LR Lower and Upper Bounds on Test Instances.

Instance Name	MILP		z _{LR1}			z _{LR2}		
	Optimum	CPU	LB(%)	UB(%)	CPU	LB(%)	UB(%)	CPU
mc_2_2_2	64	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02
mc_2_2_3	464	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03
mc_2_2_5	100.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.53
mc_2_4_2	797	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05
mc_2_4_3	585	0.02	0.00	0.00	138	0.00	0.00	420.55
mc_2_4_5	2209	0.02	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.16
mc_3_5_2	1438	0.05	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	3.02
mc_3_5_3	572	0.05	8.93	0.00	0.88	9.02	0.00	2.91
mc_3_5_5	4701	0.22	8.59	0.57	0.34	8.67	0.57	2.08
mc_3_9_2	1817	0.44	0.75	0.00	0.39	0.76	0.00	2.20
mc_3_9_3	5997	0.94	6.12	0.00	0.63	6.30	0.00	3.80
mc_3_9_5	62706	1.14	0.00	0.00	1.61	0.01	0.00	4.86
mc_4_8_2	1566	0.17	4.33	0.00	0.39	4.34	0.00	2.75
mc_4_8_3	9923	0.89	11.52	4.00	0.59	11.64	4.00	2.42
mc_4_8_5	9420	0.31	0.57	0.00	0.78	0.99	0.00	4.52
mc_4_10_2	6437	0.81	11.71	0.87	0.64	8.86	1.60	3.09
mc_4_10_3	11507	0.56	0.84	0.00	0.95	0.98	0.00	5.45
mc_4_10_5	28142	5.66	11.82	0.01	0.94	13.08	0.00	6.22
mc_4_15_2	12424	11.92	4.03	0.00	2.25	4.38	0.00	9.38
mc_4_15_3	35807	21.39	4.09	0.71	2.83	4.19	0.71	10.58
mc_4_15_5	41685	39.66	3.84	1.94	3.42	4.83	1.94	9.25
mc_5_8_2	6250	0.20	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.56
mc_5_8_3	5551	1.84	16.45	7.89	0.64	17.93	7.89	4.56
mc_5_8_5	31353	4.99	13.73	4.84	1.24	15.25	4.84	4.06
mc_5_10_2	3928	0.72	13.21	8.40	0.66	13.27	1.17	2.50
mc_5_10_3	10064	1.09	3.57	0.00	0.88	3.94	0.00	4.67
mc_5_10_5	56300	5.45	8.07	6.61	1.34	8.07	1.56	5.22
mc_5_12_2	4316	4.19	11.53	0.00	1.67	11.90	0.00	4.17
mc_5_12_3	13947	17.23	15.78	0.44	1.77	15.90	0.44	6.92
mc_5_12_5	45687	31.11	9.49	0.98	4.47	11.36	0.00	7.25
mc_5_15_2	7784	2.86	1.71	0.00	2.22	1.85	0.00	5.70

Table 2 LR Lower and Upper Bounds on Test Instances (continued).

Instance Name	MILP		z_{LR1}			z_{LR2}		
	Optimum	CPU	LB(%)	UB(%)	CPU	LB(%)	UB(%)	CPU
mc_5_15_3	32833	19.34	1.96	0.00	3.75	3.53	0.00	29.58
mc_5_15_5	24186	33.34	7.31	0.00	4.16	8.12	0.00	9.00
mc_5_20_2	9813	12.88	3.07	0.00	3.56	3.21	0.00	9.16
mc_5_20_3	20461	55.47	4.03	8.37	4.91	4.34	5.77	14.03
mc_5_20_5	58846	7150.25	9.58	4.19	11.03	14.69	6.78	32.08
mc_5_30_2	56665	244.62	2.39	1.13	9.19	3.39	0.89	25.91
mc_5_30_3	78443	2375.77	4.08	2.67	18.34	6.21	0.00	29.25
mc_5_30_5	224750	9094.00	2.03	0.30	25.74	2.59	0.24	71.14
mc_6_10_2	3082	2.16	19.41	4.22	0.70	20.23	4.22	4.13
mc_6_10_3	6427	1.81	16.42	5.09	0.78	17.31	5.09	3.63
mc_6_10_5	11459	4.45	15.55	0.00	1.23	15.93	0.00	4.52
mc_8_10_2	7004	2.02	34.14	20.52	1.00	34.35	10.95	4.28
mc_8_10_3	10420	8.92	57.94	67.72	0.97	60.05	30.89	6.69
mc_8_10_5	21288	33.70	22.86	22.01	1.59	21.45	8.20	6.66
mc_10_10_2	3601	5.16	31.56	37.68	0.78	31.84	17.55	4.28
mc_10_10_3	13564	112.14	36.94	6.78	1.70	41.76	13.28	4.81
mc_10_10_5	5390	23.94	34.08	41.06	2.58	35.97	28.31	5.47
mc_10_15_2	2878	95.72	35.76	61.22	3.38	36.43	40.17	8.20
mc_10_15_3	6980	131.40	15.39	16.88	4.97	16.02	12.92	13.94
mc_10_15_5	13233	3926.57	23.21	12.48	10.05	23.84	7.90	25.91
mc_10_20_2	10367	226.59	12.60	28.98	7.17	13.00	25.69	14.34
mc_10_20_3	5496	1775.14	21.79	21.96	7.13	22.81	19.10	14.48
mc_10_20_5†	18080	64838.60	15.67	16.88	22.73	18.82	9.15	64.77
mc_10_24_2	4182	8031.26	13.05	15.21	15.25	14.04	9.28	46.17
mc_10_24_3	11103	41311.60	14.48	21.38	21.92	14.98	13.54	62.33
mc_10_24_5	25276	53969.80	9.41	8.54	32.61	13.89	8.54	111.88
mc_10_30_2	21333	6237.39	18.06	0.00	22.34	18.19	0.00	53.97
mc_10_30_3†	51096	64841.90	14.24	10.30	29.77	15.50	7.56	63.39
mc_10_30_5†‡	82881	65050.20	12.08	5.56	50.73	13.68	6.74	101.70
Average		5496.17	11.33	7.97	8.17	12.06	5.29	23.09

Verkehrsträgerwettbewerb im Güterverkehr – Eine Scheindiskussion?

Joachim R. Daduna

Zusammenfassung Der Güterverkehr bewegt sich immer mehr in einem Spannungsfeld zwischen wirtschaftlicher Notwendigkeit und verkehrspolitischen Wunschvorstellungen. Seine Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung sollte eigentlich unstrittig sein, auch wenn immer wieder Forderungen aufkommen, die dies außer Acht lassen. Wesentliche Punkte der Diskussion sind die Verfügbarkeit und Einsetzbarkeit der Verkehrsträger sowie die bestehenden Marktstrukturen. Hieraus ergeben sich die tatsächlich existierenden Wettbewerbsstrukturen, wobei nicht erst im Zusammenhang mit dem Schlagwort Green Logistics auch umweltbezogene Aspekte einbezogen werden. Es zeigt sich, dass der intermodale Wettbewerb vergleichsweise gering ist und häufig nur eine intramodale Konkurrenz besteht. Außerdem muss festgestellt werden, dass Verkehrsträger mit umweltbezogenen Vorteilen aufgrund ihrer systemspezifischen Eigenschaften nicht immer die beste ökologische Lösung darstellen.

1 Bedeutung des Güterverkehrs

Wesentliche Grundlage politischer, ökonomischer und struktureller Entwicklungen ist, wie die Vergangenheit immer wieder gezeigt hat, die Verfügbarkeit einer ausreichenden *Mobilität*. Man muss hierbei feststellen, auch wenn dies häufig den Zielvorstellungen einer Reihe von politischen Entscheidungsträgern nicht unbedingt entspricht, dass die erreichten Mobilitätsniveaus in den einzelnen (Wirtschafts-)Regionen sehr deutlich mit deren ökonomischer Leistungsfähigkeit als auch mit den sozio-kulturellen Standards korrelieren. So ist zum Beispiel die Mobilität von (*materiellen*) *Gütern* eine entscheidende Voraussetzung, um eine ausreichend hohe Effizienz bei arbeitsteilig organisierten *Leistungserstellungsprozessen*.

Joachim R. Daduna

Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, Badense Straße 50-51, 10825 Berlin, GERMANY
E-mail: daduna@hwr-berlin.de

sen (mit dezentralisierten Strukturen) zu gewährleisten, die zunehmend den industriellen Sektor sowie auch den Handel bestimmen (siehe u.a. [7, S. 63ff], [30, S. 66ff]). Dies bedeutet, dass ein Streben nach ökonomischem Wachstum einen ständig wachsenden *Mobilitätsbedarf* erzeugt (siehe u.a. die Ausführungen bei [46, S. 65ff], [5], [30, S. 58ff] und [37]). Deutlich wird dies auch (siehe u.a. [7, S. 25f]) durch die in Abbildung 1 dargestellten Entwicklungen bzw. Prognosen des Verkehrsaufkommens für den Personen- und Güterverkehr in der *Europäischen Union* (EU) (bezogen auf das Gebiet der EU15) im Zeitraum von 1985 bis 2010 im Vergleich mit dem *Bruttoinlandprodukt* (BIP) (zu konstanten Preisen)¹. Allerdings wird erwartet (siehe u.a. [29, S. 111]), dass der Anstieg des Güterverkehrs im Vergleich zu dem des BIP stärker sein wird, u.a. bedingt durch grundsätzliche strukturellen Veränderungen, die sich in den vergangenen Jahren in der Wirtschaft gezeigt haben. Auch wenn die im Jahr 2008 begonnene Rezession zu Abschwächungen in den Entwicklungen führt, bedingen diese keine grundsätzlichen Veränderungen, da sich die Abschwächungen auf alle Ebenen auswirken.

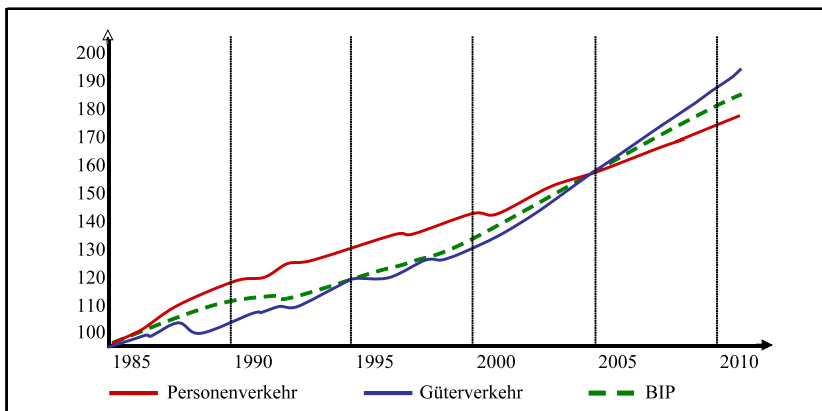


Abb. 1 Verkehrsaufkommen in der EU im Vergleich zur Entwicklung des BIP.

Unstrittig ist somit die essentielle Bedeutung des Güterverkehrs für eine Volkswirtschaft und deren wirtschaftliche Leistungsfähigkeit sowie auch, wie schon [31, S. 206ff] feststellte, für die Existenz funktionierender Märkte und Wettbewerbsstrukturen. Dies zeigt sich auch sehr deutlich bei einem Vergleich der wirtschaftlichen Situation in (entwickelten) Industrienationen mit der in Entwicklungs- und Schwellenländern. Allerdings bestehen zunehmend (politische) Vorbehalte bezüglich des ansteigenden Mobilitätsbedarfs, nicht nur im Bereich des Gütertransports, sondern auch beim Personentransport. Im Vordergrund stehen hierbei ökologische Bedenken, die mit den negativen Auswirkungen der Verkehrsinfrastrukturbereitstellung und den aus der Betriebsdurchführung resultierenden Umweltbelastung

¹ Quelle: http://europa.eu.int/comm/transport/themes/network/projects/trans_facts_de.html

begründet werden. Allerdings muss auch die Frage gestellt werden, welche negativen Auswirkungen sich bei *erzwungenen* Mobilitätseinschränkungen ergeben und ob nicht auch andere Alternativen existieren. Im Folgenden werden deshalb zunächst die Einsatzmöglichkeiten der im Güterverkehr eingesetzten Verkehrsträger skizziert. Die weiteren Ausführungen beinhalten eine kritische Betrachtung der im Güterverkehrsmarkt vorhandenen Wettbewerbspotenziale, wobei auch auf die umweltpolitischen Einflüsse bei der Verkehrssystementscheidung eingegangen wird. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Situation in Verbindung mit einer Stellungnahme zu der (verkehrs-)politischen Diskussion im Bereich des Güterverkehrs.

2 Einsatzmöglichkeiten der Verkehrsträger

Bei einer Diskussion über die verfügbaren Verkehrsträger muss berücksichtigt werden, dass deren Einsatzmöglichkeiten aufgrund von systemtechnischen Rahmenbedingungen differenziert zu betrachten sind. So stellt beispielsweise eine ausschließlich *mengenbezogenen* Betrachtung (siehe u.a. [17, S. 39], [34, S. 623f]), wie sie in Abbildung 2 skizziert ist, lediglich eine theoretische Sichtweise dar, auch wenn die Anwendung derartig vereinfachter Regelwerke, wie sie bei [32, S. 48f] bzw. [39, S. 113]) angegeben wird, immer wieder diskutiert wird. Völlig unberücksichtigt bleiben bei dieser eindimensionalen Betrachtungsweise die Anforderungen der Kunden sowie die transporttechnischen Randbedingungen.

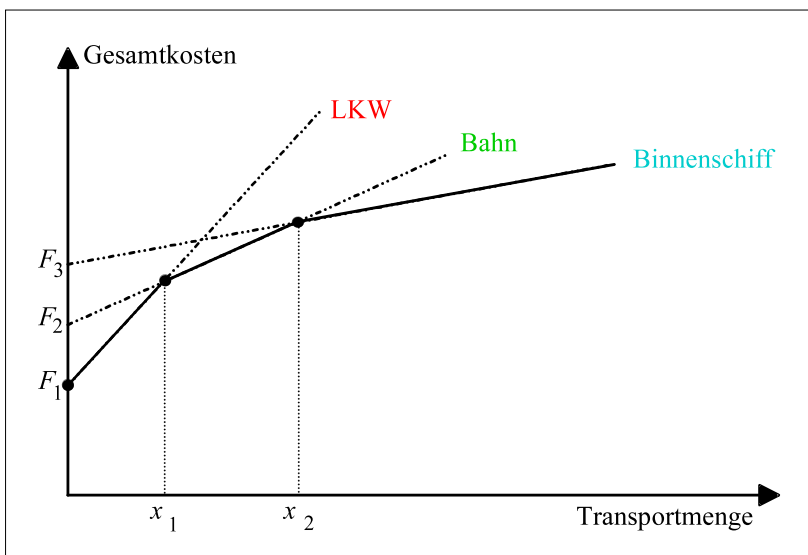


Abb. 2 Mengenbezogene Kostenverläufe für den Straßen-, Schienen- und Binnenwasserstraßentransport.

Im Vordergrund müssen deshalb neben den fallspezifischen Transportanforderungen die Nutzungsmöglichkeiten der verschiedenen Verkehrsträger stehen. Ausgangspunkt der Betrachtungen sind hierbei die systembedingten *Vor- und Nachteile* (siehe u.a. [45, 16, 33]) sowie auch die Frage der grundsätzlichen *Eignung* (siehe u.a. [45]). Eine Grundlage für eine *qualitative Bewertung* von Verkehrsträgern bietet Voigt [47, S. 80ff], der insgesamt sieben Merkmale der *Verkehrswertigkeit* definiert, die im Folgenden kurz skizziert werden (siehe u.a. [19], [24, S. 192f]):

- *Schnelligkeit* der Verkehrsleistung: Summe aus *Fahrgeschwindigkeit* und den (technisch- bzw. organisatorisch bedingten) *Wartezeiten*, wobei hierunter nicht die *Zeitgenauigkeit* im Rahmen einer Prozesssteuerung verstanden werden darf.
- *Massenfähigkeit* des Verkehrsmittels: Verfügbare *Kapazität* des eingesetzten Verkehrsmittels sowie die Höhe der Kosten für den Transport einer Gewichts- oder Raumeinheit eines bestimmten Gutes.
- Fähigkeit zur *Netzbildung*: Möglichkeit der Bildung *direkter Transportverbindungen* zwischen Verloader und Kunden, d.h., bei notwendigen Vor- und Nachlaufverkehren muss von einer Reduzierung der Fähigkeit zur Netzbildung gesprochen werden.
- *Berechenbarkeit* der Zeitpunkte und des Zeitbedarfs der Verkehrsleistung: Einhaltung der vorgesehenen Fahrzeiten für die Transportdurchführung, insbesondere bei einer fahrplanbezogenen Bedienung.
- *Häufigkeit* der in einem Zeitabschnitt zur Verfügung stehenden Verkehrsmöglichkeiten auf bestimmten Relationen: Umfang der Bedienung in Abhängigkeit von den vorhandenen Aufkommenspotenzialen auf den betrachteten Relationen.
- *Sicherheit* und *Störungsfreiheit*: Auftreten externer Einflüsse auf die Transportdurchführung, die eine Kontinuität der Abläufe be- bzw. verhindern.
- *Bequemlichkeit*: Vorhandensein von Zugangsmöglichkeiten, d.h., welcher Aufwand ist erforderlich, um die Transportdurchführung mit einem geeigneten Verkehrsträger einleiten zu können.

Betrachtet man die verschiedenen Verkehrsträger im Güterverkehr (*Straßen- und Schienengüterverkehr, Güterverkehr auf Binnenwasserstraße, (Hoch)See- und Luftfrachtverkehr* sowie *Transporte über (Rohr)Leitungen*), so zeigen sich bezüglich der Verkehrswertigkeiten deutliche Unterschiede, wie in Tabelle 1 anhand der zugrunde liegenden Transportsysteme dargestellt.

Diese Bewertungen machen deutlich, dass *systemimmanente Differenzierungen* bestehen, die einen entscheidenden Einfluss auf die Nutzungsmöglichkeiten der einzelnen Verkehrsträger haben. Hieraus leitet sich hinsichtlich der verkehrspolitischen Diskussionen die Frage ab, ob grundsätzlich überhaupt von einer *Konkurrenzsituation* gesprochen werden kann, oder ob nicht aufgrund der spezifischen Anforderungen hinsichtlich der nachgefragten Transportleistungen partiell *faktische Monopole* auftreten. Diese Problematik ist insofern von erheblicher Bedeutung, da sich nur bei der Existenz eines *intermodalen Wettbewerbs* auf den verschiedenen Verkehrsmärkten tatsächlich Substitutionsmöglichkeiten ergeben können, d.h., nur dann liegen in der betrieblichen Praxis relevante *Verlagerungspotenziale* vor, die den Ausgangspunkt für eine Veränderung des Modal Splits im Güterverkehrsmarkt bilden können.

Tabelle 1 Vergleich der Transportsysteme hinsichtlich ihrer Verkehrswertigkeiten.

Verkehrswertigkeit	Transportsysteme					
	LKW	Eisenbahn	Binnenschiff	(Hoch-)Seeschiff	Flugzeug	(Rohr-)Leitung
Schnelligkeit	++	+	-	-	++	+
Massenfähigkeit	--	++	++	++	--	++
Fähigkeit zu Netzbildung	++	-	-	--	-	--
Berechenbarkeit	+	+	o	o	+	+
Häufigkeit der Bedienung	++	o	o	-	o	++
Sicherheit	O	++	+	+	++	++
Bequemlichkeit	++	-	-	--	--	-
Bewertungen: ++ Sehr gut / + Gut / o Indifferent / - Mäßig / -- Schlecht						

3 Wettbewerbspotenziale

Kennzeichnend für einen existierenden intermodalen Wettbewerb ist das Vorhandensein von *vergleichbaren* Angeboten mehrerer Verkehrsträger. Dies bedeutet, dass ein Nachfrager nach Transportleistungen zwischen verschiedenen Angeboten konkurrierender Verkehrsträger wählen kann, wobei der *Preis* als ein wesentliches Entscheidungskriterium gesehen wird. Kommt es zu einer Erhöhung der Transportpreise bei einem Verkehrsträger, so reagiert der Markt mit erkennbaren Nachfragerückgängen bei diesem und einer gleichzeitigen Verlagerung von Transportaufkommen auf einen anderen Verkehrsträger, d.h., es liegt eine *preiselastische Reaktion* vor (siehe zur Frage der Aussagefähigkeit von *Kreuzpreiselastizitäten* bzw. *Substitutionselastizitäten* u.a. [21, S. 218ff] sowie [34, S. 186f]). Geht man von den in Tabelle 1 angegebenen Bewertungen aus, wird deutlich, dass eine Reduzierung auf den Preis als Entscheidungsgrundlage problematisch ist. Bei einer solchen eindimensionalen Betrachtung bleiben verkehrsträgerspezifische Affinitäten unberücksichtigt, d.h., es werden in diesem Fall lediglich *quantitative*, nicht aber *qualitative* Aspekte berücksichtigt.

Aus diesem Grund fordert Aberle [2, S. 16] die Einbeziehung von *Qualitätsdifferenzen*, die sich zwischen den einzelnen Verkehrsträgern hinsichtlich fallspezifischer Transportanforderungen ergeben können, wobei deren Bemessung auf Kriterien wie Zuverlässigkeit, Flexibilität, Transportzeit und -sicherheit basieren. Dies bedeutet, dass bei einer solchen Betrachtung *qualitative Faktoren* bei der Transportmittelwahl einfließen (siehe u.a. [28, S. 86f]), wodurch Preiserhöhungen, beispielsweise beim Straßengüterverkehr, (zunächst) zu keiner Veränderung im Nachfrageverhalten führen, da aufgrund von Nutzenerwartungen in einem bestimmten Umfang ein höherer Preis akzeptiert wird. Es kann daher von einem Vorliegen *partieller Substitutionslücken* (bzw. *Isolated sellings*) gesprochen werden (siehe [2, S. 16]), d.h., in bestimmten Situationen muss zunächst von einer *unelastischen Reaktion* ausgegangen werden, die erst bei einer deutlichen Veränderung der Preisrelationen umschlägt (siehe u.a. [6, S. 39ff], [40, S. 256f]). Gleichzeitig bestehen in diesem Fall auch *asymmetrische Elastizitäten*, denn *Preissenkungen* beim Stra-

ßengüterverkehr führen (in der Regel) unmittelbar zu Nachfrageverlusten im Schienengüterverkehr.

Die Preis-Qualitäts-Betrachtungen sind lediglich ein Aspekt, der allerdings in der (verkehrs-)politischen Diskussion immer wieder in den Vordergrund tritt, da eine Verteuerung des Straßengüterverkehrs eine einfache (und sehr populistische) Maßnahme darstellt. Wie die bisherigen Erfahrungen mit der Einführung der *Streckenbezogenen LKW-Gebühr auf Autobahnen* (LKW-Maut) für Schwerlastfahrzeuge über 12 t zulässigem Gesamtgewicht allerdings zeigen, ergeben sich keine signifikanten Änderungen im Modal Split zugunsten des Schienengüterverkehrs (siehe u.a. [9, S. 211f], [11] und [10]). Erkennbar ist eine Zunahme der eingesetzten LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von *unter* 12 t zur Umgehung der Mautzahlungen (siehe u.a. [41, S. 35]) sowie als einziger deutlich positiver Effekt der verstärkte Einsatz emissionsarmer Fahrzeuge (siehe u.a. [12, S. 15ff], [13]) als Ergebnis der emissionsabhängigen Mautstaffelung.

Unabhängig von den Diskussionen hinsichtlich staatlicher Eingriffe in den Wettbewerb muss auch die Frage gestellt werden, ob bestimmte Verkehrsträger überhaupt relevante Wettbewerber in den einzelnen Märkten bzw. Teilmärkten sein können. Es ist deshalb zu untersuchen, ob sich nicht aufgrund der Anforderungen an die zu erbringenden Transportleistungen die Anzahl der potenziellen Wettbewerber reduziert, unter Umständen nur noch auf einen einzigen, was zu einer Einschränkung auf einen *intramodalem* Wettbewerb führt.

Eine solche Situation zeigt sich zum Beispiel in den transatlantischen Gütertransporten, bei denen sich zwei (produktbezogene) Teilmärkte ergeben, die durch jeweils einen (quasi-monopolistischen) Verkehrsträger dominiert werden und untereinander keine bzw. marginale Konkurrenzbeziehungen aufweisen. Zum einen handelt es sich um den *Seeverkehrsmarkt*, der durch Massengutverkehre sowie Containerverkehre im Rahmen multimodaler Transportketten geprägt ist, und zum anderen um den *Luftfrachtmarkt*, bei dem in erster Linie hochwertige Güter von geringem Gewicht und Volumen mit zeitkritischen Anforderungen eine Rolle spielen. Eine ähnliche Situation zeigt sich bei Verkehren auf bestimmten Relationen im europäisch-asiatischen Raum, auch wenn bei diesen der Schienengüterverkehr (u.a. mit der *Transsibirische Eisenbahn*) als Alternative zur Verfügung steht. Allerdings reichen deren Kapazitäten in keiner Weise für eine erkennbare Aufkommensverlagerung und damit für ein Entstehen von Wettbewerb mit dem transkontinentalen Seeverkehr. Erwartet werden maximal 300.000 TEU (siehe [4]), was ca. drei Prozent des Containerumschlags im Hamburger Hafen von 9,89 Mio. TEU im Jahr 2007 entspricht. Auch zum Luftfrachtverkehr zwischen Europa und Asien kann der Schienengüterverkehr keine marktrelevante Alternative darstellen, bedingt durch die Transportlaufzeiten und die zum Teil erheblich höheren Sicherheitsrisiken. Allerdings schließt dies selbstverständlich nicht aus, dass in entsprechenden Situationen auch einzelne Nachfragenischen bedient werden können.

Somit reduziert sich die Frage nach der Existenz intermodalen Wettbewerbs auf die *terrestrischen* Verkehre und damit auf den Straßen- und Schienengüterverkehr

sowie den Güterverkehr auf Binnenwasserstraßen². Einbezogen werden kann an dieser Stelle auch der Seeverkehr, da dieser bei entsprechenden geographischen Voraussetzungen eine Alternative darstellt. In den folgenden Ausführungen erfolgt allerdings eine Einschränkung auf die (klassischen) Verkehrsträger im terrestrischen Bereich. Vergleicht man diese in ihren Grundstrukturen, zeigt sich, dass der Straßengüterverkehr die einzige Form darstellt, die als autarkes (und damit *monomodales*) System angesehen werden kann, d.h., das unabhängig von der Einbeziehung eines anderen Verkehrsträgers bei der Realisierung von Transportabläufen zwischen Ver- lader und Empfänger ist. Die beiden anderen Verkehrsträger können, abgesehen von wenigen standortbedingten Ausnahmen, den Transport nur unter Einbeziehung von mindestens einem anderen System durchführen, in der Regel dem Straßengüterverkehr, der sich aufgrund seiner hohen Flexibilität als Ergänzung im Vor- und Nach- lauf anbietet.

Aus diesen grundsätzlichen Überlegungen heraus ergibt sich zwangsläufig die Frage, ob und in welchem Umfang eine Konkurrenzsituation zwischen den einzelnen Verkehrsträgern tatsächlich gegeben ist (siehe u.a. [45], [35, S. 91ff], [19]). Untersucht man diese Frage auf der Basis von *Affinitätsdiagrammen* (siehe u.a. [15]), zeigt sich eine Differenzierung in drei *Affinitätsbereiche* und vier *Konkurrenzbe- reiche* (siehe Abbildung 3), die allerdings sehr ungleich verteilt sind, bedingt u.a. durch die differierenden Güterstrukturen und die daraus resultierenden Anforderun- gen.

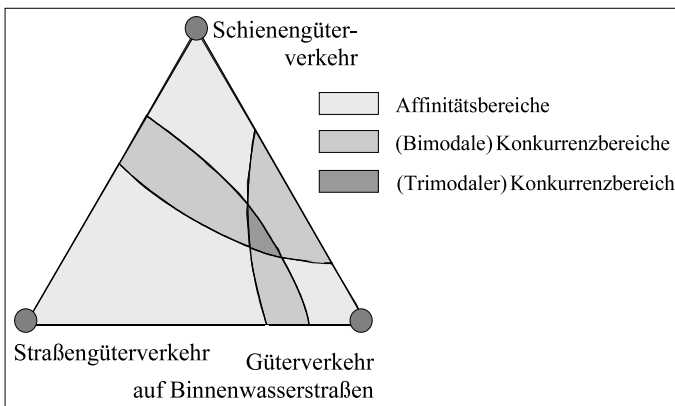


Abb. 3 Affinitätsdiagramm für die terrestrischen Verkehrsträger.

Hieraus lässt sich ableiten, dass eine Differenzierung in *Teilmärkte* mit *unterschiedlichen Wettbewerbssituationen* die vorhandenen Strukturen im Güterverkehr genauer beschreibt. Bei einer Abgrenzung von Teilmärkten wird in erster Linie die

² Nicht einbezogen sind die Gütertransporte über Rohrleitungsnetze, da diese in der Regel keine öffentliche Infrastruktur, sondern geschlossene Systeme privater Unternehmen (Pipelines, etc.) darstellen, sowie (elektrische) Leistungsnetze, bei denen verkehrliche Aspekte nicht relevant sind.

Art der zu erbringenden *Transportleistung* ein wesentliches Kriterium sein. Weitere Möglichkeiten einer Differenzierung bestehen auf der Grundlage der *Art* der zu *befördernden Güter*, der anfallenden *Transportentfernungen*, bestehender *gesetzlicher Regelungen* oder *technischer Randbedingungen*. Eindeutig abgrenzbare Teilmärkte bilden die im Folgenden skizzierten Beispiele:

- *Kurier-, Express- und Paketdienste* (KEP-Dienste): Das Sammeln und Verteilen von (gewichts- und volumenspezifizierte) Sendungen bildet einen Teilmarkt, bei dem aufgrund der strukturellen Gegebenheiten (u.a. bedingt durch die Standorte der Versender bzw. Empfänger) keinesfalls von einem *intermodalen Wettbewerb* zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern ausgegangen werden kann, da hier ausschließlich der Straßengüterverkehr (mit einer faktischen Monopolstellung) eine vertretbare Lösungsform darstellt (unabhängig davon, ob auf einzelnen Relationen in dem Gesamtsystem auch der Schienengütertransport und / oder der Luftfrachttransport einbezogen werden). Es kann somit (lediglich) von einem *intramodalen (horizontalen) Wettbewerb* unter den vorhandenen Anbietern gesprochen werden.
- *Auslieferung im Handel*: Die Auslieferung von *Handelsware* stellt einen weiteren Teilmarkt dar, der aufgrund der spezifischen Anforderungen nur über den Straßengüterverkehr abgewickelt werden kann. Entscheidend sind hierbei die Standorte der Kunden (beispielsweise in Innenstädten), die Bedienungsfrequenz und das Mengenaufkommen. Ein *intermodaler* Wettbewerb findet in diesem Teilmarkt nicht statt, wobei außerdem durch das Auftreten von *Werkverkehren* auch ein *intramodaler* Wettbewerb unterbunden werden kann.
- *Containertransport*: Eine andere Situation zeigt sich bei Containertransporten, insbesondere bei größeren Entfernungen. Hier besteht, soweit die technischen Rahmenbedingungen gegeben sind, eine *intermodale Konkurrenz* zwischen dem Straßen- und Schienengüterverkehr bzw. dem Güterverkehr auf Binnenwasserstraßen oder aber dem *Kombinierten Ladungsverkehr* (KLV) als zusätzliche Alternative. Allerdings kann dies keine grundsätzliche Aussage sein, insbesondere dann, wenn qualitative Aspekte (u.a. die Einhaltung von Terminen etc.) bzw. die Verfügbarkeit von Transportwegen von Bedeutung sind.

Diese drei Beispiele verdeutlichen, dass eigentlich kein in sich *homogener Güterverkehrsmarkt* existiert, sondern in den meisten Fällen eine Struktur mit mehr oder minder *exakt eingrenzbaaren Teilmärkten* vorliegt, in denen unterschiedliche Wettbewerbsstrukturen mit differierenden Teilnehmern vorherrschen.

4 Umweltpolitische Einflussnahme auf die Güterverkehrsmärkte

Die Verkehrsmittelwahl ist immer wieder unter umweltpolitischen Gesichtspunkten ein Diskussionspunkt. Hierbei wird argumentiert, dass es zu Wettbewerbsverzerrungen zugunsten des Straßengüterverkehrs kommt, da dieser nur unzureichend mit den tatsächlich verursachten Kosten belastet wird. Ausgangspunkt ist hierbei die

Frage der Berücksichtigung *externer Effekte*, d.h., in welchem Umfang treten neben den *prozessbezogenen* auch *gesamtwirtschaftliche* Kosten auf (siehe hierzu u.a. [43, S. 76ff], [2, S. 572ff], [18]). Diese entstehen mit der Bereitstellung der Verkehrsinfrastruktur, so u.a. durch die notwendige *Flächeninanspruchnahme* sowie die *Bodenversiegelung* mit den daraus resultierenden ökologischen Folgewirkungen (siehe u.a. [25, S. 160ff]). Eine wesentlich größere Bedeutung erhalten allerdings die unmittelbar aus den Leistungserstellungsprozessen resultierenden Effekte, in erster Linie die *CO₂-*, *Schadstoff-* und *Lärmemissionen* sowie die (nicht durch Versicherungsleistungen abgedeckten) *Verkehrsunfall-* und *-unfallfolgekosten* (siehe u.a. [25, S. 103ff bzw. 167ff], [2, S. 582], [20]). Da es sich hierbei um *nicht-monetär erfassbare* Effekte handelt, stellt sich die Frage einer ausreichend exakten Erfassung und (monetären) Bewertung der Auswirkungen, die aufgrund der fehlenden quantifizierbaren Grundlagen nicht unproblematisch ist.

So zeigen sich (siehe u.a. [25, S. 175ff], [1], [26], [27], [38, S. 86ff], [18]) bei vorliegenden Untersuchungen zu den externen Kosten des Straßenverkehrs zum Teil *eklatante Abweichungen* in den Angaben hinsichtlich der verursachten Kosten. Diese differieren (siehe [1]) beim Straßengüterverkehr zwischen 2,86 und 18,25 Mrd. Euro, d.h., mit einer Abweichung von 538%. Auch wird bei Verron et al. [44, S. 28f] von „... seriösen Kostenschätzungen aus der neueren Zeit ...“ gesprochen, wenn die Berechnungen der „... durch den Straßengüterverkehr verursachten Umwelt- und Unfallkosten in Deutschland zwischen 9 (...) und 32 Mrd. € (...) jährlich ...“ liegen, was einer Abweichung von in diesem Fall (nur) 355% entspricht. Betrachtet man diese Zahlenangaben, drängt sich zwangsläufig die Frage auf, inwieweit derartige Aussagen eine ausreichend nachvollziehbare Basis für eine verlässliche Messung und Zuordnung externer Kosten bilden können (siehe u.a. [18]). Außerdem basieren die vorliegenden Kostenabschätzungen zum Teil auf Daten, in denen beispielsweise die technischen Entwicklungen der vergangenen Jahre nicht eingeflossen sind. Dies betrifft bei den Straßenfahrzeugen u.a. die Fahrzeugsicherheit (Umfang der Unfallfolgekosten) sowie auch die Reduzierung der (betriebsbedingten) Schadstoffemissionen durch entsprechende Standards (siehe u.a. [18]). Im Nutzfahrzeugbereich sind dies im Zeitraum von 1990 (EURO 0) bis 2009 (EURO V), bezogen auf die Emissionsgrenzwerte für Dieselmotoren, mehr als 80%.

Ungeachtet der unsicheren Ausgangssituation aufgrund der eingesetzten Messverfahren und den (zum Teil nicht nachvollziehbaren) Berechnungsverfahren wird in der öffentlichen Diskussion insbesondere dem Straßengüterverkehr eine unzureichende Berücksichtigung der gesamtwirtschaftlichen Kosten angelastet. Es wird allerdings hierbei häufig übersehen oder aber auch verdrängt, dass die Möglichkeit der Realisierung von Mobilität (im Rahmen des Straßenverkehrs) eine Reihe *positiver Effekte* bedingt (siehe u.a. [3], [5], [48, S. 50f], [2, S. 598ff]), die nicht unerhebliche Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftlichen Strukturen haben. So wird die verfügbare (Straßen-)Verkehrsinfrastruktur nicht nur durch den Güterverkehr genutzt, sondern u.a. auch durch den motorisierten Individualverkehr (MIV) und den ÖPNV, durch Sicherheits- und Rettungsdienste sowie durch Versorgungs- und Betreuungsfahrten.

Bei einem korrekten Nutzen-Kosten-Vergleich müssten eigentlich diese positiven Effekte in die Berechnungen einbezogen werden, wobei selbstverständlich auch hier die Problematik einer nutzen-adäquaten Bewertung und Zuordnung zu sehen ist. Außerdem beinhaltet eine Verkehrsinfrastruktur auch eine Erschließungsfunktion, die von erheblicher Bedeutung ist, u.a. in Verbindung mit *strukturpolitischen Entwicklungszielen*. Diese beziehen sich auch auf ökonomische Überlegungen, denn schon Launhardt [31, S. 160f] stellte fest, dass eine für den Verbraucher vorteilhafte *Wettbewerbssituation auf Konsumgütermärkten* in einem erheblichen Umfang von der Leistungsfähigkeit der Verkehrssysteme (und -netze) abhängt (siehe u.a. [5]). Dieser Aspekt einer qualitativen Verbesserung der Versorgung der Bevölkerung muss in die Diskussionen einfließen, ebenso wie die Auswirkungen auf den sozio-kulturellen Bereich. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Frage einer verursachungsgerechten Zuordnung von externen Kosten (und konsequenter Weise auch externen Erlösen) eine objektiv nicht lösbare Aufgabe darstellt (siehe u.a. [40, S. 89ff]). Außerdem lassen sich, u.a. bedingt durch politische Einflüsse, Zweifel hinsichtlich der Seriosität der (bisher) ermittelten Ergebnisse nicht grundsätzlich ausschließen, insbesondere auch mit Blick auf die oben angesprochenen extremen Abweichungen.

Auch die immer wieder hervorgehobenen Vorteile des Schienenverkehrs und des Verkehrs auf Binnenwasserstraßen (siehe u.a. [20]) müssen kritisch betrachtet werden (siehe u.a. [48, S. 71f]). So ist einerseits der Anteil dieser Verkehrsträger an der Bewältigung des Güterverkehrs vergleichsweise gering, bedingt durch die fehlende Eignung zur Abdeckung der bestehenden Nachfrage. Andererseits kommen die generell unterstellten *ökologischen* Vorteile tatsächlich *nur* dann zum Tragen, wenn auch die *systemtechnischen* Vorteile genutzt werden (können), in diesem Fall insbesondere die Massenfähigkeit und der Transport über größere Entfernungen. Hinzu kommt beim Schienengüterverkehr auch die Frage der *Energieerzeugung*, d.h., um die systembedingt anfallenden Emissionen korrekt zu erfassen, muss dieser Punkt einbezogen werden. Wird beispielsweise die Energie aus Braunkohle erzeugt, kann in der Regel nicht mehr von einer ökologischen Vorteilhaftigkeit gesprochen werden, insbesondere auch im Vergleich mit dem Straßengüterverkehr, wenn dieser mit LKW der Schadstoffklasse EURO IV und höher durchgeführt wird. Ein Vorteil bezüglich der Emittierung von Schadstoffen ist nur dann gegeben, wenn der Bahnstrom aus Kernenergie oder aber aus erneuerbaren bzw. regenerativen Energien stammt.

Ein weiterer kritischer Punkt in diesen Diskussionen ist die Frage der *Transportentfernungen*, da diese einen wesentlichen Faktor bei der Verkehrssystementscheidung darstellt. So lag für das Jahr 2007 (bezogen auf die Quell- und Zielverkehre in der Bundesrepublik Deutschland) der Anteil aller durchzuführenden Transporte (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) im Entfernungsbereich bis 150 km bei 77,6 %, bis 250 km bei 86,0 % während auf über 500 km nur 4,8 % entfallen (siehe u.a. [14, S. 250]). Dies bedeutet, dass, soweit nicht spezifische Netzstrukturen vorliegen, lediglich ein vergleichsweise geringer Anteil des Güterverkehrsaufkommens *nicht* ausschließlich straßenverkehrs-affin ist, d.h., aufgrund der nachfragebedingten

Anforderungen existiert, wie oben angesprochen, in vielen Bereichen kein intermodaler Wettbewerb.

Geht man nun von der Annahme aus, dass alle derzeit im Straßengüterverkehr über *kurze Entfernungen* und auf *gering belasteten Relationen* (beispielsweise in der Fläche) transportierten Güter, bei denen es sich im Wesentlichen *nicht* um (auf Punkt-zu-Punkt-Relationen) transportierte Massengüter sondern um Verteil- und Sammelverkehre handelt, über *andere* Verkehrsträger abgewickelt werden, ergeben sich ökonomische und auch ökologische Probleme. Unabhängig von der Frage der verkehrstechnischen Machbarkeit wären die dann entstehenden externen Kosten, insgesamt gesehen, deutlich höher, ebenso wie die (letztendlich durch den Verbraucher zu zahlenden operativen) Transportkosten. Hinzu kommt die mangelnde Netzfähigkeit des Schienenverkehrs und des Transports auf Binnenwasserstraßen, die dann zwangsläufig den Straßengüterverkehr im Vor- und Nachlauf bedingen, wodurch zusätzliche Kosten aufgrund der erforderlichen Umschlagvorgänge anfallen.

Auch wenn unter ökologischen Gesichtspunkten eine stärkere Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene bzw. die Binnenwasserstraße erstrebenswert ist, muss die Frage der *tatsächlichen Realisierbarkeit* gestellt werden. Es muss in der derzeitigen Situation davon ausgegangen werden, dass die wesentlichen Anteile des (terrestrischen) Güterverkehrs nur auf der Straße abgewickelt werden können, da aufgrund der Transportanforderungen und technischen Randbedingungen *keine* ökonomisch und auch ökologisch vertretbare Alternative existiert. Außerdem kann es bei einem Einsatz nicht bzw. weniger geeigneter Verkehrsträger zu deutlich höheren ökologischen Belastungen kommen, durch die die mit einer Verkehrsverlagerung verbundenen (ökologischen) Zielsetzungen konterkariert werden.

5 Fazit und Ausblick

Betrachtet man den Güterverkehrsmarkt, ist festzustellen, dass dieser nicht als ein einheitlicher Markt betrachtet werden darf, sondern dass bei der Verkehrssystementscheidung von einer Vielzahl *unterschiedlich strukturierter Teilmärkte* auszugehen ist. Diese sind durch zum Teil stark differierende Strukturen gekennzeichnet, so dass ein Modal Split im *intermodalen* Wettbewerb letztendlich als eine *theoretische* Größe zu betrachten ist, mit Hilfe derer (grundlegende) verkehrspolitische Zielsetzungen abgebildet werden. Wie in Abbildung 3 skizziert, sind weite Bereiche des Güterverkehrsmarktes lediglich durch einen *intramodalen* bzw. einen *stark reduzierten intermodalen* Wettbewerb geprägt, d.h., es existieren in einer Vielzahl von Fällen für einzelne Marktsegmente *bestimmte* Verkehrsträger, die eine *Quasi-Monopolstellung* aufweisen, wobei diese in der Regel auf dem Fehlen einer Substituierbarkeit basiert.

Die angestrebten Verlagerungseffekte, insbesondere vom Straßen- auf den Schienengüterverkehr, sind deshalb, auch wenn die (verkehrs-)politischen Zielsetzungen (derzeit) andere Schwerpunkte aufweisen, nur sehr begrenzt realisierbar, nicht nur

unter ökonomischen sondern auch unter ökologischen Gesichtspunkten. Eine (binär geprägte) Differenzierung in ökologisch „gute“ und „schlechte“ Verkehrsträger hat somit keinen Sinn, da ein letztendlich entscheidender Aspekt, die oben skizzierten Verkehrswertigkeiten, unberücksichtigt bleibt. Es mag auf den ersten Blick unsinnig erscheinen, obwohl es Realität ist, dass ein Verkehrsträger mit umweltbezogenen Vorteilen aufgrund seiner systemspezifischen Eigenschaften nicht immer die beste ökologische Lösung darstellt und auch zukünftig nicht darstellen kann.

Problematisch ist außerdem, dass im Schienengüterverkehrsbereich aufgrund der (immer noch politisch gestützten) Quasi-Monopolisierung des Marktes zugunsten der DB *Schenker Rail AG* (siehe u.a. [26], [42]), die trotz gegenteiliger Aussagen (siehe u.a. [22, S. 61ff]) weiterhin existiert, die möglichen positiven Auswirkungen eines (intramodalen) Wettbewerbs hinsichtlich einer Marktanteilsausweitung nicht gegeben sind. Die wesentliche Ursache hierfür ist die fehlende Trennung von Netz und Betrieb, die nach wie vor eine entscheidende Grundlage für die Diskriminierung von Wettbewerbern bietet (siehe u.a. [8, S. 150ff], [23]). Ein weiterer kritischer Punkt ist die *Verhinderung* der Nutzung (von ökologisch interessanten) *innovativen Transportlösungen*, wie beispielsweise im Fall des Fahrzeugkonzepts *GigaLiner* im Straßengüterverkehr (siehe u.a. [36]). Mit der Blockierung soll zugunsten des Quasi-Monopolisten DB *Schenker Rail AG* der Markteintritt eines (aufgrund seiner Systemauslegung eigentlich nicht vorhandenen) Wettbewerbers unterbunden werden, sowie auch den bestehenden Strukturen des (hinsichtlich notwendiger Neuinvestitionen finanziell erheblich eingeschränkten) Güterverkehrsgewerbes Rechnung getragen werden.

Werden, wie in den vergangenen Jahren, undifferenziert Verkehrsverlagerungen von der Straße auf die Schiene bzw. Binnenwasserstraße gefordert und entsprechende (mehr oder minder kurzfristige) Maßnahmen eingeleitet, müssen auch die hieraus resultierenden Konsequenzen öffentlich genannt werden. So muss auf der politischen Seite deutlich erklärt werden, ob man dem (*mündigen*) Bürger in der Zukunft *negative Auswirkungen* im Wettbewerb aufgrund von Einschränkungen in der Verkehrsmittelwahl zumuten will, was mit erheblichen (strukturellen) Konsequenzen verbunden sein wird, u.a. hinsichtlich funktionierender Märkte, insbesondere auch im Einzelhandel, sowie steigender Kosten für den Bürger (als Endpunkt von Wertschöpfungsketten). Außerdem betrifft dies nicht nur die notwendige Vernetzung der zunehmend internationalisierten Leistungserstellungsprozesse, sondern bei entsprechenden Maßnahmen unter Umständen auch die grundsätzliche Frage der Gewährleistung einer ausreichenden *individuellen Mobilität*.

Die politischen Institutionen sind daher gefordert, nicht nur hinsichtlich der Vorgabe von (ökonomisch nachvollziehbaren) Rahmenbedingungen klare Aussagen zu treffen, sondern auch bezüglich derer mittel- und langfristigen (finanziellen) Auswirkungen für den Bürger. Dies bedeutet, dass die Folgen einer politischen Entscheidung in allen Konsequenzen transparent gemacht werden müssen, d.h., die angestrebten Ergebnisse und ihre meist vielschichtigen Folgewirkungen müssen offen diskutiert werden. Eine Situation, wie sie sich im Energiebereich mit der verfehlten Politik bezüglich der erneuerbaren und regenerativen Energien in den letzten zehn Jahren gezeigt hat (u.a. durch deren grenzenlose Überschätzungen und nicht er-

kannte bzw. vernachlässigte Folgewirkungen), sollte sich im Verkehrsbereich nach Möglichkeit nicht wiederholen.

Literaturverzeichnis

1. Aberle, G.: Verkehrsinfrastrukturpolitik und deren Auswirkungen auf die Unternehmenslogistik. In: Isermann, H. (Hrsg.): Logistik. 2. Aufl., Moderne Industrie, Landsberg/Lech (1998) 109–124
2. Aberle, G.: Transportwirtschaft. 4. Aufl., Oldenbourg, München (2003)
3. Aberle, G., Engel, M.: Theoretische Grundlagen zur Erfassung und Bewertung des volkswirtschaftlichen Nutzens. In: Internationales Verkehrswesen 44 (1992) 169–175
4. Albert, W., Kuhlke-Fiedler, C.: Die Transsibirische Eisenbahn-Magistrale – Landbrücke zwischen Europa und Fernost. In: ETR Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004) 301–307
5. Baum, H.: Der volkswirtschaftliche Nutzen des Verkehrs. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft 68 (1997) 27–51
6. Baum, H., Gierse, M.: Aufbereitung von Preiselastizitäten der Nachfrage im Güterverkehr für Modal Split-Prognosen. Studie im Auftrag des Verkehrsforum Bahn e.V., Bonn (1990)
7. Baum, H., Pesch, S., Weingarten, F.: Verkehrsvermeidung durch Raumstruktur im Güterverkehr. Verkehrs-Verlag Fischer, Düsseldorf (1994)
8. Booz Allen Hamilton: Privatisierungsvarianten der Deutschen Bahn AG „mit und ohne Netz“. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung sowie des Bundesministeriums für Finanzen, Berlin (PRIMON-Gutachten) (2006)
9. Bühler, G.: Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr. Physica, Heidelberg (2006)
10. Bühler, G., Jochem, P.: Weniger Emissionen von Speditionen durch Verkehrsverlagerung - Welche Potenziale haben politische Instrumente? Internationales Verkehrswesen 60 (2008) 278–281
11. Bulheller, M.: Verlagerung auf die Schiene muss teuer erkaufte werden. Internationales Verkehrswesen 58 (2006) 353–355
12. Bundesamt für Güterverkehr (BAG) (Hrsg.): Marktbeobachtung Güterverkehr - Bericht Herbst 2008. Köln (2008)
13. Bundesamt für Güterverkehr (BAG) (Hrsg.): Mautstatistik - Monatstabellen November 2008. Köln (2008)
14. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2008/2009. DVV Media Group, Hamburg (2008)
15. Chemnitz, H.-D.: Die Verkehrsteilung im inländischen Güterverkehr - Darstellung mit Hilfe des Affinitätsdiagramms. Internationales Verkehrswesen 34 (1982) 239–246
16. Daduna, J.R.: Logistische Strukturen und Prozesse. In: Ammann, P., Daduna, J.R., Schmid, G., Winkelmann, P.: Distributions- und Verkaufspolitik. Fortis, Köln (2000) 281–310
17. Daganzo, C.F.: Logistics systems analysis. 2nd rev. and enl. ed. Springer, Berlin (1996)
18. Eisenkopf, A.: Logistik und Umwelt. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 2. Aufl., Springer, Berlin (2008) 1017–1050
19. Eisenkopf, A., Hahn, C., Schnöbel, C.: Intermodale Wettbewerbsbeziehungen im Verkehr und Wettbewerbsverzerrungen. In: Eisenkopf, A., Knorr, A. (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Eisenbahnpolitik. Duncker & Humblot, Berlin (2008) 9–138
20. Ellwanger, G.: Externe Kosten des Verkehrs jetzt internalisieren! In: ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 54 (2005) 62–67
21. Feess, E.: Mikroökonomie - Eine spieltheoretisch- und anwendungsorientierte Einführung. 3. Aufl., Metropolis, Marburg (2004)
22. Franz, O., Müller, G.: Zur Frage der Marktbeherrschung durch die Deutsche Bahn AG. Studie der wik-Consult im Auftrag der Deutschen Bahn AG (2006)
23. Fuchs, K.: Trassenpreise im Urteil der Gerichte. Der Eisenbahningenieur EI 59(7) (2008) 52–56

24. Gather, M., Kagermeier, A., Lanzendorf, M.: Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Bornträger, Berlin (2008)
25. Glaser, C.: Externe Kosten des Straßenverkehrs - Darstellung und Kritik von Meßverfahren und empirischen Studien. V. Florentz, München (1992)
26. Hartwig, K.-H.: Marktwirtschaftliche Optionen der Verkehrspolitik in Europa. In: Apolte, T., Caspers, R., Welfens, P.J.J. (Hrsg.): Standortwettbewerb, wirtschaftliche Rationalität und internationale Ordnungspolitik. Nomos, Baden-Baden (1999) 97–112
27. Hartwig, K.-H.: Ökologisches road pricing - Ein Instrument rationaler Umweltpolitik. In: Eckey, H.-F., Hecht, D., Junkernheinrich, M., Karl, H., Werbeck, N., Wink, R. (Hrsg.): Ordnungspolitik als konstruktive Antwort auf wirtschaftspolitische Herausforderungen. Lucius & Lucius, Stuttgart (2001) 167–188
28. Hennighausen, A.: Wegekostenfinanzierung und Lenkung im deregulierten europäischen Verkehrsmarkt. Lang, Frankfurt a.M. (2002)
29. Ickert, L., Matthes, U., Rommerskirchen, S., Weyand, E., Schlesinger, M., Limbers, J.: Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Gutachten der protrans AG im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007)
30. Ihde, G.B.: Transport, Verkehr, Logistik. 3. Aufl., Vahlen, München (2001)
31. Launhardt, W.: Mathematische Begründung der Volkswirtschaftslehre (1885). Neudruck der Ausgabe Leipzig. Scientia, Aalen (1968)
32. Maier, G., Tödting, F.: Regional- und Stadtökonomik I - Standorttheorie und Raumstruktur. 4. Aufl., Springer, Wien (2006)
33. Matthäi, J., Schubert, W.: Die Verkehrszweige im logistischen Dienstleistungsprozeß am Markt. In: Schubert, W. (Hrsg.): Verkehrslogistik – Technik und Wirtschaft. Vahlen, München (2000) 127–182
34. Meffert, H., Burmann, C., Kirchgeorg, M.: Marketing – Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung. 10. Aufl., Gabler, Wiesbaden (2008)
35. Monopolkommission (Hrsg.): Die Privatisierung der Deutschen Bahn AG/Wettbewerbs- und Regulierungsversuche im Eisenbahnverkehr. (Sondergutachten 46 und 48 der Monopolkommission) Nomos, Baden-Baden (2007)
36. Pflug, H.-C., Lange, B., Richter, F., Riebeck, L.: EuroCombi - Ein Ansatz für einen effizienten Straßengütertransport der Zukunft. In: (VDI) (Hrsg.): Nutzfahrzeuge – Lösungen für Transporteffizienz, Sicherheit und Umweltverträglichkeit. VDI, Düsseldorf (2007) 49–63
37. Rammler, S.: Güter, Gleise und Gewinne - Soziologische Anmerkungen zur Wachstumslogik des modernen Güterverkehrs. in: VDI (Hrsg.): Gesamtverkehrsforum 2003. VDI, Düsseldorf (2003) 21–36
38. Rösler, O.M.: Gestaltung von kooperativen Logistiknetzwerken. DUV/Gabler, Wiesbaden (2003)
39. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B.: The geography of transport systems. Routledge, London (2006)
40. Schulz, W.: Industrieökonomik und Transportsektor – Marktdynamik und Marktanpassungen im Güterverkehr. Kölner Wissenschaftsverlag, Köln (2004)
41. Schmidt, K.: Erfolgsfaktoren in Speditionen. Diss., Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität Dortmund (2007)
42. Slack, B., Vogt, A.: Challenges confronting new traction providers of rail freight in Germany. Transport Policy 14 (2007) 399–409
43. van Suntum, U.: Verkehrspolitik. Vahlen, München (1986)
44. Veron, H., Huckestein, B., Penn-Bressel, G., Röthke, P., Bölke, M., Hülsmann, W.: Determinanten der Verkehrsentstehung. Texte 26/05, Umweltbundesamt Dessau (Hrsg.) (2005)
45. Voigt, F.: Verkehr und Industrialisierung. Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft 109 (1953) 193–239
46. Voigt, F.: Die volkswirtschaftliche Bedeutung des Verkehrssystems. Duncker & Humblot, Berlin (1960)
47. Voigt, F.: Verkehr - Die Theorie der Verkehrswirtschaft (Band 1.1). Duncker & Humblot, Berlin (1973)
48. Willeke, R.: Nachhaltigkeit durch Wachstum. Deutscher Instituts-Verlag Köln (2002)

Integrationskonzepte für das taktische und operationale Management von Ladungsträgern

Dirk C. Mattfeld und Thomas Huth

Zusammenfassung Dynamische Aspekte in der Planung logistischer Aufgaben stellen hohe Anforderungen an die verwendeten Lösungsansätze. Das Wechselcontainerproblem (engl. Swap Container Problem, SCP) ist ein komplexes Problem aus der Transportlogistik großer Paketdienstleister. Es integriert zwei Teilprobleme, die Allokation und die Tourenplanung von Wechselcontainern in Hub-zu-Hub-Verkehren. Dieser Beitrag konzipiert integrative Planungsansätze und eine rechnergestützte Studie unterstützt die Diskussion um die Vorteilhaftigkeit solcher Ansätze.

1 Einführung und Problembeschreibung

1.1 Das Wechselcontainerproblem

Mit der Entwicklung von Hub-and-Spoke-Netzwerken im Gütertransport auf der Straße tritt das SCP bei großen Paketdienstleistern wie DHL und Hermes auf [14]. Der Transport von Paketen geschieht aus Effizienzgründen gebündelt und deren Konsolidierung wird in zentralen Umschlagpunkten (Hubs) vorgenommen. Über längere Distanzen ist es kostengünstiger, diese in größeren Bündeln zusammen zu transportieren. Die Kundenorte (Spokes) sind in der jeweiligen Umgebung der Hubs gelegen. Nach der Konsolidierung in den Quell-Hubs erfolgt die Versendung per Lkw in die Ziel-Hubs. Als Ladungsträger kommen dabei meist Wechselcontainer zum Einsatz. In diesem Beitrag betrachten wir ausschließlich die Hub-zu-Hub-Verkehre. Bei KEP-Dienstleistern ist die Mehrzahl der Fahrten an externe Frachtführer ausgegliedert.

Dirk C. Mattfeld · Thomas Huth

Technische Universität Braunschweig, Mühlentpfordtstr. 23, 38106 Braunschweig, GERMANY

E-mail: {d.mattfeld, t.huth}@tu-bs.de

Wechselcontainer sind vergleichbar mit Containern im Schiffsverkehr und kamen Mitte der 1960er Jahre auf den Markt. Die Deutsche Post hatte im Jahr 2002 ca. 6.500 Stück im Einsatz [4]. Wechselcontainer sind 7,45 Meter lang, 2,5 Meter breit, 2,6 Meter hoch und wiegen ca. 2,5 Tonnen bei einer Zuladung von ca. 15 Tonnen. Sie haben ausklappbare Füße zur Lagerung und können dadurch ohne zusätzliches Gerät vom Lkw abgestellt und wieder aufgenommen werden.

Die *Beladung* der Wechselcontainer in den Hubs wird durch Paketroboter oder manuell durchgeführt [35, 38]. Ein beladener Wechselcontainer stellt mit seinem Be- und Entladeort einen *Transportauftrag* dar. Zwei Wechselcontainer und damit zwei Transportaufträge können gleichzeitig durch einen Lkw transportiert werden. Das Ziel der Planung sind distanzminimale Transporte, wozu Transportaufträge sinnvoll miteinander kombiniert werden müssen. Dies ist die Aufgabe der *Tourenplanung*. Aufträge müssen dabei ohne Unterbrechung, d.h. ohne zwischenzeitliches Abstellen an einem Nicht-Auftragsort, umgesetzt und mehrere Hubs miteinander verbunden werden. Folgende Eigenschaften der Tourenplanung können ausgenutzt werden:

- I. *Mitnahme*: Es ist erlaubt, bis zur maximalen Kapazität von zwei Einheiten Wechselcontainer auf einer oder mehreren Teilstrecken miteinander zu kombinieren. Es sind volle und leere Wechselcontainer kombinierbar.
- II. *Umweg*: Mitnahme in Verbindung mit der Möglichkeit über weitere Hubs zu fahren, vergrößert die Kombinationsmöglichkeiten von Wechselcontainern erheblich. Wenn sich diese zusätzlichen Hubs nicht auf der direkten Verbindung zwischen Be- und Entladeort des Transportauftrags befinden, spricht man von Umwegen.

Lkw seien durch einen Frachtführer gegeben und die kompletten Aufträge durch Fremdvergabe realisiert (Vergütung auf Basis der Tourenpläne). Fahrzeuge kehren am Ende der Tour zu ihrem Start-Hub zurück. Es seien ausreichend Wechselcontainer für das Transportaufkommen mindestens einer Periode vorhanden.

Nach der Transportphase werden die Wechselcontainer an ihren Bestimmungsorten *entladen* und stehen als leere Wechselcontainer zur Verfügung. Mit den bekannten Transportaufträgen der nächsten Periode ist es möglich, fehlende leere Wechselcontainer für die nächste Belade- und Transportphase zu bestimmen. Bei einem bekannten Angebot und einer bekannten Nachfrage nach leeren Wechselcontainern stellt die Allokationsentscheidung ein klassisches *Transportproblem* dar. Von Hubs in Netzwerken mit vielen leeren Wechselcontainern werden Hubs mit einem Bedarf an Wechselcontainern bedient und dadurch Fehlbestände ausgeglichen. In einem dynamischen Umfeld ergibt sich ein mehrperiodiges Transportproblem. Wechselcontainer, die in diesem Zusammenhang transportiert werden, nennen wir *Allokationsaufträge*. Traditionell folgt die Umsetzung der Transporte und Allokationen sequenziell, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Allokation (Bestimmung der Quell-Hubs) kann wegen der bekannten zukünftigen Auftragslage innerhalb der Tourenplanung erfolgen. Dies ist möglich, da Wechselcontainer ein homogenes Gut darstellen und es demzufolge unerheblich ist, welchem Quell-Hub sie entstammen.

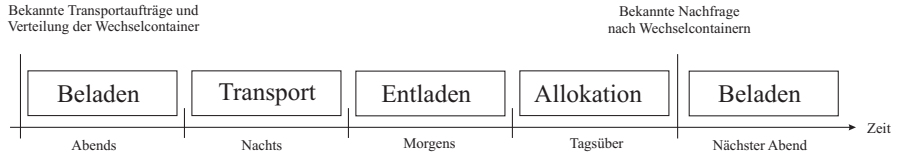
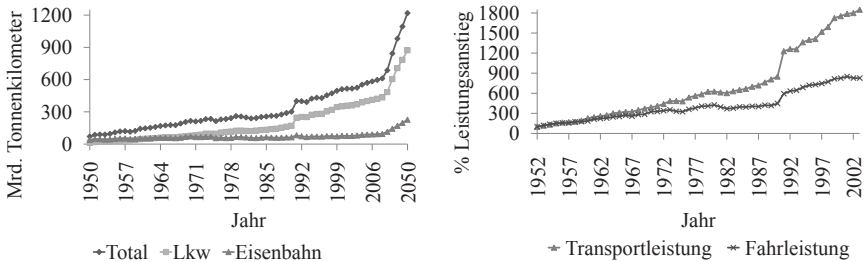


Abb. 1 Das Wechselcontainerproblem im Zeitverlauf.

Ziel der Arbeit ist es, Planungsstrategien für gute Tourenpläne und Allokationen zu entwickeln. Das wird typischerweise durch Pläne mit einer geringen Ressourcenbeanspruchung erreicht. Dieser Beitrag setzt sich einerseits mit der sequenziellen Vorgehensweise und andererseits vor allem mit der Analyse von Ansätzen zur integrativen Planung der beiden Teilprobleme auseinander. Einige Arbeiten zu eng verwandten Problemen beschäftigen sich mit der integrativen Betrachtung von Leerfahrten und Transportfahrten [30, 31, 15, 3, 11, 36, 7, 23].

1.2 Entwicklungen auf dem deutschen Transportmarkt

Beim Transport wird ein signifikant hoher Anteil der zum Transport verwendeten Ressourcen leer bewegt. Diese Leerfahrten sind ein Teil der erbrachten Verkehrsleistung [22, S. 11]. Das bedeutet, dass die Steigerung der Ausnutzung der Ressourcen und die Verringerung der leer zurückgelegten Distanzen wesentlich zur Effizienzsteigerung im Gütertransport beitragen können. Abbildung 2 belegt diese Beobachtung im deutschen Schienen- und Straßengüterverkehr [6].



2.1: Transportleistung im Bundesgebiet 1950 bis 2008 und Prognose bis 2050

2.2: Relativer Leistungsanstieg der Transportleistung im Vergleich zur Fahrleistung

Abb. 2 Transportleistung im Straßengüterverkehr ist nicht gleich Fahrleistung.

Die Transportleistung stieg von 70,4 Mrd. Tonnenkilometern im Jahr 1950 auf insgesamt 596,5 Mrd. Tonnenkilometern im Jahr 2007 (vgl. Abb. 2.1). Prognosen sagen eine Entwicklung auf 1218 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2050 voraus. Im Vergleich dazu entwickelte sich die Fahrleistung weit weniger rapide

(vgl. Abb. 2.2). Das Jahr 1952 gilt als Referenzjahr (100%). Während sich die Transportleistung bis 2002 auf 1.850% steigerte, stieg die Fahrleistung nur auf 827% des Referenzwertes an. Dies ist auch ein Erfolg effizienten Planens in der Transportlogistik.

In früheren Untersuchungen wurde der Anteil der Leerfahrten an den insgesamt zurückgelegten Distanzen analysiert. Das Potenzial für die Kostenreduktion in der Transportlogistik durch die Verringerung von Leerfahrten ist bemerkenswert. Zusammenfassend ist festzustellen:

- Schweizer Schienenverkehr: 12.000 leere Frachtwaggons verschiedenen Typs werden täglich zwischen 850 Stationen bewegt [16].
- US-amerikanischer Schienenverkehr: Geschätzte 40% der durchschnittlichen Fahrzeit eines Fahrzeuges sind Leerfahrten [29].
- Deutscher Schienenverkehr: Auf Leerwagenkilometer entfallen 32% der gesamten gefahrenen Wagenkilometer [26, 1].
- Britischer Straßengüterverkehr: Etwa 30% der Fahrzeuge werden leer bewegt [9].
- U.S. amerikanischer Straßengüterverkehr: 12% der zurückgelegten Meilen großer Transportunternehmen aus dem Komplett- und Teilladungssektor werden leer gefahren [10].
- Deutscher Straßengüterverkehr: Leerfahrtenkilometer von 22% im Straßengüterverkehr und 29,7% im Werkfernverkehr wurden benötigt [26, 1].

Ergebnisse dieser Untersuchungen können auf Wechselcontainer übertragen werden. Da es sich bei Wechselcontainern um ein homogenes Gut handelt, kann das Management dieser Behälter als Transportproblem mit einer Güterart modelliert werden.

1.3 Übersicht

In Kapitel 2 werden das SCP in die Planungsebenen der Transportlogistik eingeordnet und die zwei relevanten Ebenen in Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3 detailliert erläutert. Daraus leiten sich wichtige Eigenschaften der Teilprobleme ab, die im Folgenden ausgenutzt werden sollen. Kapitel 3 schlägt die notwendigen Integrationsstrategien dazu vor. Die abgeleiteten Planungsansätze werden in den Kapiteln 3.2 und 3.3.1 skizziert. Weiterhin hat die Dynamik im SCP einen großen Einfluss auf die Konzeption der Planungsansätze. Fragestellungen, die damit in Verbindung stehen, diskutiert Kapitel 3.4. Für die rechnergestützte Beantwortung der gestellten Forschungsfragen werden in Kapitel 4 das gewählte Design der Experimente (Kapitel 4.1) und die ermittelten Ergebnisse (Kapitel 4.2) vorgestellt. Ein Fazit schließt diesen Beitrag in Kapitel 5 ab.

2 Analyse der Planungsebenen im SCP

2.1 Die Planungsebenen

Die Planungsaufgaben in der Transportlogistik lassen sich nach Crainic in strategische, taktische und operationale Aufgaben einteilen [8]. Je nach Planungshorizont decken diese verschiedene Aspekte von strukturellen Entscheidungen (Standorte, Ressourcenausstattung, Leistungen und Tarife) über Netzwerkdesign (Linienpläne) und Leerfahrzeugausgleich bis hin zur operationalen Tourenplanung und Steuerung der Ressourcen ab. Dabei bauen die kurzfristigeren Entscheidungen auf den Vorgaben der längerfristigen Entscheidungen auf. Über eine Rückkopplung werden langfristige Entscheidungen durch die Umsetzung auf kurzfristigeren Ebenen angepasst. Abbildung 3 bietet einen Überblick zu den genannten Planungsebenen.

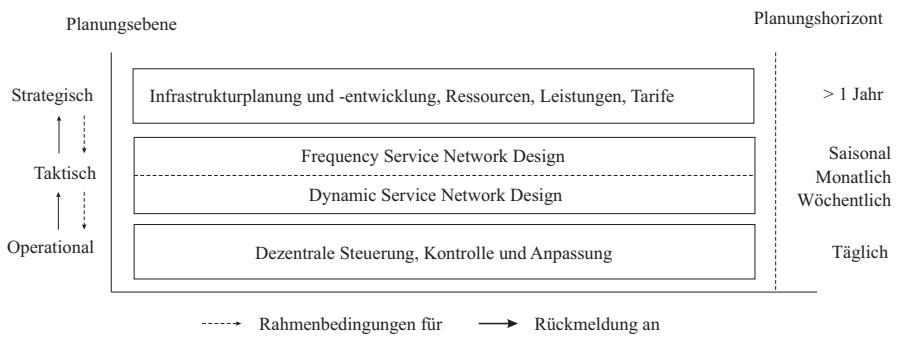


Abb. 3 Planungsebenen in der Transportlogistik.

Das SCP vereint zwei unterschiedliche Planungsaufgaben auf zwei verschiedenen Planungsebenen. Einerseits gilt es die Allokation leerer Wechselcontainer zu organisieren (taktische Ebene) und andererseits die Touren gleichermaßen für die vollen und leeren Wechselcontainer (operationale Ebene) zu planen. Die Dekomposition des SCP stellt sich demnach wie in Abbildung 4 dar. Diese Problemdekomposition ist angelehnt an das im Zeitverlauf dargestellte SCP (vgl. Abbildung 1) und der Ausgangspunkt für die traditionelle Vorgehensweise bei der Lösung des SCP in

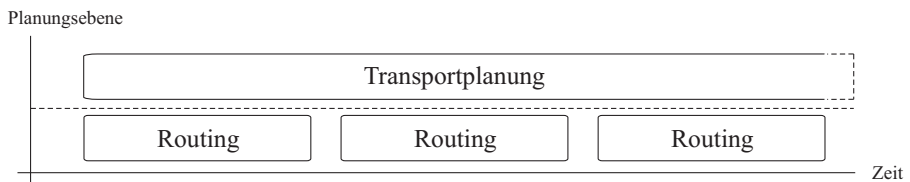


Abb. 4 Dekomposition des SCP auf Basis der identifizierten Probleme.

der Praxis. Zuerst wird für eine bestimmte Anzahl von Perioden das Allokationsproblem durch ein Transportmodell gelöst. Danach findet periodenweise das Routing der Transport- bzw. Allokationsaufträge statt.

2.2 Dynamic Service Network Design

Die taktische Planung kann bezüglich ihrer Ausrichtung weiter unterschieden werden in Frequency und Dynamic Service Network Design [8]. Übersichten zu entsprechenden Planungsaufgaben bieten [14, 24, 39]. Frequency Service Network Design zielt auf die wiederholte bzw. längerfristige Planung von Rahmentouren (Linienefahrpläne) ab. Diese Rahmentouren werden auch beim Transport von Paketen mit Wechselcontainern und relativ sicher vorhersagbarem Paketaufkommen generiert. Der nicht prognostizierbare Transportbedarf, der realisiert werden muss, ist Aufgabe des Dynamic Service Network Design. Modelliert wird diese Entscheidungsaufgabe typischerweise durch entsprechende Transportmodelle. In Abbildung 3 ist die Trennung der taktischen Service Network Design Ebene dargestellt.

Nach Arnold lassen sich Transportprobleme unterscheiden nach der Anzahl der betrachteten Planungshorizonte und dem zugrunde liegenden Datenmaterial [25, 2, 5]. Demzufolge handelt es sich entweder um statische (eiperiodige) oder dynamische (mehrperiodige) bzw. deterministische oder stochastische Transportprobleme. Das Allokationsproblem im SCP ist ein dynamisch-deterministisches Transportproblem und im Klassifikationsschema in Abbildung 5 hervorgehoben.

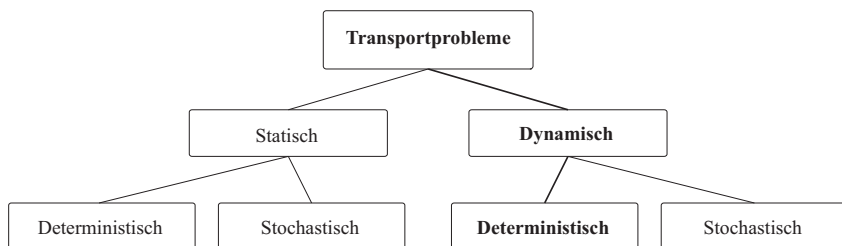


Abb. 5 Klassifikationsschema für Transportprobleme.

Prinzipiell kann ein mehrperiodiges Transportproblem durch sukzessive einperiodige Transportmodelle realisiert werden. Dies führt allerdings zu qualitativ schlechteren Lösungen, da periodenübergreifende Effekte nicht modelliert werden können. Ein Beispiel soll die Möglichkeiten der dynamischen im Vergleich zur statischen Transportplanung verdeutlichen. Dazu sei auf Abbildung 6 verwiesen. Dynamische Transportprobleme werden typischerweise in Raum-Zeit-Netzwerken mit den Perioden auf der x-Achse und den Knoten auf der y-Achse abgebildet. In Periode 1 sei das Angebot an Knoten 1 null Einheiten und an Knoten 2 und 3 jeweils eine Einheit. Eine Nachfrage ist in dieser Periode nicht vorhanden. Ginge man nun

nach dem Prinzip der einperiodigen Transportplanung vor, ergeben sich die Transportflüsse von Knoten 2 nach Knoten 1 in Periode 1, bei angenommenen kleineren Kosten auf Kante (2, 1) gegenüber Kante (3, 1). Die Ausgangssituation für Periode 2 lässt lediglich noch einen Fluss von Knoten 3 zu Knoten 2 zur Befriedigung der Nachfrage in Knoten 2 in Periode 3 zu. Die Nachfrage ist an beiden Knoten befriedigt und die Lösung, dargestellt in Abbildung 6.1, somit zulässig. Bei voraus-

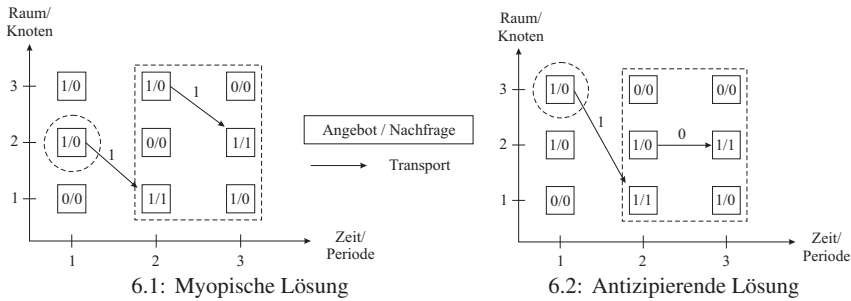


Abb. 6 Raum-Zeit-Netzwerk und zwei mögliche Lösungen für ein dynamisch-deterministisches Transportproblem.

schauender Herangehensweise ist eine Lösung mit einer Transportfahrt möglich, da die Nachfrage in Knoten 2 in Periode 3 durch den Verbleib des Wechselcontainers in Knoten 2 befriedigt werden kann. Der notwendige Transport für Knoten 1 in Periode 2 geht so von Knoten 3 aus. Abbildung 6.2 stellt die vorausschauende Lösung im Raum-Zeit-Netzwerk dar.

2.3 Tourenplanung

Die Tourenplanung baut auf den Ergebnissen der taktischen Planungen auf. Für eine Periode wird ein distanzminimaler Tourenplan entwickelt. Für die beispielhafte Lösung des *Allokationsproblems* in Abbildung 7.1 bedeutet das, dass ein leerer Wechselcontainer von Knoten 1 nach Knoten 2 und drei leere Wechselcontainer von Knoten 3 nach Knoten 2 gebracht werden.

In der Tourenplanung für eine einzelne Periode erfolgt darüber hinaus noch eine fahrzeuggenaue Zuordnung der Wechselcontainer. Ein naiver Plan würde mit dem Ergebnis der taktischen Planung eine Zuordnung zu Fahrzeugen vornehmen — es würden drei Fahrzeuge für die Direkttransporte benötigt. Zwei davon verkehren zwischen Knoten 3 und Knoten 2 und eines zwischen Knoten 1 und Knoten 2. Dies stellt aber nicht das optimale Ergebnis der operationalen Ebene dar. Die *Tourenplanung* besitzt einen weiteren Freiheitsgrad, die Reihenfolgeplanung, bei der *Umwege und Mitnahmen* über weitere Knoten realisiert werden können. Im Beispiel in Abbildung 7.2 wird ein Wechselcontainer von Knoten 3 über Knoten 1

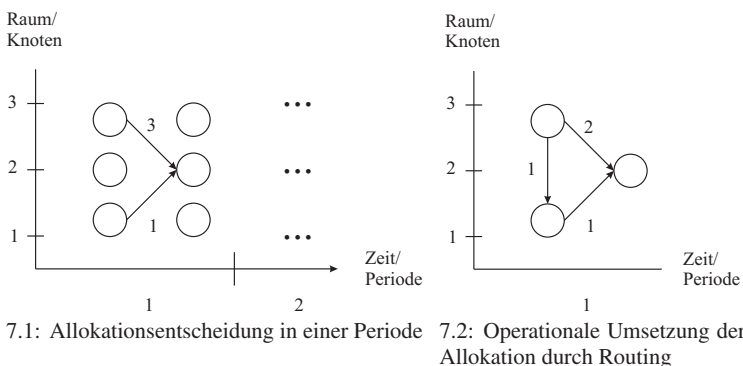


Abb. 7 Allokationsproblem und zugehörige Lösung des Routingproblems.

nach Knoten 2 gebracht. Dadurch gewährleistet die Tourenplanung, dass das Fahrzeug mit einer Kapazität von zwei Einheiten auf der Strecke $1 \rightarrow 2$ ausgelastet ist und damit kein zusätzliches Fahrzeug auf der Strecke $3 \rightarrow 2$ eingesetzt werden muss.

Wegen den Vorteilen der Tourenplanung wird sie im SCP sowohl für die feststehenden Transportaufträge als auch für die zu bestimmenden Allokationsaufträge eingesetzt. Zur Modellierung des Tourenplanungsproblems im SCP, es handelt sich um ein generalisiertes Pickup and Delivery Problem, sei auf [34] verwiesen. Zur Lösung des Problems wurde der Large Neighborhood Search Algorithmus von Ropke und Pisinger adaptiert [32].

3 Konzeption für eine integrative Betrachtung

Insgesamt sind vier Entscheidungen zu treffen:

- I. Selektion der Quelle für Allokationsaufträge,
- II. Selektion der Periode für Allokationsaufträge,
- III. Zuordnung Aufträge zu Fahrzeugen und
- IV. Reihenfolgeplanung bezüglich der zu bedienenden Hubs

Die Struktur der Planungsaufgabe wird in Abbildung 8 anhand der Sequenziellen Planung (*SP*) verdeutlicht. Ein Beziehungsdiagramm stellt die eingehenden Daten, die zu treffenden Entscheidungen und die existierenden Kommunikationsbeziehungen zwischen beiden Komponenten für den einperiodigen Fall dar.

Die Bedarfe der nächsten Perioden werden anhand der Transportaufträge ermittelt (Schritt 1). Über ein Transportmodell (Schritt 2) werden die Quellen der Allokationsaufträge bestimmt und gemäß der Zielgröße Z_a bewertet. Aus Z_a resultieren optimale Flüsse leerer Wechselcontainer (Allokationsflüsse), die als Allokationsaufträge zu interpretieren sind (Schritt 3). Anschließend setzt die Tourenplanung beide

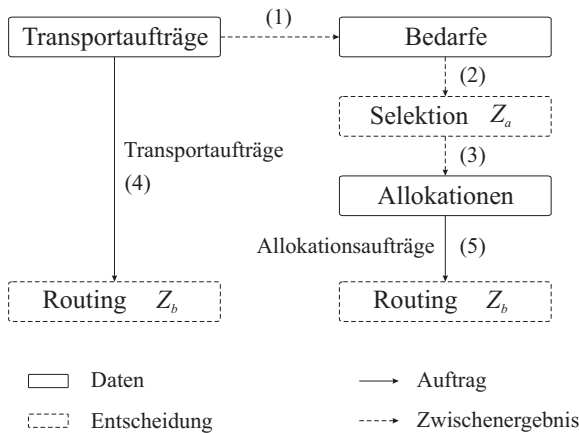


Abb. 8 Das SCP und die Sequenzielle Planung.

Auftragstypen separat gemäß eines distanzminimalen Tourenplans durch Ziel Z_b um (Schritte 4 und 5). Aufbauend auf die Sequenzielle Planung stellen wir im Folgenden zwei Integrationsstrategien vor. Es ist zu bemerken, dass Z_a gegenüber Z_b eine mehrperiodige Sicht aufweist, wohingegen Z_b gegenüber Z_a ein detaillierteres Modell verwendet. Die Zielsetzungen sind somit nicht notwendigerweise komplementär zueinander.

3.1 Arten von Integration

Die prinzipielle Herangehensweise für die Integration verlangt die gleichzeitige Betrachtung von Transport- und Allokationsaufträgen. Dabei werden zwei Nachteile der Sequenziellen Planung vermieden.

- *Nachteil 1:* Transport- und Allokationsaufträge werden getrennt betrachtet und können daher nicht durch Mitnahmeeffekte und Umwege im Routing profitieren.
- *Nachteil 2:* Das Allokationsmodell verfolgt Ziel Z_a , was keine Rückschlüsse auf die Güte der Lösung des Tourenplanungsmodells mit Allokationsaufträgen gemäß Z_b zulässt. Die Selektion ist demzufolge nicht in der Lage das Routing zu antizipieren.

Die Integration der vier Entscheidungsaufgaben kann prinzipiell nach zwei Strategien erfolgen [13, 18, 19, 20]:

- *Integration durch Koordination:* Zwei Modelle werden über einen Koordinationsmechanismus miteinander verbunden. Der Output des einen Modells stellt den Input des anderen Modells dar.
- *Integration durch simultane Planung:* Es wird ein neues Modell entwickelt, das idealerweise die Eigenschaften der zuvor getrennt betrachteten Fragestellungen

gen abdeckt. Die simultane Planung eröffnet einen aus dem Kreuzprodukt der ursprünglichen Modelle hervorgehenden erweiterten Lösungsraum. Die Modellanpassung kann beim SCP auf beiden Ebenen erfolgen. Wir sprechen im Folgenden von taktischer Integration (*TI*) und operationaler Integration (*OI*).

3.2 Integration durch Koordination

Die Komponenten im Beziehungsdiagramm von Abbildung 9 sind die gleichen wie bei der Sequenziellen Planung. Um eine Integration zu erreichen, werden die Transport- und Allokationsaufträge bei der Integration durch Koordination auf operationaler Ebene gemeinsam geplant. Die ermittelten Allokationsaufträge aus dem

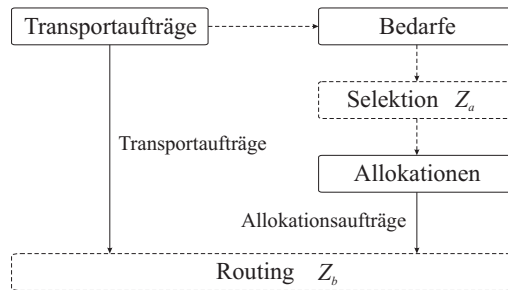


Abb. 9 Integration durch Koordination.

Transportmodell werden an die Tourenplanung kommuniziert. Die Kommunikation der Aufträge aus dem taktischen Modell ermöglicht somit die integrative Betrachtung beider Auftragsstypen innerhalb der Tourenplanung. Nachteil 1 wird somit beseitigt. Die vier genannten Entscheidungen werden allerdings auch weiterhin unabhängig voneinander getroffen. Das Transportmodell trifft die Selektionsentscheidungen für Quelle und Periode und das Routingmodell die Zuordnungs- und Reihenfolgeentscheidung.

3.3 Integration durch simultane Planung

Die Vorgabe von Allokationsaufträgen für die Tourenplanung führt zu nicht vorhersehbaren Einflüssen auf die operationale Ebene. Nur durch eine simultane Planung können die Entscheidungen zumindest teilweise integriert werden. Daher wird die Integration durch Koordination um Aspekte der simultanen Planung erweitert.

3.3.1 Taktische Integration

Die Grundidee der *TI* besteht darin, Transport- und Allokationsaufträge auf taktischer Ebene (Transportmodell) gemeinsam zu betrachten, um nach Möglichkeit paarige Transporte von Wechselcontainern zu realisieren. Durch die explizite gemeinsame Betrachtung von Transport- und Allokationsaufträgen wird versucht, die Zuordnungsentscheidung der Tourenplanung bereits im Transportmodell zu antizipieren. Damit wäre Nachteil 2 teilweise entgegnet. Abbildung 10 verdeutlicht die angepasste Vorgehensweise bei der Planung.

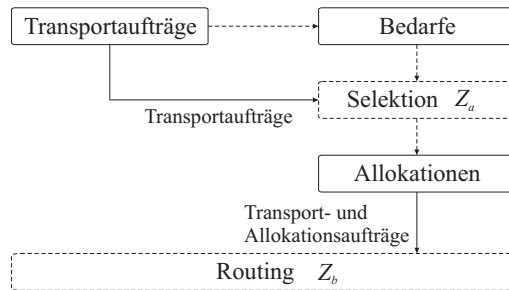


Abb. 10 Taktische Integration.

Transportaufträge gehen nicht mehr direkt in die Tourenplanung ein, sondern werden über die Allokationsentscheidung und damit unter Berücksichtigung von Z_a einbezogen. Neben den aggregierten Bedarfen stehen somit detaillierte Informationen über die Auftragsstruktur zur Verfügung. Diese können allerdings nur durch Anpassung der Kostenstruktur für die Transportplanung berücksichtigt werden. Dazu folgende Überlegung: Ein Wechselcontainer verursacht für den Transport auf einer Strecke zwischen zwei Knoten Kosten von einer Einheit. Wird ein zweiter Wechselcontainer auf dieser Strecke transportiert, so kann er ohne zusätzliche Kosten mitgenommen werden. Abbildung 11 illustriert diese Beobachtung. Die Tourenpla-

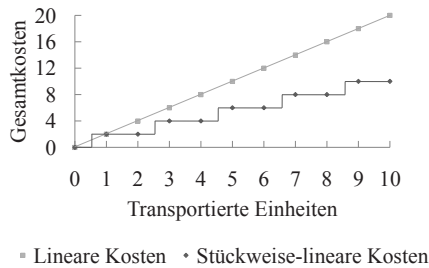


Abb. 11 Gegenüberstellung von Transportkostenverläufen.

nung berücksichtigt die Möglichkeit der Bündelung und Mitnahme, jedoch nicht das klassische Transportmodell [17]. Durch die Anpassung der Entscheidungsvariablen in Verbindung mit den veränderten Kosten kann allerdings dieses Feature der Tourenplanung (und damit Z_b) durch die Transportplanung antizipiert werden. Die Anpassung des taktischen Transportmodells unterstützt somit die operationale Tourenplanung in Bezug auf die *Zuordnungsentscheidung* von Wechselcontainern (Aufträgen) zu Fahrzeugen. Was nicht möglich ist, ist die Antizipation der *Reihenfolgeplanung*. Gezielte Entscheidungen für Umwege bleiben weiterhin der Tourenplanung vorbehalten, da aus Transportmodellen lediglich Direkttransporte resultieren.

3.3.2 Operationale Integration

Die Integration der Selektionsentscheidung für ein Quell-Hub und die Zuordnungs- und Reihenfolgeplanung bietet die Operationale Integration *OI* [19]. Abbildung 12 verdeutlicht dies. Durch die simultane Modellierung dieser drei Entscheidungen ist

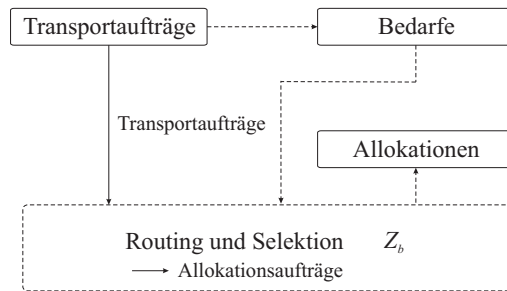


Abb. 12 Operationale Integration.

die optimale Lösung für das einperiodige SCP erreichbar. Die Selektionsentscheidung bezüglich der Periode kann nicht getroffen werden bzw. es folgt immer die Allokation in der aktuellen Periode und keine antizipierte Allokation für zukünftige Perioden. Die sich daraus ergebenden Nachteile wurden bereits in Kapitel 2.2 besprochen. Das folgende Kapitel beschreibt die sich daraus ergebenden Fragestellungen näher.

3.4 Die Rolle der Dynamik

Dynamische Tourenplanungsprobleme werden aufgrund ihrer Komplexität meist in Form von mehreren einperiodigen Tourenplanungsproblemen modelliert und gelöst [27, 28, 33, 12]. Dynamische Transportprobleme hingegen können in für das SCP ausreichender Größe als Gesamtproblem gelöst werden [5, 19]. Die Dekompositi-

on des Problems im dynamischen Kontext erfolgt demzufolge wie in Abbildung 4 dargestellt. Daraus ergibt sich ein Nachteil für Planungsansätze, die taktische Informationen vernachlässigen. Dies ist bei der *OI* der Fall. Die *TI* hingegen baut auf die Entscheidung im taktischen Transportmodell auf und berücksichtigt somit zukünftige Bedarfe. Ein Beispiel wurde bereits in Abbildung 6 gegeben. *OI* würde hier die in Abbildung 6.1 dargestellte Lösung implementieren wohingegen *TI* die in Abbildung 6.2 dargestellte Lösung favorisieren würde. Stellt man die kurzfristige und die antizipierende Vorgehensweise gegeneinander, so ändern sich die Beziehungsdiagramme wie in Abbildung 13 dargestellt.

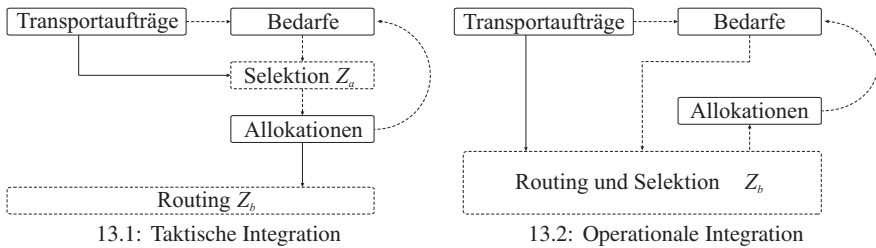


Abb. 13 Beziehungsdiagramme für die *TI* und die *OI* im dynamischen Kontext.

Bei der Taktischen Integration in Abbildung 13.1 zeigt sich eine *Beeinflussung der zukünftigen Bedarfssituation* durch die aktuelle Selektionsentscheidung, gekennzeichnet durch den geschwungenen Pfeil. Es sollte sich demnach als vorteilhaft herausstellen, wenn die Selektion durch ein dynamisches Transportmodell die zukünftigen Transportaufträge berücksichtigt. Dies geschieht durch das Ziel Z_a . Die Operationale Integration in Abbildung 13.2 bestimmt die Allokationsaufträge lediglich in Abhängigkeit von der nächsten Periode. Z_b berücksichtigt demnach keine zukünftigen Bedarfssituationen und kann damit die Allokationsflüsse nicht an zukünftige Bedarfe adaptieren.

Zusammenfassend sind für eine Analyse der Optimierungspotenziale folgende Fragen zu beantworten:

- I. Welche Potenziale bergen die Integrationsstrategien?
- II. Eine Integration aller vier Entscheidungen (Gesamtmodell) erscheint nicht möglich. Daher stellt sich die Frage, welche Entscheidungen integriert betrachtet werden sollen: *TI* integriert die Selektions- und die Zuordnungsentscheidung, *OI* integriert die Selektion der Quell-Hubs sowie die Zuordnungs- und Reihenfolgeentscheidungen?

4 Analyse der Optimierungspotenziale

Im Folgenden sollen die aufgeworfenen Fragen anhand von Computerexperimenten beantwortet werden. Aufgrund der Konzentration auf die konzeptionelle Herangehensweise in diesem Beitrag möchten wir auf eine detaillierte Erläuterung der rechnergestützten Studie verzichten. Vielmehr erscheint es sinnvoll, stark aggregierte Daten für den Vergleich der Planungsansätze für die Diskussion heranzuziehen. Dementsprechend folgt nach einem Überblick über die durchgeführten Experimente und deren Parametrisierung ein prozentualer Vergleich der Planungsansätze und damit die gemeinsame und umfassende Analyse der an anderer Stelle publizierten Einzelergebnisse [19, 21].

4.1 Design der Experimente

Die durchzuführenden Experimente sollen unterschiedliche Szenarien widerspiegeln. Dies betrifft vor allem folgende beiden Parameter.

4.1.1 Netzwerkstruktur

Die Experimente bauen auf künstlich generierten Benchmarkinstanzen R101, C101, RC101 von Solomon mit 25 Knoten auf [37]. Diese unterliegen unterschiedlichen Verteilungen: 1) zufällig, 2) geclustert und 3) eine Mischform und repräsentieren die Koordinaten der Hubs. Damit wird die Auswirkung verschiedener Strukturen im Operationsgebiet eines Paketdienstleisters mit unterschiedlich dicht besiedelten Regionen auf die Planungsansätze simuliert.

4.1.2 Verteilung der Auftragsorte

Im Netzwerk existieren Hubs mit einem unterschiedlich hohen Aufkommen an Paketen. Dies wird realisiert durch:

- *Gleichverteilung*: Die Anzahl der benötigten Wechselcontainer sind über alle Hubs gleichmäßig verteilt.
- *Normalverteilung*: Einige Hubs sind durch höhere Aufkommen gekennzeichnet als andere. Dadurch entsteht ein Ungleichgewicht von leeren Wechselcontainern. Als ein Beispiel mag die Abgrenzung von Ballungszentren gegenüber ländlichen Landstrichen dienen.
- *Normalverteilung (ssd)*: Eine Normalverteilung mit einer geringeren Standardabweichung führt dazu, dass nur noch sehr wenige Hubs als Quellen und Senken von Aufträgen zu beobachten sind. Das zuvor genannte Ungleichgewicht

verstärkt sich, etwa bei einer Häufung von Versandlagern in einer sonst wenig entwickelten Region (siehe etwa Bad Hersfeld).

- *Normalverteilung (cls)*: Normalverteilung mit örtlich getrennten (geclusterten) Pickup- und Delivery-Hubs. Das bedeutet, dass Hubs mit einem sehr großen Paketaufkommen sich in einer Region des Netzwerks befinden und Hubs, die das Ziel dieser Pakete markieren, befinden sich in einem anderen Bereich des Netzwerks. Ein Ausgleich des Wechselcontainerbedarfs kann somit nicht mehr durch nahe beieinanderliegende Hubs erfolgen. Ein Beispiel für solche Instanzen sind Überseehäfen als Eintrittspunkte ins System, in denen Containerschiffe sehr viele Waren bereitstellen.

Die sich daraus ergebenden Parameterkonstellationen werden für alle Planungsansätze zehn mal berechnet. Dies führt zu insgesamt 360 Experimenten. Einen Überblick bietet Tabelle 1.

Tabelle 1 Aufbau der Experimente für den Vergleich der Planungsansätze bei deterministischen Aufträgen.

Parameter	Ausprägungen	Anzahl
Netzwerkstrukturen	R101, C101, RC101	3
Verteilungen	Gleichverteilung und Normalverteilung (-,ssd,cls)	4
Planungsansätze	<i>SP, TI, OI</i>	3
Durchläufe		10
Summe		360

4.2 Vergleich der Planungsansätze

In Tabelle 2 sind die Planungsansätze bezüglich der verwendeten Auftragsortverteilungen zusammengefasst. Ein Wert repräsentiert damit den Durchschnitt aus 30 Distanzen (3 Netzwerkstrukturen und 10 Durchläufe). In der Summe über alle Verteilungen liefert *OI* die besten Ergebnisse, gefolgt von *TI*. Erwartungsgemäß führt eine fehlende Integration zu den Resultaten mit der schlechtesten Qualität bzw. längsten Distanz. Die Einsparungen an gefahrenen Distanzen liegen im Durchschnitt bei 7,1 bis 12,1 Prozent.

Betrachtet man die Gesamtdistanzen der einzelnen Verteilungen, so ist eine starke Zunahme der Verbesserungen bei sehr ungleichmäßig verteilten Auftragsorten zu beobachten. Bei gleich verteilten Auftragsorten gibt es praktisch keine Potenziale, da wenige Allokationsaufträge vorliegen. Für normal verteilte Auftragsorte können sehr ausgewogene Touren für die Allokationsaufträge beobachtet werden. Das bedeutet, dass die Orte der notwendigen Allokationsaufträge bei diesen Instanzen gleichmäßig im Netzwerk verteilt liegen und ein lokaler Ausgleich stattfinden

Tabelle 2 Vergleich der Planungsansätze für das deterministische SCP und Veränderung gegenüber der Sequenziellen Planung.

		<i>SP</i>	<i>TI</i>	<i>OI</i>
Gleichverteilung	Gesamtdistanz	13.418	13.589	13.350
	Veränderung		+1,3%	-0,5%
Normalverteilung	Gesamtdistanz	15.053	15.145	14.945
	Veränderung		+0,6%	-0,7%
Normalverteilung (ssd)	Gesamtdistanz	17.500	16.316	15.421
	Veränderung		-6,8%	-11,9%
Normalverteilung (cls)	Gesamtdistanz	25.350	21.247	18.987
	Veränderung		-16,2%	-25,1%
Alle Verteilungen	Gesamtdistanz	71.321	66.297	62.702
	Veränderung		-7,1%	-12,1%

kann. Anders verhält es sich bei der Normalverteilung mit einer kleineren Standardabweichung und den geclustert auftretenden Pickup- und Delivery-Orten. Hier lohnt sich die Berücksichtigung zukünftiger Bedarfe (*TI*) bzw. die effiziente Einplanung der aktuell notwendigen leeren Wechselcontainer (*OI*). Diese Instanzen entsprechen zudem eher der Praxis.

Bei den meisten untersuchten Instanzen lohnt sich die Verwendung von Informationen über zukünftige Bedarfe prinzipiell. Im Vergleich mit den Möglichkeiten ein einperiodiges Gesamtmodell zu lösen sind diese Planungsansätze unterlegen. Die operationale Fragestellung ist demzufolge in dieser Problemstellung und den untersuchten Parametrisierungen als wichtiger einzuschätzen als die optimale Lösung des taktischen Teilproblems. Die Tourenplanung bestimmt dabei die Allokation für die nächste Periode und weist demzufolge ein größeres Potenzial zur Verbesserung der Routen auf.

5 Fazit

Das Wechselcontainerproblem ist ein komplexes Problem aus dem Bereich der Transportlogistik und vereint Fragestellungen der taktischen und operationalen Planung. Durch die Integration beider Planungsebenen und der darin identifizierten Entscheidungsaufgaben können Optimierungspotenziale ausgeschöpft werden. Dieser Beitrag weist durch eine rechnergestützte Studie die Vorteilhaftigkeit integrierter Planungsansätze nach. Lediglich im für die Praxis irrelevanten Falle der gleichförmigen Verteilung der Transportmengen an Quellen und Senken ergibt sich keine Kostenreduktion aufgrund simultaner Planungen von Transport und Allokation der Wechselcontainer. Für das betrachtete Problem erscheinen die Potenziale der Tourenplanung den Potenzialen der Allokation von leeren Wechselcontainern überlegen. Daraus ergibt sich eine Vorteilhaftigkeit der Operationalen Integration

gegenüber der Taktischen Integration. Eine Übertragung auf ähnliche Problemstellungen beispielsweise aus dem Bereich des Managements von Containern oder Eisenbahnwaggons erscheint vielversprechend und sollte in zukünftigen Forschungsarbeiten aufgegriffen werden.

Literaturverzeichnis

1. Aberle, G.: *Transportwirtschaft*. 3rd edn. Oldenbourg Verlag (2003)
2. Arnold, K.P.: *Stochastische Transportprobleme*. Verlag Dr. Kovac (1986)
3. Beaujon, G., Turnquist, M.: A model for fleet sizing and vehicle allocation. *Transportation Science* 25(1) (1991) 19–45
4. Bergrath, J.: *Wechselbrücken*. Magazin - Unternehmenspraxis (2002)
5. Bookbinder, J., Sethi, S.: The dynamic transportation problem: A survey. *Naval Research Logistics Quarterly* 27(1) (1980) 65–87
6. Bundesministerium, ed.: *Verkehr in Zahlen*. DVV Media Group (2007) Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
7. Che, H., Zhang, R., Yun, W.: A coordinated inventory control of empty containers in two-depot systems. Technical report, Pusan National University (2008)
8. Crainic, T.: Long-haul freight transportation. In: Hall, R., (ed.): *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Academic Publishers (2003) 451 – 516
9. Cundill, M., Hull, P.: Reducing empty travel by goods vehicles. Technical report, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne Berkshire, G.B., Report 876 (1979)
10. Dejax, P., Crainic, T.: A review of empty flow and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science* 21(4) (1987) 227–247
11. Fagerholt, K., Christiansen, M.: A combined ship scheduling and allocation problem. *Journal of the Operational Research Society* 51 (2000) 834–842
12. Fleischmann, B., Gnutzmann, S., Sandvoß, E.: Dynamic vehicle routing based on on-line traffic information. *Transportation Science* 38(4) (2004) 420–433
13. Geoffrion, A.: Structured modelling: Survey and future research directions. *Interactive Transactions of ORMS* 1(3) (1999)
14. Grünert, T., Sebastian, H.J.: Planning models for long-haul operations of postal and express shipment companies. *European Journal of Operational Research* 122(2) (2000) 289–309
15. Haghani, A.: Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model. *Transportation Research Part B: Methodological* 23(6) (1989) 433–452
16. Herren, H.: Computer controlled empty wagon distribution on the SSB. *Rail International* 8(1) (1977) 25–32
17. Hitchcock, F.: The distribution of a product from several sources to numerous localities. *Journal of Mathematics and Physics* 20 (1941) 224–230
18. Huth, T., Mattfeld, D.: Dynamics of the multi-depot pickup and delivery problem. In: *Sixth Triennial Symposium on Transportation Analysis*. (2007)
19. Huth, T., Mattfeld, D.: Integration of routing and resource allocation in a dynamic logistics network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17(2) (2009) 149–162
20. Huth, T., Mattfeld, D.: Integration of routing and resource allocation in dynamic logistic networks. In Hasis, H.D., Kreowski, H.J., Scholz-Reiter, B., eds.: *Dynamics in Logistics*. Springer (2008) 85–93
21. Huth, T., Mattfeld, D.: Decision integration by model adaptation in dynamic service network design. (2009) in *Einreichung*.
22. Ihde, G.: *Transport, Verkehr, Logistik*. 3 edn. Verlag Vahlen (2001)
23. Imaia, A., Chen, H., Nishimura, E., Papadimitriou, S.: The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44(5) (2008)

24. Irnich, S.: Netzwerk-Design für zweistufige Transportsysteme und ein Branch-and-Price-Verfahren für das gemischte Direkt- und Hubflugproblem. PhD thesis, RWTH Aachen (2002)
25. Kelley, J.: A dynamic transportation model. *Naval Research Logistics Quarterly* 2(3) (1955) 175–180
26. Kessel+Partner: Kapazitätsauslastung und Leerfahrten im Gütertransport. In: *Deutsche Automobilzulieferer 2018: Unverändert mittelständisch*. Number 16 in *Materialien zur Automobilindustrie*. VDA (1998)
27. Kilby, P., Prosser, P., Shaw, P.: Dynamic VRPs: A study of scenarios. Technical report, APES, Strathclyde University, Glasgow, Scotland (1998)
28. Larsen, A.: The Dynamic Vehicle Routing Problem. PhD thesis, University Lyngby (2001)
29. Mendiratta, V.: A Dynamic Optimization Model of the Empty Car Distribution Process. PhD thesis, Northwestern University (1981)
30. Powell, W.: A stochastic model of the dynamic vehicle allocation problem. *Transportation Science* 20(2) (1986) 117–129
31. Powell, W.: An operational planning model for the dynamic vehicle allocation problem with uncertain demands. *Transportation Research Part B: Methodological* 21(3) (1987) 217–232
32. Ropke, S., Pisinger, D.: An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science* 40(4) (2006) 455–472
33. Sandvoß, E.: Dynamische Tourenplanung auf der Basis von Online-Verkehrsinformationen. PhD thesis, Universität Augsburg (2002)
34. Savelsbergh, M., Sol, M.: The general pickup and delivery problem. *Transportation Science* 29(1) (1995) 17–29
35. Scholz-Reiter, B., Freitag, M., Rekersbrink, H., Wenning, B.L., Gorldt, C., Echelmeyer, W.: Auf dem Weg zur Selbststeuerung in der Logistik - Grundlagenforschung und Praxisprojekte. In Wäscher, G., Inderfurth, K., Neumann, G., Schenk, M., Ziems, D., eds.: *Begleitband zur 11. Magdeburger Logistiktagung Intelligente Logistikprozesse: Konzepte, Lösungen, Erfahrungen*, Logisch-Verlag (2005) 166–180
36. Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S.: The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 43(1) (2007) 39–59
37. Solomon, M.: Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research* 35(2) (1987) 254–265
38. Wellbrock, E.: Optimierung des Materialflusses bei der roboterbasierten Entnahme von logistischen Stückgütern aus Transportcontainern. Technical report, Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH (2008)
39. Wieberneit, N.: Service network design for freight transportation: A review. *OR Spectrum* 30(1) (2008) 77–112

Computing Optimized Stock (Re-)Placements in Last-In, First-Out Warehouses

Ulrike Ritzinger, Matthias Prandtstetter, and Günther R. Raidl

Abstract Within this work, we focus on the optimization of storage location assignments arising in warehouses with storage locations applying a last-in, first-out throughput policy. The sequence of goods to be stored is, however, not entirely known such that for each item the currently best storage location has to be identified almost immediately. Caused by this imperfect data and by stock removals concurrently performed it is necessary to apply relocation operations from time to time, which might range from a few operations to relocations lasting a working day depending on the workload of the warehousemen. For this purpose we propose an ad hoc stocking strategy as well as a storage relocation strategy based on variable neighborhood descent. Supported by experimental tests we compare variants of our approaches with each other and with formerly used stocking strategies showing that the number of conflicts could be significantly reduced by the proposed approach. Furthermore, an application of the relocation strategy can significantly improve warehouse states obtained due to imperfect stocking strategies, concurrently performed stock removals and insufficient information on production sequences.

1 Introduction

Nowadays, warehouse management is beside supply chain management one of the most important tasks in production environments. On the one hand it has to be assured that all components needed during the production process are available but on the other hand the costs induced by storage capacity, i.e., storage space, should be minimized. Furthermore, the access times to individual items located in the storage should be kept as low as possible in order to optimally serve customers. For

Ulrike Ritzinger · Matthias Prandtstetter · Günther R. Raidl
Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, Vienna, AUSTRIA
E-mail: u.ritzinger@rat.at, {prandtstetter, raidl}@ads.tuwien.ac.at

collecting ordered items, it is of interest to minimize the access times by computing short routes through the warehouse [9, 10]. Yet, these tours are strongly dependent on the layout structure of the warehouse. Therefore, a reorganization of the storage exploiting properties of the goods to be stored and typical customer behavior [8] may be in some situations more convenient.

Anyhow, about 33 percent of money invested in logistics can be attributed to the costs arising in inventory management [14]. Therefore, a proper investigation of savings that might be achieved within this part of supply chains is necessary and in many cases profitable, see [14] for a literature review of the work on this topic over the last 30 years.

One of the main factors in the organization of warehouses is the throughput policy to be used within the storage [13]. The best known strategies are last-in, first-out (LIFO) and first-in, first-out (FIFO) policies. There are also other policies especially developed for different kinds of goods to be stored, e.g., first-produced, first-out (FPDO) or first-expire, first-out and first-deliver, first-out (FDFO). FPDO and FDFO mainly find application in lines of businesses coping with products having best-before dates assigned [13]. While these main inventory decisions have to be made when building warehouses, it often has to be decided on a daily or even shorter basis, which articles to be placed at which locations.

In this work, we focus on such a storage location problem arising in paper industry. To optimize the production efficiency (e.g., minimize cutting loss) it is common to temporarily store the just produced paper rolls in an intermediate store until the customers pick up their orders. Obviously it is desired that this process should be performed as fast as possible. Therefore, it is highly preferable that all paper rolls of currently served customers are directly accessible. If this is not the case the according rolls should be reinserted into the storage at the best possible location. Especially at the end of a working day there might be time left for reordering the complete warehouse such that all orders to be processed during the next day are optimally accessible.

In the next two sections a detailed description of the underlying problem and a more formal definition including an evaluation function for estimating the likelihood of additional paper roll relocations during stock removal are given. Based on this evaluation function a stocking strategy is presented in Section 4, and Section 5 includes the description of relocation strategies utilizing variable neighborhood descent and greedy methods. Both approaches are evaluated on different warehouse states in Section 6. Conclusions including future work are finally drawn in Section 7.

2 Production Process

In paper industry it is common to apply a three stage production process: At first paper roll blanks are produced which are cut into paper rolls of individual lengths in the second stage. At last the produced rolls are shipped.

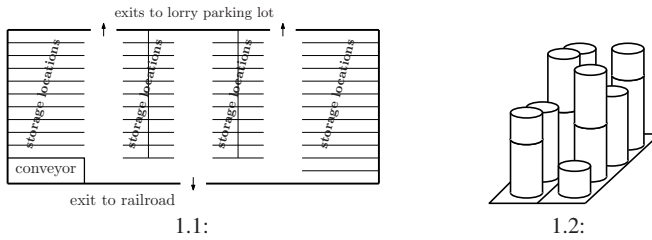


Fig. 1 1.1 Schematic plan of the warehouse and 1.2 extract of the storage.

In our case, the first two steps of the production process are optimized such that all ordered rolls of same paper type and grammage are consecutively produced and that the offcut of each blank is as small as possible. Due to this the production order of rolls is not sorted according to any attribute which is relevant for shipping. After cutting the paper rolls are transported on a conveyor belt into the warehouse.

The warehouse itself is organized as follows: The storage consists of parallel aisles and each aisle contains to its left and right side storage locations for storing rolls, also called strips (see Figure 1.1). Although, there is no structural separation between the strips they are always accessed from the corresponding aisle. In each strip the first roll is placed at the end of it and all further rolls are put in according to the last-in, first-out throughput policy, see Figure 1.2 for an extract of two strips with rolls stored at them. The strips are all physically identical except with respect to their capacities. But there are some strips dedicated to the storage of rolls of short length, i.e., rolls with less than 1250 mm. Such rolls can be loaded in a more space saving way and thus they should be stored together at these special locations. There are three workers (one is responsible for placing the rolls from production and two are assigned for picking up outgoing rolls) who are equipped with forklift trucks for transporting the rolls, mobile terminals displaying various information (e.g., where the roll should be stored) and mobile bar code scanners to communicate each operation (removal and placing of rolls) to a centralized database. Therefore, the current state of the warehouse including the advance in the loading of paper rolls is known at any time.

While the assignment of rolls to storage locations is done in a greedy manner it often occurs that rolls have to be rearranged to provide direct access to those rolls for shipping. This leads to increased removal times. Therefore, it is important that the removal sequence of the rolls is considered at the time of storage. The most important criteria therefore are the shipping dates of the rolls. Besides this there are also other attributes: It is desired that the rolls are grouped by customers, i.e., all rolls for one customer should be at the same location. In addition, each customer has a preferred type of shipment (by lorry or freight car) and therefore the rolls should be placed in those strips which are near the according exit, see also Figure 1.1. For a complete list of constraints and different aims regarded in this work and their influence on an evaluation function used for our optimization approach, see Section 3.

Unfortunately, it is in our case not possible—neither for the worker nor for any computer aided decision system—to gather the exact production sequence. This is mainly caused by frequently breakdowns or failures of certain machines needed for special types of paper such that for a short term other paper types are produced or express orders of customers which have to be fulfilled almost immediately. Thus it has to be mentioned that the investigated storage location assignment problem is an *online problem* [2]. A further reason for not globally planning a fixed storage location for each roll is that customers frequently pick up their order lately or even too early.

Therefore, the depositer has to estimate the best available storage location for each roll to be stored. In literature there exists some work for the related *storage location assignment problem* [3, 1, 5, 7], which has been shown to be \mathcal{NP} -hard [1]. Anyhow, according to the classification used in [3] the storage location assignment problem examined within this work uses class-based storage as stock location assignment strategy, i.e., each roll is assigned to a certain class according to its attributes and then (arbitrarily) stored at a location dedicated to that class of paper rolls. To overcome this arbitrariness in selecting the best available storage location for each paper roll, we propose a more fine grained evaluation function within this work that assigns to each (possible) warehouse state a positive value approximately indicating the likelihood of occurring conflicts, i.e., paper roll reallocations, during stock removals. The most promising paper roll assignments are suggested to the warehousemen via a mobile terminal.

Although this approach works quite well, it must not be disregarded that due to stock removals there might arise the situation that an explicit rearrangement of paper rolls significantly improves the warehouse situation, i.e., reduces the number of conflicts in future stock removals. Therefore, we additionally use a *variable neighborhood descent* [4] based approach for computing rearrangement operations that can be performed by warehousemen currently not busy. Again, there are some requirements which have to be regarded when implementing such a method. Mainly, it has to be assured that after each single rearrangement operation, the warehouse state is reasonable good such that in case the rearrangements have to be suspended the stock removal operations can still be efficiently performed. Due to the fact that rearrangement operations are only performed when no other jobs are to be completed it is not possible to count on these reallocations during storage location assignment. In addition, the number of times one roll is moved should be kept low.

3 Problem Definition

Within this section we provide a more formal definition of the introduced problem. In addition we present an evaluation function which will in the further context be used for approximately indicating the likelihood of conflicts, i.e., necessary paper roll reallocations, arising during stock removal operations.

We are given a warehouse W and a set of n_r paper rolls $R = \{1, \dots, n_r\}$, which includes all rolls in the system. The warehouse itself consists of n storage locations $i \in W = \{1, \dots, n\}$, which are organized according to a last-in, first-out throughput policy. Therefore, we can define a tuple $S_i = (s_{i,1}, \dots, s_{i,f_i})$ for each strip $i \in W$ indicating that roll $s_{i,l}$ has been assigned to i before $s_{i,l+1}$, with $1 \leq l < f_i$ and $f_i \in \mathbb{N}_0$ indicating the fill level of strip i , i.e., the number of rolls stored in storage location $i \in W$. While each strip $i \in W$ has a maximum capacity c_i , each paper roll $j \in R$ has a given weight w_j . Obviously, at each time $\sum_{j \in S_i} w_j \leq c_i$ holds. Further we are given a set of n_o orders O stated by costumers, where each order $K \in O$ is a set $K \subseteq R$ of paper rolls and define the set $\Omega(i) = \{K \in O \mid \exists l : s_{i,l} \in K\}$ as the set of all orders having at least one paper roll $l \in R$ stored in strip $i \in W$. In addition, we define set $D_K = \{i \in W \mid S_i \cap K \neq \emptyset\}$ as the set of storage locations containing at least one roll of an order $K \in O$. As already mentioned the exact shipping date is not known, but an expected shipping date d_K as well as the preferred shipping mode m_K are given for each order $K \in O$.

Each paper roll $j \in R$ has a certain positive length, and those rolls with a length shorter than 1250 mm are called *small goods*. Constants $w_i^{\text{small}} \in \{0, 1\}$ indicate which storage locations $i \in W$ are dedicated to storing small goods; for these locations w_i^{small} is one and for all others zero. Similarly, constants $w_i^{\text{truck}} \in [0, 1]$ and $w_i^{\text{train}} \in [0, 1]$ define with which preference paper rolls shipped by truck or train should be stored at locations $i \in W$, respectively. Note that $w_i^{\text{truck}} + w_i^{\text{train}} = 1$ does not necessarily hold. Finally, we define a (current) warehouse state \mathcal{W} as a snapshot of the current situation in the warehouse.

Evaluation Function

To present a method for either finding the best storage location(s) for a given paper roll to be stored or moving operations for improving the situation in the warehouse within this work, it is necessary to develop an evaluation function that approximately indicates the likelihood of conflicts, i.e., paper roll reallocations, during stock removals for a given warehouse state \mathcal{W} . The basic concept of this evaluation function $E(\mathcal{W})$ is as follows: In case $E(\mathcal{W}) = 0$ holds it is very likely that during stock removals no additional reallocations of paper rolls are necessary. With increasing value of $E(\mathcal{W})$ this likelihood decreases, i.e., the likelihood of reallocations increases. In addition, not only the likelihood increases but also the expected number of occurring conflicts, i.e., more reallocations will become necessary during each stock removal step. Therefore the value of $E(\mathcal{W})$ is not (strongly) bounded from above, since it is almost always possible to generate a worse warehouse state by adding an additional roll to the storage that generates additional conflicts. The evaluation process, however, is based on restrictions implied by observations stated by the warehouse manager of our paper production company.

The evaluation of a current warehouse state \mathcal{W} is done in two steps: firstly all possible conflicts arising in single strips $i \in W$ are computed and secondly a rat-

ing regarding the complete warehouse is done. Both values are then appropriately weighted and the sum represents the objective value of the warehouse state. The most important reason for conflicts is the expected shipping date d_K of the orders $K \in O$. Therefore, we introduce function $\text{date}(i) \geq 0$ counting the number of conflicts in strip $i \in W$ occurring with respect to the shipping dates associated with the rolls stored in i . A conflict occurs for two paper rolls $s_{i,l}$ and $s_{i,l'}$, with $s_{i,l}, s_{i,l'} \in S_i$, iff $l < l'$ and $d_K < d_{K'}$, with $s_{i,l} \in K$, $s_{i,l'} \in K'$, respectively, and $K, K' \in O$, i.e.,

$$\text{date}(i) = \sum_{l=1}^{f_i-1} \sum_{l'=l+1}^{f_i} \chi^d(s_{i,l}, s_{i,l'}), \quad \forall i \in W, \quad (1)$$

with $\chi^d(j, j') = 1$ iff roll j is going to be shipped before j' ; otherwise $\chi^d(j, j') = 0$, with $j, j' \in R$.

Another important reason for conflicts is the mix-up of different orders within one strip. Therefore function $\text{order}(i)$ counts the number of different orders stored at location $i \in W$; in addition the inhomogeneity of orders stored in the same strip is considered, yielding the following definition:

$$\text{order}(i) = |\Omega(i)| + \sum_{l=1}^{f_i-1} \chi^o(s_{i,l}, s_{i,l+1}), \quad \forall i \in W, \quad (2)$$

with $\chi^o(j, j') = 1$ iff the orders of rolls $j, j' \in R$ are different; otherwise $\chi^o(j, j') = 0$. Next, the number of strips used for storing all rolls of an order $K \in O$ is computed. Function $\text{distr}(\mathcal{W})$ sums up these distribution values of all orders:

$$\text{distr}(\mathcal{W}) = \sum_{K \in O} D_K. \quad (3)$$

Since the orders of customers are known, it can be decided if there are still some paper rolls in production or not. Of course, it should be emphasized that each order is stored at few locations (the best case is if only one strip is needed for each order). Therefore, it is meaningful to reserve space in the storage for each uncompleted order. This is done by using function $\text{cap}(\mathcal{W})$ which computes the number of paper rolls not yet stocked and which cannot be assigned to the same storage location as the other paper rolls of the same order:

$$\text{cap}(\mathcal{W}) = \sum_{K \in O} \max \left\{ \min_{i \in W} \left\{ \left| K \setminus \bigcup_{i' \in W} S_{i'} \right| - \left(c_i - \sum_{j \in S_i} w_j \right) \right\}, 0 \right\} \quad (4)$$

In addition, function $\text{compl}(\mathcal{W})$ counts the number of orders that are not yet completely stocked and have at least one stocked roll blocked by another one of another order. Thus, blocking of not yet completely stocked orders is also penalized.

Since the process of loading the rolls on lorries or freight cars should be finished as fast as possible (by minimizing the lengths of the paths the warehousemen have to move the rolls). Therefore, we store paper rolls preferably close to the exit pre-

sumably later used during stock removal. This is done according to function $\text{ship}(i)$, with $i \in W$, under the assumption that v_j^t is equal to one iff roll $j \in R$ should be shipped with trucks; otherwise $v_j^t = 0$ holds:

$$\text{ship}(i) = \sum_{j \in \mathcal{S}_i} \left(v_j^t \cdot (1 - w_i^{\text{truck}}) + (1 - v_j^t) \cdot (1 - w_i^{\text{train}}) \right), \quad \forall i \in W. \quad (5)$$

Analogously, function $\text{small}(i)$, with $i \in W$, increases when long paper rolls are stored in strips dedicated to small goods or when short paper rolls are stored in strips not dedicated to small goods. Under the assumption that $v_j^s = 1$ for paper rolls $j \in R$ with a length shorter than 1250 mm (and $v_j^s = 0$ in other cases), $\text{small}(i)$ can be defined as:

$$\text{small}(i) = \sum_{j \in \mathcal{S}_i} \left| v_j^s - w_i^{\text{small}} \right|, \quad \forall i \in W. \quad (6)$$

Empty strips are the most valuable ones because virtually all paper rolls or even orders can be stored in them while increasing the objective function only minimally, if at all. Therefore, it should be well considered at which time empty strips will be started to be used. For this, we define a function $\text{empty}(i)$ increasing the objective function by a small amount if strip $i \in W$ is not empty, i.e.,

$$\text{empty}(i) = \begin{cases} 0 & \text{if strip } i \text{ is empty} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

Finally, it is possible to define the evaluation function $E(\mathcal{W})$ which combines all previously defined functions. Each of the sub-functions is weighted using an appropriate coefficient in order to balance the influence of the different components among each other:

$$\begin{aligned} E(\mathcal{W}) = \sum_{i \in W} & \left(\gamma^d \cdot \text{date}(i) + \gamma^o \cdot \text{order}(i) + \right. \\ & \left. \gamma^s \cdot \text{ship}(i) + \gamma^e \cdot \text{empty}(i) + \gamma^\sigma \cdot \text{small}(i) \right) + \\ & \gamma^\delta \cdot \text{distr}(\mathcal{W}) + \gamma^c \cdot \text{cap}(\mathcal{W}) + \gamma^f \cdot \text{compl}(\mathcal{W}) \end{aligned} \quad (8)$$

Though objective function (8) covers the most important aspects during stocking operations in our particular paper industry application, there are further special cases that can be considered. For a more detailed approach we refer to [12].

4 Stocking Strategy

Based on function (8) it is easy to develop a straight forward greedy stocking strategy. For this purpose, one simply needs to compute the changes in $E(\mathcal{W})$ when

Algorithm 1: Stocking Strategy.

Input: \mathcal{W} : current warehouse state, $j \in R$: paper roll
Data: *bestStrip*: so far best strip for paper roll j ,
bestEval: value of best so far found warehouse state
Output: strip $i \in W$ roll j should be assigned to

bestStrip \leftarrow null ; *bestEval* \leftarrow ∞ ;
foreach $i \in W \setminus \{i'\}$ **do**
 $\mathcal{W}' \leftarrow \mathcal{W}$ after adding paper roll j to strip i ;
 if $E(\mathcal{W}') < \textit{bestEval}$ **then**
 bestStrip \leftarrow i ;
 bestEval \leftarrow $E(\mathcal{W}')$;
return *bestStrip*;

adding a roll to the storage. After doing this for all strips that one resulting in the best warehouse state is chosen. For pseudocode of this procedure see Alg. 1.

Influence of the Weighting Coefficients

As already mentioned above each of the sub-functions of the objective function (8) is weighted by a factor for controlling its influence on the evaluation of a given warehouse state. Unfortunately, it is not trivial to find a parameter setup being valid for any production setting. Even more, there exists no generally good weighting factor adjustment. Although this might be disappointing for warehouse operators, this circumstance holds a crucial advantage: By tuning these parameters and adapting the relations it is possible to implement different stocking strategies. For example it might be promising to ensure for certain customers that paper rolls ordered by them are directly accessible all the time. In this case one will increase the weighting factor γ^o such that a mix up of orders becomes very unlikely. Nevertheless, this behavior might not be appropriate for all customers. In such a case the weighting factors may even be differently instantiated in dependence of the customers which finally leads to a more complex but also significantly more flexible objective function.

In this work, we use the following fixed weighting factors which was determined after consulting the warehouse manager of our case company: $\gamma^d = 150$, $\gamma^o = 5$, $\gamma^s = 1$, $\gamma^e = 20$, $\gamma^\sigma = 40$, $\gamma^\delta = 25$, $\gamma^k = 20$, $\gamma^c = 50$.

5 Relocation Strategy

Due to the online aspect of our problem, even the best stocking strategy finally results in suboptimal storage situations, which means that reallocations are necessary during shipment. Additionally, empirical data provided by our case

Algorithm 2: GreedyRelocationProcedure(\mathcal{W} , n_m).

Input: \mathcal{W} : current warehouse state, n_m : number of available relocation moves

Data: \mathcal{W}' , \mathcal{W}'' : intermediate warehouse states

Output: L: list of moves to be performed

repeat

$j \leftarrow \arg \min_{j' \in \cup_{i \in W} \{s_{i,j'} \in S_{i'}\}} \{E(\mathcal{W}') \mid \mathcal{W}' = \mathcal{W} \text{ after removing roll } j'\};$

$\mathcal{W}' \leftarrow \mathcal{W}$ after removing j ;

$i \leftarrow \arg \min_{i' \in W} \{E(\mathcal{W}'') \mid \mathcal{W}'' = \mathcal{W}' \text{ after storing roll } j \text{ at location } i'\};$

$\mathcal{W}'' \leftarrow \mathcal{W}'$ after moving j to strip i ;

if $E(\mathcal{W}'') < E(\mathcal{W})$ **then**

$\mathcal{W} \leftarrow \mathcal{W}'';$

add appropriate movement instructions to L;

$cnt \leftarrow cnt + 1;$

until $cnt \geq n_m$ or no further improvement could be achieved ;

return L;

company implies that the filling level of the storage usually is about 70–80%, i.e., the stocking opportunities are rather limited. When applying the above presented stocking strategy over a longer time, it is only able to prevent major immediate conflicts to a certain degree any more. For generally improving the warehouse state and to bypass idle times of warehousemen it is possible to perform relocations of paper rolls. Of course, the aim of this is to reduce the number of conflicts occurring during stock removals and improve the warehouse situation.

There are different types of possible relocations: The first class of reallocations is automatically to be performed during stock removal operations when one or more paper rolls are blocking rolls to be shipped. The second and more laborious type is performed during idle times of warehousemen. Dependent on the available time various movements can be done. To be flexible in this point the system has to accept inputs from the workers indicating the number of rolls to be reallocated resulting in a list of movements improving the current warehouse state.

One obvious approach for achieving this is a greedy method presented in the next section selecting always the next best paper roll for relocations. In addition, we present a variable neighborhood descent based approach generating movement lists to be processed by the warehouse workers.

5.1 Greedy Reallocation

The *greedy reallocation procedure* (GRP) removes a roll $j \in R$ which is directly accessible and causes conflicts during removal operations with highest probability, i.e., under the assumption that \mathcal{W} denotes the current warehouse state

$$j = \arg \min_{j' \in \cup_{i \in W} \{s_{i,j'} \in S_i\}} \{E(\mathcal{W}') \mid \mathcal{W}' = \mathcal{W} \text{ after removing roll } j'\}. \quad (9)$$

Afterwards this roll is reinserted into the storage at the best strip $i \in W$, i.e.,

$$i = \arg \min_{i' \in W} \{E(\mathcal{W}'') \mid \mathcal{W}'' = \mathcal{W}' \text{ after storing roll } j \text{ at location } i'\}, \quad (10)$$

where \mathcal{W}' denotes the warehouse state after removing paper roll j from its current strip. This procedure is repeated until either the number of available moves n_m is reached or there is no further improvement achievable, i.e., roll j is best stored at its original storage location. An outline of the pseudocode is given in Alg. 2. For experimental results obtained using GRP we refer to Section 6.

5.2 Variable Neighborhood Descent Based Approach

Obviously, the main disadvantage of GRP lies within the fact that moves are selected on a purely greedy basis disregarding the improvement potential of moves to be investigated in further steps. Thus, it is not possible or at least very unlikely to resolve conflicts arising in connection with paper rolls not directly accessible. We propose an approach based on *variable neighborhood descent* (VND) [4].

VND itself basically exploits the observation that any global optimum is also locally optimal with respect to any given neighborhood. Therefore, a successful application of VND mainly relies on appropriately defined neighborhood structures systematically examined. For this purpose, the first neighborhood structure is searched through until no further improvement can be achieved. Then, the next neighborhood structure is examined, but as soon as an improvement could be achieved the search is continued using the first neighborhood structure again. This is repeated until a solution is found that is locally optimal with respect to all previously defined neighborhood structures.

This implies that two criteria must be regarded when following a VND based approach: on the one hand the proper definition of neighborhood structures to be used and on the other hand an appropriate order for examining these neighborhood structures. Both aspects will be discussed in more detail in the following.

5.2.1 Neighborhood Structures

The main idea of the neighborhood structures used in this work is to resolve conflicts with respect to the sub-functions of (8) step by step. The neighborhood structures are defined as follows:

N_1 : Within this first neighborhood structure the above presented greedy reallocation procedure is applied to a given warehouse state \mathcal{W} , i.e., in each iteration that roll is moved which increases $E(\mathcal{W})$ the most.

N_2 : A new warehouse state $\mathcal{W}' \in N_2(\mathcal{W})$ of a given warehouse state \mathcal{W} is obtained from \mathcal{W} by first removing all rolls from a strip $i \in W$ such that no conflicts

with respect to the shipping dates occur in strip i , see Eq. (1). Afterwards the removed rolls are assigned immediately to other strips $i' \in W \setminus \{i\}$.

- N_3 : When examining a neighborhood based on this neighborhood structure only the last assigned rolls $j \in S_i$ of a strip $i \in W$ are removed such that all of these rolls are contained in the same order $K \in O$ and the first not removed roll is not part of that order.
- N_4 : With this neighborhood structure it is tried to merge one order $K \in O$ distributed over more than one strip into one strip holding at least one paper roll $j \in K$. Anyhow, only rolls directly accessible are considered for moving.
- N_5 : To eliminate conflicts according to Eq. (2), we introduce this neighborhood structure which removes (and immediately reassigns) all rolls of a strip $i \in W$ except for the first to i assigned rolls, all contained in the same order, i.e., after removing the rolls $S_i \subseteq K \in O$ holds. Further, it is tried to completely empty a strip containing two or more mixed up orders.
- N_6 : This neighborhood structure is defined for resolving conflicts caused by rolls placed deep inside of any strip, i.e., rolls which were assigned to this storage location relatively early. Therefore, all paper rolls of a strip $i \in W$ are removed and then assigned to other strips $i' \in W \setminus \{i\}$ in the same order they were removed. Obviously, each solution contained within a neighborhood based on N_6 contains at least one strip which is totally empty.

While the size of N_1 is in $O(1)$, the sizes of all other neighborhoods is in $O(|W|)$. The time needed for examining N_1 is bounded from above by $O(|W|^2)$. Neighborhood structure N_3 can be searched in $O(|W| \cdot \max_{K \in O} \{|K|\})$. The examination time for all other neighborhood structures is in $O(|W| \cdot \max_{i \in W} \{|S_i|\})$. In order to efficiently examine each neighborhood, an incremental update of the evaluation function is implemented and the following two step functions are used:

Worst Neighbor: This step function selects among all solutions in a certain neighborhood $N(\mathcal{W})$ that one which rearranges those rolls causing the most conflicts with respect to $E(\mathcal{W})$. Although very similar, preliminary tests revealed that a *best improvement* strategy is not as promising as this worst neighbor step function. Anyhow, in case of ties the first found is selected.

Random Neighbor: When using this step function for examining a neighborhood $N(\mathcal{W})$ one of the candidate solutions contained in $N(\mathcal{W})$ is chosen randomly. The probability for choosing one solution is proportional to the contribution of the moved rolls to the objective function (8), i.e., a roulette wheel selection is applied. Therefore, it is very likely to relocate rolls causing conflicts with high probability. At the same time, not so promising candidate solutions might also contribute to a finally computed list of relocation moves.

5.2.2 Neighborhood Order

Beside the definition of neighborhood structures the sequence to be followed when examining them is of crucial importance for VND based approaches. Although there

exist rules of thumb for ordering the neighborhoods [4], empirical tests in [6, 11, 10] revealed that dynamically chosen neighborhood orderings significantly improve the finally obtained solutions for some applications. Therefore, we investigated four neighborhood ordering strategies:

Ordered: This is the classical neighborhood ordering strategy as described in [4], i.e., the neighborhoods are arranged according to increasing size and/or examination times. Although the asymptotic examination times are similar to each other in the worst case, the actual examination times experienced in practice are on average increasing for N_1 to N_6 . Therefore, when using this neighborhood ordering, N_i is examined before N_{i+1} for $i = 1, \dots, 5$. All neighborhoods are examined according to a worst neighbor strategy.

Reversely Ordered: The contribution of neighborhoods with small indices is limited to resolving conflicts occurring for paper rolls quite recently assigned to storage locations. Since the available time for reallocations is rather short, it is very likely that conflicts for paper rolls assigned early will not be resolved during relocation phases. In addition, by first applying more time expensive rearrangements, it is possible to eliminate these conflicts. Therefore, this neighborhood ordering first examines neighborhood structure N_6 and continues with N_5, N_4, N_3, N_2 and N_1 , respectively. Again, all neighborhoods are searched using the worst neighbor step function.

Randomized: Based on the observation that the current warehouse state is permanently changing and therefore the type of arising conflicts is always in flux, a randomly chosen and constantly altering neighborhood ordering might be promising. Additionally, a variation in the utilized step function is performed such that there are nine different combinations of neighborhood structures and step functions. The application of the random neighbor strategy to neighborhood structures N_2, N_3 and N_6 will be denoted by N_7, N_8 and N_9 , respectively, in the following. The next neighborhood N_i to be examined, with $i = 1, \dots, 9$, is selected on a purely random basis each time a neighborhood examination is finished. In addition, a neighborhood structure is removed, i.e., no longer examined, if it did not yield a new improved warehouse state within its five last consecutive examinations.

Dynamically Randomized: Analogously to the randomized ordering strategy the next neighborhood N_i to be examined, with $i = 1, \dots, 9$, is chosen randomly when applying this ordering strategy. Again N_7 to N_9 denote the application of the random neighbor strategy to N_2, N_3 and N_6 , respectively. The probabilities for selecting the neighborhoods, however, are adjusted each time a selection is performed. Detailed values for the applied probabilities will be given below. Analogously to the purely randomized ordering, neighborhood structures are removed as soon as five consecutive examinations did not provide improved warehouse states.

Algorithm 3: RelocationVariableNeighborhoodDescent(\mathcal{W} , n_m , $strat$).

Input: \mathcal{W} ... current warehouse state,
 n_m ... number of available paper roll movements,
 $strat$... neighborhood ordering strategy and step function to be used

Data: l ... index of currently examined neighborhood structure,
 n', n'' ... remaining number of available paper roll movements,
 $\mathcal{W}', \mathcal{W}''$... intermediate warehouse states,
 $bestVal$... value of the best so far obtained warehouse state,
 $bestL$... list of rearrangements for reaching the best so far obtained warehouse state

Output: L ... list of moves to be performed

```

 $bestL \leftarrow ()$ ;
 $bestVal \leftarrow \infty$ ;
repeat
   $L \leftarrow ()$ ;
   $\mathcal{W}' \leftarrow \mathcal{W}$ ;
   $n' \leftarrow n_m$ ;
  repeat
     $l \leftarrow$  index of neighborhood to be examined next according to  $strat$ ;
     $\mathcal{W}'' \leftarrow$  examine neighborhood  $N_l(\mathcal{W}')$  according to  $strat$ ;
    if  $E(\mathcal{W}'') < E(\mathcal{W}')$  then
       $n'' \leftarrow n' -$  number of roll moves needed for obtaining  $\mathcal{W}''$  from  $\mathcal{W}'$ ;
      if  $n'' \geq 0$  then
        add roll relocations for obtaining  $\mathcal{W}''$  from  $\mathcal{W}'$  to  $L$ ;
         $\mathcal{W}' \leftarrow \mathcal{W}''$ ;
         $n' \leftarrow n''$ ;
    until no more neighborhoods left to be examined or  $n' \leq 0$ ;
    if  $E(\mathcal{W}') < bestVal$  then
       $bestVal \leftarrow E(\mathcal{W}')$ ;
       $bestL \leftarrow L$ ;
  until until 1 or 50 repetitions are reached (dependent on  $strat$ );
return  $L$ ;

```

5.2.3 VND Framework

Given the current warehouse state \mathcal{W} , a number of paper rolls to be relocated, and a preferred neighborhood ordering and examination strategy $strat$, Alg. 3 can be used for computing a list of paper roll relocations to be performed by warehousemen. After initializing all temporary variables, the main loop of the procedure is entered and is executed until either no more neighborhoods are left to be examined according to $strat$ or the number of yet available paper roll movements is equal to or less than zero. In case of either the randomized or the dynamically randomized neighborhood ordering is chosen, this algorithm is repeatedly executed for 50 rounds. Although any arbitrary value could be chosen for the maximum number of rounds, 50 seems to be promising based on the observation that computation times on a standard PC for our paper production company are then acceptable, i.e., at most about three minutes. The list of rearrangements resulting in the best new warehouse state is then

Table 1 Selection probabilities of the neighborhoods in DRVND in dependence on the number of still available moves n_m .

n_m	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9
<20	0.50	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02
20–100	0.35	0.15	0.10	0.10	0.02	0.15	0.05	0.05	0.03
>100	0.05	0.05	0.05	0.20	0.15	0.30	0.05	0.05	0.10

returned by the algorithm. The following four different variants of VND were implemented and compared with each other (for test results see Section 6):

Ordered VND (OVND): For this variant of VND the parameter *strat* is set to ordered (neighborhood order is fixed and worst neighbor strategy is used). Since the algorithm is deterministic only one round is performed.

Reversely Ordered VND (ROVND): While the number of still available moves n_m is greater than or equal to 80, this algorithm uses a fixed reversely ordered neighborhood ordering. As soon as n_m falls below 80, the order is reversed, i.e., the same order as for OVND is used. Analogously to OVND only one round needs to be performed in Alg. 3.

Randomized VND (RVND): For this setting the randomized neighborhood ordering is selected. Therefore, N_1 to N_6 are using a worst neighborhood strategy and N_7 to N_9 are searched by the random neighbor step function. Hence, 50 rounds are performed in the algorithm and the list of relocation moves resulting in the best warehouse state is returned.

Dynamically Randomized VND (DRVND): This variant applies dynamically randomized neighborhood ordering. The concrete probability values are shown in Table 1. Each time, the number of still available moves n_m falls below a value indicated in the column labeled n_m , the probabilities for selecting neighborhoods N_1 to N_9 are adjusted to the values shown in the corresponding columns. These values were identified during preliminary tests and were then refined by the warehouse manager of our case company.

6 Experimental Results

In our paper production company the stocking strategy presented in Section 4 is already applied in practice. Comparing warehouse states previously obtained by the old stocking strategy, which was mainly based on the experience of the warehousemen as well as the warehouse manager with warehouse states obtained after using the here proposed stocking strategy, it can be clearly seen that the situation in the warehouse significantly improved and therefore the time needed for shipping is reduced by a vast amount. Unfortunately, it is not possible to directly compare the old and the new stocking strategy with each other during real time operations. There-

Table 2 Absolute values of $E(\mathcal{W})$ for six different test instances. The values represent the objective values for the warehouse states obtained by a simulated human stocking strategy and our stocking strategy proposed in Section 4. In the last column a lower bound on the objective value for the warehouse states is given.

	simulated stocking	stocking strategy		sorted stocking
		avg.	std	
w_1	102635.0	12819.9	339.1	11807.0
w_2	130856.0	14683.0	413.0	13778.0
w_3	186835.0	23047.1	1101.4	18244.0
w_4	135203.0	17290.2	1098.9	14012.0
w_5	300881.0	49481.0	3018.7	35850.0
w_6	181877.0	64687.3	2525.2	33080.0

fore, we decided to simulate the stocking of typically produced paper rolls using the old and the new strategy.

Using this simulation based data it is possible to compare the efficiency and contributions of the relocation strategies proposed within this paper. In fact, the main parameter of a typical warehouse state is the number of rolls stored within the warehouse. In our case at most 4400 paper rolls can be stored in the warehouse. Expert knowledge indicates that a filling level of 80% constitutes the critical level for which any further stocked paper rolls will almost always cause conflicts—even in case of optimal placement. Therefore we tested our relocation approaches on warehouse states with 2500, 3000 and 3500 paper rolls stocked. All computations were performed on a single core of a Dual Opteron processor with 2.4GHz and 4GB of RAM. As underlying database storing all production and order relevant data an Oracle 10i database was used. Although, the number of rolls to be relocated, can be chosen arbitrarily, we tested our algorithm for 10, 20, 50, 100, 300, 500 and 700 relocation moves, which corresponds to approximately 10, 25 and 60 minutes as well as 2, 6, 8 and 12 hours of working time. Although it is relatively rare that one worker might relocate all day long this might occur on weekends when only few new paper rolls are produced and the driving of trucks on highways is prohibited, which is law in some European countries.

For testing purposes we have chosen six exemplary production data sets called w_1 to w_6 which were provided by our paper production company. The limiting factor for our stocking strategy as well as the VND approach are the number of paper rolls to be stored in the warehouse as preliminary tests revealed. While warehouses w_1 and w_2 contain 2500 paper rolls to be stored, warehouses w_3 and w_4 consist of 3000 paper rolls. Finally, w_5 and w_6 contain 3500 rolls.

For evaluating the performance of the stocking strategy we compared three different stocking approaches. The first one corresponds to a simulation of the stocking strategy used in our paper production company during the last years. This strategy is mainly based on the experience of the warehouse operator and does not provide any type of forecast—neither with respect to the shipping dates nor regarding paper rolls to be produced in future. The corresponding objective values with respect to

Eq. (8) are given in the first data column of Table 2. The second column of this table lists the mean results over 20 runs using slightly different production sequences of paper rolls obtained by our stocking strategy including standard deviations. The final column lists values obtained by first sorting all ordered rolls according to their shipping date and customer order and then stocking them using our stocking strategy. It can be clearly seen, that our stocking strategy outperforms the formerly used strategy. It has to be emphasized that an optimal warehouse state will almost never be reached in this real world application as long as a last-in, first-out throughput policy is applied and the production process is optimized disregarding the storage structure.

Anyhow, it is still necessary to perform relocations from time to time since the shipping dates are often not met by the customers. These conflicts cannot be foreseen even by the best stocking strategy. While Table 3 represents values obtained for applying the relocation strategies on warehouse states generated by the formerly used stocking strategy, the values presented in Table 4 correspond to results obtained by reassigning paper rolls in warehouses obtained by our stocking strategy. A value of 98% indicates that an improvement of two percent could be achieved, i.e., the estimated probability of conflicts during removal operations with respect to Eq. (8) could be reduced by 2%.

The following trend can be recognized: the more available time is dedicated to relocation operations the better the obtained warehouse states become. In addition the performance of GRP seems to be poorer for a larger number of available moves than those of the different VND variants. Although the former tendency is obvious, GRP could not improve further with more than 100 moves for warehouse states considered in Table 3. It is most interesting that this behavior seems to be independent of the number of rolls stored in the warehouse. To confirm this observation, we performed additional tests investigating especially this fact. A possible explanation for this could be that within our warehouse only 175 strips exist, such that only a few conflicts can be resolved when considering always the paper rolls at the front of each strip only. A limitation of GRP to at most 100 moves seems, however, reasonable for an application in our paper production company. When applying GRP on warehouse states obtained via our stocking strategy, the improvement potential is rather limited.

Regarding the performances of our VND variants it turned out that DRVND seems to be the best VND setting for relocations consisting of many paper roll movements. If the available time is rather limited the performances of RVND, OVND and ROVND are similar. RVND, however, is outperformed almost always by DRVND. To validate this hypothesis we performed Wilcoxon rank sum tests. The resulting p-values are for nearly all tested instances below 0.01, which indicates that the assumption is in most cases correct with an error probability of at most one percent. For those warehouse states obtained via our stocking strategy an improvement could still be achieved using the VND variants which implies that conflicts induced by improper production sequences have an impact on the stocking strategy. Anyhow, it is important to assign the rolls to good storage locations from the beginning on, since the results obtained by the new stocking strategy could not be reached by the

Table 3 For different number of relocation moves the relative values of the finally obtained warehouse states based on those obtained via the formerly used stocking strategy are presented. Mean values are averages over 20 runs (with standard deviations in parentheses). The last column presents p-values of Wilcoxon rank sum tests for the hypothesis that the mean values of DRVND are better than those of RVND.

		GRP	OVND	ROVND	RVND			DRVND			p-val
					best	mean	std	best	mean	std	
$n_m = 10$	w_1	97.2%	97.2%	97.2%	97.3%	97.7%	(0.3%)	97.1%	97.2%	(0.0%)	<0.01
	w_2	96.2%	96.2%	96.2%	96.2%	96.6%	(0.3%)	96.2%	96.2%	(0.0%)	<0.01
	w_3	98.9%	98.9%	98.9%	98.9%	99.0%	(0.1%)	98.6%	98.7%	(0.1%)	<0.01
	w_4	98.8%	98.8%	98.8%	98.6%	98.9%	(0.1%)	98.6%	98.8%	(0.0%)	<0.01
	w_5	97.7%	97.7%	97.7%	99.2%	99.4%	(0.2%)	97.7%	97.7%	(0.0%)	<0.01
	w_6	98.8%	98.8%	98.9%	98.8%	99.0%	(0.2%)	98.7%	98.8%	(0.0%)	<0.01
$n_m = 20$	w_1	95.0%	95.0%	95.0%	95.8%	96.3%	(0.3%)	94.7%	95.0%	(0.2%)	<0.01
	w_2	92.9%	92.9%	92.9%	94.3%	94.7%	(0.2%)	92.9%	92.9%	(0.1%)	<0.01
	w_3	97.9%	97.9%	97.9%	97.5%	98.2%	(0.2%)	97.6%	97.8%	(0.1%)	<0.01
	w_4	98.4%	98.4%	98.4%	97.8%	98.1%	(0.2%)	97.6%	97.8%	(0.1%)	<0.01
	w_5	96.7%	96.7%	96.7%	97.5%	98.4%	(0.3%)	96.3%	96.7%	(0.2%)	<0.01
	w_6	98.0%	98.0%	98.1%	97.5%	98.2%	(0.3%)	97.0%	97.8%	(0.3%)	<0.01
$n_m = 50$	w_1	89.6%	89.6%	89.6%	92.0%	92.3%	(0.1%)	89.4%	90.0%	(0.5%)	<0.01
	w_2	87.6%	87.6%	87.6%	89.4%	89.9%	(0.3%)	86.5%	87.6%	(0.7%)	<0.01
	w_3	94.7%	94.7%	94.7%	95.1%	96.1%	(0.4%)	94.2%	94.7%	(0.3%)	<0.01
	w_4	97.1%	97.1%	97.1%	95.0%	96.5%	(0.6%)	94.4%	95.8%	(0.8%)	<0.01
	w_5	93.5%	93.5%	93.5%	94.4%	96.0%	(0.4%)	92.7%	93.5%	(0.7%)	<0.01
	w_6	97.6%	96.2%	95.8%	95.6%	95.8%	(0.2%)	94.9%	95.3%	(0.3%)	<0.01
$n_m = 100$	w_1	82.7%	82.7%	86.5%	86.6%	88.1%	(0.7%)	82.4%	83.3%	(0.8%)	<0.01
	w_2	84.9%	82.4%	83.1%	82.8%	84.4%	(0.8%)	81.1%	82.5%	(0.9%)	<0.01
	w_3	92.7%	92.3%	93.7%	91.8%	92.2%	(0.3%)	91.1%	92.0%	(0.3%)	0.03
	w_4	97.0%	95.8%	91.9%	89.8%	90.7%	(0.4%)	89.8%	90.2%	(0.3%)	<0.01
	w_5	90.4%	90.4%	91.7%	90.2%	90.7%	(0.2%)	89.5%	90.3%	(0.3%)	<0.01
	w_6	97.6%	93.4%	94.5%	92.7%	93.6%	(0.4%)	92.0%	92.5%	(0.5%)	<0.01
$n_m = 300$	w_1	77.3%	67.7%	69.1%	71.0%	73.4%	(1.4%)	64.0%	68.6%	(3.1%)	<0.01
	w_2	84.9%	68.4%	66.4%	67.1%	68.9%	(1.0%)	65.0%	66.6%	(1.0%)	<0.01
	w_3	92.7%	85.6%	83.8%	83.3%	84.2%	(0.9%)	80.2%	82.5%	(1.3%)	<0.01
	w_4	97.0%	95.8%	84.5%	76.9%	79.9%	(1.5%)	73.2%	78.3%	(3.0%)	0.01
	w_5	90.4%	85.4%	81.0%	77.7%	78.9%	(0.7%)	77.7%	78.8%	(0.8%)	0.31
	w_6	97.6%	92.0%	95.5%	83.8%	84.9%	(0.7%)	83.4%	84.7%	(1.0%)	0.21
$n_m = 500$	w_1	77.3%	63.5%	61.2%	63.0%	65.7%	(1.7%)	57.3%	59.8%	(2.1%)	<0.01
	w_2	84.9%	52.7%	51.5%	53.5%	55.3%	(1.9%)	50.4%	52.0%	(1.4%)	<0.01
	w_3	92.7%	79.1%	76.7%	74.8%	76.3%	(1.0%)	71.6%	73.6%	(1.3%)	<0.01
	w_4	97.0%	96.5%	65.7%	66.4%	67.8%	(1.3%)	64.0%	66.1%	(1.6%)	<0.01
	w_5	90.4%	77.7%	72.8%	68.9%	70.7%	(1.2%)	68.3%	70.4%	(1.2%)	0.10
	w_6	97.6%	93.4%	96.0%	76.1%	79.0%	(2.1%)	74.7%	77.2%	(1.6%)	<0.01
$n_m = 700$	w_1	77.3%	59.1%	50.6%	55.3%	57.7%	(1.9%)	50.0%	51.2%	(1.3%)	<0.01
	w_2	84.9%	42.0%	43.0%	41.4%	44.0%	(2.2%)	40.4%	42.0%	(2.3%)	<0.01
	w_3	92.7%	74.8%	66.8%	64.4%	66.4%	(1.5%)	60.3%	63.2%	(2.1%)	<0.01
	w_4	97.0%	95.8%	60.0%	57.6%	58.9%	(0.9%)	53.5%	56.5%	(2.0%)	<0.01
	w_5	90.4%	76.2%	72.9%	62.5%	64.8%	(1.5%)	62.5%	64.1%	(1.4%)	0.01
	w_6	97.6%	92.8%	96.0%	68.8%	72.7%	(3.0%)	68.5%	71.2%	(1.9%)	<0.01

Table 4 For different number of relocation moves the relative values of the finally obtained warehouse states obtained via the proposed stocking strategy are presented. Mean values are averages over 40 runs (with standard deviations in parentheses). The last column presents p-values of Wilcoxon rank sum tests for the hypothesis that the mean values of DRVND are better than those of RVND.

		GRP	OVND	ROVND	RVND			DRVND			p-val
					best	mean	std	best	mean	std	
$n_m = 10$	w_1	100.0%	99.5%	99.4%	97.9%	98.7%	(0.2%)	97.8%	98.3%	(0.1%)	<0.01
	w_2	100.0%	99.8%	99.8%	98.2%	99.2%	(0.1%)	97.7%	98.8%	(0.1%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.4%	99.3%	97.8%	98.8%	(0.1%)	97.8%	98.6%	(0.1%)	0.11
	w_4	99.9%	99.8%	99.8%	98.0%	98.7%	(0.1%)	97.9%	98.5%	(0.1%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.6%	99.6%	98.1%	99.2%	(0.1%)	98.2%	99.2%	(0.1%)	0.48
	w_6	99.9%	99.5%	99.5%	98.3%	98.8%	(0.1%)	97.8%	99.0%	(0.2%)	0.93
$n_m = 20$	w_1	100.0%	99.4%	99.3%	97.3%	98.2%	(0.1%)	97.2%	97.8%	(0.1%)	<0.01
	w_2	100.0%	99.7%	99.6%	98.0%	98.8%	(0.1%)	97.7%	98.4%	(0.1%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.1%	99.0%	96.3%	98.4%	(0.1%)	97.0%	98.1%	(0.1%)	0.04
	w_4	99.9%	99.8%	99.8%	95.5%	98.1%	(0.3%)	61.9%	96.3%	(1.2%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.4%	99.3%	96.6%	97.8%	(0.3%)	96.4%	97.9%	(0.2%)	0.67
	w_6	99.9%	99.5%	99.5%	96.5%	97.9%	(0.1%)	96.7%	98.2%	(0.2%)	1.00
$n_m = 50$	w_1	100.0%	98.9%	98.7%	95.2%	96.9%	(0.1%)	95.0%	96.2%	(0.1%)	<0.01
	w_2	100.0%	98.5%	98.5%	96.0%	97.0%	(0.1%)	95.6%	96.7%	(0.1%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.1%	99.1%	95.3%	97.9%	(0.2%)	93.9%	97.1%	(0.3%)	<0.01
	w_4	99.9%	99.8%	99.8%	92.7%	96.8%	(0.2%)	68.8%	93.3%	(1.2%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.3%	99.3%	92.5%	94.9%	(0.3%)	93.3%	95.3%	(0.3%)	0.99
	w_6	99.9%	99.1%	99.2%	93.5%	96.0%	(0.3%)	93.5%	96.2%	(0.4%)	0.85
$n_m = 100$	w_1	100.0%	98.3%	98.1%	92.7%	96.0%	(0.3%)	68.0%	92.3%	(1.9%)	<0.01
	w_2	100.0%	99.7%	99.7%	93.4%	96.6%	(0.3%)	93.2%	95.6%	(0.2%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.1%	99.1%	92.3%	97.5%	(0.4%)	92.4%	96.1%	(0.5%)	<0.01
	w_4	99.9%	99.8%	99.9%	92.5%	96.9%	(0.4%)	69.2%	93.5%	(1.3%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.3%	98.3%	87.6%	92.0%	(0.7%)	86.7%	91.9%	(0.7%)	0.46
	w_6	99.9%	99.0%	99.1%	89.1%	94.4%	(1.3%)	90.1%	93.7%	(0.5%)	0.25
$n_m = 300$	w_1	100.0%	99.2%	99.2%	93.7%	96.2%	(0.3%)	84.8%	93.1%	(0.7%)	<0.01
	w_2	100.0%	99.7%	99.7%	93.6%	97.0%	(0.3%)	91.8%	95.3%	(0.5%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.1%	99.1%	92.8%	97.3%	(0.4%)	90.9%	96.0%	(0.5%)	<0.01
	w_4	99.9%	99.8%	99.9%	91.3%	96.9%	(0.4%)	86.8%	93.8%	(0.7%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.2%	97.8%	82.5%	91.1%	(0.9%)	81.3%	88.7%	(0.6%)	<0.01
	w_6	99.9%	99.0%	98.4%	81.7%	91.2%	(1.9%)	73.8%	86.4%	(2.3%)	<0.01
$n_m = 500$	w_1	100.0%	99.2%	99.2%	93.3%	96.2%	(0.3%)	85.1%	92.9%	(0.7%)	<0.01
	w_2	100.0%	99.7%	99.7%	93.9%	97.0%	(0.3%)	92.5%	95.3%	(0.5%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.1%	99.1%	92.5%	97.6%	(0.3%)	92.1%	95.9%	(0.3%)	<0.01
	w_4	99.9%	99.8%	99.9%	93.5%	97.0%	(0.5%)	70.4%	93.8%	(1.2%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.2%	97.8%	83.2%	90.7%	(1.0%)	80.1%	88.4%	(0.8%)	<0.01
	w_6	99.9%	99.0%	98.4%	73.2%	90.6%	(1.9%)	66.4%	83.3%	(3.2%)	<0.01
$n_m = 700$	w_1	100.0%	99.2%	99.2%	93.2%	96.0%	(0.3%)	86.9%	92.8%	(0.5%)	<0.01
	w_2	100.0%	99.7%	99.7%	93.4%	96.8%	(0.2%)	91.2%	95.2%	(0.4%)	<0.01
	w_3	100.0%	99.1%	99.1%	94.2%	97.7%	(0.2%)	90.4%	95.8%	(0.3%)	<0.01
	w_4	99.9%	99.8%	99.9%	93.4%	97.1%	(0.4%)	73.1%	93.7%	(0.9%)	<0.01
	w_5	99.8%	99.2%	97.8%	82.6%	91.1%	(0.7%)	78.3%	88.4%	(1.1%)	<0.01
	w_6	99.9%	99.0%	98.4%	76.7%	91.2%	(2.1%)	68.6%	83.5%	(4.0%)	<0.01

relocation procedure applied to warehouse states resulting from the formerly used stocking strategy.

With respect to runtime, GRP is the fastest approach with runtimes of at most 5 seconds. DRVND, which is the slowest VND variant, needs for computing 700 paper roll movements about 3,5 minutes, which is reasonable according to the warehouse manager of our paper production company.

Finally, we investigated the number of times one paper roll is relocated during storage reassignments. We observed that even for the test runs including 700 moves, multiple moves of individual paper rolls seldom occur.

7 Conclusions and Future Work

Within this work, we presented a stocking and two relocation strategies for a storage location assignment problem arising in a paper production company, whereas the number of conflicts, i.e., additional reallocation moves of paper rolls, during shipment should be minimized. Each individual storage location of the underlying warehouse applies a last-in, first-out throughput strategy. Experimental tests as well as feedback given by the warehousemen and warehouse manager revealed that using the proposed stocking strategy the warehouse states could be significantly improved. In addition, the developed relocation strategy based on variable neighborhood descent can be used to reduce the likelihood of conflicts occurring during stock removal. Anyhow, these reallocation operations are only executed during idle times of warehousemen dedicated to shipment, why the reliable stocking strategy proposed in Section 4 is crucial for efficient warehouse operations.

Although the results obtained by our methods are promising and improved the warehouse management of our paper production company substantially, the further improvement potential is high. For example, future work should concentrate on the parallel optimization of the paper production process and storage management. The production sequence of paper rolls should be adapted such that the storage locations could be better utilized without raising conflicts during stock removals. For this purpose, a deeper investigation of the ordering process might be necessary such that the data administration is enhanced and shipping dates are more reliable in the future since the most conflicts emerge due to customers picking their orders too late (or too early).

Acknowledgements This work was kindly supported by Dataphone GmbH, Vienna, Austria, and Hamburger-Spremborg, Spremborg, Germany.

References

1. Abdel-Hamid, A.A.A., Borndörfer, R.: On the complexity of storage assignment problems. Technical Report SC-94-14, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Berlin, Germany (1994)
2. Albers, S.: Online algorithms: a survey. *Mathematical Programming* 97(1) (2003) 3–26
3. Brynzér, H., Johansson, M.I.: Storage location assignment: Using the product structure to reduce order picking times. *International Journal of Production Economics* 46–47 (1996) 595–603 Proceedings of the 8th International Working Seminar on Production Economics.
4. Hansen, P., Mladenović, N.: Variable neighborhood search. In Glover, F.W., Kochenberger, G.A., (eds.): *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publisher (2003) 145–184
5. Hassini, E., Vickson, R.G.: A two-carousel storage location problem. *Computers & Operations Research* 30(4) (2003) 527–539
6. Hu, B., Raidl, G.R.: Variable neighborhood descent with self-adaptive neighborhood-ordering. In Cotta, C., Fernandez A.J., Gallardo, J.E., (eds.): *Proceedings of the 7th EU/MEeting on Adaptive, Self-Adaptive, and Multi-Level Metaheuristics*. (2006)
7. Jane, C.C.: Storage location assignment in a distribution center. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 30(1) (2000) 55–71
8. Eggenhofer, O.: Optimales Lager-Layout: Kommissionierung, Material- und Verkehrsfluss im Fokus. *Getränkegrosshandel* (5) (2007) 30–34
9. de Koster, R., Le-Duc, T., Roodbergen, K.J.: Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research* 182(2) (2007) 481–501
10. Prandtstetter, M., Raidl, G.R., Misar, T.: A hybrid algorithm for computing tours in a spare parts warehouse. In Cotta, C., Cowling, P., (eds.): *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization – EvoCOP 2009*. Volume 5482 of LNCS., Springer (2009) 25–36
11. Puchinger, J., Raidl, G.R.: Bringing order into the neighborhoods: Relaxation guided variable neighborhood search. *Journal of Heuristics* 14(5) (2008) 457–472
12. Ritzinger, U.: Generierung von Ein- und Umlagervorschlägen in Lagern mit einer Last-In First-Out Strategie und kundenspezifischen Auslagerpräferenzen. Master’s thesis, Vienna University of Technology, Austria (2008)
13. Thron, T., Nagy, G., Wassan, N.: Evaluating alternative supply chain structures for perishable products. *The International Journal of Logistics Management* 18(3) (2007) 364–384
14. Williams, B.D., Tokar, T.: A review of inventory management research in major logistics journals: Themes and future directions. *The International Journal of Logistics Management* 19(2) (2008) 212–232

A General Approach to Robustness in Logistics – Basic Concepts, Quantification Approaches and Experimental Evaluations

Jörn Schönberger and Herbert Kopfer

Abstract We direct our attention to robustness issues of dynamic decision problems. After having structured the discussion of robustness in the scientific literature, we develop a generic, domain-independent definition of the term “robust” by strictly distinguishing “acceptable” and “unacceptable” schedule updates. The main innovation is the development of a general approach to robustness that does not rely on domain-specific assumptions and the proposal of a quantification scheme to measure robustness-related properties. We prove the general applicability of our robustness concept in experiments with a transport system.

1 Introduction

Processes in value creating systems are typically compromised by exogenous disturbances. As a consequence, a recurrent revision of the schedules describing the processes is necessary. Three streams of evaluating such a dynamic decision situation are subject of scientific interest. *Planning Nervousness* or *Planning Stability* addresses the validity of once made process decisions. Special attention is paid to keep the negative impacts of the revision of decisions small. *Flexibility*-related research is particularly interested in the question if it is possible to generate a feasible (e.g., executable) update of a process. *Robustness* extends the concept of flexibility and adjoins the consideration of cost variation and benefit variation to the analysis of flexibility issues.

The motivation of the investigation reported in this article is twofold. At first and in contrast to other robustness-related investigations we aim at defining robustness of a schedule or system without referring to a special application. Consequently, we cannot use specific domain knowledge for the definition of robustness and the

Jörn Schönberger · Herbert Kopfer
University of Bremen, Chair of Logistics, Wilhelm-Herbst-Straße 5, 28359 Bremen, GERMANY
E-mail: {j_s_b, kopfer}@uni-bremen.de

quantification of it. At second, we want to investigate the developed robustness evaluation issues in the area of transportation systems.

In this article, we address robustness issues from a system's perspective [32] (systemrobustness) and from the perspective of a particular schedule that describes the system's state transfer [40] (planrobustness). The main contributions of this article are the structuring of the multifaceted discussion of ideas of robustness, the generation of a general definition of robustness terms and finally the provision of robustness indicators that help to quantify robustness issues.

Besides describing the robustness of a transportation system we target to extend the ability of a transport process planning unit to compensate disturbances. Therefore, we propose to use self-adapting update algorithms that are re-adjusted before a new update step is carried out by exploiting the current process performance. It has already been demonstrated that the application of such update approaches supports the increase of the flexibility of a transport system [35] and supports the reduction of planning nervousness [36].

In this paper we want to verify (or disprove) the following two research hypothesis:

- I. The robustness of a schedule can be increased if we apply a self-adjusting re-planning (updating) method that exploits knowledge about the current process performance.
- II. A system whose processes are controlled by a self-adjusting planning method is able to compensate more disturbances than a system in which a static (invariant) planning strategy is used for the process control.

We start with a summary of the discussion of robustness-related issues in the scientific literature (Section 2). In Section 3, we introduce acceptable schedule updates. Afterwards in Section 4, we define the terms *planrobustness* and *systemrobustness* using the definition of an acceptable schedule update. In Section 5, we propose a scaled quantification of robustness properties of a schedule or a system. Finally, we configure robustness evaluation schemes for an artificial transportation system and present evaluation results from simulation experiments.

2 Robustness in the Literature

Contributions to the discussion of robustness fall into two categories. On the one hand, robustness is referred to as a property of a particular schedule (planrobustness) but on the other hand, robustness is defined as a system's property (systemrobustness). Some authors pretend to analyze robustness issues of a decision method. However, such a discussion falls back to planrobustness and/or systemrobustness. For this reason, we do not discuss robustness aspects of scheduling algorithms here.

The discussion of robustness issues is strongly related to the discussion of online decision situations where the planning data are uncertain at the time when planning decisions are derived. Jensen [18] remarks that the relation between robustness and

uncertainty is discussed in two directions. On the one hand, uncertainty lies in the problem data but on the other hand, uncertainty is also related to the imprecise implementation of a schedule in a system. Our approach to robustness will cover both directions.

2.1 Robustness of Schedules

Robustness is interpreted as a countermeasure to uncertainty that supports keeping changes and revisions of once made decisions small [14, 16, 23]. In this context, the prevention of repair costs is referred to as one important idea of generating robust schedules and systems [13]. Changes in the planning data (or of planning premises) often lead to an exceeding of the available resources because once coordinated activities run more and more uncoordinated while capacity-restricted resources become bottleneck resources [20]. Schillo et al. [32] remark that robustness is related to the measuring of performance of a schedule or a system. In this context, Jensen [18] calls a schedule *A* “more robust” than a schedule *B* if the repair costs of *A* are less than the repair costs of *B* after a disturbing event has appeared.

Small data variations implying schedule corruption have to be able to be repaired quickly (fast repair, temporal aspect) and with a small number of modifications of the schedule (small repair, effort aspect) [13].

A schedule is defined to be “robust” by Yu and Yang [46] if it has the best worst-case-performance among all available alternative schedules. The worst-case refers to the external disturbances. Montemanni and Gambardella [28] specify the uncertainty and investigate shortest path problems where uncertainty is expressed in intervals of possible arc travel times instead of a fixed travel time.

Planrobustness (robustness of a plan or schedule) is defined by Pinedo and Chao [31] as the schedules’ property to remain applicable with only small modifications after the occurrence of a disturbance. More specifically, they call a schedule robust if the schedule’s make-span is not prolonged by a disturbance. Branke [2] suggests that the quality of a robust schedule does not collapse if the environment, in which the schedule is executed changes slightly. Morales et al. [29] link planrobustness to a min-max-property of a vehicle routing plan. A plan is compared to other plans and called robust if and only if the consideration of additional customer site visits leads to a minimal route length increase among all available plan updates.

In the context of job shop scheduling Leon et al. [23] call a schedule robust if its performance remains on a high level even after a disruption has occurred. Yu and Yang [46] call a schedule robust if it has the best worst-case performance among the available alternative schedules. Jensen [18] calls a schedule robust if conflicts (after the occurrence of a disturbing event) can be solved by a simple right-shifting of unstarted operations. Hart et al. [15] calculate the Hamming-distance of the original schedule and its update. If the Hamming distance is low then the original schedule is referred to as robust.

Dynamic maintenance operation scheduling is subject of the investigation carried out by Marmier et al. [26]. Here, a schedule is declared to be “robust” as long as it is insensible to uncertainties and data variations.

Scholl [40] connects planning goals with disturbances and defines the key property of a robust schedule as its ability to be realizable for all thinkable disturbances without significant variations in the achieved planning goals (compared to the non-disturbed schedule).

Wu et al. [45] link robustness to guaranteed service levels. They call a schedule β -robust if it has the maximal probability to achieve a given performance level (i.e., the flow-time of a product, determined by this schedule, remains below a given threshold).

Fischetti and Monaci [11] introduce the term “light robustness” for solutions of optimization problems. Instead of aiming to find the mathematical optimum, they reformulate the given schedule optimization problem. An upper (lower) bound of the objective function to be minimized (maximized) is given and the original objective function is dropped. The remaining problem is then a constraint satisfaction problem (which is often easier to solve than its optimization counterpart).

The concept of p -robustness proposed by García et al. [12] evaluates the probability of a schedule that it maintains its optimality property with probability p after disruptions.

2.2 Robustness of Systems

Caballero et al. [3] link the connectivity of system components (material or immaterial connections) to robustness and especially address the robustness of networks. Scott et al. [41] establish a connection between the discussion of the term “robustness” and the reliability of a transport network.

Tarhini and Fouchal [42] call a system robust if it is able to remain reliable in improper or stressful environments, e.g., if it is able to operate correctly in the presence of invalid inputs.

Network robustness is defined as the property of a collection of components that maintain their connections among each other even under erroneous environmental conditions and/or input data [3].

Schillo et al. [32] highlight a connection between robustness and multi-agent systems. They mention that robustness is not a self-evident property of a system but that special efforts are required to avoid performance losses after the occurrence of disturbing events. They call a multi-agent system robust if the group of agents ensures that some basic restrictions (on capacity, performance, etc.) called *safety requirements* [44] are permanently respected. These requirements represent the backbone of the considered system and are vital for the system’s survival.

Demetrius and Manke [8] investigate biological systems. They call such a system (e.g., a human or an animal) robust if it remains functional in the face of random perturbations. They connect robustness with “the insensitivity of measurable pa-

rameters of the system to changes in its internal organization”. Furthermore, they distinguish *dynamic robustness* and *topological robustness*. The first property is related to changes of the behavior of network components while the last property is related to the analysis of changes in the network composition.

Kitano and Oda [21] conjecture a special structure of a robust system. They say that a robust system maintains a small highly conserved core network. This core is linked with the other components in the overall network and these “satellite components” protect the core against external perturbations.

Robustness issues play an important role in the development and configuration of computer systems as well as in software engineering. In the IEEE-definition [17] system robustness is interpreted as “the degree to which a system or component can function correctly in the presence of invalid inputs or stressful environmental conditions”. In this context, DeVale [9] investigates robustness measures for computer operating systems.

Robustness of a transport network is investigated by Scott et al. [41]. They highlight a specific compensatory property of the US highway system which they describe as “robust”. With a relative stable highway capacity the significantly increased transport demand has been managed in the last decades. They link this compensatory effect to the reliability of the investigated highway network.

2.3 Achieving, Implementing and Conserving Robustness

A generic approach to implement robustness-related properties into a schedule or into a system is to increase its tolerance against faults and errors [17]. The following efforts targeting this idea have been reported into the scientific literature.

Pinedo and Chao [31] as well as Leon et al. [23] propose to insert *idle times* at strategic points in a given schedule. These idle (or slack) times absorb right-shifted operations / tasks in case that an unforeseen event requires a prolongation or insertion of tasks. They further propagate to schedule least flexible jobs at the beginning of a schedule so that they are processed as early as possible without being endangered by unforeseen events later on. Caprara et al. [4] generalize the idle time idea and propose to insert slack between interdependent operations as *network buffer* to absorb larger delays caused by local disruptions.

Shebalov and Klabjan [38] suggest to re-assign resources to other tasks after the occurrence of a disturbance. They investigate this idea in the context of airline crew scheduling.

In order to ensure that a schedule (or system) is robust, it is necessary to invest additional efforts (costs, resources) into the schedule (system). The additional expenditures that make a schedule (system) a robust schedule (system) are called the *price of robustness* [1, 29].

Ginsberg et al. [13] propose so-called supermodels to generate robust schedules. Here, the transformation of a decision supermodel after a data disturbance into a new model guarantees bounded costs of the solution of the transformed model. Thus, a

new solution of the now updated problem can be achieved by solving the new model causing bounded costs which are known in advance.

Redundancy is labeled as a strategy to obtain disturbance-resistance [22] but it is remarked that redundancy alone cannot be implemented wherever disturbances endanger a schedule or a system. Scalability, flexibility, resistance, drop-out safety and delegation of tasks are proposed as further properties of a (multi-agent-)system that can support the strive for implementing and increasing the reliability of a system [32].

Robust Optimization subsumes optimization approaches to consider data uncertainties explicitly in the derivation of schedules. Data perturbations are modeled and added to the used optimization models so that their solving leads to high quality solutions in which some of the aforementioned robustness achieving strategies are implemented. The produced solutions are “robust” in the sense that post-optimization variations of the planning data do not lead to a loss of the optimality of the solution (solution robustness) or even of the feasibility property of the solution (model robustness) [30].

Branke [2] successfully experiments with the idea to maintain several differently looking schedules of similar performance throughout the observation time. Whenever a disturbance occurs that compromises the execution of the so far followed schedule, one of the aforementioned schedules of the same quality is likely to be able to cope with the new situation without significant revisionary need. Jensen [18, 19] extends this idea of neighborhood-based robustness, where the neighborhood of a schedule contains all similar-looking schedules.

In order to generate robust plans that fulfill not only the optimization goal but also robustness requirements, Schöbel and Kratz [39] propose to formulate the task for identifying a robust high quality plan as a bi-criteria mathematical optimization problem. One of the two objective functions is the original evaluation function and the second one is an appropriate measure for robustness.

2.4 Measuring and Quantification of Robustness

The update of a schedule is compared with the original schedule (*absolute evaluation variation*) or the update of a schedule is compared with a referential schedule that represents an (artificial) ideal schedule (*referential evaluation variation*) [46] with optimized performance.

Planrobustness. Leon et al. [23] propose to compare the quantified performance of the original schedule with the performance of the updated schedule generated to integrate the disturbance into the schedule. In this context, they mention that the applied disturbance correction strategy is important for the achievement of robustness. Furthermore, they propose three explicit quantifications of robustness where several disruptive events are simultaneously considered.

Pinedo and Chao compare the length of a delay (the disturbance) with the additional costs caused by the right shifting of subsequent operations in a machine

schedule [31]. The evaluation of lateness potentials of a schedule is proposed by Marmier et al. [26]. Chen and Muraki [5] suggest comparing the number of actually fulfilled scheduling constraints with the number of constraints to be fulfilled at all. The quotient between these two numbers is called the degree of satisfaction. A two-dimensional evaluation vector mapping costs and performance of a schedule simultaneously is proposed as robustness quantification tool by Branke [2].

The worst-case performance of a schedule is used as a measure for robustness by Yu and Yang [46] in the context of the generation of robust shortest paths in a given network with uncertain travel times. Zielinski [47] measures the robustness in terms of the *robust deviation of a path p* which is the difference between the costs of a path p and the shortest possible path in the considered network.

Neighborhood-based robustness measures for a schedule C are compiled by Jensen [18]. He defines the robustness of a schedule as the expected objective function value of all schedules contained in the neighborhood of C . Schillo et al. [32] enhance this idea and propose to calculate the expected drop in the performance quantification after a disturbing event has become effective.

A quantification of schedule robustness, based on results observed in a Monte-Carlo-experiment is introduced by Mignon et al. [27]. They fetch the objective function value observed in several Monte-Carlo-experiment realizations and calculate the standard deviation from these values. Then, the quotient of the standard deviation value and the objective function value from the deterministic counterpart is calculated and interpreted as the degree of robustness of the schedule.

Wang [43] proposes a measure for schedule robustness which is based on qualitative possibility theory.

Schöbel and Kratz [39] define measures for the robustness of a train timetable. For a disruption of given severity, they count the maximal number of missed transfers and maximal delay sums and use these values as robustness measures.

Systemrobustness. Caballero [3] uses a graph connectivity metric to define the robustness of a network under investigation.

Scott et al. [41] proposes the *Network Robustness Index (NRI)*. The NRI quantifies the compensation properties in a transport network. More precisely, it expresses the performance loss if parts of the network (e.g., a highway segment) become unusable (what-if-investigation).

Lozano et al. [25] use the maximal number of passengers in a transport network affected by a network disruption (having increased travel times after the disruption) as a measure for the resilience capabilities of the network.

De-Los-Santos et al. [7] calculate the sum of the travel duration of all passengers in a commuter system before and after a disruption of the network. The variation of the sum of travel time caused by the disruption is used as an index to quantify the robustness of the commuter system.

This survey about the usage of the term robust in planning and system control contexts reveals that there are quite different approaches to the same goal to increase the compensatory abilities of processes. However, most of the proposed definitions and measuring concepts have an explicit background in a specific application domain und exploit domain-specific knowledge. Transportation systems and

processes seem to be of minor research interest so far if robustness is in the focus of research. Furthermore, most concepts to increase the extend of compensatory aspects have their roots in the design of the physical process execution scheme but the development of special scheduling and control algorithms to increase robustness has received minor attention so far. Adaptation as design paradigm of such algorithms has not yet been exploited.

3 Acceptable Schedule Updates

3.1 Schedules and Updated Schedules

The *schedule* $P_{A,t}$ determines all necessary activities to transform the considered system \mathcal{S} from a given state (“some requests are not completed”) into an intended state (“all requests completed”). It is generated at time t and all data A known at time t are considered in the schedule. The schedule determines all processes to be executed in order to achieve the required state transformation of the system \mathcal{S} .

A *disturbance* is an event that manipulates the environment in which the processes run. Such an event might be uncontrollable (exogenous disturbance) or caused by the process control unit (endogenous disturbance). In the former case, the data from which the necessary process decisions are derived, vary due to an external uncontrollable event (e.g., additional requests specified by a customer, machine breakdowns, flow congestions). In the latter case, the process control unit activates an event in order to provoke a process revision with the goal to change the process (e.g., reducing working speed of machines).

In case that a disturbance s occurs at time $t_B \geq t_A$, which corrupts the processes specified by P_{A,t_A} , it becomes necessary to replace the so far followed schedule P_{A,t_A} by an updated schedule [23]. The update is achieved by deriving a new schedule $P_{A \cup \{s\}, t_B}$. In general, a schedule P_{B, t_B} is an *update* of another schedule P_{A, t_A} if and only if $B \supset A$ and $t_B \geq t_A$. The inclusion $B \supset A$ represents the growing knowledge acquired by the schedule generation unit while time goes on. Specifically, if we define $B := A \cup \{s\}$, then the schedule $P_{A \cup \{s\}, t_B}$ is an update of schedule P_{A, t_A} .

Often, several alternative schedules are available to transform the system \mathcal{S} from a given state into another state. The set $\mathcal{U}(P_{A, t_A}, s, t)$ is formed by all updates of P_{A, t_A} that incorporate s at time t . In order to distinguish these alternatives, each schedule $P_{A, t}$ is evaluated and mapped into a vector of real numbers $E(P_{A, t_A}) \in \mathbb{R}^n$ (the set of n -dimensional real-valued vectors).

An update strategy \mathcal{V} selects the update of P_{A, t_A} from $\mathcal{U}(P_{A, t_A}, s, t)$ to replace P_{A, t_A} after the disturbance s has appeared at time t . The selected update is called the \mathcal{V} -update of P_{A, t_A} and is denoted by $\mathcal{V}_{s, t}(P_{A, t_A})$.

Often, the update strategy \mathcal{V} is expressed as a repair algorithm by specifying the repair steps necessary to be applied to P_{A, t_A} in order to get the desired update. If the optimization of the update is targeted then the previously mentioned evaluation

vector $E(P_{A,t_A}) \in \mathcal{R}^m$ is used as a feedback information in order to determine if the optimization goal is achieved or not.

3.2 Acceptable Schedule Updates

All previously mentioned approaches to and auxiliary definitions of robustness have in common that disturbance-triggered changes (of schedules) should be kept as small as possible. In addition, changes in a schedule itself are not considered but changes in the evaluation values of the varied schedule (costs, reliability) have to be as small as possible.

To decide if the evaluation of two schedules P and Q (e.g., a schedule P and its update Q) are “similar enough” we deploy a “distance measure” and a “maximal allowed distance between two schedules”. Let n_1 be a suitable integer number. A function $\Delta(E(P), E(Q))$ that maps the two evaluation vectors $E(P)$ and $E(Q)$ into \mathcal{R}^{n_1} serves as the distance measure. The set $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{R}^{n_1}$ contains all acceptable $\Delta(E(P), E(Q))$ -vectors and determines the maximal allowed distance between P and Q . The *evaluation scheme ES* is defined as the ordered triple (Δ, E, \mathcal{E}) . As long as $\Delta(E(P), E(Q)) \in \mathcal{E}$ we call the schedule Q to be in the ES-neighborhood of P and the set $\mathcal{N}(P, \Delta, E, \mathcal{E})$ contains all schedules that fall in the ES-neighborhood of P . If Q is an update of P , we call Q an *acceptable* (or *admissible* or *intended* and *wished* [10]) update of P .

In order to demonstrate the concept of acceptable schedule updates, we introduce a simple re-planning situation, which is outlined in Fig. 1. At time t_i a server is situated at the depot S . According to the schedule P^{orig} (generated at time $t_{i-1} < t_i$) it visits consecutively the customer sites A (at time $t_i + 1$), B ($t_i + 2$), C ($t_i + 3$) and D ($t_i + 4$). Finally, it proceeds to its target T that is reached at time $t_i + 5$.

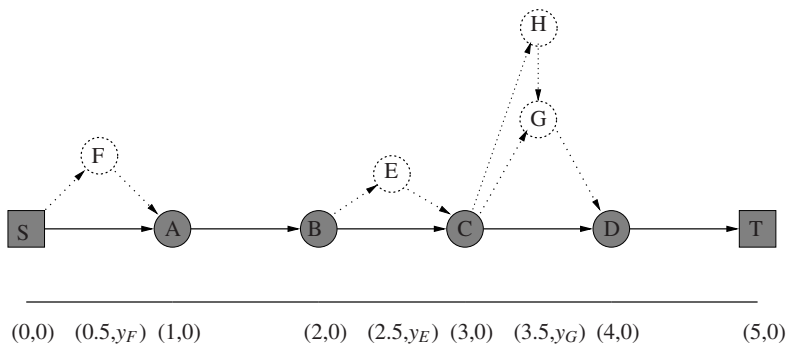


Fig. 1 Example of a single server scenario. The depots S and T as well as the customer sites A , B , C and D are known before time t_i . The ordered pairs below the line denote the position of the sites and the solid arcs represent the originally determined schedule P^{orig} .

3.3 Compensation of Disturbances

3.3.1 Controlling the Variation between the Original and its Update

For a given schedule P the set $\mathcal{A}_{s,t}^{ES}(P) := \mathcal{A}_{s,t}^{\Delta,E,\mathcal{E}}(P)$ defined in (1) contains all updates of P that fall into the given ES-neighborhood $\mathcal{N}(P, \Delta, E, \mathcal{E})$ of P , e.g., the evaluation vector of the update is “close enough” to the evaluation vector of the original schedule.

$$\mathcal{A}_{s,t}^{ES}(P) = \mathcal{A}_{s,t}^{\Delta,E,\mathcal{E}}(P) := \mathcal{U}(P, s, t) \cap \mathcal{N}(P, \Delta, E, \mathcal{E}) \quad (1)$$

We demonstrate the function of this acceptance definition using a special setting of the previously described server control scenario. The schedule evaluation vector $E_0(P)$ gives the number of time window violations in a given schedule P . No time window violation occurs as long as P^{orig} is executed, so that $E_0(P^{orig}) = 0$. If P^{update} is an update of P^{orig} then the difference $\Delta_0(E_0(P^{update}), E_0(P^{orig}))$ of the evaluation vectors is defined by $\Delta_0(E_0(P^{update}), E_0(P^{orig})) := E_0(P^{update}) - E_0(P^{orig})$ and the server control unit does not want to increase the number of time window violations, so that we define $\mathcal{E}_0 := \{r \in \mathcal{R} \mid r \leq 0\}$.

At time t_i the disturbance s_E occurs (cf. Fig. 1). It represents the demand for visiting the customer site E at position $(2.5, y_E)$. The arrival at E is expected to fall into the time window $[t_i + 2; t_i + 3]$ which is definitively agreed with the customer. An update of the schedule P^{orig} to the new schedule $P^{update} := \mathcal{V}_{s,t}(P^{orig})$ is done by following the scheduling strategy $\mathcal{V} :=$ “generate a shortest Hamiltonian path starting at the current server position S and terminating in T (ignoring time windows)”.

According to \mathcal{V} , the updated schedule $P^{update} := \mathcal{V}_{s,t}(P^{orig})$ instructs the server to follow the path $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow T$. The acceptability of the update depends on the position of the customer site associated with s_E . If $y_E \leq \sqrt{0.75}$ then the server arrives at $(2.5, y_E)$ within the given time window, so that $E_0(P^{update}) = 0$. This implies $\Delta_0(E_0(P^{update}), E_0(P^{orig})) = 0 \leq 0 \leq \mathcal{E}_0$. Thus, P^{update} belongs to the set of acceptable updates: $P^{update} \in \mathcal{A}_{s,t}^{\Delta,E,\mathcal{E}_0}(P^{orig})$. However, if $y_E > \sqrt{0.75}$ then the server arrives late at E , so that a time window violation occurs and $E_0(P^{update}) = 1$ implies $\Delta_0(E_0(P^{update}), E_0(P^{orig})) = 1 > \mathcal{E}_0$: $P^{update} \notin \mathcal{A}_{s,t}^{\Delta,E,\mathcal{E}_0}(P^{orig})$.

3.3.2 Referential Variation

If it is necessary to prevent that a sequence of schedule updates drifts away from the intended development trajectory, then the comparison of the evaluation vector $E(P^{update})$ of the recently generated update P^{update} with a given fixed referential evaluation vector E^{ref} is more suitable [18]. If the update of a given schedule P does not leave a given ES-neighborhood $\mathcal{N}(P^{ref}, \Delta, E, \mathcal{E})$ of a given fixed reference or prototypic schedule P^{ref} then $\mathcal{A}_{s,t}^{\overline{ES}} := \mathcal{A}_{s,t}^{\Delta,E,\mathcal{E}}(P)$ as defined in (2) includes all updates of P that fall into the given neighborhood $\mathcal{N}(P^{ref}, \Delta, E, \mathcal{E})$ of the artificial

reference schedule with reference vector $E(P^{ref})$. Figuratively spoken, the evaluation vectors of subsequently generated updates “oscillate” around a given fixed evaluation vector.

$$\mathcal{A}_{s,t}^{ES}(P) = \mathcal{A}_{s,t}^{\Delta,E,\mathcal{E}}(P) := \mathcal{U}(P,s,t) \cap \mathcal{N}(P^{ref}, \Delta, E, \mathcal{E}) \quad (2)$$

We re-visit the example outlined above. Again, the server is completing the schedule P^{orig} in which the sites S, A, B, C, D and T require a visit. All requests contained in P^{orig} are assumed to have been integrated in P^{orig} at time $t_{i-1} = t_i - 1$. A given schedule is evaluated now by the evaluation function $E_1(\cdot)$ that maps the schedule to the average completion time of the served requests. Due to a superior decision, the server control unit has to ensure an average completion time of less than 3 time units. Thus, a referential schedule P^{ref} fulfills the property $E_1(P^{ref}) \leq 3$. In this context, the comparison operator $\Delta_1(E_1(P^{update}), E_1(P^{ref}))$ is defined by $\Delta_1(E_1(P^{update}), E_1(P^{ref})) := E_1(P^{update}) - E_1(P^{ref}) = E_1(P^{update}) - 3$ and the set of acceptable evaluation vector differences is defined as $\mathcal{E}_1 := \{r \in \mathcal{R} \mid r \leq 0\}$.

The schedule P^{orig} is evaluated by $E_1(P^{orig}) := \frac{(1+1)+(1+2)+(1+3)+(1+4)}{4} = \frac{14}{4} = 3.5$ leading to $\Delta_1(E_1(P^{update}), E_1(P^{ref})) := 3.5 - 3 \notin \mathcal{E}_1$. In order to improve the average completion time of scheduled requests the server control unit acquires an additional request at time t_i that requires the visit of the site F situated at position $(0.5, y_F)$. This additional request requires integration into P^{orig} and is therefore interpreted as a disturbance s_F of P^{orig} . Depending on the value of y_F the update P^{update} of P^{orig} generated by applying \mathcal{V} falls into the set of acceptable updates defined in (2). In case that $y_F \leq \sqrt{\frac{1}{1.8}} - 0,25$ it is $E_1(P^{update}) \leq 3$, so that $P^{update} \in ACC_{\mathcal{V}}^{P^{ref}}(P^{orig}, s_F, t_0)$. In contrast, if $y_F > \sqrt{\frac{1}{1.8}} - 0,25$ then the schedule valuation vector $E_1(P^{update})$ exceeds the threshold value 3, so that $P^{update} \notin ACC_{\mathcal{V}}^{P^{ref}}(P^{orig}, s_F, t_0)$.

We have demonstrated exemplarily by means of the simple server routing scenario that a performance variation measurement based on absolute variation of schedules and their updates is adequate if the consideration of a disturbance is measured by an indicator that is surely increased in each update or decreased in each update. However, a variation measurement based on a relative comparison of schedules and updates seems to be adequate if a decrease or increase of the observed indicator is possible. This observation can be generalized for multidimensional evaluation vectors: If the indicator function components are unbounded then an absolute comparison should be applied preferentially but if the indicator components are bounded then an adequate reference schedule should be searched and a relative comparison has to be performed.

3.4 Comparison of Input-Output-Variations

So far, we have only considered the variation of the schedule evaluation vector in the discussion of robustness issues (*output variation*). However, the severity of the disturbance has not yet been considered in the definition of an acceptable update (*input variation*). In order to enable the integration of input data variations we generalize the definition of an acceptable schedule update. Therefore, we propose a simultaneous consideration of the input and the output variation in the definition of an acceptable schedule update.

At first, we generalize the term “ES-neighborhood” of a given schedule P and introduce the extended evaluation scheme EES. Let P_{B,t_B} and P_{A,t_A} be two schedules. The function $e(A)$ maps the planning data A of a plan P_{A,t_A} to an evaluation vector. In order to decide whether P_{B,t_B} and P_{A,t_A} are “close enough” we map the vector $(E(P_{A,t_A}), e(A), E(P_{B,t_B}), e(B))$ into \mathcal{R}^n using the function Γ . The vector $(\Gamma, E, e, \mathcal{E})$ is called the *extended evaluation scheme (EES)*. A schedule P_{B,t_B} belongs to the EES-neighborhood of P_{A,t_A} , denoted by $\mathcal{M}(P_{A,t_A}, \Gamma, E, e, \mathcal{E})$, if and only if the property (3) is fulfilled.

$$\Gamma(E(P_{A,t_A}), e(A), E(P_{B,t_B}), e(B)) \in \mathcal{E} \quad (3)$$

3.4.1 Comparison of Update and Original

In the context of the comparison of input data variations and schedule modifications during the transformation of a schedule to its update we define the set $\bar{\mathcal{A}}_{s,t}^{EES}(P_{A,t_A}) = \bar{\mathcal{A}}_{s,t}^{\Gamma, E, e, \mathcal{E}}(P_{A,t_A})$ of acceptable updates of P_{A,t_A} as shown in (4).

$$\bar{\mathcal{A}}_{s,t}^{EES}(P_{A,t_A}) := \bar{\mathcal{A}}_{s,t}^{\Gamma, E, e, \mathcal{E}}(P_{A,t_A}) := \mathcal{U}(P_{A,t_A}, s, t) \cap \mathcal{M}(P_{A,t_A}, \Gamma, E, e, \mathcal{E}) \quad (4)$$

The example introduced in 3.2 is re-visited in order to illustrate the functionality of the comparison of input and output variations. The server control unit only accepts an additional request if its consideration leads to an increase of profits that is at least as rapid as the increase of costs. This leads to the definition of the following EES:

- $e_2(A)$: necessary investments (travel expenditures) to fulfill the requests collected in the order backlog A (representing the input data of the schedule P_{A,t_A}) (1 money unit per each traveled distance unit).
- $E_2(P_{A,t_A})$: rewards associated with P_{A,t_A} (We assume that the visit of a customer site is rewarded with 1 money unit).
- $\Gamma(E_2(P_{A,t_A}), e_2(A), E_2(P_{B,t_B}), e_2(B)) := \frac{E_2(P_{B,t_B})}{E_2(P_{A,t_A})} - 1$ (we assume $P_{B,t_B} := \frac{e_2(B)}{e_2(A)} - 1$)
- $\mathcal{V}_{s,t}(P_{A,t_A})$.
- $\mathcal{E}_2 := \{r \in \mathcal{R} \mid r \geq 1\}$

For the original schedule P^{orig} , we get $E_2(S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow T) = 4$ (output) and $e_2(\{A, B, C, D\}) = 5$ (input).

At time t_i an additional request is added to the portfolio and must be integrated into P^{orig} . This new request requires the visit of the customer site G situated at $(3.5, y_G)$ (disturbance s_G). We use \mathcal{V} to update P^{orig} to P^{update} and achieve the Hamiltonian path $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow T$ describing the updated server path. The evaluation of the updated schedule leads to $E_2(P^{update}) = 5$ and $e_3(\{A, B, C, D, G\}) = 4 + 2\sqrt{0.25 + y_G^2}$.

If $y_G \leq \frac{\sqrt{65}}{8}$ we have $\Gamma(4, 5, 5, 4 + 2\sqrt{0.25 + y_G^2}) \in \mathcal{E}_2$ so that the updated schedule $\mathcal{V}(P_{\{A, B, C, D, G\}, t_i}) \in ACC_{\mathcal{V}}^{\Gamma, E, e, \mathcal{E}}(P_{\{A, B, C, D\}, t_{i-1}}, s_G, t_i)$. In all other cases, the necessary detour to visit $(3.5, y_G)$ is too long so that the updated schedule does not fall into the set $ACC_{\mathcal{V}}^{\Gamma, E, e, \mathcal{E}}(P_{\{A, B, C, D\}, t_{i-1}}, s_G, t_i)$.

3.4.2 Comparison of Updates with a Fixed Reference Schedule

We assume now that G has appeared at position $(3.5; 0.2)$, so that $\Gamma(4, 5, 5, 4 + 2\sqrt{1.25}) \approx 16.2 \in \mathcal{E}_2$. Thus, the updated visiting order $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow T$ represents an acceptable update according to the applied EES.

We further assume that additional requests are inserted consecutively into the existing schedule one after another. An additional request H must be integrated into the plan $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow T$ at time t_i after G has been integrated. This request H requires a visit at position $(3.5; 1)$. Now, the updated schedule $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow T$ is not an acceptable update of the schedule $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow T$, because $\Gamma(5, 4 + 2\sqrt{1.25}, 6, 5.5 + \sqrt{1.25}) \approx 0.74 \notin \mathcal{E}_2$. However, compared to the original schedule $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow T$ the last mentioned update is acceptable, because $\Gamma(4, 5, 6, 4.8 + \sqrt{0.29} + \sqrt{1.25}) \approx 1.7 \in \mathcal{E}_2$. Thus, from the point of view after the insertion of the first additional request G , the integration of the second additional request H is not beneficial. However, compared to the initial schedule the integration of both requests G and H is beneficiary. Here, the comparison of the variation between the first and the second update is misleading. The analysis of the evaluation variation from the initial to the second update is more suitable. Similarly to the ‘‘compensation of disturbances’’-approach for the comparison of an updated schedule with a referential schedule, the comparison of the potential update candidates with a fixed (artificial) referential schedule $P_{A^{ref}, t_{A^{ref}}}$ is useful here, too. The set of acceptable updates of a schedule P_{A, t_A} (compared to a reference schedule $P_{A^{ref}, t_{A^{ref}}}^{ref}$) is then defined as shown in (5).

$$\begin{aligned} \stackrel{\equiv}{\mathcal{A}}_{S, t}^{EES}(P_{A, t_A}) &:= \stackrel{\equiv}{\mathcal{A}}_{S, t}^{\Gamma, E, e, \mathcal{E}}(P_{A, t_A}) := \\ &\mathcal{U}(P_{A, t_A}, S, t) \cap \mathcal{M}(P_{A^{ref}, t_{A^{ref}}}^{ref}, \Gamma, \Delta, E, e, \mathcal{E}) \end{aligned} \quad (5)$$

3.5 The Role of the Schedule Update Strategy

Jensen [18] and Cicerone et al. [6] state that robustness statements require the specification of the applied update strategy. If we replace the schedule update strategy \mathcal{V} for example by the strategy \mathcal{V}' representing the FIFO-scheduling principle, then an acceptable schedule update cannot be found neither for s_E, s_F, s_G nor for s_H . For this reason, the decision about the used update strategy constitutes an important key aspect in the configuration of a responsive as well as efficient value creation system.

4 Robustness of Schedules and Systems

We have clearly defined sets of acceptable schedule updates in the previous section. These sets are now used for a clear and straightforward definition of planrobustness and systemrobustness, e.g., the robustness of a given schedule or system alternatively. In order to simplify the presentation, we restrict ourselves to consider only a single type of reference set $\mathcal{A}_{s,t}^{ES}(P)$. If we refer to the aforementioned set defined in (1) then the proposed definitions and conclusions are also applicable for the sets defined in (2), (4), and (5). For the same reason, we do not distinguish the applied evaluation system. In the remainder of this section, we only refer to simple evaluation schemes (ES) but the same definitions can be used for extended evaluation schemes.

4.1 Robust Schedules

Ginsberg et al. [13] propose to define robustness independently of the used update strategy. However, we have discussed in Section 3.5 that the acceptance-property depends on the applied update strategy \mathcal{V} . Therefore, we propose to explicitly consider the deployed update rule \mathcal{V} for two reasons. At first, the robustness definition of Ginsberg et al. requires the existence of a special type of decision models. Such models are not trivial to find and only available for very few decision problems. Secondly, the update strategy is an important part in scheduling systems and in order to compare several update strategies, it is necessary to distinguish update-strategy-specific behaviors. Liebchen et al. [24] investigate the correlation of disturbance and update strategy under the term “recoverable robustness”.

We call the schedule P s - \mathcal{V} -plan robust at time t for the evaluation system ES if and only if $\mathcal{V}_{s,t}(P) \in \mathcal{A}_{s,t}^{ES}(P)$.

Thus, in case that the disturbance s occurs at time t , a s - \mathcal{V} -planrobust schedule is able to be transformed by applying \mathcal{V} into another schedule whose performance complies with the intended performance after the appearance of s at time t and the performance is measured by ES.

In order to enable an analysis of several different disturbances, we extend the planrobustness-definition. If D is a set of disturbances compromising the schedule P then this schedule is called D - \mathcal{V} -planrobust at time t for the evaluation system ES if and only if P is s - \mathcal{V} -planrobust at time t for the evaluation scheme ES for all disturbances $s \in D$. The application of the decision preferences \mathcal{V} ensures that a schedule, which is D - \mathcal{V} -planrobust at time t cannot be disturbed unexpectedly as long as the disturbances fall into the set D . If D consists of all possible (expected or unexpected) disturbances and if a schedule is D - \mathcal{V} -planrobust at time t for the evaluation system ES then this schedule is referred to as \mathcal{V} -planrobust at time t for the evaluation scheme ES .

If the schedule P is D - \mathcal{V} -planrobust for the evaluation system ES not only at a particular time t but during a period (or any other compilation of time points) T then we call P D - \mathcal{V} - T planrobust for the evaluation scheme ES if and only if P is D - \mathcal{V} -planrobust for the evaluation scheme ES at all time points $t \in T$. A D - \mathcal{V} - T planrobust schedule (for the evaluation scheme ES) is able to absorb all disturbances from D during T with an acceptable performance variation if the decision preferences \mathcal{V} are invoked for updating the schedule. In case that T comprises the complete relevant observation period, we call a D - \mathcal{V} - T planrobust schedule (for ES) D - \mathcal{V} planrobust for the evaluation scheme ES .

Finally, if D covers all possible disturbances and if T covers the complete relevant observation period, we call a D - \mathcal{V} - T planrobust schedule (with respect to ES) simply \mathcal{V} -planrobust for the evaluation system ES .

4.2 Robust Systems

In case that every schedule in the system \mathcal{S} which has been generated by using the decision preferences \mathcal{V} is able to cope with a specific disturbance s at time t (s - \mathcal{V} -planrobust at t for ES), we call \mathcal{S} s - \mathcal{V} -systemrobust at time t for ES . More formally, we define \mathcal{S} to be named s - \mathcal{V} -systemrobust at time t for ES if and only if each schedule P is s - \mathcal{V} -planrobust at time t for ES . A sufficient condition for s - \mathcal{V} -systemrobustness at time t is that there is an update $\mathcal{V}_{s,t}(P) \in \mathcal{A}_{s,t}^{ES}(P)$ for each schedule P at time t .

Let D be again a set of disturbances. Then we call the system \mathcal{S} D - \mathcal{V} -systemrobust at time t for ES if and only if \mathcal{S} is s - \mathcal{V} -systemrobust at time t for ES for all disturbances $s \in D$. In case that D contains all possible disturbances then the system \mathcal{S} is called \mathcal{V} -systemrobust at time t for ES .

In order to allow systemrobustness statements for several time points, we extend the systemrobustness definition as follows. The set T contains several time points (for example, it covers a certain time period). We name \mathcal{S} D - \mathcal{V} - T systemrobust for ES if and only if \mathcal{S} is D - \mathcal{V} -systemrobust at all time points $t \in T$ for ES .

If D covers all potential disturbances and if T spans over the complete considered time span then a D - \mathcal{V} - T systemrobust system \mathcal{S} (for ES) is called \mathcal{V} -systemrobust for ES .

Here, we have proposed a set of robustness definitions that enable a binary statement if a schedule or system is robust. DeVale [9] distinguishes graduations of impacts ranging from “silent errors” having no impacts on the system performance up to “catastrophic failures” that affects the complete schedule or system.

4.3 Robustness and Flexibility

Schneeweiß [33] explicates that robustness is a special form of flexibility. The here proposed definitions for planrobustness as well as systemrobustness and the definition by Schneeweiß are contradictory. To explain this, we first remember the definitions of planflexibility and systemflexibility introduced in [35]. A schedule P is called e-planflexible at time t with respect to \mathcal{V} if (and only if) there is an acceptable update $\mathcal{V}(P)$ of P in case that a disturbance e occurs at time t . The term “acceptable update” refers to the feasibility of the proposed update. Each update is evaluated only with respect to the number of constraint violations.

In the context of defining the term “e-planrobustness” we generalize the evaluation of schedule updates. Now, we enable a consideration of all suitable update evaluation schemes, especially those who exploit only the number of violated constraints. Clearly, it is still possible to evaluate a schedule and its update by counting the number of violated constraints. A similar conclusion can be exercised for a robust system. Thus, the robustness-concept generalizes the flexibility-concept by extending the meaning of an “acceptable” update. For these reasons, it makes sense to define robustness as previously explained in this article.

In the application context, flexibility typically addresses the question if there is a feasible update of a schedule in case that a disturbance occurs. The costs or any other evaluations associated with the update are of minor interest. However, if the existence of a feasible update is obvious and if updates are easy to generate, then the question “which update should be selected” arises. Here, the evaluation values are consulted so that the robustness issues are now of major interest. Figuratively spoken, flexibility addresses the question, if there is a feasible update, but robustness also addresses the costs of the update.

5 Quantification of Robustness

The main purpose for the quantification of robustness and the distinction of several “degrees of robustness” is to enable a distinction of different schedules with respect to robustness issues. It is neither realistic to assume that a given schedule is able to be planrobust with respect to all possible disturbances nor is each system systemrobust with respect to all thinkable disturbances. Therefore, it is reasonable to quantify the relative frequency that a schedule (system) is able to compensate disturbances in a given configuration for a given time or time period [23]. In this context, Chen

and Muraki [5] define the expected delay of a schedule as robustness measure and propose to scale this value into the interval $[0, 1]$.

In the following, we assume that the applied evaluation scheme ES remains unvaried and that a specific update strategy \mathcal{V} is used. We are then interested in answering the question how large is the possibility that a given schedule is planrobust (systemrobust) with respect to a given disturbance randomly drawn from a set of disturbances. Doing so, we want to know the relative frequency that a disturbance can be compensated. This relative frequency is called the “robustness degree” of the given schedule or system. Schneeweiß [33] proposes this approach to define robustness. Although he uses such a definition to describe the extend of robustness of an update strategy, we can transfer the idea to describe the extend of robustness of schedules and systems. Here, we estimate the probability that a disturbance is able to be compensated. The associated relative frequency is used to define a “degree of robustness” of schedules and systems. Tarhini and Fouchal [42] as well as Mignon et al. [27] propose the same idea to calculate the probability that given constraints are still met after an update.

5.1 Planrobustness Quantification

Let \mathcal{D}_t be the set of all disturbances that corrupt a given schedule P at time t . We define $N(t, D_t, P)$ to be the number of possible disturbances of schedule P at time t . The set \mathcal{D}_t^* contains all disturbances $s \in \mathcal{D}_t$ for which P is s - \mathcal{V} -planrobust at time t for the applied evaluation scheme ES. We set $n(t, D_t, P, ES, \mathcal{V}) := |\mathcal{D}_t^*|$ and define the D_t - \mathcal{V} -planrobustness-degree $robdeg_{t, \mathcal{D}_t, \mathcal{V}, ES}^{plan}(P)$ of P at time t with respect to ES as shown in (6).

$$robdeg_{t, \mathcal{D}_t, \mathcal{V}, ES}^{plan}(P) := \frac{n(t, D_t, P, ES, \mathcal{V})}{N(t, D_t, P)}. \tag{6}$$

This definition of the schedule’s property is derived similarly as the planflexibility property proposed in [35]. Again, the calculation of $robdeg_{t, \mathcal{D}_t, \mathcal{V}, ES}^{plan}(P)$ will hardly be possible if the set \mathcal{D}_t is very large. If the cardinality of \mathcal{D}_t exceeds a certain threshold, the quotient must be approximated, e.g., by a Monte-Carlo-based experiment. For a sufficiently large sample of $\tilde{N}(t, D_t, P)$ randomly selected disturbances s it is checked if the considered schedule P is s - \mathcal{V} -planrobust at time t for the applied evaluation scheme ES. We count the number $\tilde{n}(t, D_t, P, ES, \mathcal{V})$ of those disturbances for which the planrobustness is observed and approximate $robdeg_{t, \mathcal{D}_t, \mathcal{V}, ES}^{plan}(P)$ by (7) as proposed in [5].

$$\frac{\tilde{n}(t, D_t, P, ES, \mathcal{V})}{\tilde{N}(t, D_t, P)} \tag{7}$$

If the selected sample is representative for \mathcal{D}_t and if the sample is large enough then (7) is a reasonable approximation of (6).

5.2 Quantification of Systemrobustness

The need to quantify the degree to which a system is robust is emphasized by Tarhini and Fouchal [42]. We present a definition of a systemrobustness degree that re-uses the knowledge about planrobustness. Let \mathcal{T} denote a period or a set of periods for which the robustness of the system S should be measured. The set \mathcal{D} contains all disturbances for which we want to quantify the compensatory properties of S . Similarly to the planrobustness degree definition, we want to calculate the relative frequency (probability) that an event taken from \mathcal{D} occurring within \mathcal{T} and disturbing a schedule in S can be managed by generating an acceptable update using the update preferences \mathcal{V} . We define $M(\mathcal{T}, \mathcal{D}, S)$ to be the number of all possible disturbances belonging to the disturbance set \mathcal{D} and appearing during \mathcal{T} . The number of acceptable updates (with respect to ES) generated by \mathcal{V} is stored in $m(\mathcal{T}, \mathcal{D}, S, ES, \mathcal{V})$.

Then the D - \mathcal{V} -systemrobustness-degree $robdeg_{\mathcal{T}, \mathcal{D}, \mathcal{V}, ES}^{system}(S)$ of S during \mathcal{T} with respect to ES is defined by (8).

$$robdeg_{\mathcal{T}, \mathcal{D}, \mathcal{V}, ES}^{system}(S) := \frac{m(\mathcal{T}, \mathcal{D}, S, ES, \mathcal{V})}{M(\mathcal{T}, \mathcal{D}, S)}. \quad (8)$$

Again, we have to approximate $robdeg_{\mathcal{T}, \mathcal{D}, \mathcal{V}, ES}^{system}(S)$ if the set $M(\mathcal{T}, \mathcal{D}, S)$ is very large.

6 Robustness in a Transportation Scenario

We are prepared to start the verification efforts for the initially stated research hypothesis. Therefore, we define specific evaluation schemes and calculate planrobustness as well as systemrobustness degrees in a transport system.

6.1 Informal Scenario Description

A detailed description of the considered transportation system is given in [35]. Here, we give an outline of the investigated planning scenario.

A stream of consecutively incoming transportation requests must be served by a fleet of vehicles. The number of incoming requests varies over time and temporarily exceeds the capacity of the fleet. Requests arriving in such a peak period are postponed or subcontracted. In the first case, deferred arrival times at customer site lead

to conflicts with time windows agreed with the customers and finally cause penalty payments. In the second case, a subcontractor is paid for the timely fulfillment of the additional requests. In both cases, additional costs occur. We assume that \mathcal{V} selects least-cost alternatives.

In situations when the punctuality of the transport operations is high the deferment of selected requests (postponement) is acceptable but if the overall punctuality is already on a too low level, the subcontracting of selected requests supports the preservation of the process reliability more than postponements. Therefore, the preferences \mathcal{V} should be adapted to the currently observed process punctuality rate p_{t_i} . If p_{t_i} lies above a given threshold (e.g., 80%) then postponement should be selected preferentially by \mathcal{V} but if p_{t_i} is below the threshold subcontracting supports the saving of costs and should be selected more often.

We assume that the subcontracting alternative is significantly more costly than the postponement of requests. Without any adaptation of \mathcal{V} to p_{t_i} (NONE), only postponement is selected to handle the additional arriving requests. Two strategies to adapt the update decision preferences \mathcal{V} to the currently observed punctuality rate at time t have been proposed. In the first one (CSAD=Constraint Set Adaptation), the subcontracting alternative is selected independently of the resulting costs [37]. In the second one (SDAD=Search Direction Adaptation) artificial costs are temporarily added to one of the two fulfillment modes in order to make the second alternative more attractive [34]. For both strategies it has been proven that their application is able to integrate cost minimization goals and reliability maximization goals.

6.2 Setup of the Simulation Experiments

We simulate the arrival of artificial streams of incoming requests introduced in [37]. The same disturbance (arrival of a given number of additional requests) is activated in all experiments so that we refrain from adding disturbance-related information to the statement of planrobustness and systemrobustness values. Since we consider the same observation period [1000,4000] for all systemrobustness degree calculations, we also desist from adding observation period information to the systemrobustness statements.

For a simulation scenario, we calculate the planrobustness degree $robdeg_{s_i, \Phi, \Sigma}^{plan}$ and the systemrobustness degree $robdeg_{\Phi, \Sigma}^{system}$. Three different update strategies Φ are applied: CSAD, SDAD and NONE. Furthermore, it is necessary to distinguish the robustness degrees with respect to the applied (extended) evaluation scheme $\Sigma \in \{ES_1, ES_2, ES_3, ES_4\}$. We apply two evaluation schemes (ES_1 and ES_2) and two extended evaluation schemes (ES_3 and ES_4).

Absolute Cost Variation ($\Sigma = ES_1$). At time t_{i+1} we compare the cumulated costs $E(P_i)$ and $E(P_{i+1})$ of the schedule P_i and its update P_{i+1} . The relative cost increase $\Delta(E(P_{i+1}), E(P_i)) := \frac{E(P_{i+1})}{E(P_i)} - 1$ of an acceptable update P_{i+1} should be at most 10% ($\mathcal{E} := \{r \in \mathcal{R} \mid r \leq 0.10\}$).

Referential Punctuality Variation ($\Sigma = ES_2$). We compare the punctuality rate $E(P_i) := q_{t_i}$ with the target punctuality rate $E(P^{ref}) := p^{target} = 0.8$ of (an artificial) reference schedule P^{ref} and calculate $\Delta(E(P_i), E(P^{ref})) := E(P_i) - E(P^{ref})$. The acceptable Δ -values are collected in the set $\mathcal{E} := \{r \in \mathcal{R} \mid r \geq -0.05\}$. The remaining parameters are configured as described for ES_1 .

Absolute Efficiency Variation ($\Sigma = E_3$). At time t_i , we calculate the number of requests completed between t_{i-1} and t_i . This number is interpreted as output variation ($E(P_i) :=$ number of requests completed not later than t_i) between the consecutive planning steps. Furthermore, we determine the additional costs during the same period. The additionally spent money units are interpreted as input variation ($e(t_i)$ investment up to time t_i). We define $\Gamma(E(P_i), e(t_i), E(P_{i+1}), e(t_{i+1})) := \frac{E(P_{i+1}) - E(P_i)}{e(t_{i+1}) - e(t_i)}$ which gives the number of additionally completed requests for each invested money unit.

Referential Efficiency Variation ($\Sigma = E_4$). At time t_i , we calculate the number of requests completed between $t_0 = 1000$ and t_i . Furthermore, we determine the additional costs spent from t_0 until t_i and interpret the resulting amount as input variation ($e(t_i)$ investment up to time t_i). We define $\Gamma(E(P_0), e(t_0), E(P_i), e(t_i)) := \frac{E(P_i) - E(P_0)}{e(t_i) - e(t_0)}$ ($e(t_i) - e(t_0) > 0$ for $i > 0$).

6.3 Presentation and Discussion of Simulation Results

The thin lines in Fig. 2 represent the planrobustness degrees if the evaluation scheme $\Sigma = E_1$ is used to quantify the planrobustness degree. We observe a dramatic decrease of $robdeg_{S_t, \Phi, E_1}^{plan}$ after the initiation of the load peak at time $t = 1500$. The degree falls down to 0 independently from the applied update strategy. If no update preference adaptation is switched on (NONE, thin continuous line) then the maximal robustness is re-achieved at time $t = 2000$. The incorporation of CSAD (thin dashed line) shifts the time when the degree re-achieves 1 to the left to time $t = 1900$ and if SDAD (thin dotted line) is applied then the maximal degree 1 is re-reached already at time $t = 1800$.

If we use the second evaluation scheme $\Sigma = E_2$ then we observe the planrobustness degrees represented by the thick lines in Fig. 2. The application of $\Phi = NONE$ (thick continuous line) leads to a decrease of $robdeg_{S_t, NONE, E_2}^{plan}$ from 0.6 down to 0 after the initiation of the demand peak. This indicator re-climbs up not before time $t = 2500$ and re-reaches its pre-peak level at time $t = 3500$. If the decision preferences are adapted to the current punctuality rate of the fleet then the situation is completely different. At first, $robdeg_{S_t, CSAD, E_2}^{plan}$ (thick dashed line) as well as $robdeg_{S_t, SDAD, E_2}^{plan}$ (thick dotted line) show a pre-peak level of 100%. Furthermore, after the peak's introduction a decrease of these values down to 0.6 (SDAD) resp. 0.7 (CSAD) is observed and the pre-peak level is re-reached already at time $t = 2000$. If the decision preferences are updated then the pre-peak situation is re-reached significantly earlier than in the experiments without adaptation of the decision preferences.

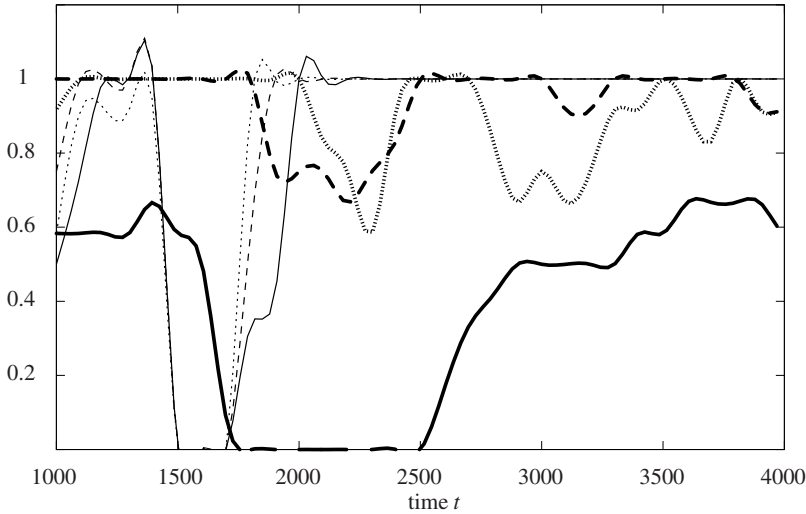


Fig. 2 Evolution of the planrobustness degrees $robdeg_{\delta_t, NONE, \Sigma}^{plan}$ (continuous lines), $robdeg_{\delta_t, SDAD, \Sigma}^{plan}$ (dotted lines), $robdeg_{\delta_t, CSAD, \Sigma}^{plan}$ (dashed lines). The thin lines show the results observed for $\Sigma = E_1$ and the thick lines show the results for $\Sigma = E_2$.

We conclude, that the adaptation of the update strategy leads to higher planrobustness degrees compared to the results observed in the NONE experiments if E_1 or E_2 are applied. Hence, for E_1 and E_2 we have verified the first research hypothesis.

In Fig. 3, we have compiled the planrobustness degrees averagely observed in the experiments where the extended evaluation schemes E_3 (thin lines) and E_4 (thick lines) are used to quantify the planrobustness. If E_3 is applied then all three update strategies NONE, SDAD and CSAD demonstrate a similar qualitative evolution. Before the peak, a planrobustness degree between 0.5 and 0.8 is shown. Immediately after the peak, the three planrobustness degrees collapse and fall down to 0 and after a certain time the degree starts a re-climbing. However, $robdeg_{\delta_t, SDAD, E_3}^{plan}$ (thin dotted line) recovers most rapidly followed by $robdeg_{\delta_t, NONE, E_3}^{plan}$ (thin continuous line) and $robdeg_{\delta_t, CSAD, E_3}^{plan}$ (thin dashed line). Finally, $robdeg_{\delta_t, SDAD, E_3}^{plan}$ and $robdeg_{\delta_t, NONE, E_3}^{plan}$ permanently remain on a level above 0.5 but $robdeg_{\delta_t, CSAD, E_3}^{plan}$ regularly oscillates between 0 and above 0.5 (which means that the process efficiency alternatingly increases and decreases). In summary, we do not observe a significant dominance of the adaptive control approaches if E_3 is applied, i.e., for E_3 the first research hypothesis can not be verified.

The results observed in the E_4 -experiments (thick lines in Fig. 3) strongly suggest that the adaptation of the update preferences does not lead to a higher planrobustness degree in general. We observe that $robdeg_{\delta_t, NONE, E_4}^{plan}$ (thick continuous line) clearly outperforms $robdeg_{\delta_t, SDAD, E_4}^{plan}$ (thick dotted line) as well as $robdeg_{\delta_t, CSAD, E_4}^{plan}$ (thick

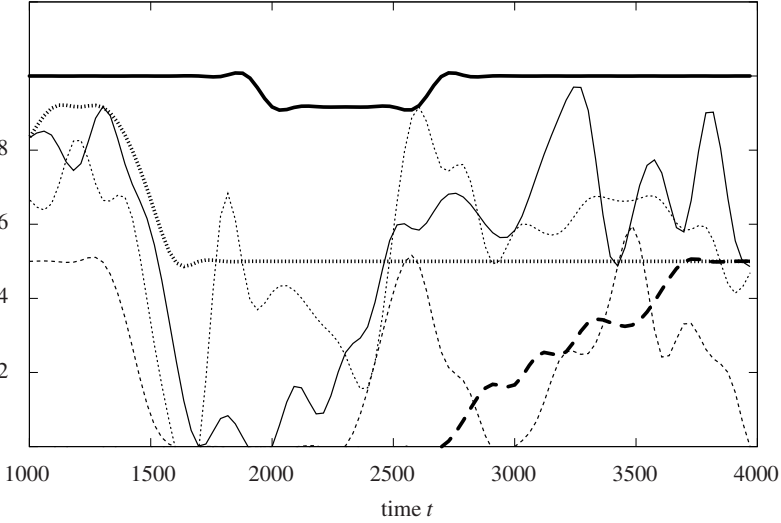


Fig. 3 Evolution of the planrobustness degrees $robdeg_{s_t, NONE, \Sigma}^{plan}$ (continuous lines), $robdeg_{s_t, SDAD, \Sigma}^{plan}$ (dotted lines), $robdeg_{s_t, CSAD, \Sigma}^{plan}$ (dashed lines). The thin lines show the results observed for $\Sigma = E_3$ and the thick lines show the results for $\Sigma = E_4$.

dashed line). The values of $robdeg_{s_t, NONE, E_4}^{plan}$ remain nearly unaffected by the demand peak and remain close to 1 throughout the complete simulation so that the efficiency remains the same. However, we see that $robdeg_{s_t, SDAD, E_4}^{plan}$ falls down from 0.9 down to 0.5 and remains on this level for the rest of the simulation. Here, the efficiency is sustainably damaged by the temporarily active demand peak. Finally, $robdeg_{s_t, CSAD, E_4}^{plan}$ remains zero until time $t = 2700$ but then, it climbs up to 0.5. Here, the efficiency increases.

Table 1 Observed systemrobustness degrees $robdeg_{\Phi, \Sigma}^{system}$.

Φ	Σ			
	E_1	E_2	E_3	E_4
NONE	0.86	0.42	0.58	0.99
SDAD	0.89	0.92	0.56	0.55
CSAD	0.90	0.95	0.23	0.27

In Table 1, the systemrobustness degrees $robdeg_{\Phi, \Sigma}^{system}$ are compiled. In the E_1 -experiments, the incorporation of SDAD and also the incorporation of CSAD lead to a small increase of the systemrobustness degree from $robdeg_{s_t, NONE, E_1}^{system} = 0.86$ to $robdeg_{s_t, SDAD, E_1}^{system} = 0.89$ resp. $robdeg_{s_t, CSAD, E_1}^{system} = 0.90$. A similar situation is observed for E_2 . Here, an improvement from $robdeg_{s_t, NONE, E_2}^{system} = 0.42$ to $robdeg_{s_t, SDAD, E_2}^{system} = 0.92$

and $robdeg_{CSAD,E_2}^{system} = 0.96$ takes place. These results support the conjecture that our second research hypothesis is true.

However, contrary evolutions of the systemrobustness degrees are observed in the E_3 - and E_4 -experiments. In the first experiment-class (E_3), we recognize a decrease from $robdeg_{NONE,E_3}^{system} = 0.58$ down to $robdeg_{SDAD,E_3}^{system} = 0.56$ and $robdeg_{CSAD,E_3}^{system} = 0.23$. The preselection of the subcontractor for selected requests (CSAD) seems to be disastrous with respect to the efficiency of the considered transportation system. In the second experiment-class (E_4), even SDAD shows a very bad performance. We observe a decrease from $robdeg_{NONE,E_4}^{system} = 0.99$ down to $robdeg_{SDADE_4}^{system} = 0.55$ and $robdeg_{CSAD,E_4}^{system} = 0.27$. These results contradict the second research hypothesis.

7 Conclusions

In this article, we have proposed a domain-independent definition of robustness and we have developed robustness measures. Within an artificial transport planning scenario we have configured several robustness evaluation schemes and we have demonstrated the general applicability of our robustness concept. In contrast to the discussion of planning stability/nervousness and planning flexibility we have not succeeded in demonstrating in general that adaptive process planning systems have positive impacts to the robustness of processes and plans. Future research efforts will include the acceptance and rejection decision about customer demand into the robustness discussions.

Acknowledgements This research was supported by the German Research Foundation (DFG) as part of the Collaborative Research Centre 637 *Autonomous Cooperating Logistic Processes* (Subproject B7).

References

1. Bertsimas, D.: The price of robustness. *Operations Research* 52(1) (2004) 35–53
2. Branke, J.: Creating robust solutions by means of evolutionary algorithms. In: *Proc. of the 5th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. Springer, Berlin (1998) 119–128
3. Caballero, J., Kampouris, T., Song, D., Wang, J.: Would diversity really increase the robustness of the routing infrastructure against software defects? In: *Proc. of the 15th Annual Network and Distributed System Security Symposium* (2008)
4. Caprara, A., Galli, L., Stiller, S., Toth, P.: Recoverable-robust platforming by network buffering. *ARRIVAL Project - Technical Report No. 157* (2008)
5. Chen, W., Muraki, M.: A fuzzy evaluation of schedule robustness under processing time variations in batch plants. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 30(2) (1997) 260–267
6. Cicerone, S., D’Angelo, G., Di Stefano, G., Frigioni, D., Navarra, A.: Robust algorithms and price of robustness in shunting problems. In: *Proc. of ATMOS 2007 - 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems* (2007)

7. De-Los-Santos, A., Mesa, J.A., Perea, F.: Evaluating the passenger robustness of an urban railway network. ARRIVAL Project - Technical Report No. 224 (2009)
8. Demetrius, L., Manke, T.: Robustness and network evolution - an entropic principle. *Physica A* 346 (2005) 682–696
9. DeVale, J.: Measuring operating system robustness. Technical Report Department of Electrical and Computer Engineering & Institute for Complex Engineering Systems, Carnegie Mellon University (1998)
10. Eslami, M.: Robustness measures in nonlinear discrete-time systems with delays and large-parameter variations. *Automatica* 35 (1999) 159–167
11. Fischetti, M., Monaci, M.: Light robustness. ARRIVAL Project - Technical Report No. 119 (2008)
12. García, R., Marín, À., Mesa, J.A., Perea, F., Verastegui, D.: A new concept of robustness. In: Proc. of ATMOS 2007 - 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems (2007)
13. Ginsberg, M.L., Parkes, A.J., Roy, A.: Supermodels and robustness. In: Proc. of the 15th National/Tenth Conference on Artificial Intelligence / Innovative Applications of Artificial Intelligence 334–339 (1998)
14. Graves, S.C.: A review of production scheduling. *Operations Research* 29 (1981) 646–675
15. Hart, E., Ross, P., Nelson, J.: Producing robust schedules via an artificial immune system. In: Proc. of International Conference on Evolutionary Computation (1998) 464–469
16. Hnich, B., Kiziltan, Z., Miguel, I., Walsh, T.: Hybrid modelling for robust solving. *Annals of Operations Research* 130 (2004) 19–39
17. Radatz, J. (Ed.): IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. Computer Society of the IEEE (1990)
18. Jensen, M.T.: Robust and Flexible Scheduling with Evolutionary Computation. PhD-Thesis University of Aarhus, Denmark (2001)
19. Jensen, M.T.: Improving robustness and flexibility of tardiness and total flow-time job shops using robustness measures. *Applied Soft Computing* 1 (2001) 35–52
20. Keys, K., Moore, D., Estan, C.: A robust system for accurate real-time summaries of internet traffic. In: Proc. of the ACM SIGMETRICS 2005 (2005) 85–96
21. Kitano, H., Oda, K.: Self-extending symbiosis: A mechanism for increasing robustness through evolution. *Biological Theory* 1(1) (2005) 61–66
22. Laporte, G., Marin, A., Mesa, J.A., Perea, A.: Designing robust rapid transit networks with alternative routes. ARRIVAL Project Technical Report 152 (2008)
23. Leon, V.J., Wu, S.D., Storer, R.H.: Robustness measures and robust scheduling for job shops. *IIE Transactions* 26(5) (1994) 32–43
24. Liebchen, C., Lübbecke, M., Möhring R.H., Stiller, S.: Recoverable robustness. ARRIVAL-Project - Technical Report 66. (2007)
25. Lozano, A.J., Mesa, J.A., Ortega, F.A.: Rapid transit network robustness indices: From the topological to the operational viewpoint. ARRIVAL Project Technical Report 53 (2006)
26. Marmier, F., Varnier, C., Zerhouni, N.: Robustness measure for fuzzy maintenance activities schedule. In: Proc. of 4th Conference on Management and Control of Production and Logistics. (2007)
27. Mignon, D.J., Honkomp, S.J., Reklaitis, G.V.: A framework for investigating schedule robustness under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering* 19 (1995) 615–620
28. Montemanni, R., Gambardella, L.M.: The robust shortest path problem with interval data via Benders decomposition. *4OR* 3 (2005) 315–328
29. Morales, J.C., Erera, A.L., Savelsbergh, M.W.P.: Robust duration-constrained tours for vehicle routing problems with stochastic demands. In: Proc. of TRISTAN VI (2007)
30. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J., Zenios, S.A.: Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research* 43(2) (1995) 264–281
31. Pinedo, M., Chao, X.: *Operations Scheduling*. McGrawHill (1999)
32. Schillo, M., Bürckert, H.-J., Fischer, K., Klusch, M.: Towards a definition of robustness for market-style open multi-agent systems. In: Proc. of the 5th International Conference on Autonomous Agents (2001) 75–76

33. Schneeweiß, C.: Planung 2: Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung. Springer-Verlag, Heidelberg (1992)
34. Schönberger, J., Kopfer, H.: Online decision making and automatic decision model adaptation. *Computers & Operations Research* 36(6) (2009) 1740–1750
35. Schönberger, J., Kopfer, H.: Transport system responsiveness improvement. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 39(1) (2009) 63–79
36. Schönberger, J., Kopfer, H.: Schedule nervousness reduction in transport re-planning. *Communications of SIWN* 3 (2008) 7–14
37. Schönberger, J., Kopfer, H.: On decision model adaptation in online optimization of a transport system. In: Günther, H.-O., Mattfeld, D.C., Suhl, L. (Eds.) *Management logistischer Netzwerke*, Springer, 361–381 (2007)
38. Shebalov, S., Klabjan, D.: Robust airline crew pairing: Move-up crews. *Transportation Science* 40(3) (2006) 300–312
39. Schöbel, A., Kratz, A.: A bicriteria approach for robust timetabling. Pre-Print 2009.4 of the Institut für Numerische und Angewandte Mathematik der Universität Göttingen (2009)
40. Scholl, A.: *Robuste Planung und Optimierung*. Physica Verlag, Heidelberg (2001)
41. Scott, D.M., Novak, D.C., Aultman-Hall, L., Guo, F.: Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks 14 (2006) 215–227
42. Tarhini, A., Fouchal, H.: Robustness evaluation of real-time protocols. In: *Proc. of the Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services*, (2006) 95–100
43. Wang, J.: A fuzzy robust scheduling approach for product development projects. *European Journal of Operational Research* 152 (2004) 180–194
44. Wooldridge, M., Jennings, N.R., Kinny, D.: A methodology for agent-oriented analysis and design. In: *Proc. of the Third International Conference on Autonomous Agents* (1999) 69–76
45. Wu, C.W., Brown, K.N., Beck, J.C.: Scheduling with uncertain durations: Modeling β -robust scheduling with constraints. *Computers and Operations Research* 36 (2009) 2348–2356
46. Yu, G., Yang, J.: On the robust shortest path problem. *Computers and Operations Research* 25(6) (1998) 457–468
47. Zielinski, P.: The computational complexity of the relative robust shortest path problem with interval data. *European Journal of Operational Research* 158 (2004) 570–576

A New Approach for an Inventory Model of a Remanufacturing System with Stochastic Decomposition Process

Matin Bagherpour, Behrooz Pourghannad, and Narges Shahraki

Abstract In this paper, we consider a single-item inventory system with stochastic remanufacturing process. For this system, the $(Q, \alpha, \beta, \gamma)$ inventory policy is proposed. The control policy parameters are the outside procurement order quantity, the capacity of material warehouse, the capacity of part warehouse, and the capacity of product warehouse, respectively. In this study, queuing system analysis is used to derive the estimated cost function. Also, the simulation studies are used to evaluate effectiveness of proposed estimated cost function. To the best of our knowledge, this study, for the first time in the literature, used analytical method for deriving estimated cost function of a remanufacturing system with stochastic decomposition process.

1 Introduction

In recent years, manufacturers have paid growing attention to reuse activities that provide material waste reduction via the recovery of some content of used products. Motivations behind these product recovery activities are two-fold: growing environmental concerns and potential economical benefits [1]. These reuse processes and related activities are studied in term of reverse logistics. Reverse logistics is the process of effectively planning, implementing, and controlling inbound flow and storage of secondary goods and related information opposite to the traditional supply chain direction for the purpose of recovering value or proper disposal [2, 3]. Reverse logistics systems are capable of dealing with product returns via several product recovery options, which can be categorized as direct reuse, repair, refurbishing, remanufacturing, cannibalization and recycling, respect to increasing degree of required disassembly level [4]. Remanufacturing is a typical example for economi-

Matin Bagherpour · Behrooz Pourghannad · Narges Shahraki
University of Science and Culture, Tehran, IRAN
E-mail: n.shahraki@usc.ac.ir

cally attractive reuse activities. Remanufacturing transforms used products into like new products. After disassembly, modules and parts are extensively inspected and problematic parts are repaired, or if not possible, replaced with new parts [1]. In 1997 Fleischmann et al. [3] reviewed the literature on inventory control and production planning in reverse logistics, they stated that recovery process effect three main areas, namely, distribution planning, inventory control, and production planning. Inventory control, as an important issue in the remanufacturing systems, is a key research aspect. Because the products already used by the customers are a main part of inventory in reverse logistics systems [5]. This study belongs to the inventory control area. The complexity of inventory control for recoverable manufacturing systems, due to uncertainty of product returns and coordination of product recovery option with regular procurement, are more than traditional systems [6]. In recent years, the challenges that are faced when dealing with returns in the context of production planning and inventory management have gained considerable attentions [1]. The scheme of the Manufacturing/Remanufacturing Hybrid, which denoted by MRH, is illustrated in Figure 1. There are many papers concerning the inventory control of the manufacturing/remanufacturing hybrid system such as Dobos and Richter [7], Heyman [8], Inderfurth and Van der Laan [6], Kiesmüller and Van der Laan [9], Van der Laan et al. [10], Van der Laan and Salomon [11], Van der Laan and Teunter [12], Muckstadt and Isaac [13], Ouyang and Zhu [14], Roy et al. [15], Tang and Grübbstrom [16]. Models found in the literature within this framework differ from one another respect to the assumptions. The demand and return processes, the existence of a disposal option for returned items, relevant cost parameters, lead times of production and remanufacturing activities, and the length of the planning horizon are these assumptions. Kleber et al. [17] and Corbacioglu and Van der laan, [18] dealt with a different model of remanufacturing system as shown in Figure 2. Also, Inderfurth [19] studied inventory control systems for a product recovery system. As shown in Figure 2, the recovered products are stocked in order to reuse them for multiple options. More recently, Takahashi et al. [20] consider a decomposition process for the first time as shown in Figure 3 where recovered products are decomposed and divided into components to be disposed and materials and parts to be reused in the production process. This study, for the first time, considers the process of decomposing the recovered products. Takahashi et al. [20], who developed a remanufacturing system with stochastic decomposition process for the first time, propose two control policies for controlling inventories in their under study system. They developed a Markov chain model and flow balance equations and analyzed performance of their proposed control policies by using numerical examples under various conditions. Also, they used numerical examples without providing any proof to show performance of their proposed policies. However, although remanufacturing systems with stochastic decomposition process can model real world problems more accurate than former studies, there is not any analytical method proposed for analyzing this problem. Without analytical method for evaluating behavior of such a system, applicability of this model can be limited. Also, for obtaining optimum parameters of a control policy, it is necessary to derive the analytical cost function. This study, to the best of our knowledge, develops an analytical method for deriv-

ing estimated cost function of single-item remanufacturing systems with stochastic decomposition process for the first time in the literature. Also, none of the previous studies in inventory control of remanufacturing systems studied the decomposition process of used products except Takahashi et al. [20]. In this paper, the traditional continuous review policy is developed and a $(Q, \alpha, \beta, \gamma)$ policy is proposed. The approximated cost function of proposed policy, using queuing system analysis, is presented. We used simulation experiments in order to evaluate performance of our estimated cost function. Statistical hypothesis tests with 95% confidence level reveal that there is no significant difference between cost function obtained by our proposed method and simulation results.

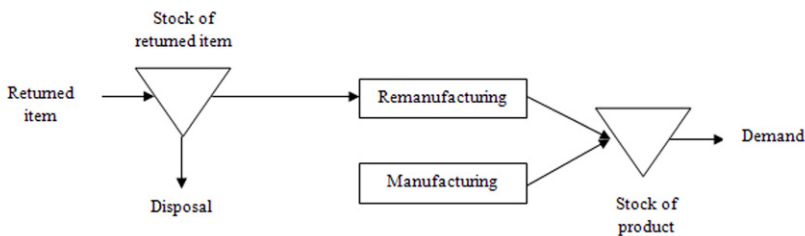


Fig. 1 The scheme of the manufacturing/remanufacturing hybrid inventory system.

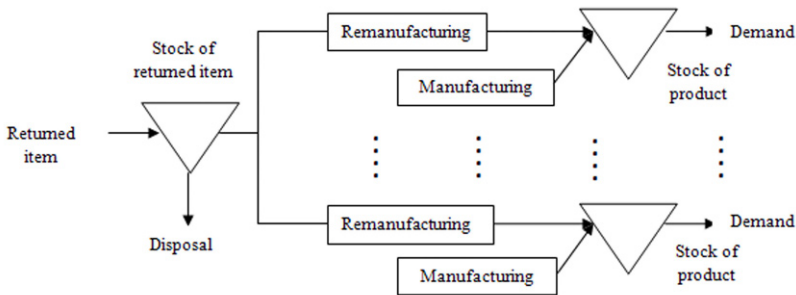


Fig. 2 The scheme of the manufacturing/remanufacturing hybrid inventory system with multiple demands.

The rest of this paper is organized as follows. In Section 2, notations used in this paper are introduced and the problem is defined. The proposed queuing system analysis for deriving the inventory remanufacturing model cost function is presented in Section 3. In Section 4, the effectiveness of our approach is evaluated by using simulation. Finally, conclusion and some suggestions for future research are presented in Section 5.

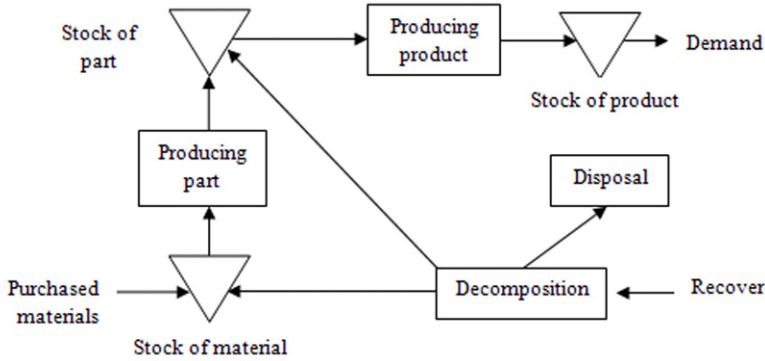


Fig. 3 The model of remanufacturing shown by Takahashi et al. [20].

2 Problem Description and Notations

In this section, a brief description of under study remanufacturing system is presented and notations are introduced. This paper studies a remanufacturing system which consists of three processes: decomposition, producing parts, and producing products. Also, there are three warehouses for storage of materials, parts, and products, as shown in Figure 4.

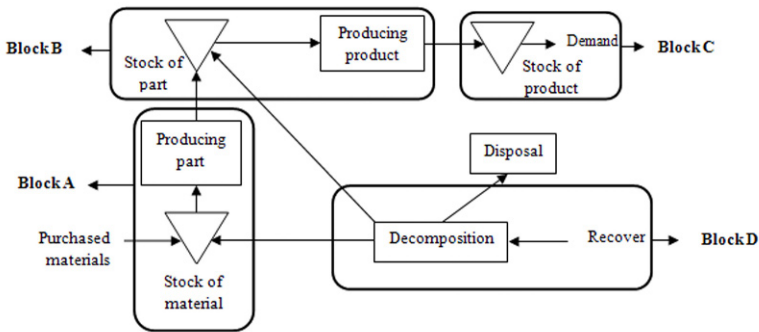


Fig. 4 The schematic model of remanufacturing in this paper.

The following assumptions are made in this paper:

1. The system deals with a single storable item.
2. The production system consists of three processes: producing products from parts, producing parts from materials, and decomposing recovered products.

3. By decomposing a recovered product, a part or a material is obtained, or the recovered product is disposed, base on the introduced notations λ_r is equal to summation of λ_{dis} , λ_m , and λ_{pa} .
4. The demand is lost when there is no stock of product available.
5. Quality of the parts or materials obtained from recovered products is the same as new ones.
6. Demands, recoveries, manufacturing of products, and production of parts are Poisson processes.
7. For material warehouse, there is a purchasing process with lot size equal to Q and zero lead time. For this purchasing process, the reorder point is considered to be zero.
8. The warehouses have limited capacities. The vector $(Q, \alpha, \beta, \gamma)$ represents inventory control policy, which consists of four control parameters, as described as follows:

- Products are produced unless the stock of products reaches the upper limit γ , or the stock of parts runs out.
- Parts are produced unless the stock of parts reaches the upper limit β , or the stock of materials runs out.
- Materials are purchased with the lot size Q when the stock of material runs out.
- When at least one of the two warehouses for materials or parts is full, recovered items are classified as waste and will be disposed.

The mathematical model in this paper is developed on the basis of the following notations:

- λ_d : Demand rate, according to a Poisson process,
- λ_r : Recovery rate, according to a Poisson process,
- M_p : Rate of products produced per unit time, according to a Poisson process,
- M_{pa} : Rate of parts produced per unit time, according to a Poisson process,
- λ_{dis} : Rate of disposal of decomposed recovered items,
- λ_m : Rate of reuse of decomposed recovered items as material,
- λ_{pa} : Rate of reuse of decomposed recovered items as part,
- α : Capacity of material warehouse,
- β : Capacity of part warehouse,
- γ : Capacity of product warehouse,
- $\pi^p(x)$: Steady-state probability of having x units of products on hand,
- $\pi^{pa}(x)$: Steady-state probability of having x units of parts on hand,
- $\pi^m(x)$: Steady-state probability of having x units of materials on hand,
- $L_{q|M/M/y/z}$: Average number of product/part/material in warehouse when deal with an $M/M/y/z$ queue system,
- h_{pa} : Part holding cost per unit per unit time,
- h_p : Product holding cost per unit per unit time,
- h_m : Material holding cost per unit per unit time,
- S : Shortage cost per unit, at product warehouse,

- D : Disposal cost per unit,
- c_i : Expected cost related to block i ; $i = A, B, C$ and D ,
- c_{total} : Expected total cost

3 Deriving the Model

In this section, a new approach is proposed for analyzing the problem. In order to use this approach to estimate the objective function of this problem, the problem is divided into four independent blocks, as shown in Figure 4. As mentioned in the previous section, the warehouses have limited capacities and we have a special control policy and the value of inventory on-hand in each block depends on the subsequent and previous blocks. Therefore, for formulating the cost function, we calculate inventory on-hand of each block by using condition of fullness or emptiness of subsequent and previous blocks. Blocks B and C can be modeled as an M/M/1/k queuing system. However, the block A is not a classic queuing system. There are two input sources for block A, including the remanufacturing and purchasing processes. However, such a system is studied by Ouyang and Zhu [14]. Although their under study problem has a simple structure, as shown in Figure 1, but they stated that their method can be used as a block in more complex systems [14]. Also, in block D, there is just a disposal option, because the decomposition process time is assumed to be negligible. Therefore, decomposition process has no inventory on-hand. In this section the cost function of the problem is derived. The cost function includes holding, shortage and disposal costs. As mentioned, the contribution of this paper is presenting an analytical estimation method to obtain the cost function. The total cost function equals to the summation of cost functions in blocks A, B, C and D (Equation (1)). The total cost function includes holding costs in all three mentioned warehouses, plus shortage cost in block D and disposal cost in block A.

$$c_{\text{total}} = c_A + c_B + c_C + c_D \quad (1)$$

Lemmas 1, 2, 3 and 4 present detailed calculation of c_A, c_B, c_C , and c_D , respectively. In addition, Lemma 5 presents formulation of the estimated cost function.

Lemma 1: c_A can be presented as follows:

$$c_A = E(x) \cdot h_m \quad (2)$$

where

$$E(x) = \sum_{x=1}^{\alpha} x \pi^m(x) \quad (3)$$

and

$$\pi^m(x) = (1 - \pi^{pa}(\beta)) \cdot \pi^m(x | \text{part warehouse is not full}) + \pi^{pa}(\beta) \cdot \pi^m(x | \text{part warehouse is full}) \tag{4}$$

where $\pi^{pa}(\beta)$ is calculated according to Equation (18) (see Appendix for more details), and

$$\pi^m(x | \text{part warehouse is not full}) = \begin{cases} \frac{1-r}{Q-r\alpha-Q+1 \sum_{i=0}^{Q-1} r^i} & x = 1 \\ \sum_{i=0}^{x-1} r^i \cdot \pi_1^m & 2 \leq x \leq Q \\ r^{x-Q} \sum_{i=0}^{Q-1} r^i \cdot \pi_1^m & Q+1 \leq x \leq \alpha \end{cases} \tag{5}$$

And the utilization factor that is denoted by r is equal to $\lambda_m M_{pa}$. In the steady-state, if part warehouse is full, r tends to zero. Therefore:

$$\pi^m(x | \text{part warehouse is full}) = \begin{cases} 0 & 1 \leq x \leq \alpha - 1 \\ 1 & x = \alpha \end{cases} \tag{6}$$

Proof: For calculating c_A , all possible events can be divided into two cases. First case is related to the states in which block B is not full. The steady-state probability of occurrence of this state is represented by $\pi^m(x | \text{part warehouse is not full})$. Second case is related to the states in which part warehouse is full, so the output rate of block A is zero, and r tends to zero. The steady-state probability of occurrence of this state is represented by $\pi^m(x | \text{part warehouse is full})$. According to the assumptions we made about the additional purchasing process and zero lead time, it can be concluded that inventory on-hand can be modeled as a continuous time Markov chain process. The state space of this system is $S = \{1, 2, \dots, Q-1, Q, Q+1, \dots, \alpha-1, \alpha\}$. Figure 5 illustrates the state transition diagram of the inventory on-hand.

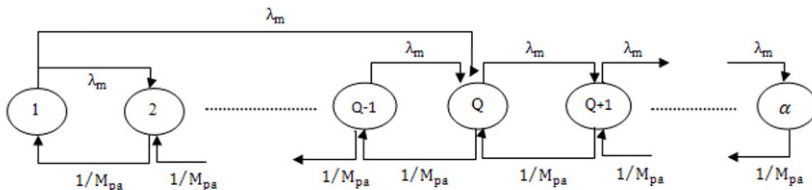


Fig. 5 State transition diagram of inventory on-hand in material warehouse.

As shown in Figure 5, the transition rates from a state to another state, denoted by f_{yx} , can be written as:

$$f_{x,x+1} = \lambda_m, 1 \leq x \leq \alpha - 1$$

$$f_{x,x-1} = 1/M_{pa}, 2 \leq x \leq \alpha$$

$$f_{1,Q} = \lambda_m$$

The inventory on-hand is an irreducible continuous time Markov chain, the proof of that is presented by Ouyang and Zhu [14]. This continuous time Markov chain has a unique steady-state probability. It is given by the solution of following equations.

$$\sum \pi^m(x) f_{yx}; \quad 1 \leq x \leq \alpha \quad (7)$$

$$\sum \pi^m(x) = 1 \quad (8)$$

Where f_{yx} is the transition rate from state y to state x as shown in Figure 5. Equation (7) is called balanced equation, and Equation (8) is called normalized equation in ([14]). By solving Equation (7) and (8) the steady-state probabilities can be obtained as follows:

$$\pi^m(x) = \begin{cases} \frac{1-r}{Q-r^{\alpha-Q+1} \sum_{i=0}^{Q-1} r^i} & x = 1 \\ \sum_{i=0}^{x-1} r^i \cdot \pi_1^m & 2 \leq x \leq Q \\ r^{x-Q} \sum_{i=0}^{Q-1} r^i \pi_1^m & Q+1 \leq x \leq \alpha \end{cases} \quad (9)$$

In the steady-state, if the part warehouse is not full, then r is equal to $\lambda_m M_{pa}$, otherwise if the part warehouse is full, then r tends to zero, and Equation (6) can be easily obtained.

Lemma 2: c_B can be written as follows:

$$c_B = \pi^p(\gamma) \cdot \beta \cdot h_{pa} + (1 - \pi^p(\gamma)) \cdot L_{q|M/M/1/(\beta+1)} \cdot h_{pa} \quad (10)$$

Where $\pi^p(\gamma)$ is calculated according to Equation (16) (For more details, see Appendix).

Proof: For calculating c_B , all of possible events can be divided into two cases. The first case is related to the states in which the product warehouse is full. Therefore, the output rate of part warehouse is zero, and input rate of part warehouse tends to $\lambda_{pa} + (1/M_{pa})$. The steady-state probability of occurrence of this state is represented by $\pi^p(\gamma)$.

The second case is related to the states in which the product warehouse is not full, so, in the steady-state, the output rate and input rate of block B tend to $1/M_p$ and

λ_{pa} , respectively. This case can be modeled as an $M/M/1/(\beta + 1)$ queuing system with the above mentioned input and output rates. Also, the steady-state probability of this case is represented by $1 - \pi^p(\gamma)$. Based on these two cases, the expected cost for block B can be expressed as follows, by using conditional probability:

$$c_B = [P(\text{Case 1}) \cdot E[\text{Inventory on hand in part warehouse} | \text{Case 1}] + P(\text{Case 2}) \cdot E[\text{Inventory on hand in part warehouse} | \text{Case 2}]] \cdot h_{pa} \tag{11}$$

If the product warehouse is full, i.e., the first case, then the expected number of on-hand inventory is β according to Equation (12). So, the first term in Equation (11) can be written as $\pi^p(\gamma) \cdot \beta \cdot h_{pa}$. Also in the second case, when the product warehouse is not full, the expected number of inventory on-hand is equal to the average length of an $M/M/1/(\beta + 1)$ queuing system with the above mentioned input and output rates.

$$L_q = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{r}{1-r} - \frac{(\beta + 2)r^{\beta+2}}{1-r^{\beta+2}} - \frac{r(1-r^{\beta+1})}{1-r^{\beta+2}} \right) = \beta \tag{12}$$

By rewriting Equation (11), *Lemma 2* can be easily obtained.

Lemma 3: c_C can be written as follows:

$$c_C = (1 - \pi^{pa}(0)) \cdot L_{q|M/M/1/(\gamma+1)} \cdot h_p + \pi^{pa}(0) \cdot 0 + S \cdot \pi^p(0) \cdot \lambda_d \tag{13}$$

Where $\pi^{pa}(0)$ and $\pi^p(0)$ are calculated according to Equations (17) and (19) respectively (See Appendix).

Proof: Similar to *lemma 2* for calculating c_C , all of the possible events can be divided into two cases, based on the fact that part warehouse is empty, $\pi^{pa}(0)$, or not, $1 - \pi^{pa}(0)$. If the part warehouse is empty, then, in the steady-state, the output rate of product warehouse tends to λ_d and the input rate of product warehouse tends to zero. On the other hand, in the steady-state, if the part warehouse is not empty, the output rate tends to λ_d , and the input rate tends to $1/M_p$. Second case can be represented by an $M/M/1/(\gamma + 1)$ queuing system with the above mentioned input and output rates. Simply, similar to *lemma 2*, by using conditional probability, the holding cost function is obtained. On the other hand, shortage happens when the product warehouse is empty. The number of lost demands can be calculated by $\pi^p(0) \cdot \lambda_d$, and the expected shortage cost is expressed by $S \cdot \pi^p(0) \cdot \lambda_d$. Eventually, using these relations Equation (13) can be obtained.

Lemma 4: c_D can be written as follows:

$$c_D = D \cdot (\lambda_{dis} + n_{\alpha}^m \cdot \lambda_m + n_{\beta}^{pa} \cdot \lambda_{pa}) \tag{14}$$

Where n_{α}^m and n^{pa} are calculated according to *lemma 1* and Equation (18), respectively.

Lemma 5: The estimated cost function under proposed $(Q, \alpha, \beta, \gamma)$ inventory control policy can be expressed as follows:

$$\begin{aligned}
Z = & E(x) \cdot h_m + \pi^p(\gamma) \cdot \beta \cdot h_{pa} \\
& + (1 - \pi^p(\gamma)) \cdot L_{q|M/M/1/(\beta+1)} \cdot h_{pa} \\
& + (1 - \pi^{pa}(0)) \cdot L_{q|M/M/1/(\gamma+1)} \cdot h_p \\
& + S \cdot \pi^p(0) \cdot \lambda_d + D \cdot (\lambda_{dis} + \pi_{\alpha}^m \cdot \lambda_m \\
& + \pi^{pa} \cdot \lambda_{pa})
\end{aligned} \tag{15}$$

Proof: Using *lemmas* 1,2,3, and 4, Equation 15 is obtained.

4 Computational Results

Evaluation of the approximation approach: Validity of proposed approximation approach in this paper is evaluated by simulation experiments. To generate test instances for comparing the cost function of our approach and the simulated model, we set $h_m = 2, h_{pa} = 4, h_p = 5, S = 5, \lambda_m = 2.5, \lambda_{pa} = 2.5, \lambda_{pa} = 1(\lambda_d = 6), M_p = 5, M_{pa} = 4$, which come from the case study carried out at an automobile company in Asia, and we study the effect of the following parameters: outside procurement order quantity (Q), capacity of material warehouse (α), capacity of part warehouse (β), and capacity of product warehouse (γ) By assigning three values to $Q(Q = 5, 10, 15)$, three values to $\alpha(\alpha = 15, 20, 25)$, three values to $\beta(\beta = 15, 20, 25)$, and three values to $\gamma(\gamma = 15, 20, 25)$, we obtain $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ different scenarios. We randomly select 30 scenarios from 81 scenarios and each scenario is labeled as $(Q, \alpha, \beta, \gamma)$. We denote the objective function values obtained from the two methods as Z_o (our approach) and Z_s (simulation), respectively, and the percent error is calculated by $100 \cdot |Z_s - Z_o|/Z_s$ which is denoted by ε . In Table 1, we present the results obtained for the objective function by the two methods for each scenario.

We propose hypothesis test as follows:

$$\begin{cases} H_0 : \varepsilon = 1.5\% \\ H_1 : \varepsilon \neq 1.5\% \end{cases}$$

The statistical hypothesis test with 95% confidence level reveals that there is no significant difference between proposed method and simulation studies.

5 Conclusion

In this paper, we investigated the remanufacturing inventory system with stochastic decomposition process; such a system models the real world problems more realistic. In this study, for the first time in the literature, we used queuing network analysis

Table 1 The results of two methods.

Scenario Number	Scenario	Z ₀	Z _s	Percent error (%)
1	(5,15,15,20)	83.685866	85.6127356	2.2506813
2	(5,15,20,20)	105.05335	106.630431	1.4790183
3	(5,15,25,20)	125.8821	128.843063	2.2981133
4	(5,20,15,15)	86.492644	85.0538928	1.6915765
5	(5,20,20,25)	107.29661	107.76772	0.4371534
6	(5,20,25,25)	128.11952	128.58343	0.3607881
7	(5,20,25,15)	128.67113	128.574723	0.0749825
8	(5,15,25,20)	128.11952	128.58343	0.3607881
9	(5,25,15,15)	88.920127	87.4817733	1.6441755
10	(5,25,15,20)	88.47656	88.5249923	0.0547105
11	(5,25,20,20)	109.80496	109.499042	0.2793832
12	(10,15,15,20)	87.299731	88.7231793	1.6043707
13	(10,15,15,25)	87.178523	90.1286256	3.2732138
14	(10,15,20,15)	108.99488	110.379632	1.2545381
15	(10,15,25,20)	129.50773	131.774663	1.7203126
16	(10,20,15,20)	89.889095	92.9919372	3.3366787
17	(10,20,15,25)	89.7481	90.0582679	0.3444077
18	(10,20,25,15)	132.44447	131.71083	0.5570105
19	(10,25,15,20)	92.288702	95.37729	3.2382845
20	(10,25,25,15)	134.87219	134.274723	0.4449578
21	(10,25,25,20)	134.44786	133.81729	0.4712134
22	(15,15,25,15)	132.36567	135.454723	2.2805055
23	(15,15,25,25)	131.94656	135.32343	2.4954094
24	(15,20,20,15)	111.19406	112.615696	1.2623777
25	(15,20,20,20)	110.85984	113.305647	2.158593
26	(15,20,25,20)	131.68558	137.693466	4.363232
27	(15,25,15,15)	96.472207	94.5938928	1.985661
28	(15,25,15,20)	96.081167	98.4498153	2.4059451
29	(15,25,15,20)	95.930004	97.4644954	1.5744102
30	(15,25,25,20)	138.25266	139.773466	1.0880506

for deriving the estimated cost function of remanufacturing inventory system with stochastic decomposition process. Finally, the validity of purposed approximation approach in this paper is evaluated by simulation studies. For future work in this area, researchers can focus on the efficient algorithms for minimizing estimated cost function in order to obtaining the optimal control parameters.

Appendix

This appendix provides the proof for the following steady-state probabilities:

$$\pi^p(\gamma) = \frac{A \cdot C}{1 - A \cdot B + A \cdot C} \tag{16}$$

$$\pi^{\text{pa}}(0) = 1 - \frac{\pi^P(\gamma)}{A} \quad (17)$$

$$\pi^{\text{pa}}(\beta) = (1 - \pi^P(\gamma)) \cdot E \quad (18)$$

$$1 - \pi^P(0) = \pi^{\text{pa}}(0) \cdot F + (1 - \pi^{\text{pa}}(0)) \cdot G \quad (19)$$

Where,

$$A = \pi^P\left(\gamma \mid \lambda = \frac{1}{M_p}, \mu = \lambda_d\right) = \frac{\left(1 - \frac{1}{\lambda_d M_p}\right) \left(\frac{1}{\lambda_d M_p}\right)^\gamma}{1 - \left(\frac{1}{\lambda_d M_d}\right)^{\gamma+2}}$$

$$B = 1 - \pi^{\text{pa}}\left(0 \mid \lambda = \lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}, \mu = 0\right) = 1$$

$$C = 1 - \pi^{\text{pa}}\left(0 \mid \lambda = \lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}, \mu = \frac{1}{M_p}\right) = 1 - \frac{\left(1 - \frac{\lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}}{\frac{1}{M_p}}\right)}{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}}{\frac{1}{M_p}}\right)^{\beta+2}}$$

$$D = \pi^{\text{pa}}\left(\beta \mid \lambda = \lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}, \mu = 0\right) = 0$$

$$E = \pi^{\text{pa}}\left(\beta \mid \lambda = \lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}, \mu = \frac{1}{M_p}\right) = \frac{\left(1 - \frac{\lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}}{\frac{1}{M_p}}\right) \left(\frac{\lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}}{\frac{1}{M_p}}\right)^\beta}{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{pa}} + \frac{1}{M_{\text{pa}}}}{\frac{1}{M_p}}\right)^{\beta+2}}$$

$$F = 1 - \pi^P(0 \mid \lambda = 0, \mu = \lambda_d) = 1$$

$$G = 1 - \pi^P\left(0 \mid \lambda = \frac{1}{M_p}, \mu = \lambda_d\right) = 1 - \frac{\left(1 - \frac{1}{\lambda_d M_d}\right)}{1 - \left(\frac{1}{\lambda_d M_d}\right)^{\gamma+2}}$$

Proof:

$$\begin{aligned} \pi^P(\gamma) &= (1 - \pi^{\text{pa}}(0)) \cdot \pi^P(\gamma \mid \text{part warehouse is not empty}) \\ &\quad + \pi^{\text{pa}}(0) \cdot \pi^P(\gamma \mid \text{part warehouse is empty}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$1 - \pi^{pa}(0) = \pi^P(\gamma) \cdot \pi^{pa}(\text{part warehouse is not empty} | \text{product warehouse is full}) \tag{21}$$

$$+ (1 - \pi^P(\gamma)) \cdot \pi^{pa}(\text{part warehouse is not empty} | \text{product warehouse is not full})$$

$$\pi^{pa}(\beta) = \pi^P(\gamma) \cdot \pi^{pa}(\beta | \text{product warehouse is full}) \tag{22}$$

$$(1 - \pi^P(\gamma)) \cdot \pi^{pa}(\beta | \text{product warehouse is not full})$$

$$1 - \pi^P(0) = \pi^{pa}(0) \tag{23}$$

$$\cdot \pi^P(\text{product warehouse is not empty} | \text{part warehouse is empty})$$

$$+ (1 - \pi^{pa}(0))$$

$$\cdot \pi^P(\text{product warehouse is not empty} | \text{part warehouse is not empty})$$

Where

$$A = \pi^P(\gamma | \text{part warehouse is not empty}) \rightarrow \pi^P\left(\gamma | \lambda = \frac{1}{M_p}, \mu = \lambda_d\right)$$

$$1 = \pi^P(\gamma | \text{part warehouse is empty}) \rightarrow \pi^P(\gamma | \lambda = 0, \mu = \lambda_d)$$

$$B = \pi^P(\gamma | \text{part warehouse is not empty} | \text{part warehouse is full})$$

$$\rightarrow 1 - \pi^{pa}\left(0 | \lambda = \lambda_{pa} + \frac{1}{M_{pa}}, \mu = 0\right)$$

$$C = \pi^{pa}(\text{part warehouse is not empty} | \text{product warehouse is not full})$$

$$\rightarrow 1 - \pi^{pa}\left(0 | \lambda = \lambda_{pa} + \frac{1}{M_{pa}}, \mu = \frac{1}{M_p}\right)$$

$$D = \pi^{pa}(\beta | \text{product warehouse is full}) \rightarrow \pi^{pa}\left(\beta | \lambda = \lambda_{pa} + \frac{1}{M_{pa}}, \mu = 0\right)$$

$$E = \pi^{pa}(\beta | \text{product warehouse is not full}) \rightarrow \pi^{pa}\left(\beta | \lambda = \lambda_{pa} + \frac{1}{M_{pa}}, \mu = \frac{1}{M_p}\right)$$

$$F = \pi^P(\text{product warehouse is not empty} | \text{part warehouse is empty})$$

$$\rightarrow 1 - \pi^P(0 | \lambda = 0, \mu = \lambda_d)$$

$$G = \pi^P(\text{product warehouse is not empty} | \text{part warehouse is not empty})$$

$$\rightarrow 1 - \pi^P\left(0 | \lambda = \frac{1}{M_p}, \mu = \lambda_d\right)$$

By solving simultaneously Equations 20, 21, 22 and 23 we get the steady-state probabilities as in Equations 16, 17, 18 and 19.

References

1. Ahiska S. S.: Inventory optimization in a one product recoverable manufacturing system. Dissertation, North Carolina State University (2008)
2. Beltran L. S.: Reverse Logistics: Current Trends and Practices in the Commercial World. *Logistics Spectrum* 36(3) (2002) 4–8
3. Fleischmann M., B-Ruwaard J., Dekker R., van der Laan E., van Nunen J., Van Wassenhove L.: Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research* 103 (1997) 1–17
4. Thierry M., Salomon M., Vannunen J., Wassenhove L.: Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review* 37(2) (1995) 114–135
5. Dong Y., Kaku I., Tang J.: Inventory Management in Reverse Logistics: A Survey. *International Conference ICSSSM 1* (2005) 352–356
6. Inderfurth K., van der Laan E.: Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 71(1-3) (2001) 381–390
7. Dobos I., Richter K.: A production/recycling model with quality consideration. *International Journal of Production Economics* 104 (2006) 571–579
8. Heyman DP.: Optimal disposal policies for a single-item inventory system with returns. *Naval Research Logistics Quarterly* 24 (1977) 385–405
9. Kiesmüller G., Laan V.: An inventory model with dependent product demands and returns. *International Journal of Production Economics* 72 (2001) 73–87
10. Van der Laan E., Dekker R., Salomon M.: An (s,Q) inventory model with remanufacturing and disposal. *International Journal of Production Economics* Vol 46-47 (1996b) 339–350
11. Van der Laan E., Salomon M.: Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. *European Journal of Operational Research* 102(2) (1997) 264–278
12. Van der Laan E., Teunter R.H.: Simple heuristics for push and pull remanufacturing policies. *European Journal of Operational Research* 175 (2006) 1084–1102
13. Muckstadt J.A., Isaac M.H.: An analysis of single item inventory systems with returns. *Naval Research Logistics Quarterly* 28 (1981) 237–254
14. Ouyang H., Zhu X.: An Inventory Control System for Remanufacture with Disposal. *IEEE Conference on Robotic, Automation and Mechatronic* (2006) 1–5
15. Roy A., Maity K., Kar S., Maiti M.: A production-inventory model with remanufacturing for defective and usable items in fuzzy-environment. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56(1) (2009) 87–96
16. Tang O., Grubbstrom R.: Considering stochastic lead times in a manufacturing/ remanufacturing system with deterministic demands and returns. *Journal of Production Economics*. 93-94 (2005) 285–300
17. Kleber R., Minner S., Kiesmüller G.: A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options. *International Journal of Production Economics* 79 (2002) 121–141
18. Corbacioglu U., Van der Laan, E.A.: Setting the holding cost rates in a two-product system with remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 109 (2007) 185–194
19. Inderfurth K.: Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing systems with product substitution. *International Journal of Production Economics* 90 (2004) 325–343
20. Takahashi K., Morikawa K., Takeda D., Mizuno A.: Inventory control for a MARKOVIAN remanufacturing system with stochastic decomposition process. *International Journal of Production Economics* 108 (2007) 416–425
21. Bolch G., Greiner S., De Meer H., Trivedi K.S.: *Queueing Networks and Markov Chains*. Wiley, New York (1998)

Strukturen der Logistikforschung: Ergebnisse einer Zitations- und Koziationsanalyse internationaler Logistikzeitschriften

Christoph Georgi, Inga-Lena Darkow und Herbert Kotzab

Zusammenfassung Der vorliegende Beitrag greift die kontroverse Diskussion der Frage nach einem eigenständigen Profil der Logistik auf. Im Vergleich zu den bisherigen Beiträgen, die sich dieser zentralen Frage gewidmet haben, stehen weder Entwicklungszüge und Gestaltungsansätze der Logistik noch Forschungsparadigmen und die Art der Wahrnehmung der Wirklichkeit wissenschaftlicher Arbeiten in der Disziplin im Vordergrund. Vielmehr wird der aktuelle Stand der Forschung anhand des Eigenverständnisses aktueller Publikationen maßgeblicher Fachzeitschriften mit Logistikmanagementfokus greifbar gemacht. Anhand einer Zitations- und Koziationsanalyse aktueller Beiträge (2004-2008) aus den Zeitschriften *IJLM*, *IJL:R&A*, *IJPDLM* und *JBL* werden die einflussreichsten Publikationen und Publikationsorgane der repräsentierten Forschung identifiziert und Forschungsfelder bzw. -schwerpunkte abgegrenzt und analysiert.

1 Einleitung

In regelmäßigen Abständen wird das eigenständige Profil der Logistik diskutiert und hinterfragt (siehe dazu [42, 61, 64, 39, 9, 68, 82]). Zumeist werden dabei die Entwicklungszüge und Gestaltungsansätze der Logistik – seit den späten 1990ern auch die des Supply Chain Management (SCM) – auf Basis eines Bezugsrahmens analysiert, der das Forschungsparadigma und die Art der Wahrnehmung der Wirklichkeit

Christoph Georgi · Inga-Lena Darkow

Supply Chain Management Institute SMI, European Business School EBS, Söhnleinstr. 8/F, 65201 Wiesbaden, GERMANY

E-mail: {georgi, darkow}@supplyinstitute.org

Herbert Kotzab

Department of Operations Management, Copenhagen Business School, Solbjerg Plads 3, 2000 Frederiksberg, DENMARK

E-mail: hk.om@cbs.dk

der wissenschaftlichen Arbeiten untersucht (siehe auch [23]). Ein Beispiel hierzu ist die von [50] durchgeführte Analyse deutschsprachiger Dissertationen im Fachbereich. Ebenso werden Bestandsaufnahmen zu eingesetzten Forschungsmethoden durchgeführt (siehe z.B. [43, 57]), deren Ergebnisse zu einer Charakterisierung des Wissenschaftsgebiets führen. Manche Autoren wie z.B. [32, 82] präsentieren entsprechende Denkschulen, die das Fach prägen und auf eine Desintegration und Fragmentierung des Fachbereichs hinweisen (siehe auch [17, 18, 82, 86]). Während im Fachbereich Logistik noch immer oft die Frage nach dem Wesen der Logistik oder des SCM gestellt wird (siehe u.a. [5, 44, 54]), wird in anderen Disziplinen wie z.B. im Accounting, Marketing, Controlling, im strategischen Management oder in der Organisation der Stand der jeweiligen Forschung dahingehend untersucht, inwieweit dieser in den Publikationen führender Fachzeitschriften zum Ausdruck kommt (siehe u.a. [1, 15, 19, 20, 27, 36, 40, 58, 63, 69, 70, 71, 78, 81]). Entsprechend stellt sich die Frage, wie sich die Logistikforschung in einem ausgewählten Zeitraum in der wissenschaftlichen Literatur widerspiegelt. Eine ausschließlich inhaltliche Analyse von Publikationen, die der Logistikforschung anhand der Schlagworte „logistics“ und „supply chain“ zugeordnet werden können, greift für die vorliegende Problemstellung zu kurz. Das Spektrum potentiell einflussreicher Publikationsorgane könnte nicht abgedeckt und ein nachhaltiger Einfluss der zu untersuchenden Beiträge auf die Forschung würde nicht eingeschätzt werden können. Hingegen können mit Hilfe von Zitations- und Koitationsanalysen jene Publikationen identifiziert werden, die „als inhaltlich relevant und thematisch zusammengehörig wahrgenommen und deshalb gemeinsam in Artikeln als Zitat wiederfinden“ ([70, S. 142], vgl. auch [81]). Vor diesem Hintergrund ist das Ziel des vorliegenden Beitrags jene Literatur zu identifizieren und zu strukturieren, auf die die aktuelle Logistikforschung aufbaut. Im Mittelpunkt der Analyse stehen folgende Fragestellungen:

- Welche Publikationen wurden im Untersuchungszeitraum am häufigsten zitiert?
- Welche Publikationsorgane haben den größten Einfluss auf die aktuelle Logistikforschung?
- Welche abgrenzbaren Forschungsfelder bzw. -schwerpunkte lassen sich in der aktuellen Forschung erkennen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird die aktuelle Logistikforschung anhand von bibliometrischen Analysen untersucht. Die Bibliometrie bietet eine Methodik, anhand derer man auf unbefangene, unaufdringliche und dennoch umfangreiche Art und Weise [33, 74] die Entwicklung, Verbreitung und Verwendung von Wissen in einer akademischen Disziplin untersuchen kann [40]. Bislang kann für die Logistikforschung nur auf die Studie von Charvet et al. [11] zurückgegriffen werden. Die Autoren untersuchen in ihrem Beitrag auf der Basis einer bibliometrischen Analyse von 33 Publikationen, die zwischen 1995 und 2004 erschienen sind, die Strukturen der SCM Forschung [52]. Im Unterschied dazu werden im vorliegenden Beitrag über 16.000 Zitationen von 412 Beiträgen, die zwischen 2004 und 2008 in maßgeblichen Logistikzeitschriften mit Logistikmanagementfokus erschienen sind, analysiert. Wie in Abschnitt 2.1 eingehend gezeigt wird, wurde *a priori* keine direkte Einschränkung der zu untersuchenden Publikationen vorgenommen.

2 Methodologie

2.1 Auswahl der zu analysierenden Artikel

Der erste Schritt der Datenerhebung in bibliometrischen Untersuchungen bestimmt diejenigen Publikationen, die das zu analysierende wissenschaftliche Gebiet definieren. Bei der Auswahl der Publikationen ist darauf zu achten, dass sie das Feld weitläufig im Sinne von Schwerpunkten, Methodologien oder Denkschulen abdecken, um bei der Analyse das Forschungsfeld umfassend darstellen zu können [52]. Diesbezüglich wird zwischen zwei Vorgehensweisen unterschieden [28, 34, 52]: Entweder können die zu untersuchenden Publikationen auf Basis des Wissens des Forschers bzw. vorheriger Studien oder auf Basis von Zitations- bzw. Koziationshäufigkeiten, die sich aus einer entsprechenden umfangreichen Datenbank erschließen lassen, zusammengestellt werden. Bei der zweiten Vorgehensweise muss die aufzubauende Datenbank allerdings so beschaffen sein, dass die verzeichneten Zitationen für das Feld repräsentativ sind. Aufgrund des explorativen Charakters der vorliegenden Studie wurde für die Auswahl der Beiträge die zweite Vorgehensweise gewählt (vgl. auch die ähnlichen Studien [1, 11, 65, 69]). Um dem oben genannten Kriterium der Repräsentativität der Datenbank zu entsprechen, wurden die in die Datenbank aufzunehmenden Artikel anhand einer Abfrage nach „logistics“ oder „supply chain“ in Titel (TI), Zusammenfassung (AB) oder Schlagwort (KW) in EBSCO's BSC identifiziert. Da für bibliometrische Analysen das Literaturverzeichnis der Publikationen notwendig ist, wurde die Suche auf solche Artikel eingeschränkt, für die EBSCO das Literaturverzeichnis vorhält („cited references available“). Diese Suchanfrage lieferte 4.356 Artikel aus 597 unterschiedlichen akademischen und „peer-reviewed“ Zeitschriften. Eine erste Analyse der Treffer zeigte, dass das *International Journal of Logistics Management (IJLM)*, das *International Journal of Logistics: Research & Applications (IJL:R&A)*, das *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management (IJPDLM)* und das *Journal of Business Logistics (JBL)* nicht nur die führenden Fachzeitschriften mit Logistikmanagementfokus sind (vgl. die logistikspezifischen Zeitschriftenrankings [10, 29, 35, 47, 53]), sondern im Verhältnis zu allen publizierten Artikeln die meisten Artikel mit „logistics“ oder „supply chain“ in Titel, Zusammenfassung oder Schlagwort veröffentlicht haben. So sind mehr als drei Viertel aller Publikationen in den oben genannten Zeitschriften in Bezug auf die durchgeführte Datenbankabfrage dem hier zu untersuchenden Forschungsgebiet zuzuordnen. Im Vergleich dazu entsprechen z.B. im *Journal of Supply Chain Management (JSCM)* nur 53%, im *Transportation Journal (TJ)* nur 42% und im *Journal of Operations Management (JOM)* bzw. im *Journal of Production & Operations Management (JPOM)* nur 34% aller Publikationen unseren Suchkriterien. Dementsprechend wurde die Datenerhebung auf die 412 Publikationen beschränkt, die in den Zeitschriften *IJLM*, *IJL:R&A*, *IJPDLM* und *JBL* veröffentlicht wurden und den oben genannten Suchkriterien entsprachen. Die aus EBSCO's BSC exportierten Literaturverzeichnisse dieser 412 Beiträge umfassen 17.118 Zitationen. Mit Hilfe eines eigens entwickel-

Tabelle 1 Übersicht zur Stichprobe.

Zeitschrift	Artikel	Zitation zu Publikationen	Zitierte Publikationen	Zitationen zu Zeitschriften	Zitierte Zeitschriften
IJLM	75	3.379	2.690	2.647	451
IJL:R&A	96	2.589	2.262	1.762	460
IJPDLM	163	6.288	4.766	4.957	708
JBL	78	4.117	2.983	3.294	434
Gesamt	412	16.373	10.106	12.660	1.194

ten Skripts wurden die bibliographischen Informationen von 16.446 zitierten Artikel, Bücher, und Buchbeiträge in eine Datenbank importiert. Zitationen zu Konferenzbänden, Arbeitsberichten, und ähnlichem (566) sowie alle Zitationen ohne Titelangabe (106) wurden nicht berücksichtigt. Aufgrund von Zitations- und Rechtschreibfehlern wurden alle Werke deren Titel zu 85% übereinstimmen als eine Publikation importiert; Zitationen zu Werken, die so fälschlicherweise zusammengeführt wurden („false positives“) wurden manuell angepasst. Ebenso wurden die Titel der Werke, die von der Regel nicht als ein Werk identifiziert wurden und dennoch mindestens drei Mal zitiert wurden, in der Datengrundlage editiert. Die Titel der Zeitschriften wurden anhand ihres Akronyms (z.B. „JBL“ für das „Journal of Business Logistics“) identifiziert und die Datengrundlage, wo nötig, entsprechend editiert um Überschneidungen und Zitationsfehler zu beheben. Nachdem die Datengrundlage bereinigt wurde, konnten insgesamt 16.373 Zitationen zu 10.106 Publikationen (Zeitschriften, Bücher und Buchbeiträge) und 12.660 Zitationen zu 1.194 Zeitschriften importiert und analysiert werden (vgl. Tabelle 1).

2.2 Analyse der bibliometrischen Informationen

Entsprechend unserer Forschungsfragen, wurde der Datensatz in zwei Schritten analysiert:

- Für die von den 412 Artikeln zitierten Beiträge wurden die Zitationshäufigkeiten bestimmt, um jene Werke und Publikationsorgane zu identifizieren, die die aktuelle Forschung im Bereich Logistik/Supply Chain am meisten beeinflusst haben (Forschungsfragen 1 und 2). Darüber hinaus wurden für jede der vier ausgewählten Zeitschriften die einflussreichsten Werke und Publikationsorgane gegenübergestellt.
- Anhand einer Kozitationsanalyse wurden die einflussreichsten Publikationen analysiert und Forschungsfelder bzw. -schwerpunkte identifiziert.

Die Anzahl der in der Zitations-/Kozitationsanalyse zu berücksichtigenden Publikationen wurde anhand von Kruskals stress, einem Indikator für die Anpas-

zungsgüte einer multidimensional skalierten Darstellung der Daten, bestimmt [69].¹ Mit dieser Vorgehensweise konnten 39 Publikationen, die mindestens 16 Mal zitiert wurden, identifiziert werden, die in der MDS zu einer ausreichenden Anpassungsgüte führten (Kruskals stress unter 20%; siehe auch Tabelle 2). Wenngleich durch dieses Kriterium die Anzahl der zu analysierenden Publikationen eher gering ausfällt, stellen die verbleibenden Publikationen dennoch Meilensteine dar, die zentrale und wichtige Schwerpunkte der Forschung repräsentieren [73]. Danach wurden die Top-39 Publikationen nach den gebräuchlichen Methoden der Koziationsanalyse wie folgt analysiert [52, 81, 80]: Die Koziationshäufigkeiten zwischen den zu analysierenden Publikationen wurden in einer symmetrischen Matrix abgebildet, wobei die Diagonale durch die höchste Koziationshäufigkeit der Publikation ersetzt wurde. Um die Matrix zu normieren, wurde Pearsons r Korrelationskoeffizient eingesetzt.² Die normierte Matrix wurde schließlich anhand einer Faktorenanalyse (Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotierung und Kaiser-Normalisierung; Extraktion aller Faktoren mit Eigenwerten größer 1); einer Clusteranalyse (hierarchischer Verfahren mit Complete-Linkage Algorithmus); und einer MDS (SPSS PROXSCAL; Interpretation des Pearsons Korrelations-Koeffizienten als Ähnlichkeitsdistanz) analysiert [3]. Die angewandten Verfahren erlauben eine Analyse der Daten aus unterschiedlichen Perspektiven, die komplementär sind. Die folgende Diskussion der Ergebnisse beruht primär auf dem kartographischen Output der MDS. Einblicke, die aus der Faktorenanalyse und der Clusteranalyse gewonnen werden konnten, wurden unterstützend zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen.

3 Ergebnisse

3.1 Die einflussreichsten Publikationen und Publikationsorgane

Die 39 am häufigsten zitierten Beiträge teilen sich auf 25 Zeitschriftenbeiträge und 14 Monographien auf (siehe Tabelle 2).

An erster Stelle der einflussreichsten Publikationen der vier untersuchten Logistikzeitschriften steht das Lehrbuch „Logistics & Supply Chain Management: Stra-

¹ Hierbei dienten die mit Pearsons r normierten Koziationshäufigkeiten zwischen den Publikationen als Ähnlichkeitsmaß; als Startkonfiguration wurde in SPSS „Simplex“ gewählt. Eine Verbesserung der Anpassung erfolgte nicht. Die Anzahl der Zitationen, die ein Dokument mindestens erhalten haben muss, um dargestellt zu werden, wurde kontinuierlich so lange erhöht, bis die multidimensionale Skalierung (MDS) eine ausreichende Anpassungsgüte aufwies (stress kleiner als 20%; [3, 46, 45]).

² Die Normierung der Koziationshäufigkeiten mit Pearsons r hebt die „likeliness in shape of their co-citations count profiles over all other [documents] in the set“ [81, S. 331] hervor. Die Normierung „eliminates scale effects due to the relative citedness of documents [...] and instead measures the degree to which cocitations with documents [...] follow a similar profile or pattern“ [80, S. 165]. D.h., wenn zwei Dokumente häufig zusammen mit einem Dritten, aber selten mit anderen Dokumenten zitiert werden, weisen diese eine hohe Korrelation auf.

Tabelle 2 Die 39 am häufigsten zitierten Publikationen, sortiert nach absoluten Zitationshäufigkeiten.

Nr.	Publikation	Titel	Zeitschrift bzw. Monographie	Gesamt	IJLM	IJL:R&A	IJPDLM	JBL
1	[12]	Logistics & Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Service	Monographie	59	24	15	14	6
2	[85]	Case Study Research: Design and Methods	Monographie	54	11	14	25	4
3	[54]	Defining Supply Chain Management	JBL	50	11	6	16	17
4	[16]	Supply Chain Management: More than a New Name for Logistics	IJLM	42	11	5	11	15
5	[2]	Estimating Non-response Bias in Mail Surveys	JMR	40	4	4	12	20
6	[30]	What is the Right Supply Chain for your Product?	HBR	38	11	6	13	8
7	[49]	Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities	IJLM	37	11	5	13	8
8	[76]	Strategic Logistics Management		31	4	7	10	10
9	[51]	Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect	MS	30	7	4	12	7
10	[51]	The Bullwhip Effect in Supply Chains	SMR	28	8	3	12	5
11	[72]	Designing and Managing the Supply Chain	Monografie	28	1	8	12	7
12	[57]	A Framework of Logistics Research	JBL	27	3	3	13	8
13	[8]	21st Century Logistics: Making the Supply Chain Integration a Reality	Monografie	26	5	2	9	10
14	[67]	Competitive Advantage	Monografie	26	8	3	10	5
15	[26]	The Use of the Case Study Method in Logistics Research	JBL	25	4	5	13	3
16	[75]	Supply Chain Collaboration and Logistical Service Performance	JBL	24	6	1	6	11
17	[4]	Business Logistics Management	Monografie	23	4	5	12	2
18	[6]	Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process	Monografie	23	4	3	9	7
19	[14]	A Paradigm for Developing better Measures of Marketing Constructs	JMR	23	1	3	9	10
20	[38]	Multivariate Data Analysis	Monografie	23	5	4	7	7

Logistics & Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Service“ von Christopher [12], gefolgt von Yin [85] Methodenwerk und dem konzeptionellen Beitrag von Mentzer et al. [54].

Eine zeitschriftenspezifische Auswertung zeigt folgende Ergebnisse: Hierbei fällt auf, dass sich [12] in der JBL nicht durchsetzen konnte, jedoch im IJLM und im IJL:R&A an erster Stelle gereiht wird. Die Dominanz von Beiträgen von Christopher im IJLM ist augenscheinlich (drei von den zehn meist zitierten Werken) und könnte vor dem Hintergrund der langjährigen Herausgeberschaft von Christopher begründbar sein. Seine führende Rolle im IJL:R&A kann damit begründet werden, dass es sich um die Zeitschrift der britischen Wissenschaftsgemeinde handelt.

Tabelle 2 Die 39 am häufigsten zitierten Publikationen, sortiert nach absoluten Zitationshäufigkeiten (fortgesetzt).

Nr.	Publi- kation	Titel	Zeitschrift bzw. Mo- nographie	Gesamt	IJLM	IJL:R&A	IJPDLM	JBL
21	[55]	Validity in Logistics Research	JBL	23	1	1	10	11
22	[59]	The Commitment-Trust Theory of Relation- ship Marketing	JM	22	3	1	10	8
23	[7]	Supply Chain Logistics Management	IJPDLM	21	4	1	6	10
24	[84]	Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in your Corporation	Monografie	20	7	8	3	2
25	[5]	Supply Chain Management: A Strategic Perspective	IJLM	19	6	2	7	4
26	[56]	Logistics Service Quality as a Segment Customized Process	JM	19	0	2	5	12
27	[60]	Logistics Needs Qualitative Research – Especially Action Research	IJPDLM	18	1	4	10	3
28	[24]	Building Theories from Case Study Research	AMR	18	3	2	11	2
29	[66]	Competitive Strategy	Monografie	18	1	1	10	6
30	[25]	The Relationship between Marke- ting/Logistics Interdepartmental Integration and Performance in U.S. Manufacturing Firms: An Empirical Study	JBL	17	4	1	4	8
31	[48]	Issues in Supply Chain Management	IMM	17	6	2	7	2
32	[62]	Psychometric Theory	Monografie	17	2	1	8	6
33	[79]	Vendor Managed Inventory in the Retail Supply Chain	JBL	17	4	1	7	5
34	[13]	Developing market-specific Supply Chain Strategies	IJLM	16	7	1	5	3
35	[21]	Leveraging Logistics Distributions Capabili- ties: The Effect of Logistics Service on Market Share	JBL	16	2	2	2	10
36	[22]	The Capabilities of Market-Driven Organiza- tions	JM	16	2	0	4	10
37	[31]	Industrial Dynamics	Monografie	16	4	3	6	3
38	[77]	A Conceptual Framework for the Analysis of Vulnerability in Supply Chains	IJPDLM	16	3	1	9	3
39	[83]	The Machine that Changed the World	Monografie	16	5	4	5	2

Insgesamt fällt die Dominanz sozialwissenschaftlich orientierter Methodenbeiträge auf, die sich vor allem mit quantitativer als auch qualitativer Datenerhebung und Analyse beschäftigen. Hervorzuheben ist die Verwendung der Standardwerke von [66] und [67], der vorwiegend im JBL als auch im IJPDLM zitiert wird. fällig ist auch das Fehlen der in der Wissenschaftlichen Kommission Logistik oft diskutierten dualen Betrachtung logistischer Fragestellungen mittels OR-spezifischer und managementorientierter Methoden [37, 41]. Die vorliegenden Ergebnisse deuten vielmehr auf eine Aufspaltung zwischen quantitativer und qualitativer sozialwissenschaftlicher Logistikforschung hin; auf problemspezifische Lösungsansätze

der OR-Forschung wird innerhalb der untersuchten Zitate kaum verwiesen. Auch scheint es eine Kluft zwischen der Standardliteratur der jeweiligen Zeitschriften zu geben, die als US-dominiert (siehe JBL) und nicht-US-dominiert (siehe IJLM, IJL:R&A und IJPDLM) charakterisiert werden kann.

In Tabelle 3 wird ein Ranking der 30 einflussreichsten Publikationsorgane präsentiert. Die Tabelle zeigt sowohl die Zitationen zur jeweiligen Zeitschrift insgesamt als auch die erhaltenen Zitationen von jeder der vier untersuchten Zeitschriften. Die Ergebnisse der Tabelle 3 zeigen, dass sich das Wissen der Logistikforschung aus Zeitschriften generiert, die eindeutig dem Feld Logistik zugeordnet werden können. Interessant ist der Anteil managementorientierter Zeitschriften aus den Bereichen Logistik, Marketing und strategischem Management. Knapp die Hälfte der Beiträge stammt aus logistikspezifischen Zeitschriften, weitere 32% der Zitationen stammen aus Zeitschriften wie dem Journal of Marketing oder Harvard Business Review.

4 Eine Kartographisierung der einflußreichsten Publikationen

Abbildung 1 stellt das Ergebnis der MDS Analyse der 39 einflussreichsten Publikationen in den untersuchten Logistikzeitschriften dar (vgl. Tabelle 2). Die Größe der Kreise ist proportional zu der Zitationshäufigkeit der Publikationen dargestellt. Es konnten anhand der MDS, Cluster- und Faktorenanalyse (vgl. Abschnitt 2.2) mehrere Themenschwerpunkte auf der Karte hervorgehoben werden, die in der Folge benannt wurden. Auffällig ist dabei die zentrale Position der Beiträge zur Konzeption des SCM von Mentzer et al. [54], Cooper und Lambert [16] und Lambert und Cooper [49]. Interessant ist, dass Bechtel et al. [5] IJLM-Artikel zum SCM sehr nah an Mentzer et al. [54] JBL-Beitrag positioniert ist. An den äußeren Enden dieser Gruppe befindet sich der vertrauensspezifische Beitrag von Morgan und Hunt [59] und der weiterführende SCM-Beitrag von Lambert und Cooper [48].

Relativ zentral ist auch ein Lehrbuch-Block zu finden, der sich primär aus US-amerikanischen Lehrbüchern, die mittig angesiedelt sind, zusammensetzt. An seinen Enden finden sich die beiden Standardwerke von Porter [66] und [67] bzw. Simchi-Levi et al. [72] und Christopher [12]. In Bezug auf Simchi-Levi et al. [72] kann auch eine Nähe zum thematischen Block „Bullwhip Effekt“ erkannt werden. Diese Gruppe ist am unteren Ende der Karte angesiedelt. Hierbei ist hervorzuheben, dass diese Gruppe das älteste Werk [31] beinhaltet. Am rechten Ende der Karte können zwei thematische Bereiche geortet werden. Einerseits ein Block zum Thema Supply Chain Design [13, 30] und andererseits ein Block zur Lean-Thematik, der Werke der Cardiff-Gruppe beinhaltet.

An den oberen und linken Randbereichen finden sich einerseits wissenschaftstheoretische Beiträge ([57] bzw. [55]), sozialwissenschaftliche qualitative empirische Forschung [24, 26, 60, 85] und sozialwissenschaftliche quantitative empirische Forschung [2, 14, 38, 62]. Die thematischen Blöcke Logistikservice/-qualität als auch logistische Erfolgsfaktorforschung sind beim sozialwissenschaftlich quantitativen Bereich angesiedelt. Interessant ist, dass die qualitative Methodik der Fall-

Tabelle 3 Die 30 am häufigsten zitierten Publikationsorgane und die Anzahl der Zitationen.

Nr.	Zitierte Zeitschrift	Gesamt	IJLM	IJL:R&A	IJPDLM	JBL
1	Journal of Business Logistics (JBL)	1.206	264	98	361	483
2	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management (IJPDLM)	960	237	122	461	140
3	International Journal of Logistics Management (IJLM)	518	188	71	151	108
4	Journal of Marketing (JM)	493	64	22	180	227
5	Harvard Business Review (HBR)	362	75	52	141	94
6	Journal of Operations Management (POM)	352	61	34	154	103
7	Management Science (MS)	324	50	50	129	95
8	Journal of Marketing Research (JMR)	294	38	17	98	141
9	Strategic Management Journal (SMJ)	266	26	19	82	139
10	International Journal of Operations & Productions Management (IJOPM)	247	76	41	105	25
11	Supply Chain Management: An International Journal (SCM:IJ)	215	74	32	84	25
12	Transportation Journal (TJ)	210	100	15	78	17
13	Supply Chain Management Review (SCMR)	186	43	17	66	60
14	European Journal of Operational Research (EJOR)	183	30	41	86	26
15	Academy of Management Review (AMR)	175	20	12	86	57
16	Industrial Marketing Management (IMM)	171	49	18	61	43
17	MIT Sloan Management Review (SMR)	151	36	18	57	40
18	International Journal of Logistics: Research & Applications (IJL:R&A)	142	38	46	45	13
19	International Journal of Production Economics (IJPE)	138	38	41	44	15
20	Academy of Management Journal (AMJ)	135	10	9	49	67
21	Journal of Supply Chain Management (JSCM)	120	35	13	50	22
22	Decision Sciences (DS)	114	15	19	35	45
23	Journal of the Academy of Marketing Science (JAMS)	114	16	0	35	59
24	International Journal of Purchasing & Materials Management (IJPMM)	108	32	16	40	20
25	Administrative Science Quarterly (ASQ)	93	15	6	29	43
26	California Management Review (CMR)	88	15	12	38	23
27	Journal of Business Research (JBR)	87	11	10	30	36
28	Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review (TR:LTR)	86	36	15	16	19
29	International Journal of Production Research (IJPR)	79	18	13	42	0
30	Production & Operations Management (POM)	68	20	11	22	15

studienforschung am rechten Rand, also bei Beiträgen die operative Fragestellungen adressieren, gesehen wird. Ein Erklärungsversuch hierfür ist, dass operative Fragestellungen in der Logistik eher anhand von Fallstudien als anhand von großzahligen empirischen Studien bearbeitet werden. So basieren z.B. die Erkenntnisse zur „Lean Production“ auf der Analyse eines einzelnen Unternehmens (Toyota).

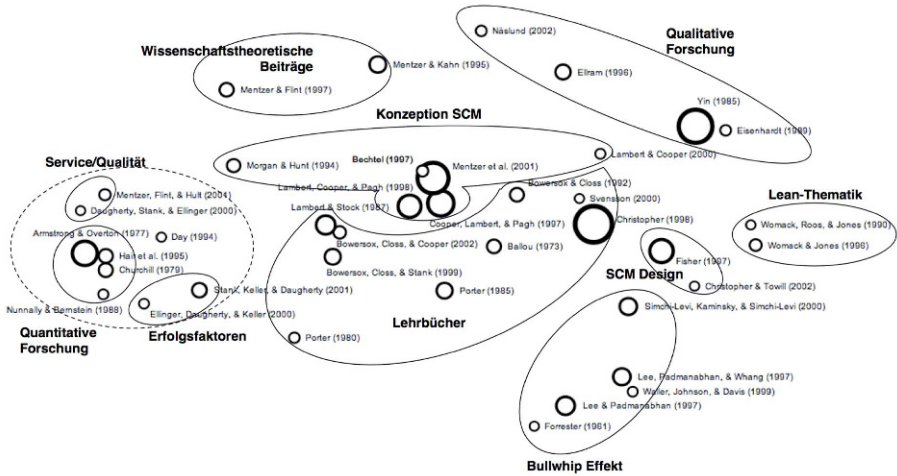


Abb. 1 Kartographisierung der 39 einflussreichsten Publikationen.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag fokussierte die folgenden drei Fragen:

- Welche Publikationen wurden im Untersuchungszeitraum am häufigsten zitiert?
- Welche Publikationsorgane haben den größten Einfluss auf die aktuelle Logistikforschung?
- Welche abgrenzbaren Forschungsfelder bzw. -schwerpunkte lassen sich in der aktuellen Forschung erkennen?

Hierzu wurde eine Zitations- und Koziationsanalyse aktueller Beiträge aus dem IJLM, dem IJL:R&A, dem IJPDLM und dem JBL durchgeführt. Was die am häufigsten zitierten Publikationen betrifft, so konnte ein Mix zwischen Lehrbüchern und wissenschaftlichen Artikel festgestellt werden. Es zeigt sich, dass die Zitationshäufigkeit zeitschriftenspezifisch ist, denn es konnte anhand der Zitationsanalyse eine Diskrepanz zwischen dem Zitierverhalten der US-dominierten JBL und den nicht-US-dominierten Zeitschriften IJLM, IJL:R&A und IJPDLM festgestellt werden. Der Unterschied betrifft sowohl die Wahl der Lehrbücher als auch die gewählten Methodenbeiträge. So ist auffällig, dass im JBL Beiträge zu quantitativen Methoden der Sozialwissenschaften dominieren, wohingegen in den anderen drei Zeitschriften Beiträge zu qualitativen Methoden (Fallstudien) dominieren. Dieses Ergebnis konnte auch durch die Koziationsanalyse bestätigt werden.

Was den Einfluss und die Abgrenzung von Forschungsfeldern betrifft, konnte auf Basis einer Kartographisierung der 39 einflussreichsten Publikationen folgendes festgestellt werden: Der Themenschwerpunkt Logistikservice- und -qualitätsforschung sowie die logistische Erfolgsfaktorforschung dürften hauptsächlich mit Daten aus Befragungen untersucht werden. Diese Vermutung kann durch die Unter-

suchung von Kotzab [43] gestützt werden, die aufzeigt, dass vor allem im JBL die Fragebogenforschung dominiert. Die Themenschwerpunkte „Lean Production“ und „Supply Chain Design“ werden von operativen Fragestellungen dominiert, die mittels qualitativer Forschungsmethoden untersucht werden. Darüber hinaus konnte die konzeptionelle SCM-Forschung als ein zentrales Thema, wissenschaftstheoretische Beiträge und Forschung zum Bullwhip-Effekt als Randthemen räumlich verortet werden. Entsprechend der vorliegenden Datengrundlage beschränken sich die hier vorgestellten Ergebnisse nur auf jene Publikationen, die in den vier untersuchten Zeitschriften innerhalb des Untersuchungszeitraums am häufigsten zitiert wurden. Eine Verbreiterung der Datengrundlage, d.h. die Einbeziehung von Zeitschriften u. a. aus dem OR- oder Produktionsbereich könnte das hier gewonnene Bild über Forschungsschwerpunkte in der Logistik/Supply Chain Forschung durchaus verändern. Ebenso sollte angedacht werden, die hier gewonnen Erkenntnisse über eine qualitative Untersuchung der Literatur zu verifizieren, zu detaillieren und zu konkretisieren.

Literaturverzeichnis

1. Acedo F.J., Casillas J.C.: Current paradigms in the international management field: An author co-citation analysis. *International Business Review* 14 (2005) 619–639
2. Armstrong J.S., Overton T.S.: Estimating nonresponse bias in mail surveys. *Journal of Marketing Research*, 14(3) (1977) 396–402
3. Backhaus K., Erichson B., Plinke W., Weiber R.: *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer (2006)
4. Ballou R.H.: *Business logistics management*. Englewood Cliffs: Prentice Hall (1973)
5. Bechtel C., Jayaram J.: Supply chain management: A strategic perspective. *International Journal of Logistics Management* 8 (1997) 15–34
6. Bowersox D.J., Closs, D.J.: *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. New York: McGraw-Hill (1996)
7. Bowersox D.J., Closs D.J., Cooper M.B.: *Supply Chain Logistics Management*. New York : McGraw-Hill (2002)
8. Bowersox D.J., Closs D.J., Stank T.P.: *21st Century Logistics: Making Supply Chain Integration a Reality*. Oak Brook: Council of Logistics Management (1999)
9. Bretzke W.: Supply Chain Management: Wege aus einer Utopie, *Logistik Management* 7 (2005) 21–30
10. Carter C.R.: Assessing logistics and transportation journals: Alternative perspectives. *Transportation Journal* 42 (2002) 39–50
11. Charvet F.F., Cooper M.C., Gardner J.T.: The intellectual structure of supply chain management: A bibliometric approach. *Journal of Business Logistics* 29 (2008) 47–73
12. Christopher M.: *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service*. New Jersey: Prentice-Hall (1998)
13. Christopher M., Towill D.R.: Developing market specific supply chain strategies. *International Journal of Logistics Management*, 13 (2002) 1–14
14. Churchill G. A.: A paradigm for developing better measures of marketing constructs. *Journal of Marketing Research* 16 (1979) 64–73
15. Cooper M.C., Gardner J.T., Pullins E.B.: A benchmark bibliometric approach to identifying the state of theory development in relationship marketing. *New and Evolving Paradigms: The Emerging Future of Marketing*. Dublin (1997) 187–203

16. Cooper M., Lambert D.M., Pagh J.D.: Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8 (1997) 1–14
17. Cousins P.D., Lawson B., Squire B.: Supply chain management: theory and practice: The emergence of an academic discipline? *International Journal of Operations & Production Management* 26 (2006) 697–702
18. Croom S.R., Romano P., Giannakis M.: Supply chain management: An analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management* 6 (2000) 67–83
19. Culnan M.J.: Mapping the intellectual structure of MIS, 1980-1985: A co-citation analysis. *MIS Quarterly* 11 (1987) 341–353
20. Culnan M.J., O'Reilly C.A., Chatman J.A.: Intellectual structure of research in organizational behavior, 1972-1984: A cocitation analysis. *Journal of the American Society for Information Science* 41 (1990) 453–458
21. Daugherty P.J., Stank T.P., Ellinger A.E.: Leveraging logistics/distribution capabilities: the effect of logistics service on market share. *Journal of Business Logistics*, 19(2) (1998) 35–51
22. Day G.S.: The capabilities of market-driven organizations. *Journal of Marketing* 58(4) (1994) 37–52
23. Dunn S.C., Seaker R.F., Stenger A., Young R.: An assessment of logistics research paradigms. Working Paper 93-5, Center for Logistics Research, The Pennsylvania State University (1993)
24. Eisenhardt K.M.: Building theory from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4) (1989) 532–550
25. Ellinger A.E., Daugherty P. J., Keller S.B.: The relationship between marketing/logistics interdepartmental integration and performance in U.S. manufacturing firms: An empirical study. *Journal of Business Logistics* 21 (2000) 1–22
26. Ellram L.M.: The use of the case study method in logistics research. *Journal of Business Logistics*, 17(2) (1996) 93–138
27. Eom S.B., Lee S.M., Kim J.K.: The intellectual structure of decision support systems (1971-1989). *Decision Support Systems* 10 (1993) 19–35
28. Eom S.B.: Author Co-Citation Analysis using Custom Bibliographic Databases: An Introduction to the SAS Approach. Lewiston, Queenston, Lampeter: Edwin Mellen (2003)
29. Fawcett S.E., Vellenga D.B., Truitt L.J.: An evaluation of logistics and transportation professional organizations, programs, and publications. *Journal of Business Logistics* 16 (1995) 299–314
30. Fisher M.L.: What is the right supply chain for your product? *Harvard Business Review* 75 (1997) 105–117
31. Forrester W.D.: *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press (1961)
32. Gammelgaard B.: Schools in logistics research? A methodological framework for analysis of the discipline. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 34 (2004) 479–491
33. Garfield E.: Is citation analysis a legitimate evaluation tool? *Scientometrics* 1 (1979) 359–375
34. Garfield E.: ABCs of cluster mapping part 1: Most active fields in the life sciences in 1978. *Current Contents* 40 (1980) 5–12
35. Gibson B.J., Hanna J.B.: Periodical usefulness: The U.S. logistics educator perspective. *Journal of Business Logistics* 24 (2003) 221–240
36. Gmür M.: Wird die deutschsprachige Organisationsforschung immer amerikanischer? Eine bibliometrische Analyse. *Die Unternehmung* 61 (2007) 227–248
37. Gudehus T.: *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*, Berlin: Springer (2005)
38. Hair J.F., Anderson R.E., Tatham R.L., Black W.C.: *Multivariate Data Analysis*. Upper Saddle River: Prentice-Hall (1995)
39. Hakansson H., Persson G.: Supply Chain Management: The logic of supply chains and networks. *International Journal of Logistics Management* 15 (2004) 11–26
40. Hoffman D.L., Holbrook M.B.: The intellectual structure of consumer research: A bibliometric study of author cocitations in the first 15 years of the *Journal of Consumer Research*. *Journal of Consumer Research* 19 (1993) 505–517

41. Kirsch W., Bamberger I., Gabele E., Klein H. K.: Betriebswirtschaftliche Logistik: Systeme, Entscheidungen, Methoden. Wiesbaden: Gabler (1973)
42. Klaus P.: Die dritte Bedeutung der Logistik. Nürnberger Arbeitspapier Nr. 3, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg (1994)
43. Kotzab H.: The role and importance of survey research in the field of supply chain management. In: Kotzab, H., Seuring S., Müller M. und Reiner G. (eds.) *Research Methodologies in Supply Chain Management*. Heidelberg: Physica (2005) 235–250
44. Kotzab H.: Zum Wesen von Supply Chain Management vor dem Hintergrund der betriebswirtschaftlichen Logistikkonzeption: Erweiterte Überlegungen. In: Wildemann H. (ed.): *Supply Chain Management*. München: TCW (2000) 21–48
45. Kruskal J.B.: Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika* 29 (1964) 1–27
46. Kruskal J.B.: Nonmetric multidimensional scaling: A numerical method, *Psychometrika* 29 (1964) 115–129
47. Kumar V., Kwon I.G.: A pilot study on normalized weighted approach to citation study: A case of logistics and transportation journals. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 34 (2004) 811–826
48. Lambert D.M., Cooper M.C.: Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29 (2000) 65–83
49. Lambert D.M., Cooper M.C., Pagh J.D.: Supply chain management: Implementation issues and research opportunities. *International Journal of Logistics Management*, 9(2) (1998) 1–19
50. Large R., Stölzle W.: Logistikforschung im Spiegel wissenschaftlicher Publikationen: Eine empirische Untersuchung auf der Basis betriebswirtschaftlicher und ingenieurwissenschaftlicher Dissertation. In: Pfohl, H.-C. (ed.) *Logistikforschung: Entwicklungszüge und Gestaltungsansätze*. Berlin: Erich-Schmidt (1999) 3–35
51. Lee H.L., Padmanabhan V.: Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 43(4) (1997) 546–558
52. McCain K.W.: Mapping authors in intellectual space: A technical overview. *Journal of the American Society for Information Science* 41 (1990) 433–443
53. Menachof D.A., Gibson B.J., Hanna J.B., Whiteing A.E.: An analysis of the value of supply chain management periodicals for teaching, research, and outreach purposes. SSRN Working Paper 989744 (2007)
54. Mentzer J.T., DeWitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G.: Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics* 22 (2001) 1–25
55. Mentzer J.T., Flint D.J.: Validity in logistics research. *Journal of Business Logistics*, 18 (1997) 199–216
56. Mentzer J.T., Flint D.J., Hult G.T. M.: Logistics Service Quality as a Segment-Customized Process. *Journal of Marketing*, 65(4) (2001) 82–104
57. Mentzer J.T., Kahn K.B.: A framework of logistics research. *Journal of Business Logistics*, 16 (1995) 231–50
58. Meyer M., Schäffer U., Gmür M.: Transfer und Austausch von Wissen in der Accounting-Forschung: Eine Zitations- und Koitationsanalyse englischsprachiger Accounting-Journals 1990-2004. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* (2008) 153–181
59. Morgan R.M., Hunt S.D.: The commitment-trust theory of relationship marketing. *Journal of Marketing*, 58(3) (1994) 20–38
60. Näslund D.: Logistics needs qualitative research – especially action research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 32(5) (2002) 321–338
61. New S.J.: The scope of supply chain management research. *Supply Chain Management: An International Journal* 2 (1997) 15–22
62. Nunnally J.C., Bernstein I.H.: *Psychometric theory*. New York: McGraw-Hill (1978)
63. Persson O.: The Intellectual Base and Research Fronts of JASIS 1986-1990. *Journal of the American Society for Information Science* 45 (1994) 31–38
64. Pfohl H. (ed.): *Logistikforschung: Entwicklungszüge und Gestaltungsansätze*. Erich Schmidt: Berlin (1999)

65. Pilkington A., Fitzgerald R.: Operations management themes, concepts and relationships: a forward retrospective of IJOPM. *International Journal of Operations & Production Management* 26 (2006) 1255–1275
66. Porter M.E.: *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. New York: Free Press (1980)
67. Porter M.E.: *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press (1985)
68. Prockl G.: *Logistik-Management im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Erklärung und praktischer Handlung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (2007)
69. Ramos-Rodríguez A., Ruiz-Navarro J.: Changes in the intellectual structure of strategic management research: A bibliometric study of the *Strategic Management Journal*, 1980-2000. *Strategic Management Journal* 25 (2004) 981–1004
70. Roth S., Gmür M.: Strukturen und Entwicklungslinien der Marketingforschung: Ergebnisse einer Zitations- und Kozitationsanalyse nordamerikanischer Marketing-Journals 1987-2001. *Marketing ZFP* (2004) 141–158
71. Schäffer U., Binder C., Gmür M.: Struktur und Entwicklung der Controllingforschung: Eine Zitations- und Kozitationsanalyse von Controllingbeiträgen in deutschsprachigen wissenschaftlichen Zeitschriften von 1970 bis 2003. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 76 (2006) 395–440
72. Simchi-Levi D., Kaminsky P., Simchi-Levi E.: *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Cases*. New York: McGraw-Hill (2000)
73. Small H.: A co-citation model of a scientific specialty: A longitudinal study of collagen research. *Social Studies of Science* 7 (1977) 139–166
74. Smith L.C.: Citation analysis. *Library Trends* 30 (1981) 83–106
75. Stank T.P., Keller S.B., Daugherty P.J.: Supply chain collaboration and logistical service performance. *Journal of Business Logistics* 22 (2001) 29–48
76. Stock J.R., Lambert D.M.: *Strategic logistics management*. Homewood: R.D. Irwin (1987)
77. Svensson G.: A conceptual framework for the analysis of vulnerability in supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 30(9) (2000) 731–749
78. Voeth M., Gawantka A., Chatzopoulou G.: Impact auf die deutschsprachige Marketingforschung: Ergebnisse einer Zitationsanalyse der deutschsprachigen Marketing ZFP-Jahrgänge 1979 bis 2004. *Marketing ZFP* 28 (2006) 7–20
79. Waller M., Johnson M.E., Davis T.: Vendor-Managed Inventory in the Retail Supply Chain. *Journal of Business Logistics* 20 (1999) 183–204
80. White H.D., Griffith B.C.: Author Cocitation: A Literature Measure of Intellectual Structure. *Journal of the American Society for Information Science* 32 (1981) 163–171
81. White H.D., McCain K.W.: Visualizing a Discipline: An Author Co-Citation Analysis of Information Science, 1972-1995. *Journal of the American Society for Information Science* 49 (1998) 327–355
82. Wolf J.: *The Nature of Supply Chain Management Research: Insights from a Content Analysis of International Supply Chain Management Literature from 1990 to 2006*. Wiesbaden: Gabler (2008)
83. Womack J.P., Roos D., Jones D.T.: *The Machine that Changed the World*. New York: Mac-Millan (1990)
84. Womack J.P., Jones D.T.: *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press (1996)
85. Yin R.K.: *Case Study Research: Design and Methods*. Beverly Hills: Sage (1985)
86. Zsidisin G.A., Smith M.E., McNally R.C., Kull T.J.: Evaluation criteria development and assessment of purchasing and supply management journals. *Journal of Operations Management* 25 (2007) 165–183

Modeling the Supply Chain in the Semi-Integrated Steel Industry: A Case Study in Colombia

Edgar Gutierrez-Franco, Jairo R. Montoya-Torres, Luz Helena Mancera und Jaime Cabra

Zusammenfassung This paper presents an approach for modeling the supply chain in the semi-integrated steel industry. A case study is taken from a Colombian company. The production of this company is based on waste management: recycled iron and steel scrap. The supply chain is modeled using linear programming. The model looks for the minimization of total logistics (production and distribution) costs considering intermediate and final products. Input data and constraints concerning raw material suppliers, manufacturing plants, distribution centers and local sales and imports are considered. The model is intended to be used as a support tool for decision-making at a strategic and tactical decision levels. The strength of this contribution is that it gives some insights about the situation and the structure of the semi-steel industry (i.e., based on recycled steel waste) in Colombia by modeling the different costs for production and transportation.

1 Introduction

The society increasingly demands companies to take responsibility about the effects that their products and processes cause on the environment [11, 13, 15]. Therefore, in recent years the interest in environmental conservation and the (re-) use of resources have led to new approaches to production and logistics, among them, Reverse Logistics. Fleischmann et al. [5] presents a review about quantitative models

Edgar Gutierrez-Franco · Luz Helena Mancera · Jaime Cabra
Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Autopista norte de Bogotá, D.C., Chía (Cundinamarca), COLUMBIA
E-mail: edgar.gutierrez@unisabana.edu.co

Jairo R. Montoya-Torres
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de La Sabana, Autopista norte de Bogotá, D.C., Chía (Cundinamarca), COLUMBIA
E-mail: jairo.montoya@unisabana.edu.co

for Reverse Logistics, including applications in distribution, inventories and study cases. Seeking to reduce the negative impact on the environment, several companies have been implementing successful reverse logistics processes of seeking the recovery of materials and products, and the link with traditional production models [5]. Some examples of such companies are IBM, HP or BMW [15].

For instance, Hafeez et al. [9] describe the analysis and modeling of a two-echelon steel industry supply chain that services the construction industry using an integrated system dynamics framework and performs simulation experiments. Using process mapping techniques, Potter et al. [14] study the evolution of a case study steel supply chain within the UK over the past decade. The changes that have occurred are identified and categorized and their impact on inventory, lead times and asset utilization are assessed. They propose that supply chains evolve from a traditional (uncoordinated, disparate, sub-optimal) to an integrated supply chain structure. The paper concludes that although the steel supply chain has evolved between 1990 and 2001 towards an integrated structure, there are currently constraints imposed by organizational boundaries. Zäpfel and Wasner [17] analyze the problem efficient warehouse management of in a real logistic centre of a steel supply chain (SC). Geyer et al. [7] present a detailed account of the SC for iron and steel in the UK, using material flow analysis. They show that the UK no longer has the capacity to recycle the scrap it collects and is increasingly relying on foreign economies to do so. We also observe that trade in iron and steel products and ferrous metal containing final goods has increased dramatically over the years, but remained relatively balanced. Today, one-half of UK's iron and steel production is exported, whereas one-half of the iron and steel entering the UK use phase comes from imported final goods. The efficiency with which the UK iron and steel industry transforms iron ore and scrap into iron and steel products has increased substantially. Chandra [3] studies a case of production scheduling for a steel SC by modeling SC workflows and capturing and organizing knowledge necessary for managing them. To model workflows, this author proposed a combination of two frameworks: (1) SC operation reference model for higher-level process and (2) process modeling tools, such as integrated definition (IDEF) and unified modeling language (UML), for the lower, application-level process model representation.

For workflow knowledge capturing and representation, this paper introduced two standards: situation calculus and SC markup language (SCML). The former is utilized for capturing process logic with mathematical expressions, and the latter for coding this logic with a computational language. The work of Spengler et al. [16] presents the development of sophisticated operations research models for two selected planning problems: recycling of industrial byproducts and dismantling and recycling of products at the end of their lifetime. To the best of our knowledge, no more papers have been published in literature analyzing the use of reverse logistics operations research-based techniques for the steel industry. The steel industry is a traditional heavy industry. Being a commodity product the price is elastic. This makes the various players in the SC "price takers" where the price is set a level that the market will bear [14]. Furthermore, the basic nature of the products means that differentiation is difficult to achieve. With the price of steel declining margins are

tight making profitability on the basic products low. Therefore, companies in the SC are increasingly looking to provide extra value to their customers by improving customer service or providing additional services. Cost reduction is also mandatory for enterprises if they want to continue being in the marketplace. This paper aims to provide a formal methodology for decision-making in a semi-integrated steel SC. The modeling and design of distribution networks has been extensively studied in literature (see, for example, the works of [1, 4, 6, 8]). As our work, the work of Bielefeld [2] also focused on the steel industry presenting however a computer-based strategic planning system for the manufacturing process. We develop a tactical decision support model for the design of the supply and distribution network. The production process and hence the SC is based on recycling waste iron and steel ("recycled" vehicles at the end of their life-cycle) from the automotive industry. Taking a case study of one of the biggest companies in Colombia, this paper proposes a linear programming model that minimizes the overall logistic cost of the SC by defining the flow of products through the supply network. One of the aspects that allow us to study this industry's SC is that the production process in the semi-integrated steel industry is based on recycled scrap. The optimization of the SC is not only motivated by the traditional economic metrics, but also by the fact that improving the performance of this industry will lead to an improvement on the treatment of recycled steel. This paper is organized as follows. Section 2 presents a description of the steel industry in Colombia, including the production process and the organization of the SC under study. Section 3 is devoted to the detailed description of the mathematical model of the SC. The implementation of the model and the analysis of obtained results are presented in Section 4. The paper ends with Section 5 and Section 6 presenting some concluding remarks.

2 Production Process and the Supply Chain

Colombian steel manufacturers have experienced an important growth over the last years mainly due to the increase in building constructions in Bogotá, D.C., the capital of the country, and in investment in public infrastructure along the country [10]. During the first semester of 2008, this growth was about 0.9% of the total tons of steel manufactured in comparison with the same period in 2007. There are two main processes to obtain steel: integrated manufacturing (steel obtained from mines) and semi-integrated manufacturing (steel obtained from scrap). Choosing one of these two manufacturing processes depends on the structure of the marketplace, as well as on the availability of raw material. Steel manufacturing requires high investments in machinery and demands large production rates in order to reduce fixed costs. About 60% of world production is performed in integrated processes, about 33% of world production is done in electric furnaces (semi-integrated production) and the other 7% uses obsolete technology. In Colombia, 65% of the steel industry employs semi-integrated processes, using national and foreign iron and steel scrap. The scrap sources are mostly the urban and freight vehicles, while customers are constructi-

on, automotive and cement industries. Figure 1 illustrates a generic semi-integrated steel manufacturing process and the dismantling and recycling of scrapped products at the end of their life time. A schematic representation of the SC considered in this paper is presented in Figure 2. The SC is composed of three main echelons: scrap sources, steel manufacturer and steel stockholder/distributor. The end users source their materials from a steel stockholder/distributor who performs a break bulk role within the SC. The steel stockholders order in large quantities form the main producers and then sell the material in small quantities according to the customer requirements [12]. The steel stockholders are mainly located in the principal cities of the country. The steel suppliers can be classified as general producers who convert steel scrap into billets, which are then rolled into a variety of steel products. For the purpose of our research, some manufacturers were aggregated into conglomerates. These conglomerates are sets of facilities for each echelon in the chain of the semi-integrated steel sector that are group strategically to supply between them the necessary materials and equipment for their operations. Each conglomerate corresponds to a big main city of the country. Other manufacturers are not grouped into conglomerates and consist on independent plants. We also take into account the external entities that participate in the chain, especially in the third echelon. Foreign steel producers are also located in Brazil, Venezuela and Panama. The primary echelon in our SC is the scrap suppliers. National scrap sources are grouped into a conglomerate, representing nearly 90% of the scrap market. Foreign scrap sources include Venezuela, Brazil, Panama and Ecuador.

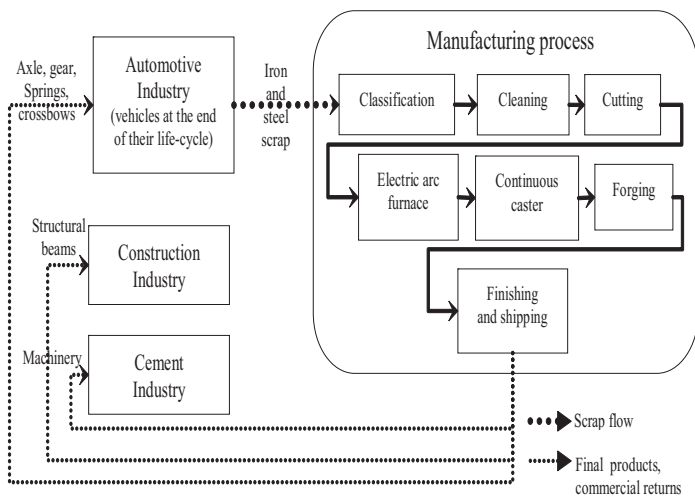


Abb. 1 Schematic Representation of the Flows in Semi-Integrated Steel Industry Supply Chain.

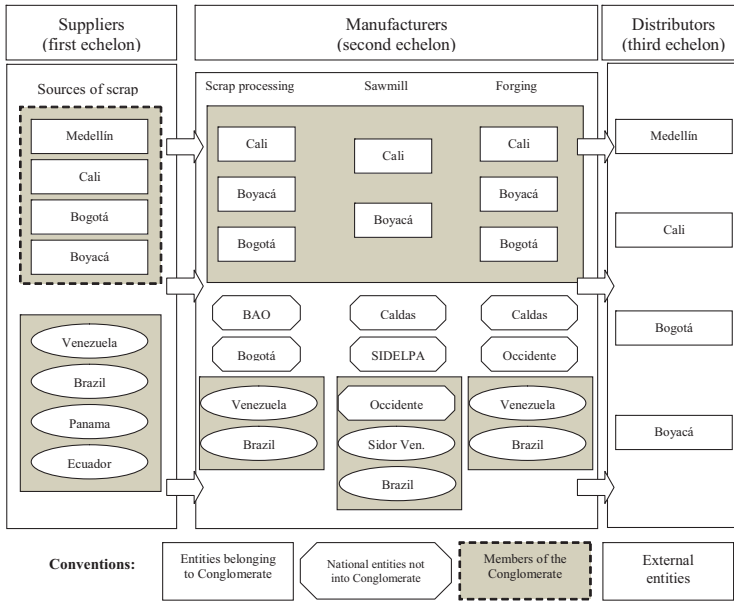


Abb. 2 Configuration of the semi-integrated steel supply chain.

3 Mathematical Model

The proposed mathematical model based on linear programming considers the problem of the physical distribution of intermediate and finished products. The model seeks the minimization of the total logistics costs. These costs include both product manufacturing and transportation, supporting mid-term decision-making processes. The model is based on the following hypothesis:

- We only consider national distribution. Hence, neither product exportation nor such associated costs are taken into account. The focus will be on minimizing production and distribution costs in Colombia.
- The processes of scrap processing, sawmill, and forging are considered to be completely independent from each other.
- Transportation is always performed by tier parties, not by companies themselves. There is unlimited transportation capacity for the mathematical model.
- There is unlimited storage capacity for raw material and finished products at each production unit.
- Forging plants deliver finished products only to distribution centers. No product flows exist neither between manufacturing plants nor from manufacturing plants and clients.

To describe the model, the following notation is needed.

Indexes

t : Each month of the production horizon,
 i : Source of scrap,
 j : Scrap processing unit,
 k : Sawmill,
 l : Forging plant,
 p : Product,
 c : Distribution center

Sets

Products

PA_p : Types of wire,
 PA_b : Types of bars,

Sources of scrap

FCS_j : National,
 FCE_j : From outside Colombia,

Scrap processing plants

PPC_j : Plants belong to the conglomerate,
 PPW_j : From outside Colombia,
 PPN_j : National plants not belonging to the conglomerate

Sawmill plant

PPA_k : Belonging to the conglomerate,
 PAW_k : From outside Colombia,
 PAN_k : National plants not belonging to the conglomerate

Forging plants

PPL_l : Belonging to the conglomerate,
 PPW_l : From outside Colombia,
 PLN_l : National plants not belonging to the conglomerate

Parameters

- $FNJ_{i,j}$: Transportation cost between scrap source i and scrap processing plant j (\$/Ton),
- $FNA_{j,k}$: Transportation cost between the processed scrap supplier j and sawmill k (\$/Ton),
- $FNL_{k,l}$: Transportation cost between sawmill k and forging plant l (\$/Ton),
- $FNL_{l,c}$: Transportation cost between forging plant l and distributor c (\$/Ton),
- CPC_i : Production capacity of scrap source i (Ton)
- CPP_j : Scrap processing capacity of scrap processing plant j belong to the conglomerate (Ton),

- CPA_k : Production capacity of intermediate product in sawmill k belonging to the conglomerate (Ton),
- CPT_l : Production capacity of finished products of forging plant l belonging to the conglomerate (Ton),
- CPD_j : Maximum storage capacity of raw scrap in scrap processing plant j (Ton),
- CPW_j : Maximum storage capacity of processed scrap in scrap processing j (Ton),
- CQA_k : Maximum storage capacity of processed scrap in sawmill k (Ton),
- CQW_k : Maximum storage capacity of intermediate products at sawmill k (Ton),
- CQL_l : Maximum storage capacity of intermediate products in forging plant l (Ton),
- $CAL_{l,p}$: Maximum storage capacity of wire l in forging plant p (Ton),
- $CBB_{l,p}$: Maximum storage capacity of bars of type l in forging plant p (Ton),
- $CEB_{c,p}$: Maximum storage capacity of bars of type c in distribution center p (Ton),
- $CAP_{c,p}$: Maximum storage capacity of wire c in distribution center p (Ton),
- $DEMAND_{p,c,t}$: Demand of product p in distribution zone c at period t ,
- CIP : Yield of intermediate product to produce 1 ton of finished product,
- CMP : Yield of raw scrap to be converted in processed scrap,
- $CWPS$: Yield of raw scrap to be converted in processed scrap,
- CVA_j : Cost of processing 1 ton of raw scrap in scrap processing plant j (\$/Ton),
- CVB_k : Cost of processing 1 ton of processed scrap in sawmill k (\$/Ton),
- CVC_l : Cost of processing 1 ton of finished product in forging plant l (\$/Ton),
- PAS_j : Price of national raw scrap j (\$/Ton),
- PCX_i : Price of foreign raw scrap i (\$/Ton),
- PPF_j : Price of buying national processing scrap outside the conglomerate j (\$/Ton),
- PPX_j : Price of buying foreign processing scrap j (\$/Ton),
- PQF_k : Price of buying national intermediate product outside the conglomerate,
- PQX_k : Price of buying foreign intermediate product,
- $PRICE_{l,p}$: Price of buying finished product p to both national and foreign forging plant outside the conglomerate and foreign,
- $IPT_{p,c}$: Storage cost of product p in distribution center c ,
- $IPP_{p,l}$: Storage cost of product p in forging plant l ,
- IQN_l : Storage cost of intermediate product in forging plant l ,
- ICA_k : Storage cost of scrap in sawmill k ,
- IQA_k : Storage cost of intermediate product in sawmill k ,
- ICZ_j : Storage cost of raw scrap in scrap processor j ,
- ICX_j : Storage cost of processed scrap in scrap processor j .

Decision Variables

- $CXC_{j,t}$: Quantity of raw scrap to be processed in scrap processor belonging to the conglomerate (Ton),
- $CCF_{k,t}$: Quantity of processed scrap to be processed in sawmill k (Ton),
- $CQP_{l,p,t}$: Quantity of intermediate product to be processed in forging plant l belonging to the conglomerate per product p (Ton),

- $CCC_{i,j,t}$: Quantity of raw scrap to request to a national source (Ton),
- $CCE_{i,j,t}$: Quantity of scrap to buy a foreign scrap source (Ton),
- $CCJ_{j,k,t}$: Quantity of processed scrap to distribute from scrap processor j belonging to the conglomerate to sawmill k belonging to the conglomerate (Ton),
- $CKK_{j,k,t}$: Quantity of processed scrap to buy to a national scrap processor not belonging to the conglomerate for sawmill k in the conglomerate (Ton),
- $CCL_{j,k,t}$: Quantity of processed scrap to buy to foreign scrap processor for sawmill k belonging to the conglomerate (Ton),
- $CCA_{k,l,t}$: Quantity of intermediate product to distribute from sawmill k of conglomerate to forging l belonging to conglomerate (Ton),
- $CCQ_{k,l,t}$: Quantity of intermediate products to buy from a foreign sawmill to a forging plant belonging to the conglomerate (Ton),
- $CCZ_{k,l,t}$: Quantity of intermediate products to buy from a national sawmill not belonging to the conglomerate for a forging plant l of the conglomerate (Ton),
- $CCX_{p,l,c,t}$: Quantity of finished product p to buy to a foreign forging plant for distribution center c (Ton),
- $CCY_{p,l,c,t}$: Quantity of finished product p to buy to a national forging plant outside the conglomerate for distribution center c (Ton),
- $CLC_{p,l,c,t}$: Quantity of finished product p for distribution from forging plant l to distribution center c (Ton),
- $IAC_{p,c,t}$: Inventory level of product p in distribution center c ,
- $IAB_{l,p,t}$: Inventory level of product p in forging plant l ,
- $IUP_{l,t}$: Inventory level of intermediate product p in forging plant,
- $IQ_{k,t}$: Inventory level of intermediate product in sawmill k ,
- $ICF_{k,t}$: Inventory level of scrap processed in sawmill k ,
- $ICO_{j,t}$: Inventory level of scrap processed in scrap processor j ,
- $ICP_{j,t}$: Inventory level of raw scrap in Scrap processor j .

4 Objective Function

As explained before, the objective function seeks to minimize the total cost of operations, including raw material purchasing, manufacturing costs, inventory holding costs, transportation and distribution. Equation 1 presents the objective function.

$$\begin{aligned} \min Z = & \text{Raw material aquisition} + \text{Transportation cost} \\ & + \text{Inventory holding cost} + \text{Production cost} \end{aligned} \quad (1)$$

Each part of the total cost is given below.

Raw material acquisition (RMAC):

$$\begin{aligned}
 RMAC = & \sum_{i \in FCS} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CCC_{i,j,t} PAS_i + \sum_{i \in FCE} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CCE_{i,j,t} PCX_i \quad (2) \\
 & + \sum_{j \in PPN} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCK_{j,k,t} PPF_j + \sum_{j \in PPW} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCL_{j,k,t} PPX_j \\
 & + \sum_{k \in PAN} \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CCZ_{k,l,t} PQF_k + \sum_{k \in PAW} \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CCQ_{k,l,t} PQX_k \\
 & + \sum_{p \in PLN} \sum_{l \in PLN} \sum_{c \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CCY_{p,l,c,t} PRICE_{l,p} + \sum_{p \in PLW} \sum_{l \in PLW} \sum_{c \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CCX_{p,l,c,t} PRICE_{l,p}
 \end{aligned}$$

Transportation costs (TC):

$$\begin{aligned}
 TC = & \sum_{i \in FCS} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} FNJ_{i,j} CCC_{i,j,t} + \sum_{i \in FCE} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} FNJ_{i,j} CCE_{i,j,t} \quad (3) \\
 & + \sum_{j \in PPN} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNA_{j,k} CCJ_{j,k,t} + \sum_{j \in PPN} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNA_{j,k} CCK_{j,k,t} \\
 & + \sum_{j \in PPW} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNA_{j,k} CCL_{j,k,t} + \sum_{l \in PPL} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNL_{k,l} CCA_{k,l,t} \\
 & + \sum_{l \in PPL} \sum_{k \in PAN} \sum_{t=1}^{12} FNL_{k,l} CCZ_{k,l,t} + \sum_{l \in PPL} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNL_{k,l} CCQ_{k,l,t} \\
 & + \sum_{l \in PPL} \sum_{c \in PPL} \sum_{p \in PLN} \sum_{t=1}^{12} FNC_{l,c} CLC_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLN} \sum_{c \in PPL} \sum_{p \in PLW} \sum_{t=1}^{12} FNC_{l,c} CCY_{p,l,c,t} \\
 & + \sum_{l \in PLW} \sum_{c \in PPL} \sum_{p \in PLW} \sum_{t=1}^{12} FNC_{l,c} CCX_{p,l,c,t}
 \end{aligned}$$

Inventory holding costs (IHC):

$$\begin{aligned}
 IHC = & \sum_c \sum_p \sum_{t=1}^{12} IAC_{p,c,t} IPT_{p,c} + \sum_{l \in PPL} \sum_p \sum_{t=1}^{12} IAB_{l,p,t} IPP_{p,l} \quad (4) \\
 & + \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} IUP_{l,t} IQN_t + \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} IQL_{k,t} IQA_k \\
 & + \sum_{k \in PAA} \sum_{t=1}^{12} ICF_{k,t} ICA_k + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} ICO_{j,t} ICX_j + \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CQP_{l,t} CVC_l \\
 & + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CXC_{j,t} CVA_j + \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCF_{k,t} CVB_k + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} ICP_{j,t} ICZ_j
 \end{aligned}$$

Production costs (PC):

$$PC = \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CQP_{l,t} CV C_l + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CXC_{j,t} CVA_j + \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCF_{k,t} CV B_k \quad (5)$$

Constraints:

Constraints (6) and (7) are associated to the inventory of scrap material in processing plants. Constraints (8) and (9) concern the inventory of processed scrap and intermediate products in sawmill. The inventory of intermediate and finished products in forging plants is given by constraints (10) and (11). Constraint (12) represents the inventory of finished products distribution centers.

$$ICP_{j,t} = ICP_{j,t-1} + \sum_{i \in FCS} CCC_{i,j,t} \quad (6)$$

$$+ \sum_{i \in FCE} CCE_{i,j,t} - CXC_{j,t} \quad \forall t, \forall j \in PPC$$

$$ICO_{j,t} = ICO_{j,t-1} + CXC_{j,t} CWP - \sum_{k \in PPA} CCJ_{j,k,t} \quad \forall t, \forall j \in PPC \quad (7)$$

$$ICF_{k,t} = ICF_{k,t-1} + \sum_{j \in PPC} CCJ_{j,k,t} + \sum_{j \in PPN} CCK_{j,k,t} \quad (8)$$

$$+ \sum_{j \in PPW} CCL_{j,k,t} - CCF_{k,t} \quad \forall t, \forall k \in PPA \quad (9)$$

$$IQL_{k,t} = IQL_{k,t-1} + CCF_{k,t} CMP - \sum_{l \in PPL} CCA_{k,l,t} \quad \forall t, \forall k \in PPA$$

$$IUP_{l,t} = IUP_{l,t-1} + \sum_{k \in PPA} CCA_{k,l,t} + \sum_{k \in PAN} CCZ_{k,l,t} \quad (10)$$

$$+ \sum_{k \in PAW} CCQ_{k,l,t} - \sum_p CQP_{l,p,t} \quad \forall t, \forall l \in PPL$$

$$IAB_{l,p,t} = IAB_{l,p,t-1} + CQP_{l,p,t} CIP - \sum_c CLC_{p,l,c,t} \quad \forall t, \forall l \in PPL \quad (11)$$

$$IAC_{p,c,t} = IAC_{p,c,t-1} + \sum_{l \in PPL} CLC_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLW} CCX_{p,l,c,t} \quad (12)$$

$$+ \sum_{l \in PLN} -DEMAND_{p,c,t} \quad \forall p, c, t$$

Capacity of scrap processors is expressed by Constraints (13). Constraints (14), (15), (16), (17), (18) and (19) represent the production and storage capacity in sawmills. Constraints (20), (21), (22) and (23) represent production and storage capacity in forging plants. Storage capacity in distribution centers is given by Constraints (24) and (25).

$$\sum_{j \in PPC} CCC_{i,j,t} \leqslant CPC_i \quad \forall t, i \tag{13}$$

$$CXC_{j,t} \leqslant CPC_j \quad \forall t, \forall j \in PPC \tag{14}$$

$$ICO_{j,t} \leqslant CPW_j \quad \forall t, \forall j \in PPC \tag{15}$$

$$ICP_{j,t} \leqslant CPD_j \quad \forall t, \forall j \in PPC \tag{16}$$

$$CCF_{k,t} \leqslant CPA_k \quad \forall t, \forall k \in PPA \tag{17}$$

$$ICF_{k,t} \leqslant CQA_k \quad \forall t, \forall k \in PPA \tag{18}$$

$$IQL_{k,t} \leqslant CQW_k \quad \forall t, \forall k \in PPA \tag{19}$$

$$\sum_p CQP_{p,l,t} CIP \leqslant CPT_l \quad \forall t, \forall l \in PPL \tag{20}$$

$$IUP_{l,t} \leqslant COL_l \quad \forall t, \forall l \in PPL \tag{21}$$

$$IAB_{l,p,t} \leqslant CBB_l \quad \forall l \in PPL, \forall p \in PB \tag{22}$$

$$IAB_{l,p,t} \leqslant CAL_l \quad \forall t, \forall l \in PPL, \forall p \in PA \tag{23}$$

$$IAC_{c,p,t} \leqslant CAP_{c,p} \quad \forall t, \forall c, \forall p \in PAP \tag{24}$$

$$IAC_{c,p,t} \leqslant CEP_{c,p} \quad \forall t, \forall c, \forall p \in PBP \tag{25}$$

Constraints (26), (27) and (28) express the selling capacity of foreign suppliers while their maximum delivery capacity is expressed in constraints (29), (30), (31) and (32). Right sides in such equations correspond to capacity parameters given by national or foreign total capacity. Finally, demand coverage is given by constraint (33).

$$CCK_{PPN,PPA,t} \leqslant CAPNAL \quad \forall PPN, \forall PPA, \forall t \tag{26}$$

$$CCZ_{PAN,PPL,t} \leqslant CAPNAL \quad \forall PAN, \forall PPL, \forall t \tag{27}$$

$$CCY_{p,PLN,c,t} \leqslant CAPNAL \quad \forall p, \forall PLN, \forall c, \forall t \tag{28}$$

$$CCE_{FCE,PPCL,t} \leqslant CAPINT \quad \forall FCE, \forall PPC, \forall t \tag{29}$$

$$CCL_{PPW,PPA,t} \leqslant CAPINT \quad \forall PPW, \forall PPA, \forall t \tag{30}$$

$$CCQ_{PAW,PPL,t} \leqslant CAPINT \quad \forall PAW, \forall PPL, \forall t \tag{31}$$

$$CCX_{p,PLW,c,t} \leqslant CAPINT \quad \forall p, \forall PLW, \forall c, \forall t \tag{32}$$

$$DEMAND_{t,p,c} \leqslant \sum_{l \in PPL} CLC_{p,l,c,t} \tag{33}$$

$$+ \sum_{l \in PLW} CCX_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PPL} CCY_{p,l,c,t} \quad \forall t, \forall c$$

All decision variables are non-negative (34)

5 Model Implementation

The mathematical model was implemented using the General Algebraic Modeling System (GAMS) through CPLEX® solver and run on a PC Pentium 4 with 2.0 GB of RAM. For the case study presented previously, the model consisted on a total of 11945 constraints and 13289 decision variables. After running the model, resulting values of decision variables are obtained for each production period. As shown in Figure 3, product flow between members of each echelon is giving the quantity of products transported is obtained. Raw material is bought from scrap sources belonging to the Conglomerate, mainly the site located in Boyaca. This site supplies 52.6% of the total raw scrap. The site located in Bogotá supplies 23.3%, while the site in Cali supplies 24.1% of the total raw scrap. Scrap processing is performed by the three entities belonging to the Conglomerate. The site located in Cali processes 23.9% of the scrap, the site of Boyaca processes 52.8% and the site of Bogotá processes 23.3%. Overall, a total of 250.500 tons of scrap is processed during the production period. An interesting result is that the production volume remains constant over each month of the whole production period. Foreign entities, those not belonging to the Conglomerate, do not process scrap. Because of transportation costs, each scrap processor belonging to the Conglomerate supplies in processed scrap the sawmill units located in the same region. Besides, in some production months, there is some product flow of processed scrap between national entities not belonging to the Conglomerate and sawmill units. This is principally due to the high demand of the corresponding month. From the total processed scrap, 74.7% is obtained from plants belonging to Conglomerate, while 25.3% is obtained from national processor not belonging to the Conglomerate. Concerning the manufacturing of intermediate products, sawmill plants located in Cali and Boyaca work at their maximum production capacity. They become the bottleneck of the whole SC. Sawmill in Boyaca processes 42% of scrap while sawmill in Cali processes the other 58%. Forging plants works during all production periods. The plant in Boyaca is observed to be the one with the highest quantity to produce. Both plants in Cali and in Boyaca are constrained to work uniformly in every month at their maximum production capacity. The forging plant in Bogotá has the highest variability of manufactured quantity during the whole production period. This result is not surprising since there is no sawmill in Bogotá. Hence, all its incoming material must be supplied by other units in the Conglomerate or by foreign entities. Also, this sawmill allows the system to react when demand increases; its capacity is used at 75%.

The higher manufacturing flows are generated between distribution centers located in the same region of the forging plant. This is due to high transportation costs between units located in different regions. In the results it is to notice that in all production periods, a transportation flow is always present between the forging plant in Boyaca and the distribution center in Bogotá. This is mainly due to the low production capacity of the forging plant in Bogotá, compared with the actual demand. Concerning foreign units, only those located in Venezuela are found in the solutions simply because of low transportation costs. A sensitivity analysis on some parameters of the model was also performed. Results show that production capacity

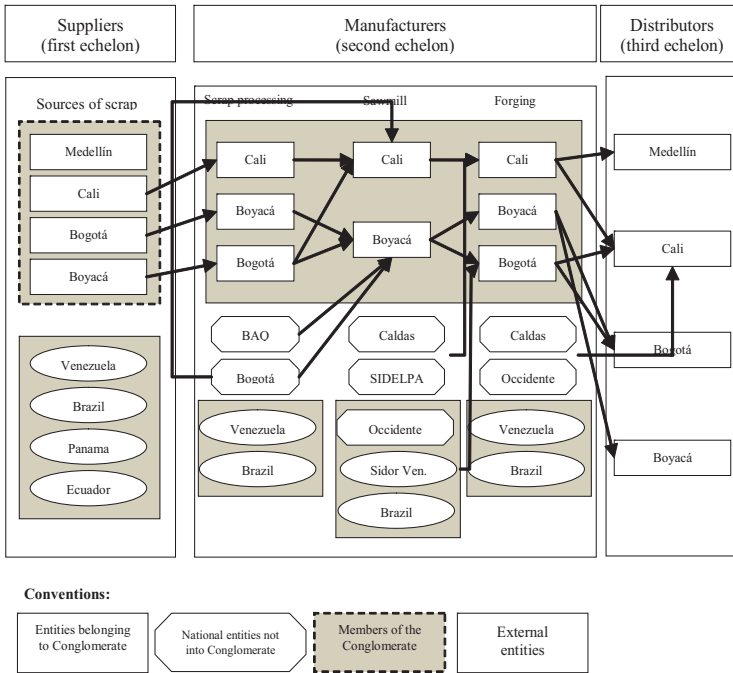


Abb. 3 Example of results for a given month of production flows after model implementation.

in processing plants, forging plants and sawmill units must be increased as shown in Table 1. This will allow an important decrease in global costs over the whole production horizon. Performing a sensitivity analysis of the terms on the right side, it is concluded that the production capacity at the processing plants, rolling mills and steel must be increased. For the particular case of the processing plant located in Boyacá is noted that a production capacity between 7.875 and 11.000 tons will produce an increase in the objective function, from 11.000 to 12.000 tons will produce a decrease and a quantity of 12.000 tons will not make any change in the objective function, so in conclusion it's best to increase the plant capacity to until 12.000 tons in case of being extended with a cost study to justify this change.

Tabelle 1 Increase in production capacity.

Unit	Increase in capacity (Ton)
Processing unit – Boyacá	4.13
Sawmill – Boyacá	80
Forging plant – Cali	70

6 Concluding Remarks

The concern for both the environment and the rational use of resources has led the enterprises to improve their processes, including recycling and waste management operations. These processes are linked to the traditional logistics and therefore have been included in the modeling and optimization of SCs. Enterprises are today extensively implementing optimization procedures, including mathematical modeling and heuristics, for the analysis and design of their SCs. Such optimizations allow them to improve their performance in the competitive marketplace. This paper focused on the analysis of the semi-integrated SC industry. Little has been done in the literature for the Latin-American case, at least to the best of our knowledge. This paper analyzed the problem for a semi-integrated steel manufacturing company located in Colombia and having suppliers and clients within the country and also in the north of South America. A mathematical model, based on linear programming, was proposed in order to design the supply/distribution network so as to minimize the global cost. The model considered that each stage of the manufacturing process is performed in different sites, while it is commonly found in Colombian steel manufacturer that all three process are being performed in the same site. Our model considered constraints associated at this particular scenario. For further research it could be interesting if the impacts in prices of international trade agreements (e.g., Andean Community) are considered in order to give more flexibility to the different supply and distribution networks.

Danksagung This work was supported by Research Funds from Universidad de La Sabana under young researcher grant "Design, planning, and management of sustainable SCs". Authors are grateful with the anonymous referees for their comments to improve the presentation of this paper.

Literaturverzeichnis

1. Arntzen B.C., Brown G., Harrison T., Trafton L.: Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces* 25 (1995) 69–93
2. Bielefeld F.: A Computer-Based Strategic Planning System for Steel Production. *Interfaces* 16 (1986) 41–46
3. Chandra C.: Supply Chain Workflow Modeling Using Ontologies. In: Collaborative Engineering, Kamrani A.K., Abouel Nasr E.S. (eds) Springer (2008) 61–87
4. Eskigun E., Uzsoy R., Preckel P., Beaujon G., Krishnan S., Tew J.: Outbound Supply Chain Network Design With Mode Selection, Lead Times and Capacitated Vehicle Distribution Centers. *European Journal of Operational Research* 165 (2005) 182–206
5. Fleischmann M., Jacqueline M., Van der Laan E., Van Nunen J.A. Van Wassenhove L.N.: Quantitative models for Reverse Logistics: A review. *European Journal of Operational Research* 103 (1997) 1–17
6. Geoffrion A.M., Graves G.W.: Multicommodity distribution system design by Benders decomposition. *Management Science* 20 (1974) 822–844

7. Geyer R., Davis J., Ley J., He J., Clift R., Kwan A., Sansom M., Jackson T.: Time-dependent material flow analysis of iron and steel in the UK: Part 1: Production and consumption trends 1970-2000. *Resources, Conservation and Recycling* 51 (2007) 101-117
8. Gunnarsson H.: Supply chain optimization in the forest industry. Linköping University Institute of Technology (2007)
9. Hafeez K., Griffiths M., Griffiths J., Naim M. M.: Systems design of a two-echelon steel industry supply chain. *International Journal of Production Economics* 45 (1997) 121-130
10. IMC Información Minera de Colombia: The steel industry is keeping growing. Available on line at: <http://www.imcportal.com/newsfiles/2008081722222.pdf>
11. Jonas J., Eriksson S.: Sustainable Business at Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): The Case of Coffee Queen AB. University essay from Karlstads Universitet Centrum för tjänsteforskning (2007)
12. McAdam R., Brown L.: Strategic alignment and the supply chain for the steel stockholder sector: An exploratory case study analysis. *Supply Chain Management: An International Journal* 6 (2001) 83-94
13. Monroy N., M. Ahumada., *Logística Reversa: Retos para la Ingeniería Industrial*. Revista de Ingeniería Universidad de los Andes 23 (2006)
14. Potter A., Mason R., Naim M., Lalwan C.: The evolution towards an integrated steel supply chain: A case study from the UK. *International Journal of Production Economics* 89 (2004) 207-216
15. Quariguasi J., Bloemhof-Ruwaard J. M.: Designing and Evaluating Sustainable Logistics Networks. ERIM Report Series Research Management (2006)
16. Spengler T. H., Püchert H., Penkuhn T., Rentz O.: Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research* 97 (1997) 308-326
17. Zäpfel G., Wasner M.: Warehouse sequencing in the steel supply chain as a generalized job shop model. *International Journal of Production Economics* 104 (2006) 482-501

Integrierte Planung von Produktions-, Nacharbeits- und Recyclingprozessen bei fehlerbehafteter Produktion

Steffen Rudert, Udo Buscher und Christian Schwarz

Zusammenfassung Im Mittelpunkt dieses Beitrages steht ein Unternehmen mit zwei Fertigungslinien, auf denen unterschiedliche Produkte hergestellt werden. Gleichwohl benötigen beide Produkte zur Fertigung ein und denselben Rohstoff. Mithin bietet es sich aus Kostengründen an, die Bestellung des Rohstoffes für beide Produkte gemeinsam vorzunehmen. Im Hinblick auf den Produktionsprozess auf beiden Linien ist zu beachten, dass jeweils ein bestimmter Anteil der Produkte nicht den Qualitätsanforderungen genügt. Während einige Einheiten durch Nacharbeit das gewünschte Qualitätsniveau erreichen, können andere Einheiten nicht mehr zur Nachfragebefriedigung herangezogen werden. Dieser auf beiden Linien anfallende Ausschuss wird dem Recycling zugeführt, wobei auch hier aufgrund der Fixkosten ein abgestimmter Recyclingprozess gewählt wird. Bei der Beschaffung des Rohstoffes ist ferner zu berücksichtigen, dass dieser sich durch das Rezyklat substituieren lässt. Mithin besteht das Ziel des Beitrages darin, die bestehenden Interdependenzen zu erfassen und mit einem statisch-deterministischen Losgrößenmodell die entscheidungsrelevanten Kosten des abgegrenzten Systems zu minimieren.

1 Einleitung

Dem durch hohen Wettbewerb verursachten Kostendruck versuchen viele Unternehmen mit Rationalisierungsmaßnahmen in der Produktion entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit besteht darin, durch eine Losgrößenplanung, die der Mehrstufigkeit des Produktionsprozesses und den Interdependenzen zwischen den Fertigungsbereichen Rechnung trägt, die Kosten zu senken. Gleichwohl handeln die einzelnen

Steffen Rudert · Udo Buscher · Christian Schwarz
TU Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Münchner Platz 2-3, 01062 Dresden,
GERMANY
E-mail: steffenrudert@gmx.de,
{christian.schwarz, udo.buscher}@tu-dresden.de

an Produkten oder Produktionslinien orientierten Bereiche selbstständig und planen die Beschaffung von Rohmaterialien, die Größe der Fertigungslose sowie Losauftragshäufigkeiten unabhängig voneinander. Die vorliegende Arbeit schlägt dagegen eine abgestimmte Planung der Fertigungsbereiche vor. Werden beispielsweise Rohstoffe für mehrere Produktionslinien gemeinsam beschafft, so lassen sich nicht nur Bestellkosten reduzieren, sondern gegebenenfalls zusätzlich auch Mengenrabatte bei Lieferanten gezielt nutzen.

Neben dem Kostendruck sehen sich Unternehmen auch immer höheren Anforderungen an ihre Produktionseffizienz ausgesetzt. Dadurch sind die Produktionsprozesse in den letzten Jahren stark optimiert worden. Allerdings können bei einigen Produktionsverfahren bestimmte Ausschussquoten nicht unterschritten werden. Das trifft vor allem auf simple Produkte mit einem geringen Güterwert zu. Eine weitergehende Optimierung des Herstellungsverfahrens oder eine zusätzliche Nachbesserung defekter Einheiten wäre wirtschaftlich nicht sinnvoll. Hier bietet es sich an, die sonst als Ausschuss entsorgten Einheiten durch Verwertung des Materials nutzbar zu machen [10, S. 675]. So lassen sich die Effizienz des gesamten Herstellungsprozesses steigern und auch zum Teil die Anforderungen erfüllen, die sich aus der Umweltgesetzgebung ergeben.

In der Literatur existieren zahlreiche Arbeiten, in denen neben einwandfreien auch fehlerhafte Güter explizit berücksichtigt werden.¹ Defekte Einheiten können sich bereits in den Sendungen der Lieferanten befinden [18]. In [19] wird unzuverlässigen Produktionssystemen mit Investitionen in die Prozesszuverlässigkeit begegnet, um damit die Prozessausbeute zu erhöhen. In anderen Fällen werden die defekten Einheiten einfach entsorgt (siehe u.a. [2]), bzw. zu einem reduzierten Preis verkauft [15]. In [5] werden weiterhin verschiedene Zeitpunkte für diesen Verkauf in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Güterprüfung unterschieden. Auf die Sicherstellung einer fehlerfreien Bedarfsbefriedigung in diesem Zusammenhang geht [13] ein. Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Zeitpunkten, zu denen die defekten Einheiten erkannt werden, ist in [3] von Bedeutung. Nacharbeit führt in [7] dazu, dass die vorher fehlerhaften Erzeugnisse doch noch in den Verkauf gehen können. In [11] wird die Betrachtung auf den Beschaffungsbereich ausgedehnt und diverse Kombinationsmöglichkeiten von Rohstoff-, Produktions- und Auslieferungslosen werden unterschieden. Ein mehrstufiger unzuverlässiger Produktionsprozess steht hingegen im Mittelpunkt von [16]. Von der Nacharbeit von fehlerhaften Produkten aus unternehmensinternen Rückflüssen kann die Wiederaufarbeitung von gebrauchten aus dem Markt zurückkehrenden Produkten unterschieden werden, worauf hier aber nicht weiter eingegangen wird (vgl. hierzu [9]).

Im Unterschied zur bisher vorliegenden Literatur werden in diesem Beitrag zwei parallele Produktionslinien betrachtet, die sowohl durch unterschiedliche Herstellungs- als auch Vertriebsprozesse gekennzeichnet sind. Gleichwohl greifen sie aber auf ein und denselben Rohstoff zurück. Die Beschaffung des Rohstoffes erfolgt gemeinsam für die beiden Linien, um die mit der Versorgung der Produktion in Verbindung stehenden Kosten zu minimieren. Der aufgrund der unzuverlässigen Produkti-

¹ Zu einem ausgezeichneten Überblick zur Modellierung von Produktionssystemen, die zu fehlerhaften Einheiten führen vgl. [20].

on entstehende Ausschuss wird nicht entsorgt, sondern kann nach einem Recycling als Ausgangsmaterial verwendet werden.

Die Modellierung basiert auf einem Praxisprojekt mit einem Unternehmen, das Produkte im Kunststoffspritzgussverfahren fertigt. Die erste Fertigungslinie stellt simple Massenprodukte her, wobei sich die Qualitätssicherungsmaßnahmen auf die reine Güterprüfung beschränken. Im Gegensatz dazu fertigt die zweite Produktionslinie etwas aufwändigere Produkte, bei denen die defekten Einheiten einem zusätzlichen Nacharbeitungsprozessschritt unterzogen werden, um die Produktionsausbeute an fehlerfreien Einheiten zu erhöhen [7, S. 585]. Hier handelt es sich um Produkte aus dem Haushaltsbedarf.

Auch die Vertriebsprozesse der beiden Produktionslinien unterscheiden sich. Im ersten Fall werden alle hergestellten Güter geschlossen zum Vertrieb gegeben um die Nachfrage zu bedienen (vgl. [11, S. 3202]). Diese Einheiten werden den Abnehmern direkt geliefert bzw. ab Werk abgeholt. Im zweiten Fall liegt eine multiple Bedarfsstruktur vor. Einerseits werden Großkunden durch die Belieferung mit den Produkten versorgt. Andererseits findet direkt ab Werk ein Verkauf der produzierten Güter statt. Dieser wird permanent aufrecht erhalten, da sich die Öffnungszeiten des Werksverkaufs nicht an den Produktions- und Ruhezeiten der Fabrik orientieren. Somit müssen bei der zweiten Linie zwei Bedarfe berücksichtigt werden. Einerseits werden nach endgültiger Fertigstellung eines Loses die Großabnehmer beliefert. Andererseits findet permanent ein Werksverkauf der hergestellten Einheiten statt.

Die für das im Folgenden entwickelte Modell verwendeten Symbole sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Zahlen in den Indizes geben die Zuordnung zur ersten bzw. zweiten Produktionslinie wieder. Als Einheiten werden Zeiteinheiten (ZE), Mengeneinheiten (ME) und Geldeinheiten (GE) verwendet.

Die weitere Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Den Ausgangspunkt des zu entwickelnden Modells bildet die schematische Darstellung des Wertschöpfungsprozesses (Kapitel 2.1) zusammen mit der Veranschaulichung der unvollständigen Prozessausbeute im Produktionssystem (Kapitel 2.2). Es schließt sich die separate Vorstellung der beiden Produktionslinien an (Kapitel 2.3 und 2.4). Schließlich werden beide Linien in einem integrierten Modellansatz zusammengefasst und Handlungsempfehlungen abgeleitet, um minimale Gesamtkosten zu erzielen (Kapitel 2.5). Ein Zahlenbeispiel veranschaulicht die Abstimmung der beiden Fertigungslinien. Den Abschluss der Arbeit bildet die Zusammenfassung des Beitrags (Kapitel 3).

2 Integrierte Fertigungslosgrößenplanung unter Berücksichtigung von Recycling

2.1 Darstellung des Wertschöpfungsprozesses

Die Betrachtung erstreckt sich vom Lager des Rohstoffs bis zum Vertrieb der produzierten Güter. Durch das Recycling des während der Produktion anfallenden Aus-

Tabelle 1 Übersicht verwendeter Symbole.

Symbol	Beschreibung [Einheit]
a, b	Anzahl Produktionslose im Gesamtzeitraum T
T	Gesamtzyklus (Dauer von a bzw. b Produktionslosen) [ZE]
T_1, T_2	Teilzyklus (Dauer für ein Produktionslos) [ZE]
t_{p_1}, t_{p_2}	Produktionszeit [ZE]
t_{w_2}	Nacharbeitszeit [ZE]
t_{2m}	Ruhezeit bei zweiter Linie [ZE]
Q_{f_1}, Q_{f_2}	Losgröße für Endprodukte [ME]
$Q_{f_{2m}}, Q_{f_{2n}}$	Teillos für Werksverkauf und für Großkunden [ME]
Q_{r_1}, Q_{r_2}	Losgröße für Rohstoff [ME]
D_1	Bedarfsrate [ME/ZE]
D_{2m}	Bedarfsrate (Werksverkauf) [ME/ZE]
D_{2n}	Bedarfsrate (Großkunden) [ME/ZE]
P_{f_1}, P_{f_2}	Produktionsrate [ME/ZE]
P_{w_2}	Nacharbeitsrate für zweite Linie [ME/ZE]
g_1, g_2	Direktbedarfskoeffizienten (Endprodukte aus Rohmaterial)
α_1	Ausschussrate bei der Produktion [%]
β_2	Defektrate für zweite Linie (fehlerhaft, nacharbeitbar) [%]
γ_2	Ausschussrate bei Nacharbeit für zweite Linie [%]
φ_1, φ_2	Recyclingfaktor [%]
S_{R_1}, S_{R_2}	Bestellkosten für Rohmaterial [GE/ZE]
S_{F_1}, S_{F_2}	Rüstkosten für Produktion [GE/ZE]
S_{Y_1}, S_{Y_2}	Rüstkosten für Recycling [GE/ZE]
S_r	Bestellkostensatz für Rohmaterial [GE]
S_{f_1}, S_{f_2}	Rüstkostensatz für Produktion [GE]
S_y	Rüstkostensatz für Recycling [GE]
I_{R_1}, I_{R_2}	Lagerhaltungskosten für Rohmaterial [GE/ZE]
I_{F_1}, I_{F_2}	Lagerhaltungskosten für Endprodukte [GE/ZE]
I_{W_2}	Lagerhaltungskosten für defekte Güter [GE/ZE]
I_{Y_1}, I_{Y_2}	Lagerhaltungskosten für Ausschussmaterial [GE/ZE]
h_{r_1}, h_{r_2}	Lagerhaltungskostensatz für Rohmaterial [GE/(ME · ZE)]
h_{f_1}, h_{f_2}	Lagerhaltungskostensatz für Endprodukte [GE/(ME · ZE)]
h_{w_2}	Lagerhaltungskostensatz für defekte Güter [GE/(ME · ZE)]
h_{y_1}, h_{y_2}	Lagerhaltungskostensatz für Ausschussmaterial [GE/(ME · ZE)]
L_r, L_y	Lagerbestandsverlauf für Rohstoffe und für Ausschuss [ME]
L_f, L_w	Lagerbestandsverlauf für fehlerfreie und defekte Endprodukte [ME]

schussmaterials bildet sich ein Kreislauf im betrachteten System. Der Rohstoff bildet das Ausgangsmaterial für eine breite Palette an Produkten. Diese werden in verschiedenen Produktionslinien hergestellt. Das konkret vorliegende System betrachtet zwei Linien. Beispielhaft werden simple Industriegüter und Produkte für den Haushaltsbedarf betrachtet. Trotz unterschiedlicher Charakteristika und voneinander abweichender Prozessabläufe können die verschiedenen Linien später in einem Gesamtmodell abgebildet werden.

Start des Gesamtzyklus ist die gemeinsame Beschaffung des Rohstoffs (vgl. hier und im Folgenden Abbildung 1). Danach folgen a Fertigungslose in Produktionslinie 1 und zeitgleich b Lose in Produktionslinie 2. Den Abschluss bildet das gemeinsame Recycling des angefallenen Ausschussmaterials.

Die Optimierung des Gesamtsystems besitzt zwei Ansatzpunkte. Zum einen zielt die Formulierung als Losgrößenproblem auf die Ermittlung der Größe und Anzahl der Produktionslose (im Folgenden allgemein mit Q bezeichnet) in beiden Ferti-

gungslinien ab. Zum anderen sichert das Modell durch Kombination zu einem Gesamtmodell die kostenoptimale Rohstofflosgröße und deren Aufteilung auf die beiden Produktionslinien. Um die Prozesse der beiden Fertigungslinien nachvollziehen

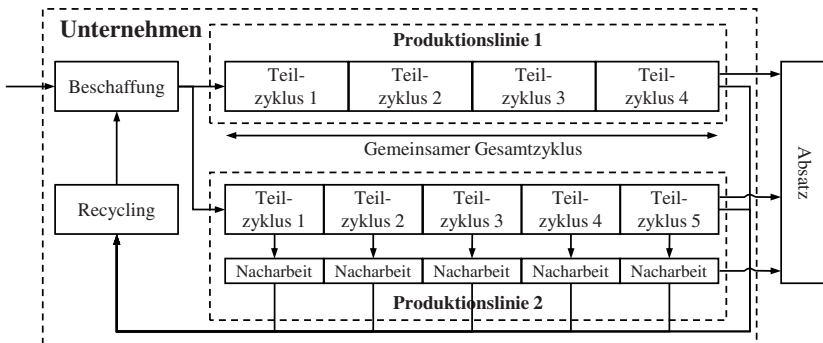


Abb. 1 Wertschöpfungsprozess im Überblick.

zu können, ist zunächst eine Darstellung der im Modell abgebildeten Fehlerarten notwendig.

2.2 Unvollständige Prozessausbeute im Produktionssystem

Bei der Entstehung der nicht den Anforderungen genügenden Einheiten ist zunächst eine Betrachtung der zugrunde liegenden Fertigungsprozesse notwendig. Im vorgestellten System sind in der Produktion weder Einfahrprozesse (mit sinkenden Fehlerraten) noch plötzlich auftretende Prozessverschlechterungen (beispielsweise durch Werkzeugbruch) zu beobachten. Ein solches Außer-Kontrolle-Geräten zeigt [14]. Dagegen werden in diesem Modell konstante Faktoren für Ausschuss-, Fehler- und Recyclinganteile ($\alpha, \beta, \gamma, \varphi$) verwendet. Diese Form der Modellierung findet weite Verbreitung in der Literatur (siehe u.a. [6, 15, 11]).

Grundsätzlich werden bei der Produktion aus dem Rohstoff die Enderzeugnisse hergestellt (vgl. hier und im Folgenden Abbildung 2). Dabei können zwei Arten fehlerhafter Produkte entstehen. Der Anteil αQ umfasst Güter mit grober Abweichung vom Soll-Zustand, bei denen eine Nacharbeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll ist. Weiterhin entstehen Produkte, bei denen lediglich kleine Fehler festgestellt wurden (βQ). Diese können in einem zusätzlichen Prozessschritt behoben werden. Allerdings ist diese Nacharbeit nicht bei allen defekten Gütern erfolgreich. Der Anteil γ der defekten Einheiten (βQ) ist auch nach abgeschlossener Nacharbeit nicht fehlerfrei und wird ebenfalls dem Ausschusslager zugefügt.

Somit beträgt die fehlerfreie Ausbeute nach der Produktion lediglich $(1 - \alpha - \beta)Q$ Einheiten. Weitere $(1 - \gamma)\beta Q$ Produkte kommen durch die Nacharbeit hinzu.

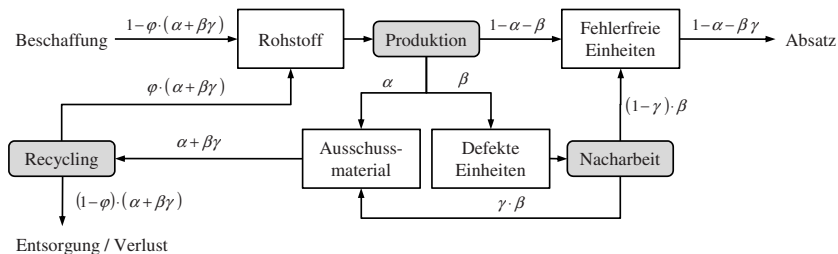


Abb. 2 Ablaufdiagramm zur Darstellung der unvollständigen Prozessausbeute.

Der Bestand im Ausschusslager setzt sich zusammen aus den während der Produktion (αQ) und während der Nacharbeit ($\gamma \cdot \beta Q$) entstehenden fehlerhaften Einheiten.

Diese endgültig nicht weiterverwendbaren Güter $(\alpha + \beta\gamma)Q$ werden dem Recycling und damit der Wiederverwertung zugeführt. Der Recyclingfaktor φ bildet dabei die Effizienz des Recyclingprozesses ab. Es entsteht ein geringer Verlust in Höhe von $(1 - \varphi)(\alpha + \beta\gamma)Q$. Das recycelte Material $\varphi(\alpha + \beta\gamma)Q$ wird dem Rohstofflager hinzugefügt und verringert dadurch die neu zu beschaffende Menge des Ausgangsstoffes auf $1 - \varphi(\alpha + \beta\gamma)$.²

Für das weitere Vorgehen der Arbeit lässt sich zusammenfassen: Im Produktionssystem laufen die folgenden Prozessschritte nacheinander ab: Produktion, Nacharbeit, Recycling. Damit werden die Bestände im System in vier Stufen eingeteilt: Rohstoff (L_r), fehlerfreie Endprodukte (L_f), defekte Einheiten (L_w) und Ausschussmaterial (L_y).

Nachdem die Struktur des Gesamtsystems in 2.1 und der Güterkreislauf im zurückliegenden Abschnitt erläutert wurden, folgen jetzt die detaillierten Beschreibungen der beiden Produktionslinien. Die erste Linie fertigt simple Industriegüter. Dagegen produziert die zweite Linie aufwändiger herzustellende Haushaltsartikel.

2.3 Produktionslinie 1

Aus einem Los Rohstoff werden in der ersten Fertigungslinie a Produktionslose hergestellt. Der Direktbedarfsfaktor g_1 bildet die Relation zwischen Rohstoff und Endprodukt ab (vgl. [11, S. 3194]): $\frac{Q_{f_1}}{Q_{r_1}} = g_1$. Es sind also $g_1 Q_{r_1}$ Einheiten des Rohstoffs notwendig, um ein Produktionslos der Größe Q_{f_1} herzustellen. Die Nachfrage nach dem Produkt der ersten Linie symbolisiert D_1 . Sie ist in Mengeneinheiten pro Zeiteinheit angegeben. Als Zeiteinheit wird oft ein Jahr [8, S. 496] oder aber ein Monat verwendet.

Die Nachfrage nach Produkten der ersten Linie kann aufgrund der getakteten Produktionssysteme der industriellen Abnehmer als konstant angenommen werden.

² Gemäß der vorgestellten Systematik gilt für die erste Linie $\beta_1 = 0$ und $\gamma_1 = 0$, hingegen für die zweite Linie $\alpha_2 = 0$.

Da auch die Nachfrage nach den Erzeugnissen der zweiten Linie keinen saisonalen Schwankungen unterliegt und sich gleichzeitig auf sehr viele Abnehmer verteilt, kann auch dort eine konstante Nachfrage unterstellt werden. Durch die Verwendung konstanter Bedarfsraten bietet sich eine statisch deterministische Modellierung an.

Die Bestände beim Abnehmer werden im vorgestellten Modell nicht explizit berücksichtigt. Deshalb ist die Nachfragerate D_1 im Bestandsverlauf der fehlerfreien Endprodukte (L_{f_1}) als fallende Gerade angedeutet (siehe Abbildung 3). Zusammen mit der Produktionsrate P_{f_1} , dem Ausschussanteil α_1 und der geschlossenen Losweitergabe zum Vertrieb ergibt sich der Verlauf von L_{r_1} . Daraus abgeleitet zeigt L_{r_1} den Bestandsverlauf der Rohstoffe. L_{r_1} beinhaltet dabei den zur ersten Linie zugehörigen Anteil am für beide Linien gleichen Rohstoff. Während der Produktionsabschnitte (t_{p_1}) erfolgen Abgänge mit der Verbrauchsrate $\frac{P_{f_1}}{g_1}$. L_{y_1} bildet die als Ausschuss deklarierten Güter ab. Hier erfolgen die Zugänge während t_{p_1} mit $\alpha_1 P_{f_1}$. Nach a Produktionslosen erfolgt das Recycling des Ausschussmaterials und direkt im Anschluss die neue Beschaffung der Rohstoffe.

Beim Versuch ein Los der Größe Q_{f_1} zu produzieren vergehen t_{p_1} Zeiteinheiten bei einer Produktionsgeschwindigkeit P_{f_1} . Neben einwandfreien Gütern werden auch defekte Einheiten produziert [3, S. 6590]. Aufgrund des geringen Güterwerts und der Möglichkeit zur Verwertung des Materials ist Nacharbeit wirtschaftlich nicht sinnvoll. α_1 bezeichnet den Anteil der nicht einwandfreien Güter nach der Produktion. Diese werden direkt dem Ausschusslager zugeführt. Die Ausbeute an fehlerfreien Erzeugnissen am Ende von t_{p_1} beträgt somit $L_{f_1\max} = (1 - \alpha_1)Q_{f_1}$.

Die Länge eines Teilzyklus wird bestimmt durch die Dauer, in der die effektive Prozessausbeute in Höhe von $(1 - \alpha_1)Q_{f_1}$ Produkten die Nachfrage D_1 befriedigt. Der Gesamtzyklus setzt sich aus a Teilzyklen zusammen und so ergibt sich $T = aT_1 = a \frac{(1 - \alpha_1)Q_{f_1}}{D_1}$. Während zu Beginn von T ein Grundstofflos Q_{r_1} beschafft wird, endet der Gesamtzyklus mit dem Recycling des während aller a Teilzyklen angefallenen Ausschussmaterials $a \cdot \alpha_1 Q_{f_1}$ und anschließender Zuführung zum Rohmateriallager. Im vorliegenden Fall bietet sich das intern abgewinkelte Recycling an [12, S. 137], da die verschiedenen Produkte alle mit der gleichen Anlage recycelt werden können und das Material als Granulat wieder verwendet werden kann. Eine Sammlung über die Produktionszyklen hinweg ist trotzdem sinnvoll. So wird der mit dem Ingangsetzen der Recyclinganlagen verbundene Aufwand (S_y) auf möglichst viele Ausschussteile verteilt. Bedingt durch die sehr hohe Geschwindigkeit des Recyclingvorgangs kann die Zeit dafür als vernachlässigbar angenommen werden.

Der Recyclingfaktor φ_1 bildet die Effizienz der Verwertung des Ausschusses ab. Der Anteil $\varphi_1 \cdot a \cdot \alpha_1 \frac{Q_{f_1}}{g_1}$ kann für den nachfolgenden Zyklus wieder als Rohstoff genutzt werden und reduziert so die zu beschaffende Menge.

Durch die gegenüber dem klassischen Modell der Losgrößenplanung verringerte Prozessausbeute ist folgende Anforderung an die Produktionsgeschwindigkeit zu erfüllen, um Fehlmengen bei der Produktionslinie 1 zu verhindern: $P_{f_1} \geq \frac{D_1}{1 - \alpha_1}$.

Um die Modellierung auf das Notwendige zu beschränken, werden im Folgenden nur die entscheidungsrelevanten Kosten vorgestellt. Durch die statische Modellierung des Gesamtsystems und der konstanten Fehleranteile im Produktions-

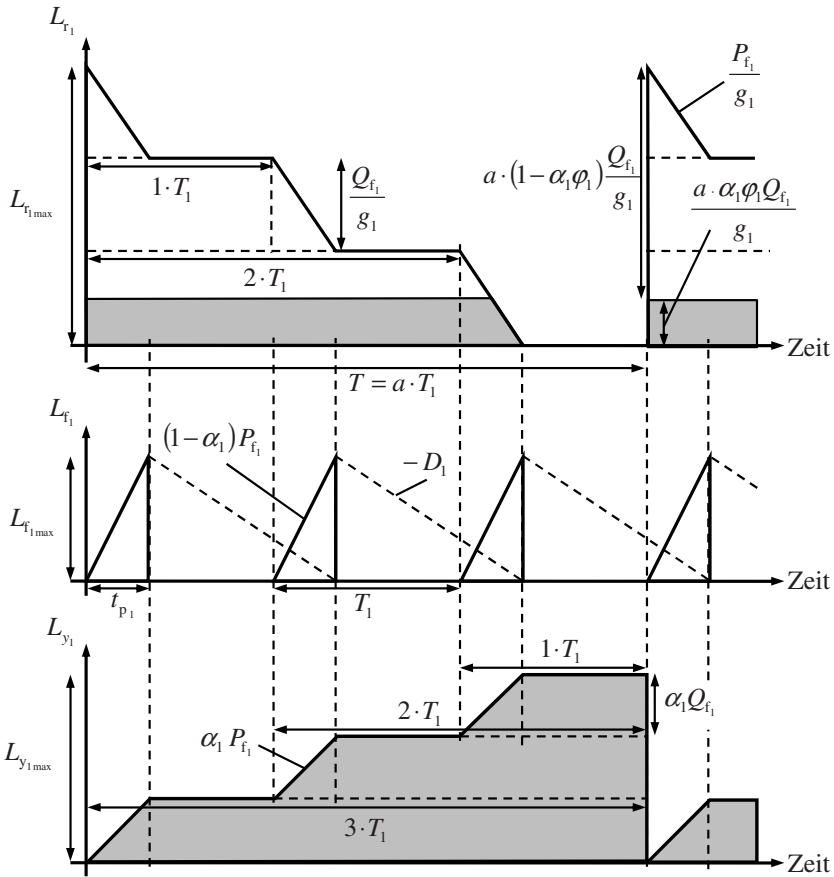


Abb. 3 Lagerbestandsverläufe in der ersten Produktionslinie ($a = 3$).

prozess [16, S. 917] hat die Losgröße keinen Einfluss auf den Anteil fehlerhafter Produkte im Los. Es kann gezeigt werden, dass bei konstanten Kostensätzen pro Stück die Produktions-, Prüf-, Entsorgungs- und Beschaffungskosten (Kosten des Einkaufsvolumens) nicht entscheidungsrelevant sind. Im Fokus stehen dagegen die Rüstkosten für Produktions- und Recyclinganlagen, die fixen Bestellkosten sowie Lagerhaltungskosten für den Rohstoff, für die fertigen Erzeugnisse und für das Ausschussmaterial. Wie später in 2.5 gezeigt wird, ist es sinnvoll bzgl. der Gesamtzykluslänge T zu optimieren.

Fixe Bestellkosten S_f fallen durch das Auslösen einer Bestellung beim Lieferanten an. Sie entstehen genauso wie die Recyclingrüstkosten S_y nur einmal im Gesamtzyklus. Dagegen sind die Anlagen der Produktionslinie 1 zu Beginn jedes Teilzyklus zu rüsten, wobei jedes Mal der Kostensatz S_{f_1} anfällt. Entsprechend ergeben sich die fixen Kostenbestandteile.

$$S_{R_1} + S_{F_1} + S_{Y_1} = \frac{S_r + aS_{f_1} + S_y}{T} \quad (1)$$

Durch Division mit der Gesamtzykluszeit T sind die fixen Kosten gemäß Formel (1) in [GE/ZE] angegeben. Dies gilt auch für alle folgenden Kostenfunktionen.

Der Lagerbestandsverlauf im Rohstofflager ist gekennzeichnet durch den Verbrauch des zur Produktion der a Fertigungslose notwendigen Materials $\left(\frac{aQ_{f_1}}{g_1}\right)$ und der dazwischen liegenden Ruhezeiten $(T_1 - t_{p_1})$ (vgl. [17, S. 716]). Mit dem Lagerhaltungskostensatz h_{r_1} ergeben sich die Kosten wie folgt.

$$\begin{aligned} I_{R_1} &= \frac{h_{r_1}}{T} \left(\frac{aQ_{f_1}}{g_1} \cdot \frac{t_{p_1}}{2} + \sum_{j=1}^{a-1} j \cdot \frac{Q_{f_1}}{g_1} \cdot T_1 \right) \\ &= \frac{h_{r_1} D_1 T}{2(1 - \alpha_1)^2 a g_1} \left[\frac{D_1}{P_{f_1}} + (1 - \alpha_1)(a - 1) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Der Verlauf des Lagerbestands für die fertigen Produkte gleicht sich für alle a Teilzyklen. Dem Aufbau während t_{p_1} folgt der Abbau durch die geschlossene Losweitgabe zum Vertrieb.

$$I_{F_1} = \frac{h_{f_1}}{T} \cdot a \cdot (1 - \alpha_1) Q_{f_1} \cdot \frac{t_{p_1}}{2} = \frac{h_{f_1} D_1^2 T}{2(1 - \alpha_1) a P_{f_1}} \quad (3)$$

Im Ausschussmateriallager werden die nicht weiter verwendbaren Einheiten aller a Produktionszyklen gesammelt. Zum Ende des Gesamtzyklus erfolgt dann das Recycling in einem Los.

$$\begin{aligned} I_{Y_1} &= \frac{h_{y_1}}{T} \left(\sum_{j=1}^a j \cdot \alpha_1 Q_{f_1} \cdot T_1 - a \cdot \alpha_1 Q_{f_1} \cdot \frac{t_{p_1}}{2} \right) \\ &= \frac{\alpha_1 h_{y_1} D_1 T}{2(1 - \alpha_1)^2 a} \left[(1 - \alpha_1)(a + 1) - \frac{D_1}{P_{f_1}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Nach der detaillierten Vorstellung der ersten Produktionslinie folgt nun die Beschreibung der zweiten Linie mit den abweichenden Gegebenheiten.

2.4 Produktionslinie 2

Im Gegensatz zur ersten fertigt die zweite Produktionslinie aufwändigere Produkte. Die höheren Produktionskosten rechtfertigen die Bemühung um eine Nacharbeit der als ungenügend deklarierten Erzeugnisse. So werden grundsätzlich alle im ersten Schritt ausgesonderten Einheiten in einem zweiten Prozessschritt nochmals bearbeitet. Als Ergebnis kann ein Teil der defekten Produkte doch noch als einwandfreie

Güter in den Verkauf gehen. Der Rest wird, analog zur ersten Produktionslinie, im Lager für Ausschussmaterial gesammelt.

Weiterhin setzt sich die Nachfrage bei der zweiten Linie durch eine multiple Bedarfsstruktur zusammen. Einerseits gilt es, einen Bedarf D_{2m} permanent durch die Weitergabe von Erzeugnissen zu befriedigen. Dabei werden die Einheiten direkt vor Ort vertrieben. Dieser Werksverkauf ist vor allem für kleinere Kunden in der näheren Umgebung relevant. Andererseits wird ein komplettes Transportlos direkt nach Fertigstellung zum Vertrieb gegeben und bedient damit die Nachfrage D_{2n} . Dieser zweite Weg der Bedarfsbefriedigung entspricht dem klassischen Fall der Auslieferung an Großkunden. Damit zeigt die zweite Produktionslinie eine Kombination aus offener und geschlossener Losweitergabe.

In Abbildung 4 sind die Lagerbestände der zweiten Produktionslinie dargestellt. Es ergeben sich zwei grundlegende Unterschiede zu Abbildung 3. Einerseits werden defekte Einheiten zunächst zwischengelagert (L_{w_2}) und während t_{w_2} mit der Rate P_{w_2} nachgearbeitet. Die danach immer noch unzureichenden Güter werden, wie bei der ersten Linie, dem Ausschusslager (L_{y_2}) hinzugefügt. Andererseits weicht der Bestandsverlauf der Fertigerzeugnisse (L_{f_2}) aufgrund der Kombination von offener und geschlossener Losweitergabe von L_{f_1} ab. Die Verläufe des Bestandes von zur zweiten Linie zugehörigen Rohstoffen (L_{r_2}) und der des Ausschussmaterials (L_{y_2}) ähneln dagegen denen der ersten Produktionslinie.

Während der Produktion des Loses Q_{f_2} werden also permanent Güter weitergegeben und verkauft. Dieser Effekt bewirkt zusammen mit der fehlerbehafteten Produktion mit Fehleranteil β_2 , dass zum Ende von t_{p_2} nur $L_{f_{2b}} = \left(1 - \beta_2 - \frac{D_{2m}}{P_{f_2}}\right) Q_{f_2}$ Einheiten im Fertigwarenlager verfügbar sind. Auch während der Nacharbeit, bei der wiederum der Ausschussanteil γ_2 zu berücksichtigen ist, geht der Verkauf weiter. Folglich sind weitere $L_{f_{2a}} = \left(1 - \gamma_2 - \frac{D_{2m}}{P_{w_2}}\right) \beta_2 Q_{f_2}$ Güter nach zusätzlichen t_{w_2} Zeiteinheiten vorhanden.

Die verfügbare Menge nach Fertigstellung beträgt damit

$$\left[1 - \beta_2 \gamma_2 - D_{2m} \left(\frac{1}{P_{f_2}} - \frac{\beta_2}{P_{w_2}}\right)\right] Q_{f_2} = Q_{f_{2m}} + Q_{f_{2n}} \quad .$$

$Q_{f_{2m}}$ dient zur Bedarfsbefriedigung von D_{2m} während der Ruhezeit $T_2 - t_{p_2} - t_{w_2} = t_{2m}$, verbleibt deshalb zunächst im Bestand und wird über diesen Zeitraum kontinuierlich verbraucht. $Q_{f_{2n}}$ hingegen bedient die Nachfrage von D_{2n} bis zur nächsten Auslieferung und damit für den gesamten Zeitraum von T_2 .

Aus der gesamten während eines Teilzyklus produzierten fehlerfreien Menge $(1 - \beta_2 \gamma_2) Q_{f_2}$ und dem Gesamtbedarf $D_{2m} + D_{2n}$ ergibt sich die Länge eines Teilzyklus bei der zweiten Produktionsstätte durch

$$T_2 = \frac{(1 - \beta_2 \gamma_2) Q_{f_2}}{D_{2m} + D_{2n}} = \Delta_{2n} Q_{f_2} = \frac{T}{b} \quad (5)$$

und die Ruhezeit t_{2m} durch

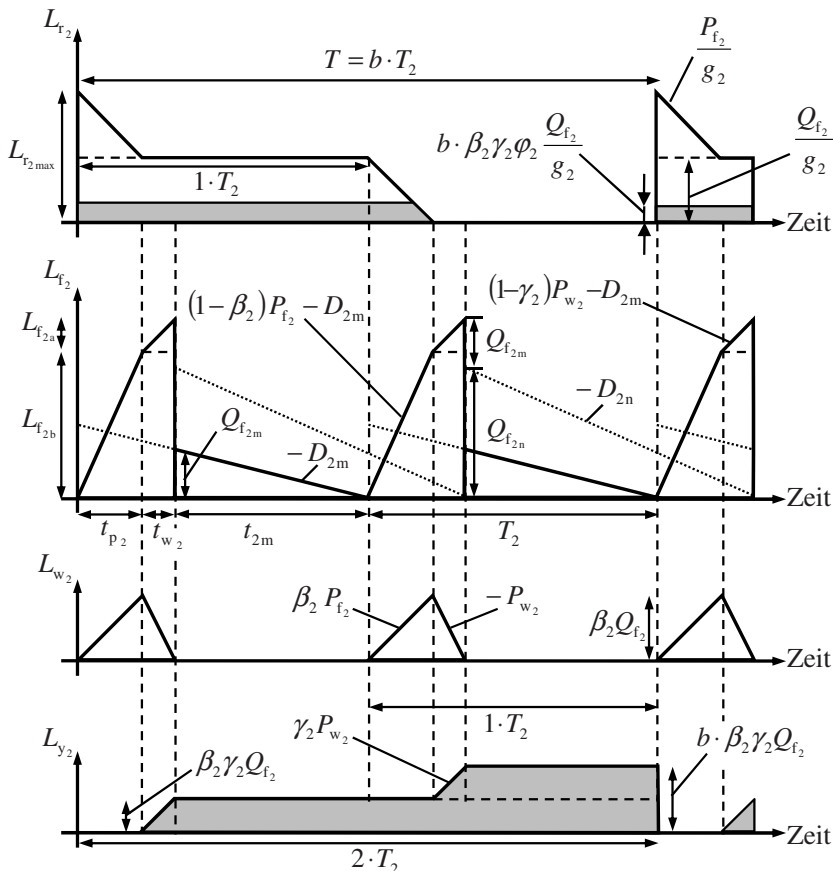


Abb. 4 Lagerbestandsverläufe in der zweiten Produktionslinie ($b = 2$).

$$t_{2m} = T_2 - t_{p_2} - t_{w_2} = \left(\frac{1 - \beta_2 \gamma_2}{D_{2m} + D_{2n}} - \frac{1}{P_{f_2}} - \frac{\beta_2}{P_{w_2}} \right) Q_{f_2} = \Delta_{2m} Q_{f_2} \quad (6)$$

Während der Produktionsphase (t_{p_2}) werden neben einwandfreien auch defekte Einheiten mit der Rate $\beta_2 P_{f_2}$ produziert. Diese Güter werden mit der Nacharbeitsgeschwindigkeit P_{w_2} während t_{w_2} wieder abgebaut. Allerdings können die Fehler nicht bei allen Erzeugnissen behoben werden, so dass durch den Ausschussanteil γ_2 schließlich $\gamma_2 \cdot \beta_2 Q_{f_2}$ endgültig nicht mehr verwendbare Einheiten pro Teilzyklus T_2 entstehen. Im Gesamtzyklus $T = b \cdot T_2$ sammeln sich so $b \cdot \beta_2 \gamma_2 Q_{f_2}$ Einheiten an Ausschussmaterial an. Das Recycling mit dem Ausbringungsfaktor φ_2 für dieses Material senkt den Anteil des komplett neu zu beschaffenden Rohstoffs um $b \cdot \beta_2 \gamma_2 \varphi_2 \frac{Q_{f_2}}{g_2}$ Einheiten.

Ähnlich zur ersten gibt es auch bei der zweiten Produktionslinie eine Mindestanforderung an die Produktionsgeschwindigkeit. Der Ansatz $T_2 \geq t_{p_2} + t_{w_2}$ führt zu

$\Delta_{2n} \geq \frac{1}{P_{f_2} + \frac{\beta_2}{P_{w_2}}}$. Diese Ungleichung muss bei der zweiten Linie erfüllt werden, um auch hier Fehlmengen zu verhindern.

Die Fixkosten verhalten sich bei der zweiten Produktionslinie analog zur ersten.

$$S_{R_2} + S_{F_2} + S_{Y_2} = \frac{S_r + bS_{f_2} + S_y}{T} \quad (7)$$

Der Verlauf des Rohstofflagerbestandes ähnelt ebenfalls dem von Linie 1. Nur die Berechnung unterscheidet sich aufgrund der abweichenden Ermittlung der Zykluszeit. Die Lagerhaltungskosten im Rohstofflager lauten

$$\begin{aligned} I_{R_2} &= \frac{h_{r_2}}{T} \left(b \cdot \frac{Q_{f_2}}{g_2} \cdot \frac{t_{p_2}}{2} + \sum_{j=1}^{b-1} j \cdot \frac{Q_{f_2}}{g_2} \cdot T_2 \right) \\ &= \frac{h_{r_2} T}{2bg_2\Delta_{2n}^2} \left[\frac{1}{P_{f_2}} + (b-1)\Delta_{2n} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Für die Berechnung der Lagerhaltungskosten für fehlerfreie Endprodukte sind drei Zeitabschnitte relevant. Zuerst steigt der Bestand während t_{p_2} um $\left(1 - \beta_2 - \frac{D_{2m}}{P_{f_2}}\right) Q_{f_2}$ Einheiten an. Dann kommen während t_{w_2} weitere $\left(1 - \gamma_2 - \frac{D_{2m}}{P_{w_2}}\right) \beta_2 Q_{f_2}$ Güter hinzu. Schließlich verbleiben $Q_{f_{2m}}$ Produkte, die während $t_{2m} = T_2 - t_{p_2} - t_{w_2}$ den Bedarf D_{2m} vom Lager aus decken. Im Endproduktlager fallen damit die folgenden Lagerhaltungskosten an:

$$\begin{aligned} I_{F_2} &= \frac{h_{f_2}}{T} b \left[\left(1 - \beta_2 - \frac{D_{2m}}{P_{f_2}}\right) Q_{f_2} \left(\frac{t_{p_2}}{2} + t_{w_2}\right) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \gamma_2 - \frac{D_{2m}}{P_{w_2}}\right) \beta_2 Q_{f_2} \frac{t_{w_2}}{2} + Q_{f_{2m}} \frac{t_{2m}}{2} \right] \\ &= \frac{h_{f_2} T}{2b\Delta_{2n}^2} \left[\left(1 - \beta_2 - \frac{D_{2m}}{P_{f_2}}\right) \left(\frac{1}{P_{f_2}} + \frac{2\beta_2}{P_{w_2}}\right) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \gamma_2 - \frac{D_{2m}}{P_{w_2}}\right) \frac{\beta_2^2}{P_{w_2}} + D_{2m}\Delta_{2m}^2 \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Der Bestand an defekten Einheiten baut sich während t_{p_2} mit der Rate $\beta_2 P_{f_2}$ auf und während t_{w_2} mit P_{w_2} wieder ab. Die Lagerhaltungskosten für defekte Einheiten sind:

$$I_{W_2} = \frac{h_{w_2}}{T} \cdot b \cdot \beta_2 Q_{f_2} \cdot \frac{t_{p_2} + t_{w_2}}{2} = \frac{\beta_2 h_{w_2} T}{2b\Delta_{2n}^2} \left(\frac{1}{P_{f_2}} + \frac{\beta_2}{P_{w_2}} \right). \quad (10)$$

Wie oben erwähnt wird das Ausschussmaterial während aller Teilzyklen gesammelt und zum Ende des Gesamtzyklus recycelt. Während eines jeden der b Teilzyklen kommen $\beta_2 \gamma_2 Q_{f_2}$ Einheiten Ausschussmaterial hinzu und werden bis zum Ende des Gesamtzyklus im Bestand gehalten. Die zugehörigen Lagerhaltungskosten lauten

$$\begin{aligned}
 I_{Y_2} &= \frac{h_{y_2}}{T} \left(\sum_{j=1}^b j \cdot \beta_2 \gamma_2 Q_{f_2} \cdot T_2 - b \cdot \beta_2 \gamma_2 Q_{f_2} \cdot \frac{t_{w_2}}{2} - b \cdot \beta_2 \gamma_2 Q_{f_2} \cdot t_{p_2} \right) \\
 &= \frac{\beta_2 \gamma_2 h_{y_2} T}{2b \Delta_{2n}^2} \left(\Delta_{2n}(b+1) - \frac{\beta_2}{P_{w_2}} - \frac{2}{P_{f_2}} \right) .
 \end{aligned} \tag{11}$$

Nach der Darstellung der einzelnen Produktionslinien erläutert der nächste Abschnitt das Gesamtmodell, mit dem beide Fertigungslinien simultan geplant werden können.

2.5 Optimierung des Gesamtsystems

Ziel dieser Arbeit ist es, die gesamten entscheidungsrelevanten Kosten des betrachteten Systems zu minimieren. Trotz der gemeinsamen bereichsübergreifenden Losgrößenplanung werden die individuellen Charakteristika der beiden Fertigungslinien berücksichtigt. Das äußert sich konkret in der unterschiedlichen Anzahl an Produktionszyklen je Linie, die sich trotz abgestimmter Beschaffungs- und Recyclingprozesse ergeben können. Allerdings sind ganzzahlige Werte für a und b bei der Lösung des Losgrößenproblems notwendig. Bei angebrochenen Teilzyklen würden in der zweiten Linie möglicherweise defekte Einheiten auf Nacharbeit warten. Zudem könnten auch die für den Werksverkauf vorgesehenen Güter nicht abgesetzt werden. Die resultierenden Restbestände im System würden sich mit jedem Zyklus weiter aufbauen. Aus diesen Gründen wird später ein Verfahren zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen für a und b vorgestellt.

Abbildung 5 zeigt die Bestandsverläufe im Gesamtsystem. L_{f_1} und L_{f_2} stellen die beiden Endproduktbestände dar, während L_r das gemeinsame Rohstofflager und L_y das gemeinsame Ausschussmateriallager zeigt. L_{w_2} bildet die defekten Güter der zweiten Linie nach der Produktion ab. Die Prozessabläufe verhalten sich wie in 2.3 und 2.4 beschrieben.

Die beiden Gesamtzyklen der beiden Produktionslinien werden gedanklich zusammengeführt. Daraus ergibt sich ein gemeinsamer Zyklus T , wobei in der ersten Linie a Produktionslose und in der zweiten Linie b Produktionslose hergestellt werden. Das Ziel besteht darin, sowohl die Gesamtzykluszeit als auch die Anzahl der Lose in den einzelnen Linien so festzulegen, dass ein Gesamtkostenminimum erreicht wird. Hierzu gilt es zunächst die Gleichungen (1), (2), (3), (4), (7), (8), (9), (10) und (11) zu der folgenden Gesamtkostenfunktion zusammenzuführen:

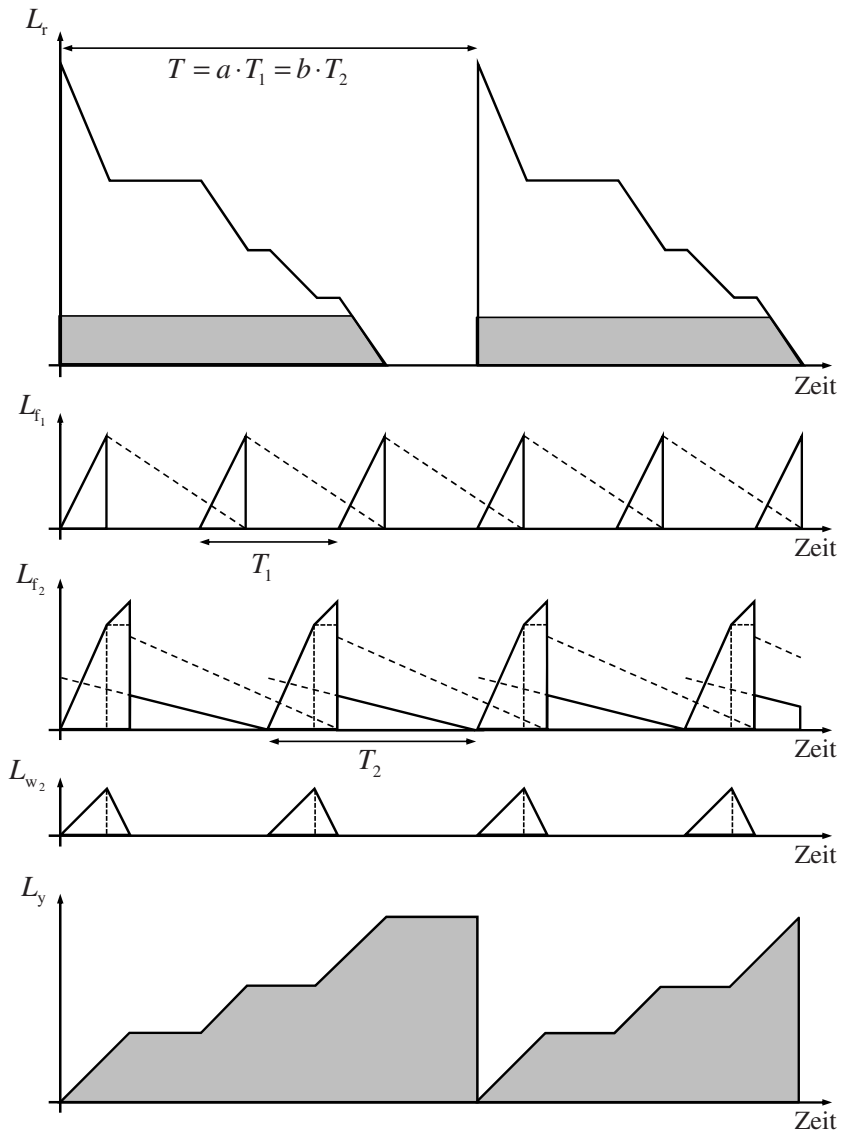


Abb. 5 Bestandsverläufe im Gesamtsystem ($a = 3, b = 2$).

$$\begin{aligned}
 K(a, b, T) &= S_R + S_{F_1} + S_{F_2} + S_Y + I_{R_1} + I_{R_2} + I_{F_1} + I_{F_2} + I_{W_2} + I_{Y_1} + I_{Y_2} \\
 &= \frac{S_r + aS_{f_1} + bS_{f_2} + S_y}{T} + \frac{h_{r_1}D_1T}{2(1-\alpha_1)^2ag_1} \left[\frac{D_1}{P_{f_1}} + (1-\alpha_1)(a-1) \right] \\
 &\quad + \frac{h_{r_2}T}{2bg_2\Delta_{2n}^2} \left[\frac{1}{P_{f_2}} + (b-1)\Delta_{2n} \right] + \frac{h_{f_1}D_1^2T}{2(1-\alpha_1)aP_{f_1}} \\
 &\quad + \frac{h_{f_2}T}{2b\Delta_{2n}^2} \left[\left(1 - \beta_2 - \frac{D_{2m}}{P_{f_2}} \right) \left(\frac{1}{P_{f_2}} + \frac{2\beta_2}{P_{w_2}} \right) + \left(1 - \gamma_2 - \frac{D_{2m}}{P_{w_2}} \right) \frac{\beta_2^2}{P_{w_2}} \right. \\
 &\quad \left. + D_{2m}\Delta_{2m}^2 \right] + \frac{\beta_2 h_{w_2} T}{2b\Delta_{2n}^2} \left(\frac{1}{P_{f_2}} + \frac{\beta_2}{P_{w_2}} \right) + \frac{\alpha_1 h_{y_1} D_1 T}{2(1-\alpha_1)^2 a} \left[(1-\alpha_1)(a+1) - \frac{D_1}{P_{f_1}} \right] \\
 &\quad + \frac{\beta_2 \gamma_2 h_{y_2} T}{2b\Delta_{2n}^2} \left(\Delta_{2n}(b+1) - \frac{\beta_2}{P_{w_2}} - \frac{2}{P_{f_2}} \right). \tag{12}
 \end{aligned}$$

Durch Nullsetzen der ersten Ableitungen und kleinerer Umstellungen ergeben sich die optimalen Systemparameter.

$$T^* = \sqrt{\frac{S_r + S_y}{\Delta_3}} \qquad a^* = \sqrt{\frac{\Delta_a(S_y + S_y)}{\Delta_3 S_{f_1}}} \qquad b^* = \sqrt{\frac{\Delta_b(S_y + S_y)}{\Delta_3 S_{f_2}}}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_a &= \frac{h_{r_1}D_1}{2(1-\alpha_1)^2g_1} \left(\frac{D_1}{P_{f_1}} - 1 + \alpha_1 \right) + \frac{\alpha_1 h_{y_1} D_1}{2(1-\alpha_1)^2} \left[1 - \alpha_1 - \frac{D_1}{P_{f_1}} \right] \\
 &\quad + \frac{h_{f_1}D_1^2}{2(1-\alpha_1)P_{f_1}} \tag{13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_b &= \frac{h_{r_2}}{2g_2\Delta_{2n}^2} \left(\frac{1}{P_{f_2}} - \Delta_{2n} \right) + \frac{\beta_2 h_{w_2}}{2\Delta_{2n}^2} \left(\frac{1}{P_{f_2}} + \frac{\beta_2}{P_{w_2}} \right) + \frac{\beta_2 \gamma_2 h_{y_2}}{2\Delta_{2n}^2} \\
 &\quad \left(\Delta_{2n} - \frac{2}{P_{f_2}} - \frac{\beta_2}{P_{w_2}} \right) + \frac{h_{f_2}}{2\Delta_{2n}^2} \left[\left(1 - \beta_2 - \frac{D_{2m}}{P_{f_2}} \right) \left(\frac{1}{P_{f_2}} + \frac{2\beta_2}{P_{w_2}} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \left(1 - \gamma_2 - \frac{D_{2m}}{P_{w_2}} \right) \frac{\beta_2^2}{P_{w_2}} + D_{2m}\Delta_{2m}^2 \right] \tag{14}
 \end{aligned}$$

$$\Delta_3 = \frac{h_{r_1}D_1}{2(1-\alpha_1)g_1} + \frac{h_{r_2}}{2g_2\Delta_{2n}} + \frac{\alpha_1 h_{y_1} D_1}{2(1-\alpha_1)} + \frac{\beta_2 \gamma_2 h_{y_2}}{2\Delta_{2n}} \tag{15}$$

Allerdings müssen die Ergebnisse für a und b ganzzahlige Werte sein. Ein Vergleich aller Kombinationen der auf- bzw. abgerundeten Werte von a und b garantiert dabei noch keine optimale Gesamtlösung. Wie sich einfach zeigen lässt, ist $K(a, b, T)$ jeweils konvex bezüglich a , b und bezüglich T . Dies gilt jedoch nicht für alle Variablen zusammen. Aus diesem Grund wird ein Branch-and-Bound-Verfahren zur Bestimmung der Optimallösung vorgeschlagen [4]. Für die Anwendung des Verfahrens sind zuerst einige Voraussetzungen zu schaffen. Durch Nullsetzen der ersten Ableitungen von $K(a, b, T)$ nach a und b und kleinen Umformungen

ergeben sich folgende Ausdrücke.

$$a(T) = T \sqrt{\frac{\Delta_a}{S_{f_1}}} \quad b(T) = T \sqrt{\frac{\Delta_b}{S_{f_2}}}$$

Werden diese beiden Formeln in die mit null gleichgesetzte erste Ableitung von $K(a, b, T)$ nach T eingesetzt, ergibt sich

$$T(a, b) = \sqrt{\frac{S_r + S_y + aS_{f_1} + bS_{f_2}}{\Delta_3 + \frac{\Delta_a}{a} + \frac{\Delta_b}{b}}}$$

Weiterhin führt das Einsetzen von $a(T)$ und $b(T)$ in $K(a, b, T)$ zu

$$K(T) = 2 \left(\sqrt{\Delta_a S_{f_1}} + \sqrt{\Delta_b S_{f_2}} \right) + \Delta_3 T + \frac{S_r + S_y}{T} \quad (16)$$

Mit dem Umstellen von $K(T)$ nach T kann durch Ausnutzen der Konvexität von $K(T)$ die Zykluszeit T für einen festen Wert K^O auf den Bereich

$$T^O = [\omega_1 - \omega_2; \omega_1 + \omega_2] \quad (17)$$

$$\text{mit } \omega_1 = \frac{\frac{K^O}{2} - \sqrt{\Delta_a S_{f_1}} - \sqrt{\Delta_b S_{f_2}}}{\Delta_3} \text{ und } \omega_2 = \sqrt{\omega_1^2 - \frac{S_r + S_y}{\Delta_3}} \quad (18)$$

beschränkt werden. Anhand dieser beiden Grenzen für T^* werden die unteren und oberen Grenzen von a und b durch $\lfloor a(T = \omega_1 - \omega_2) \rfloor$ und $\lceil a(T = \omega_1 + \omega_2) \rceil$ ermittelt (analog für b).

Das Branch-and-Bound-Verfahren geht nun wie folgt vor. Die ermittelte optimale Lösung wird für a^* und b^* auf die naheliegendsten ganzzahligen Werte gerundet (a^g, b^g) und mit $T(a, b)$ die entsprechende Zykluszeit berechnet. Anhand dieser drei Werte können die Gesamtkosten nach oben beschränkt werden $K^O = K(a^g, b^g, T(a^g, b^g))$. Mit Hilfe dieses Wertes K^O werden die untere $T_u^* = \omega_1 - \omega_2$ und die obere Grenze $T_o^* = \omega_1 + \omega_2$ von T^* festgelegt. Diese Grenzen geben den Bereich für die optimalen Werte für a und b vor.

$$\begin{aligned} a_u &= \lfloor a(T = \omega_1 - \omega_2) \rfloor & a_o &= \lceil a(T = \omega_1 + \omega_2) \rceil \\ b_u &= \lfloor b(T = \omega_1 - \omega_2) \rfloor & b_o &= \lceil b(T = \omega_1 + \omega_2) \rceil \end{aligned} \quad (19)$$

Die optimale Lösung ist nun diejenige Kombination der ganzzahligen Werte von a und b , die zu minimalen Gesamtkosten $K(a, b, T(a, b))$ führt. Dabei ist zu beachten, dass T für jede Kombination von a und b mittels $T(a, b)$ angepasst werden muss.

Das folgende Zahlenbeispiel (vgl. Tabelle 2) soll das vorgestellte Modell und den vorgeschlagenen Lösungsweg veranschaulichen. Aufgrund der Daten ergeben sich die Werte

$$T^* = 0,502 \text{ [ZE]} \quad a^* = 6,118 \quad b^* = 8,423$$

Tabelle 2 Parameterwerte für das Zahlenbeispiel.

$D_1 = 90.000 \left[\frac{\text{ME}}{\text{ZE}} \right]$	$P_{f_1} = 150.000 \left[\frac{\text{ME}}{\text{ZE}} \right]$	$\alpha_1 = 10\%$	$S_{f_1} = 200 [\text{GE}]$
$D_{2m} = 10.000 \left[\frac{\text{ME}}{\text{ZE}} \right]$	$P_{f_2} = 120.000 \left[\frac{\text{ME}}{\text{ZE}} \right]$	$\beta_2 = 15\%$	$S_{f_2} = 300 [\text{GE}]$
$D_{2n} = 70.000 \left[\frac{\text{ME}}{\text{ZE}} \right]$	$P_{w_2} = 50.000 \left[\frac{\text{ME}}{\text{ZE}} \right]$	$\gamma_2 = 12\%$	$S_r = 1500 [\text{GE}]$
$h_{r_1} = 0,6 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$	$h_{y_1} = 0,2 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$	$\varphi_1 = 98\%$	$S_y = 500 [\text{GE}]$
$h_{r_2} = 0,6 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$	$h_{y_2} = 0,4 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$	$\varphi_2 = 97\%$	
$h_{f_1} = 1 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$	$h_{w_2} = 2 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$	$g_1 = 17$	
$h_{f_2} = 2 \left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$		$g_2 = 5$	

und damit der Startpunkt für das Lösungsverfahren

$$K(a = 6, b = 8, T(a = 6, b = 8) = 0,489) = 22.930 [\text{GE}/\text{ZE}] = K^O .$$

Durch K^O wird T^* auf den Bereich

$$T^O = [0,483; 0,522] [\text{ZE}]$$

eingegrenzt. Mit den Formeln (19) ergeben sich die Grenzen des optimalen Bereichs für a und b wie folgt.

$$a_u = 5 \quad a_o = 7 \quad b_u = 8 \quad b_o = 9$$

Den Kostenvergleich der Kombinationen der resultierenden Werte für a und b zeigt Tabelle 3. Es ist ersichtlich, dass $a^{*g} = 6$ und $b^{*g} = 8$ mit $T^* = 0,488 [\text{ZE}]$ die

Tabelle 3 Ermittlung der optimalen ganzzahligen Lösung.

a	b	$T(a,b)$	$T(a,b) \in T^O$	$K(a,b,T(a,b))$	$K(a,b,T(a,b)) \leq K^O$
5	8	0,470	nein	22.988	nein
5	9	0,495	ja	23.044	nein
6	8	0,488	ja	22.930	ja
6	9	0,514	ja	22.940	nein
7	8	0,505	ja	22.981	nein
7	9	0,532	nein	22.952	nein

minimalen Gesamtkosten von $K^* = 22.930 [\text{GE}/\text{ZE}]$ ergeben. In diesem Beispiel entspricht damit die Anfangslösung gleichzeitig der Optimallösung. Daraus ergeben sich die Losgrößen in Linie 1 und 2 von

$$Q_{f_1}^* = \frac{D_1 T^*}{a^{*g}(1 - \alpha_1)} = 8.141 [\text{ME}] \text{ und } Q_{f_2} = \frac{T}{b \Delta_{2n}} = 4.974 [\text{ME}]$$

sowie die Rohstofflosgröße

$$Q_r = a^{*g} \frac{Q_{f_1}^*}{g_1} + b^{*g} \frac{Q_{f_2}^*}{g_2} = 10.831 \text{ [ME]}$$

wovon allerdings nur

$$a(1 - \alpha_1 \varphi_1) \frac{Q_{f_1}^*}{g_1} + b(1 - \beta_2 \gamma_2 \varphi_2) \frac{Q_{f_2}^*}{g_2} = 10.411 \text{ [ME]}$$

für jeden Gesamtzyklus neu zu beschaffen sind (alle Losgrößenangaben sind gerundete Werte).

Zum Vergleich ergeben sich bei separater Planung für Produktionslinie 1

$$a_{\text{sep}}^{*g} = 11, T^*(a_{\text{sep}}^{*g}) = 0,891 \text{ [ZE]} \text{ und } K_1^* = 9.586 \text{ [GE/ZE]}$$

und für Linie 2

$$b_{\text{sep}}^{*g} = 10, T^*(b_{\text{sep}}^{*g}) = 0,606 \text{ [ZE]} \text{ und } K_2^* = 16.514 \text{ [GE/ZE]} .$$

Die Gesamtkosten betragen bei separater Planung 26.101 [GE/ZE] und liegen damit im Beispiel 3.171 [GE/ZE] oder knapp 14% über denjenigen bei gemeinsamer Planung.

3 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat aufgezeigt, auf welche Art deutliche Kosteneinsparungen durch bereichsübergreifende Koordination zu realisieren sind. Dabei wurden zwei Produktionslinien mit unterschiedlichen Prozessabläufen und unterschiedlichen Vertriebsprozessen zu einem Gesamtsystem zusammengefasst. Die Basis bildete eine Fertigungslosgrößenplanung, die explizit die Entstehung fehlerhafter Güter berücksichtigt, die Methoden der Qualitätssicherung wahrnimmt und konsequent den Kreislaufwirtschaftsansatz verfolgt. Die Gesamtplanung setzt bei der gemeinsamen Beschaffung des Produktionsrohstoffes an. Innerhalb des Gesamtzyklus können beide Produktionslinien gemäß ihren Spezifikationen individuell gefahren werden. Schließlich bildet das Recycling den Abschluss des gemeinsamen Gesamtzyklus und sichert durch die Wiederverwendung des Rohstoffs eine möglichst hohe Prozessausbeute.

Die Betrachtung dieses Modells bezieht sich explizit nur auf die Koordination von Bereichen innerhalb eines Unternehmens. Ähnliche Ansätze sind durchaus auch zwischen Produktionsbereichen unterschiedlicher Unternehmen denkbar. Dort sollte allerdings den zu berücksichtigenden Transportvorgängen zwischen den Standorten Rechnung getragen werden. Weiterhin können dann auch die zugrunde liegenden Anreizsituationen der beteiligten Akteure näher analysiert werden (vgl. [1]).

Literaturverzeichnis

1. Banerjee, A.: A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. *Decision Sciences* 17(3) (1986) 292–311
2. Ben-Daya, M., Rahim, A.: Multi-stage lot sizing models with imperfect processes and inspection errors. *Production Planning & Control* 10(2) (1999) 118–126
3. Biswas, P., Sarker, B.R.: Optimal batch quantity models for a lean production system with in-cycle rework and scrap. *International Journal of Production Research* 46(23) (2008) 6585–6610
4. Buscher, U., Rudert, S., Schwarz, C.: A note on: An optimal batch size for an imperfect production system with quality assurance and rework. *International Journal of Production Research*, to appear (2009).
5. Chan, W.M., Ibrahim, R.N., Lochert, P.B.: A new EPQ model: integrating lower pricing, rework and reject situations. *Production Planning & Control* 14(7) (2003) 588–595
6. Chiu, S.W.: Production lot size problem with failure in repair and backlogging derived without derivatives. *European Journal of Operational Research* 188(2) (2008) 610–615
7. Hayek, P.A., Salameh, M.K.: Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced. *Production Planning & Control* 12(6) (2001) 584–590
8. Joglekar, P., Tharthare, S.: The individually responsible and rational decision approach to economic lot sizes for one vendor and many purchasers. *Decision Sciences* 21(3) (1990) 492–506
9. Minner, S., Lindner, G.: Lot Sizing Decisions in Product Recovery Management. In: Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., v. Wassenhove, L.N. (Eds.): *Reverse Logistics*. Springer, Berlin, (2004) 157–180
10. Nebl, T.: *Produktionswirtschaft*. 6. Aufl., Oldenbourg, München (2007)
11. Ojha, D., Sarker, B.R., Biswas, P.: An optimal batch size for an imperfect production system with quality assurance and rework. *International Journal of Production Research* 45(14) (2007) 3191–3214
12. Pagell, M., Wu, Z., Murthy, N.N.: The supply chain implications of recycling. *Business Horizons* 50(2) (2007) 133–143
13. Papachristos, P., Konstantaras, I.: Economic ordering quantity models for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics* 100(1) (2006) 148–154
14. Rosenblatt, M.J., Lee, H.L.: Economic production cycles with imperfect production processes. *IIE Transactions* 18 (1986) 48–55
15. Salameh, M.K., Jaber, M.Y.: Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics* 64(1–3) (2000) 59–64
16. Sarker, B.R., Jamal, A.M.M., Mondal, S.: Optimal batch sizing in a multi-stage production system with rework consideration. *European Journal of Operational Research* 184(3) (2008) 915–929
17. Sarker, R.A., Khan, L.R.: An optimal batch size for a production system operating under periodic delivery policy. *Computers & Industrial Engineering* 37(4) (1999) 711–730
18. Silver, E.A.: Establishing the reorder quantity when the amount received is uncertain. *INFOR* 14(1) (1976) 32–39
19. Tripathy, P., Wee, W.M., Majhi, P.: An EOQ model with process reliability considerations. *Journal of the Operational Research Society* 54 (2003) 549–554
20. Yano, C.A., Lee, H.L.: Lot sizing with random yields: A review. *Operations Research* 43(2) (1995) 311–334

An Integrated Framework for Bus Logistics Management: Case Studies

József Békési, Andrej Brodnik, Miklós Krész, and David Pash

Abstract This paper describes the most obvious way for public transportation companies to decrease their operational cost. This is to optimize the logistics of their operations. The optimization process is a very complex operation and therefore we split the logistics into three phases: vehicle scheduling, driver scheduling and driver rostering. The phases reflect also the split of a large problem (long term optimization) to the daily operation and finally to individual trips. The individual trips are then grouped into working shifts and to these are scheduled individual drivers. In the paper we present a detail description of bus scheduling. We use its mapping to the multiple depot vehicle scheduling problem (MDVSP) using a time-space network model. Finally, we solve the problem for two different cases – the city of Szeged and the city of Ljubljana.

1 Introduction

The largest expenses of public transportation companies are operational costs which include costs of bus fleet, gasoline and maintenance of the fleet, and salaries for the drivers. Therefore, the reduction in operational costs represents a big improvement in their OPEX. One of the most common ways to reduce the cost is the introduction of an efficient computer supported integrated information system.

Due to the development of ICT (information and communication technology) nowadays a bus company has its own information system, ensuring a modern business engineering environment. The main functions of these systems are, besides

József Békési · Miklós Krész

Institute of Applied Sciences, University of Szeged, H-6701 Szeged, POB 396, HUNGARY

E-mail: {bekesi, kresz}@jgypk.u-szeged.hu

Andrej Brodnik · David Pash

University of Primorska, PINT, Muzejski trg 2, Koper, SLOVENIA

E-mail: {andrej.brodnik, david.pas}@upr.si

business applications like accounting etc., preparing bus schedules for lines served by the company, scheduling buses and drivers to serve the lines, tracking and monitoring of the bus fleet during the day and notifying the dispatcher in case of unusual events, tracking the mechanical performance of buses in a fleet and similar.

Nevertheless, ICT environment is a basic background for the efficient logistic management (e.g., [18]), but the second step is to discover the parts in the system which can be optimized with respect to operational costs. There already are several commercial decision support tools like IVU Microbus, INIT initplan, and M.A.I.O.R. that aim to be a complete solution for the planning and optimization of the logistic system. In practice, however, it turns out that there are several company-specific constraints which need to be met to make the computed results useful, and these constraints cannot be tackled by the off-the-shelf systems. A typical example for the above situation is that most of the buses in Szeged urban transportation (especially buses running on natural gas) must be refuelled during the day which must be taken into account by the scheduling software to create reasonable vehicle schedules and assignments.

Following the general method of the development of a bus operation service, the main elements of a system are: bus routing, timetabling, scheduling of buses and scheduling the drivers. The bus routing is usually defined by the city and the bus companies usually have only a minor possibility to influence it. Furthermore, cities usually define the frequency (or capacity) of buses riding each line and the bus companies have minor influence here as well. On the other hand, it is completely up to the companies to schedule their fleet of buses and roster of their drivers.

Setting the mentioned elements represents one huge entwined problem requiring a global optimization. However, such an approach is completely unfeasible and hence we split it into sub-problems (see Figure 1), which are isolated enough, so

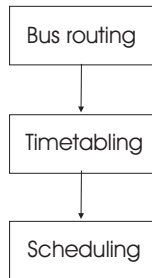


Fig. 1 Stages of transport operations planning and scheduling.

that we can tackle them in practice. Still, however, the planners and schedulers do make changes back and forth among the tasks to find a globally optimized solution.

In this study we mostly concentrate on the scheduling of a bus fleet, although we also describe the general structure of the bus logistics management systems. Furthermore, based on the experimental results, we provide the necessary support

for decision making on the other aspects of the system – driver scheduling and driver rostering. The reason for giving a detailed insight into the bus scheduling only is twofold. On the one hand the management system is already established and it is used by the companies (dusty deck problem), and we can only upgrade module by module. This also provides us an opportunity to apply our results immediately to two practical case studies in two different cities. On the other hand vehicle scheduling is appropriate to serve as a proof of our concept for the presented flexible system.

Several decades ago the scientific community recognized that the optimization of the above problems are challenging and exciting tasks. Several results have been achieved [4, 3, 6, 8, 16, 7, 5], concerning the model and the algorithms. It turned out that most of the subproblems are NP-hard, which makes it difficult to find an exact or a nearly optimum solution for larger problems. However, even in a middle sized city (few hundred thousand population), the problem is quite complex.

The problem is even more complex if we consider all constraints originating from legislation, union agreements, personnel requests, and other practical issues. To avoid this additional complexity we developed a highly modular system or better a framework which permits us the inclusion of the above mentioned requirements as necessary.

Consequently, since a general framework for bus logistics management is difficult to describe because the companies and their activities differ significantly, we decided to investigate two quite different cases. Hence, the main goal of this paper is to present our experience through the case studies, which aspects are important in forming such an integrated environment, and also present how the mathematical results can be applied. The cases we choose are: Szeged¹ and Ljubljana². Both cities are middle sized cities, although Ljubljana has almost 300 thousand inhabitants, while Szeged has 160 thousand inhabitants. Furthermore, since the two cities are in different countries, we could investigate the general aspects of the problem, avoiding the situation that the developed system to have too many national aspects.

The structure of the paper is the following: first we describe a scheduling system for public transportation companies in greater detail. Next, we introduce the model in which we will solve the problem and also present related theoretical problems and subsequently, we describe how our solution fits into a general framework for bus logistics management. The last two sections present the practical results from the two case studies and give conclusions.

2 Scheduling Systems for Public Transportation

Scheduling in public transport is a complex task, as it was outlined in the previous section. Considering the problem from the operational point of view, theoretically a global optimum is expected, which reduces the operational cost induced by both

¹ www.szeged.hu

² www.ljubljana.si

vehicle operations and personnel scheduling. As the above-mentioned cost types influence each other (more efficient vehicle scheduling may increase the personnel costs) newer approaches suggest a combined model that tries to solve the vehicle and driver scheduling simultaneously (see, e.g., [24, 5]). These models, however, are still under research and have at least two drawbacks which are unacceptable from a practical point of view. The more severe one is their computational complexity which does not permit an interactive planning process. The other one is a universality of so far studied combined models. They support only a few general constraints for driver scheduling (e.g., modeling of time for a meal break), which is far from being sufficient. In practice several specific constraints need to be considered, like the type of the breaks might depend on the executed working hours, the physical location, or the structure of the particular schedule.

The above reasons convinced us to follow a more classical approach where the vehicle and personnel scheduling are treated separately. Moreover, in the design of personnel scheduling we distinguish two phases: driver scheduling and driver rostering. The difference between the above subproblems is the following.

A *driver schedule* is a collection of the duties of one driver for a given period (typically for one day) such that all the personnel rules concerning the given period are satisfied. Typical rules are breaks after a prescribed time, constraint for the daily working hours etc. However, the constructed driver schedules are assigned to particular drivers in the rostering phase only, when the duties of each driver are obtained as a collection of driver schedules. *Driver rostering* generally concerns a longer period, typically several weeks. In the rostering phase, all the rules regarding the given longer period are considered, such as weekly rest day, rest period between daily schedules etc.

The main reason of the above grouping of optimization subtasks is that these subproblems are more tractable separately, meaning that mathematical modeling can be better captured and the solution algorithms are more efficient. Now we shortly describe the above subproblems and also summarize which aspects are considered in the scientific papers and which further aspects are significant in a practical logistic environment.

- *Vehicle scheduling*: The vehicle scheduling problem consists of scheduling a fleet of vehicles to cover a set of tasks at minimum cost. The tasks are given by prescribed time intervals and vehicles are supplied by different depots. The problem is to minimize the total cost induced by the number of vehicles used and by the vehicle travel (timetabled and deadhead trips) length. There are several mathematical models for this problem. The most widely used ones are when the problem is formulated as an integer multi-commodity network flow model [4, 16, 12, 5]. In this model the optimal schedule is computed by solving a linear integer programming problem. There exist other formulations, too, e.g., the set covering formulation (see [22, 10]). The disadvantage of the models applied in the literature is that only those rules are considered which relate to the timetabled trips, such as the required bus type or bus capacity. However, it is not possible with the above techniques to handle vehicle specific restrictions coming from real-world applications. Typical vehicle specific constraints in transportation

logistics are refueling requirements, different maintenance regulations (weekly, monthly etc.) or parking rules (the possible parking places depend on the particular parking length etc.).

- *Driver scheduling:* In driver scheduling there is a set of operational tasks and the aim is to define the sequence of these tasks as shifts in such a way that every task must be assigned to a shift while minimizing the cost. There are many constraints depending on the transportation company and the relevant laws such as maximum number of working hours, length of the daily break, number and length of short breaks, etc. Since the costs of the tasks can be weighted according to the respective payment, shift-costs can be calculated. Therefore, the objective of driver scheduling is minimizing the complete cost of the scheduled shifts. The most favorite approaches are set partitioning and set covering as relaxation of the problem. There are two ways of producing a solution: constructing one solution guided by the constraints [8] or to generate a large set of candidate shifts and choose the best one [14]. Many types of algorithm are used to solve the problem, e.g., integer linear programming [25], evolutionary algorithm [14] or fuzzy method [15]. Nevertheless, different companies have different driver scheduling policies, like rules concerning the possible locations for changing drivers (relief points) etc. Because of these differences and the high number of hard constraints, most solution methods deal with only a few basic constraints, such as maximum working hours or handling some short and a long (meal) break. But in real-life case, the schedule of breaks is not so simple: the number of the breaks may depend on the length of the shift, there might be a high variation in the length of the different break-types or there are special places where the breaks must be passed. Moreover there are bounds for not even working time, but driving time and other prescribed activities (see [9]).
- *Driver rostering:* In driver rostering there is a set of daily shifts as the output of the driver scheduling and a set of drivers. The method produces an assignment of the persons to the shifts for a planning period: several days, weeks, months or even a year. Generally there are usually some standard constraints such as the maximum number of working hours per week or the minimum number of days off but these can be totally different in different crew scheduling areas (airline, train, urban transport, nurse etc.). Nevertheless, usually many special local constraints are also applied, such as there must be at least one Sunday as day off or there are several types of driving license depending on the bus-types used. The cost of an assignment highly depends on the control “philosophy” of transportation company, typically it contains many components. The objectives can be the number of drivers to be minimized, the number of buses used by a single driver to be minimized, or the difference of the average working hours and the stated working hours in the contract (overtime, undertime) to be minimized, etc. By this reason, some methods are based on multi-objective rostering [20]. Since the main problem is a general assignment, there are many general approaches for crew scheduling: e.g., multicommodity flow [6], constraint logic programming [26] or evolutionary method [20].

Considering the above subproblems, we can conclude that several options are possible for designing the structure of a scheduling system. There are two main questions which are important from the point of view of this structure:

- The “border” between the rules of driver scheduling and rostering: The main principle is that the personnel regulations prescribed during a daily shift are considered in driver scheduling, while other rules are the constraints of driver rostering. Nevertheless, by the above approach, in theory we may obtain a structure of daily schedules which cannot be assigned to the crew in a feasible fashion. In practice, this worry is realistic only in the case of smaller companies, like the urban transportation of smaller cities (with population significantly below 100 thousand), because the smaller combination possibilities may cause assignment problems in a predetermined schedule structure. However, in this case the problem size is much smaller, which makes it possible to consider driver scheduling for week periods, reducing the risk of infeasibility. Therefore, a compromise can be made by a quite simple methodology.
- The order between the driver scheduling and personnel scheduling: Since the vehicle duties are prescribed by the timetable, it is quite a natural way to find an optimal vehicle scheduling in the first phase, then the drivers are assigned to the vehicles in such a way that – allowing vehicle exchanges during the shift – all the personnel rules are satisfied. According to the logistic paradigm, the above methodology is efficient, but takes robust computational optimization background. Therefore, in practice, where the computational support does not include optimization tools, the engineering “heuristics” as a first step construct driver schedules for the timetable with taking into consideration the personnel rules, then appropriate vehicles are assigned to the driver schedules. The advantage of this latter approach is that the problem complexity is significantly reduced, since vehicle exchange is not allowed during the shifts. However, as a quite disadvantageous aspect the above reduction might result in schedules with higher costs. (Typically the number of buses used in a single day is significantly higher). Therefore, an optimization-oriented automatic scheduling system is supposed to follow the principle of starting with vehicle scheduling.

Summarizing the above facts, considering both the practical and theoretical (mathematical modelling, etc.) aspects for designing a well-established scheduling system, the general view of the structure is represented in Figure 2.

A typical action for a scheduling system is applied for a longer period (several weeks or months). Therefore, the stream in the process represented in Figure 2 is considered in a way that vehicle scheduling and driver scheduling are repeated for each day of the particular period and a phase of driver rostering is applied for a related scheduling term prescribed by general or local rules. Nevertheless, as it was mentioned earlier, in (theoretical) vehicle scheduling several important practical aspects cannot be modeled. In the following we present how we modified this structure in order for these aspects considered.

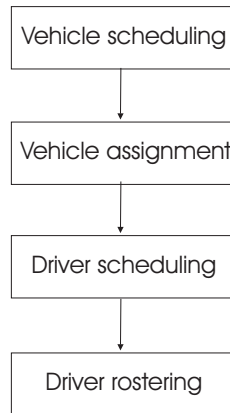


Fig. 2 Structure of the scheduling system.

Based on the above observations, our scheduling system consists of four modules: vehicle scheduler, vehicle assignment, driver scheduler, driver rostering. Below we summarize the tasks of each module.

Vehicle scheduler: In this module, the classical vehicle scheduling problem is solved for each day of the considered period. The vehicles are grouped into depots according to their characteristics and/or their location. The number of available buses provides a constraint for each depot. The buses in the same depot are considered identical with respect to their general and operational costs, and for each trip it is prescribed which depots can serve it. Using the above data, the algorithm gives an optimal solution with respect to the sum of the costs such that all the trips are accomplished. The result of this module is a set of vehicle schedules, such that each schedule is labeled with a depot and it consists of trips which can be served from that particular depot. However, no real vehicles are assigned to the schedules and the duties concerning real vehicles (fueling, maintenances, parking) are not contained in the schedules. As a solution methodology, we apply a time-space network model [12] which is a modern approach in the classical multi depot vehicle scheduling problems.

Vehicle assignment: Making use of the schedules of the previous phase, this module is responsible for a real-life daily schedule of the given vehicle set such that all the vehicle-specific demands (refuelling, parking, maintenances) are satisfied. In this approach we apply an assignment model [1] in which both the matching between the schedules and vehicles are executed and the vehicle-dependent duties are inserted into the schedules in a simultaneous fashion. The feasibility depends on both the allowed schedule-vehicle assignments (e.g., vehicle-schedule pairs must have the same depot property) and the realizable vehicle-duties (e.g., the number of vehicles at a filling station in a given time-window cannot exceed the station capacity). The complexity of the above problem is arising from the simultaneous

approach, but a sequential solution of these two subproblems might result in an infeasible situation.

Driver scheduler: In this part, the input data come from the vehicle scheduler and vehicle assignment modules. The aim is to partition these tasks into sets for a single day such that these sets satisfy all the constraints induced by the daily rules. The main considered daily rules are the following: upper bounds for driving time, for the working time and for the length of the shifts. Moreover, there must be required number and length of breaks in a scheduled time-window and all prescribed activities (administration, maintenance, etc.) are included. The aim of the optimization is to minimize the total cost of the shifts. This cost also can be quite different depending on the company. Basic claim is to minimize the number of shifts, but even the cost of a single shift might be weighted by the length of the working hours, the length and position of the inactive periods and the type of the activities. Methodologically we apply a new approach [11] in which an initial semi-solution is constructed by an adaptation of the time-space network model for drivers, then by a heuristic we iteratively cut-and-match the solutions with respect to work units, resulting a gradually improved result according to a cost function based on the proportion of active and inactive time shifts.

Driver rostering: In this phase the aim is to assign real drivers to the constructed shifts for a planning period (some days, weeks, months) fulfilling the rules and minimizing the total cost. The constraints can be also quite different by customers, but usually they apply the rest days, number of working hours and number of hours between two consecutive shifts. Of course, there can be local rules, e.g., one rest day must be a Sunday. Another difficult problem is the “human-depot” which means that a driver can be assigned to a task if he has the suitable driving license concerning that vehicle. A shift, coming from the driver scheduler module is “labeled” by the set of the driving licenses expected from the assigned person. The main goal is to minimize the number of required drivers, but the cost may also contain the penalized number of overtime and undertime hours. Since driver rostering is not a bus driver specific problem, we use classical approaches from the rostering literature.

In this paper we present a detailed description of the vehicle scheduler module and its application experience in two middle-size cities. Therefore, the case study objective of our paper is twofold: On the one hand, through the vehicle scheduler module, we present our development approach for the integration of theoretical results in real-life information technology environment in urban transportation logistic management. On the other hand we analyze the usage of our system in two similar size cities with different operational environment (different countries, differences in current logistic approaches in everyday operation).

Finally, with the help of the vehicle scheduler module, we also present the high modularity of our system. We will review how the modules can be applied separately in the operation management process, and as a third “case study” give a detailed methodology for the use of vehicle scheduling in decision support.

3 The Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem

In this section we present the mathematical model applied in the vehicle scheduler module. Since in the general case, based on the special demands of the timetabled trips and the physical locations of the buses, the vehicles are separated into depots in a natural way, we concentrate on the multi depot problem.

The Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem was defined by Bodin et al. [4] and was shown to be NP-hard by Bertossi et al. [3]. The model represents the most important components of the real-world problem. Our terminology follows the terminology used by Löbel [16]. The two most important components are the set of *timetabled trips* and the set of *vehicles*. We call timetabled trips those ones, when the vehicles carry passengers. All trips are represented by their departure and arrival time, stations, and their distance. The set of available vehicles can be classified by their location, i.e., the garage where the vehicles are parked. The vehicles may have some other specific properties, e. g., low-floor, double-decked, etc. This allows us to make further classification on the set of vehicles. Based on these properties and the physical locations we can make several subsets of the vehicles, which are called *depots*.

In addition to the timetabled trips, the vehicles have to execute other kind of trips. For example, they have to travel from the parking place to the starting station of their first trip. In this case they do not carry passengers and so we distinguish this kind of trips from the timetabled trips. We call them *deadhead trips*. Typical deadhead trips are the ones when a vehicle travels from or to its parking place, these are called *pull-out* and *pull-in* trips, respectively. More deadhead trips are possible, for example when a vehicle changes the station after executing a trip, in order to work more efficiently.

For each timetabled trip the user specify the set of depots, from which it can be executed. In practice this means, e.g., that certain trips can only be executed by double-decked vehicles from given garages. These kinds of conditions are very reasonable, taking into account the garage and station locations and traffic characteristics.

We can define some relation between the timetabled trips. We say that two trips are *compatible*, if the vehicle is able to arrive in time to the location of the second trip after executing the first one. If the arrival station of the first trip is the same as the departure station of the second one, then the only condition of the compatibility is that the arrival time of the first trip is smaller or equal than the departure time of the second trip. Otherwise we have to take into account the time of the deadhead trip between the stations. We assume that the pull-out and pull-in trips are always compatible. We have already used the term vehicle schedule, but now we can give a more precise definition. A *vehicle schedule* is a chain of trips, where each timetabled trip is compatible with the next one. Usually in practice a vehicle schedule represents a daily work of a vehicle. The first trip of a valid vehicle schedule should be always a pull-out trip and the last one should be a pull-in trip. Other deadhead trips may occur between the timetabled trips.

The basic *multiple depot vehicle scheduling problem* (MDVSP) is to construct the minimal number of vehicle schedules in such a way, that each trip is assigned to exactly one schedule and all trips in a given schedule can be executed from a given depot. Instead of minimizing the number of vehicles it is possible to define a cost function and minimize it. The cost function should represent the total cost of the schedule. In this latter case, we can distinguish for each depot a *vehicle general cost* (cost arisen from the “existence” of an average vehicle of the given depot) and a *vehicle operational cost* (cost proportional to the traveled distance). Moreover, the presented models are capable to handle “depot capacity constraints”, i.e., the solution takes into consideration the maximum number of available vehicles in each depot. Though the developed system uses the above extensions in the optimization, for simplicity we omit them in the description of the models.

In the following we are presenting two solution techniques for the MDVSP. Both of them transform it to a multicommodity flow minimization problem and solve it as an IP problem. The difference between them is the construction method of the basis network. The models are called connection based and time space network models. There exist other formulations as well, e.g., set covering formulation (see, e.g., [22, 10, 5]), but we do not deal with them here.

The Connection-Based Multicommodity Network Flow Model

This model has been widely used to solve the problem and a lot of research has been focused on this technique. Researchers mainly dealt with the improvement of the solution methods for the IP problem and with different formulations. Some approaches are based on heuristic methods (see [16, 7, 19]), others deal with exact algorithms (see [13, 17]). Several heuristic approaches are investigated and compared by Pepin et al. [21].

To describe the model, we introduce some notations. Let D denote the set of depots and T the set of trips. For each $t \in T$ denote by $d(t)$ and $a(t)$ the departure and arrival time of t , respectively. Denote by $g(t) \subseteq D$ the depot set of t , which means that only a depot from this set is allowed to service trip t . Let $T_d \subseteq T$ be the set of those trips, which can be serviced from depot d . Similarly for every $d \in D$ we define by $s(d)$ and $e(d)$ its starting and ending point. The set of the nodes of the corresponding network is defined by

$$N := \{d(t) \cup a(t) \cup s(d) \cup e(d) \mid t \in T, d \in D\}.$$

We define the edges of the network as well. Let

$$A^d := \{(d(t), a(t)) \mid t \in T_d\}$$

denote the set of timetabled trips corresponding to the depot d .

$$B^d := \{(a(t), d(t')) \mid t, t' \in T_d \text{ compatible trips}\}$$

is the set of possible deadhead trips corresponding to the depot d and

$$P^d := \{(s(d), d(t), (a(t), e(d)) | t \in T_d \}$$

indicates the set of pull-out and pull-in edges corresponding to the depot d . From this we can give the set of edges of the network.

$$E := A^d \cup B^d \cup P^d \cup \{(e(d), s(d))\} \text{ for all } d \in D,$$

where $(e(d), s(d))$ are the depot circulation edges necessary for the correct definition of the network.

Now we are ready to define a feasible solution of the MDVSP on the network (N, E) . To do this, we define an integer vector on the edges of the network, which can also be considered as a multicommodity flow. Denote this vector by x . We have to define such constraints on x , which assure the basic requirements of the problem. If a component of a vector belongs to the edge e of depot d , we simply write x_e^d . The constraints are that each trip should be executed exactly once and the solution consists of disjoint chains of trips. Formally we have

$$\sum_{d \in g(t)} x_{(d(t), a(t))}^d = 1 \text{ for all } t \in T, \tag{1}$$

$$\sum_{e \in n^+} x_e^d - \sum_{e \in n^-} x_e^d = 0 \text{ for all } d \in D \text{ and } n \in N, \tag{2}$$

$$x_e^d \in \{0, 1\} \text{ except for the depot circulation edges,} \tag{3}$$

$$x_e^d \text{ integer,} \tag{4}$$

where n^+ denotes the set of outgoing edges from node n and n^- denotes the set of incoming edges to node n .

Constraint (1) expresses that each trip should be executed once, while Constraint (2) means that if a vehicle from a given depot arrives at a station, then it should leave from that. If we have depot capacity constraints, we can add them to the depot circulation edges as upper bounds on their flows. Any flow satisfying these constraints is a feasible solution of the problem. If we want to find an optimal solution, we should define an objective function. This can be done by assigning weights to the edges, which represents the cost of that trip. If we simply want to minimize the number of vehicles, we should assign relatively large weights to the pull-out edges. If c_e is the cost of edge e , then the objective function is

$$\sum_e c_e x_e,$$

and we want to minimize it. This defines an integer programming problem. The problem is that usually there are a lot of edges in the network, even for real prob-

lems given by transportation companies of smaller cities. To decrease the number of edges a new model has been developed.

The Time-Space Network Model

This model has been developed by Kliewer et al. [12] and it enables us to solve MDVSP instances of practical sizes. The main disadvantage of the connection based model, that usually the number of edges representing deadhead trips, is extremely high. This is because there are a lot of theoretically possible deadheads. In the final solution we use only a small percentage of them, but it is not possible to leave any of them, because in this case we can loose the optimality of the solution.

To overcome the above problem, Kliewer et al. [12] introduced the time-space network model. In this model there are two dimensions, time and space. Actually space means existing physical locations or stations, while time is represented by timelines, which belong to stations. Timelines contain the departure and arrival times. Each possible departure and arrival time point means a node on its timeline. It is easy to see that the main difference between the two models is that in this one the time points are assigned to locations. So we can define the set of nodes N of the network as the possible departure and arrival times for all stations. We can define A^d similarly as in the previous model for every $d \in D$. Of course there are timelines also for the depots, so it is possible to define P^d . See Figure 3 for a sample time-space network.

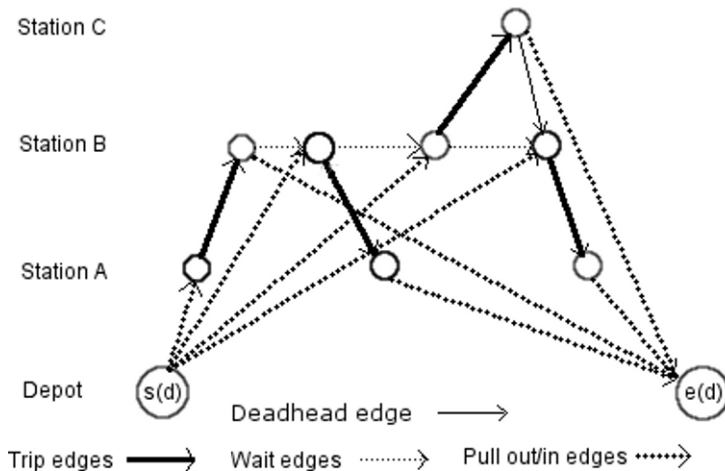


Fig. 3 A sample time-space network.

Another main difference between the two models is the definition of the deadhead trips. In the timespace network model it is possible to use timelines, which can aggregate the flows of some possible deadhead or trip edges. So it is not necessary, to explicitly give all the possible deadhead edges. By using an aggregation strategy the number of edges can be reduced drastically. The authors define the latest-first match strategy. The basic idea of this is a two-stage aggregation procedure. In the first stage for each arriving trip edge the first compatible deadhead edge is computed for each other station. These edges are called first matches. Only these edges are considered among the possible deadhead edges. In the second stage these edges are further reduced. The technique is to introduce the latest first matches. The idea is to collect the incoming trip edges at a given station with the same first matches on another station. Then instead of all the common first matches only the latest one can be considered. This is called latest first match and omitting the other first matches makes possible further decreasing of the edges. So we can define B^d as this reduced set of deadhead edges. To complete the model we have to add a set of waiting edges W^d for each $d \in D$. These edges follow always the timelines and connects the subsequent time points aggregating the flows along the timelines. So in this case the definition of the set of edges E is

$$E := A^d \cup B^d \cup P^d \cup W^d \cup \{(e(d), s(d))\} \text{ for all } d \in D.$$

The IP model is similar for this network, except that we should substitute the $x_e^d \in \{0, 1\}$ condition with $x_e^d \geq 0$.

4 Integration of the Scheduling Software Component into Bus Logistics Management Systems

As it was mentioned earlier, the scheduling software component has four modules:

- vehicle scheduler module
- vehicle assignment module
- driver scheduler module
- driver rostering module

Each module is based on the previous one and directly uses its output as an input. The schedules of the first module are the input of the vehicle assignment module. The vehicle assignment module assigns buses to the schedules, schedules refuelling, adds parking events, calculates bus service times, etc. This module requires further parameters, e.g., refilling frequency requirements, parking rules, service times, etc. The module applies an assignment algorithm, which is described in detail in [1]. The driver scheduler and rostering modules use the vehicle schedules as input and it assigns drivers to them using the driver working rules applied by the company. Nevertheless, each module can be used separately as well, an interface is provided for both the vehicle related and driver related tables through which one can load the

inputs in the appropriate format. For example, after running the vehicle assignment module, the manager has the opportunity to modify the schedules and assignments, and then driver scheduling is applied with the modified data. Figure 4 shows the structure of the system.

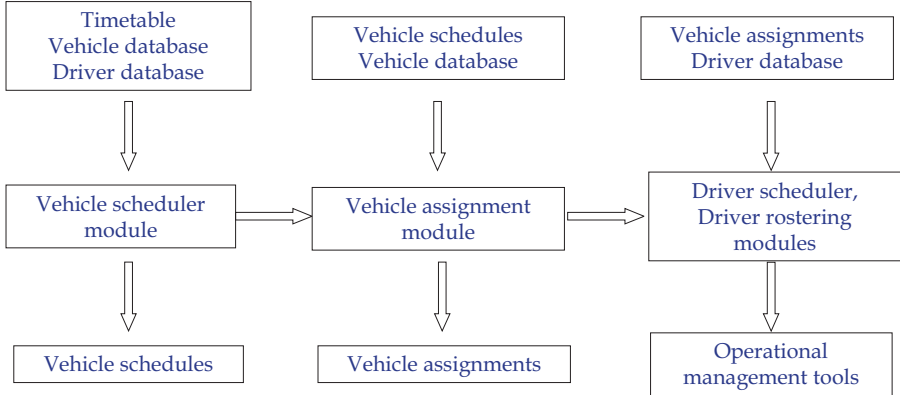


Fig. 4 The structure of the integrated scheduling system.

In the following we introduce the bus scheduler module in detail. The fundamental solution model integrated is the MDVSP based time-space network solver. The necessary data for the MDVSP solvers usually can be obtained from the information systems of the transportation companies. The most important information are the timetable, depots, stations, and possible deadheads. To be able to use an MDVSP optimizer we need at least the following:

The `TIMETABLED_TRIPS` data table contains all the trips defined by the timetable for a day:

- `TRIP_ID` : Identifier of a timetable trip
- `DEP_TIME` : departure time of the trip
- `ARR_TIME`: arrival time of the trip
- `DEP_STATION` : reference to the departure station of the trip
- `ARR_STATION` : reference to the arrival station of the trip

The `DEPOT_TRIP_RELATIONS` data table contains the possible trip depot relationships:

- `TRIP_ID` : Identifier of a timetable trip
- `DEPOT_ID`: Identifier of the corresponding depot

The `STATIONS` data table contains the possible stations:

- `STATION_ID` : Identifier of a station

- STATION_NAME: Name of a station, only for information purposes

The DEADHEADS data table contains the possible deadheads:

- DEP_STATION : reference to a departure station
- ARR_STATION : reference to an arrival station
- TIME: deadhead time
- COST: deadhead cost

The DEPOTS data table contains the possible depots:

- DEPOT_ID: Identifier of the depot
- DEPOT_COST: Average usage cost of a vehicle from that depot

The model can be built from this data. In our program we use the time-space network model. To build the network, the following structures must be given:

- the time lines with the departure and arrival time points, which will be the nodes of the network,
- the trips edges, pull-out, pull-in and depot circulation edges for each depot,
- the deadhead edges for each depots,
- the waiting edges for each depot.

The following submodules are distinguished:

- input/output submodule,
- time-space network building submodule,
- solver submodule,
- output generator submodule.

Time lines can be easily built by using the TIMETABLED_TRIPS and STATIONS data tables. The number of time lines will be given by the number of stations and for each station we should generate the ordered departure and arrival time points from the TIMETABLED_TRIPS table. Here we handle the situation when a time point is a departure and an arrival time, too. We should add a time line for each depot with artificial departure and arrival times as well. Trip, pull-out and pull-in edges are also generated from the TIMETABLED_TRIPS table. We use the DEPOT_TRIP_RELATIONS table to decide for which depot we need to add an edge. Here we can order the DEPOT_COST value to each corresponding pull-out edge. Finally, we add the waiting and deadhead edges based on the DEADHEADS table.

For solving the generated problem we included the IP solver SYMPHONY 5.1.7. The output generator submodule simply reads the solution from the solver and builds the bus schedules from the edges of the solution. It simply creates the chains by parsing the network edges based on the solution values.

The sets of the module make it possible to use the system both for operational goals and for logistics analysis. As it was outlined in Section 3, the time-space network model can be equipped with constraints for depot capacity. If the system is

used with the constraints provided by the status of the current vehicle set, then the system is used for operational goals. In this case, the schedules can be constructed effectively with respect to the current company environment. However, if the above constraints are systematically modified, then the same module is iteratively used as a decision support tool for structural and logistics analysis in the operations of the company. For example, one can analyze, which collection of the different bus types could offer the most efficient service level. For the above analysis, the module should be applied without depot capacity constraints. Nevertheless, by a more sophisticated way, simulations can be executed for different situations of the bus collection. The flexibility expressed by the above described multi-functionality (scheduling and analysis) is one of the main advantages of the developed integrated solution.

The second main novelty of the system is the modularity in vehicle scheduling. Though the results of the vehicle scheduler module gives only raw schedules, but by our new approach (cf. [1]), in the vehicle assignments module, these schedules can be used as a starting point for the design of the real vehicle operation. In real-life vehicle operation there are two additional main aspects not considered in the vehicle scheduler:

- The vehicle schedules must be physically assigned to a real bus.
- The vehicle schedule contains several further special duties.

The above twofold objective results in a series of optimization problems, which can be solved by the vehicle assignments module. Since this phase might be quite different in the practice of the companies, a typing methodology have been developed for the grouping of the vehicle-specific tasks. By our methodology, four types of vehicle-specific tasks can be distinguished which are solved by this module as subproblems:

- Physical depots: The vehicle scheduler does not determine the starting and terminating geographical locations of the vehicles.
- Parking places: If there is a break between two tasks, then the vehicle is parking in some location. Since each location has a strict parking regulation, the parking places must be also determined for each breaking time in all schedules.
- Refuelling schedule: Based on the distance capacity and the actual fuel level, the vehicles must be scheduled for refuelling. The schedule also needs to take into consideration the capacities of the service stations.
- Maintenance: Regular maintenance is needed for each vehicle. Generally there is a frequent maintenance type (approximately weekly), an in-depth maintenance type (approximately monthly) and a grand technological service (approximately yearly). All the maintenances are scheduled, their constraints are similar to the refueling service.

All the necessary models in the vehicle assignment module can be built from the tables used by the vehicle schedulers. Concerning the cost function, the coefficients represent individual vehicle costs, unlike in the case of vehicle scheduler, where

average costs of the depots are considered. As a result, the “vehicle part” provides a complete real-life vehicle schedule for the “driver part” of the system.

5 Computational Results in Szeged

The Szeged City Bus Company³ operates 40 lines, the total length of the lines is 328 km and served by 120 buses and about 160 drivers. The frequency of the trips depends on the day of the week (working day, saturday, sunday or holiday) and the time of the year (summer period, school time, etc.). The buses run between 100 and 500 km on a working day. They have a predefined schedule, which consists of a series of trips. In addition to the trips some other events may happen during the day. For example, most of the vehicles are needed to be refilled. Parking is allowed only on predefined parking centers, so if a vehicle should wait for a longer time, then it has to travel to its parking centrum. Deadhead trips are also allowed and usually applied to make the bus schedules more efficient.

We have tested our bus scheduling system on the real-world data received from Szeged City Bus Company. The database of the largest timetable contains:

- 2700 trips,
- 4 vehicle-types and one physical depot,
- 120 vehicles.

We applied our program for 14 different subproblems, which came from different timetable versions of the transportation company. These versions were applied for different days, e.g., weekdays, weekend, etc. Table 1 contains the most important characteristics of the 14 instances.

It can be seen that the program could achieve a significant reduction – almost 11 % on average – in the number of necessary vehicles. Nevertheless, it is a realistic request to analyze the correlation of operational costs and general costs, because the reduction on the number of buses may increase the length of the deadhead trips. As it was mentioned in Section 3, the studied models of MDVSP can be used for the above analysis, since they capture the optimization of the total vehicle-type cost induced by the combination of general and operational costs.

Taking advantage of the previously mentioned properties of the time-space network model, we have executed basic running tests with respect to total vehicle costs on the 14 subproblems. Though our results are quite reassuring (5%-10% cost reduction), the used data can be considered only approximate, the realistic cost determination requires further intensive cooperation with the controlling department.

The results of vehicle scheduling can be “justified” by its use in the vehicle assignment and driver scheduling modules. Below we summarize our preliminary experiences with respect to the above subproblems. For the vehicle assignment task we applied our vehicle assignment algorithm described in [1]. Table 2 shows the results.

³ *Tisza Volán, Urban Transport Division, www.tiszavolan.hu.*

Table 1 Results of the Szeged test data.

Problem	Trips	Depots	IP rows	IP cols	Buses (program)	Buses (current)
1	2765	4	18186	180151	97	107
2	2765	4	18186	180151	96	107
3	2767	4	18196	180563	96	107
4	1826	4	12687	122113	51	57
5	2033	4	14355	136791	59	67
6	2033	4	14355	136791	59	67
7	1827	4	12697	122211	51	57
8	1822	4	12652	121045	51	57
9	2767	4	18196	180563	97	107
10	2765	4	18186	180151	96	107
11	2758	4	18143	179349	94	107
12	1821	4	12643	120947	51	57
13	2760	4	18153	179761	94	107
14	2758	4	18143	179349	94	107

Table 2 Vehicle assignment IP model problem sizes and running times.

Problem	Trips	Depots	IP rows	IP cols	Objective	Running time(sec.)
1	2765	4	702	183986	3016370	9
2	2765	4	696	187807	2944730	7
3	2767	4	692	184629	2930364	9
4	1826	4	540	50200	1803723	1
5	2033	4	572	90466	2006394	1
6	2033	4	572	90265	2008205	1
7	1827	4	536	50166	1808116	1
8	1822	4	546	52038	1806006	1
9	2767	4	692	184359	2913963	6
10	2765	4	694	189324	2921190	6
11	2758	4	690	169618	2903435	6
12	1821	4	558	51463	1811220	1
13	2760	4	690	175203	2897050	6
14	2758	4	690	173622	2898044	6

Table 2 shows that the assignment model is very efficient, the running times are very good even for larger problems. The model can effectively extend the capabilities of the MDVSP models to be able to handle real vehicle assignment with refueling and maintenance constraints. Apart from efficiency, it is also a main point that the output of the vehicle scheduling module can be used to construct feasible assignments on all of the real problem instances.

Several times, in practical applications a significant cost reduction in the vehicle scheduling might result in extra costs in the driver scheduling phase. Therefore, it is an important aspect in justification of our concept to test thoroughly on driver scheduling too. Our preliminary results show that though our concept increases the number of driver schedules, but in cost there is a further reduction. For example, in a typical working day, the present solution provided by the Szeged Urban Bus Trans-

portation ensures 164 shifts, while our algorithm results in 172 shifts. However, in cost the system guarantees 3% reduction.

Finally, we analyzed the efficiency of the result with respect to a logistics management point of view. For simplicity, we present our results concerning a problem induced by a typical working day. The statistics represented by Figure 5 gives a constraint for the necessary number of vehicles in a whole day timeline.

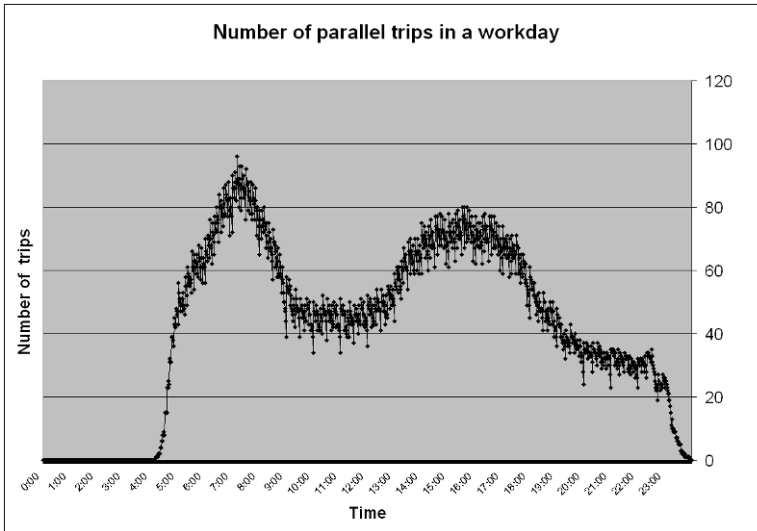


Fig. 5 Maximum number of parallel trips in Szeged.

It can be seen that the maximum number of parallel trips in a working day in the worst example is 96. This is the theoretical lower bound on the necessary schedules. Our largest schedule uses 97 vehicles, which is very close to the lower bound. Therefore, as a reverse analysis, we obtain that a significantly more efficient timetable cannot be designed without increasing the vehicle cost.

6 Computational Results in Ljubljana

The Ljubljana Public Transport⁴ serves 21 lines and some lines have during the day variations (e.g., night ride, two switching end stations, etc.). The total length of all lines is 263 km and are served by 207 buses and 376 drivers (numbers are from June 2008). In the urban part of Ljubljana, 95% of all homes are in a range of 500m from the closest bus stop. In 2007 the buses traveled for 12.5 million km and served more than 96 million passengers.

⁴ Ljubljanski potniški promet, LPP, www.lpp.si.

The frequency of serving individual lines depends on the time of the year (Spring or Fall, Summer and Winter), on day of the week (working day, Saturday, Sunday or holiday) and also varies during the day. The daily variations follow morning and afternoon rush hours and some other time of the day dependent necessities.

Motivated by the results in Szeged we were applying the optimization software to Ljubljana. We managed to gain the cooperation of the bus company that provided us with realistic test data. Like Szeged Ljubljana is a mid-sized city, but is twice as big and currently also employs the double number of buses. In this investigation we are also interested in how this scale factor of two will express itself in the achievable gain and the problem complexity. Table 3 gives some statistical information about the used test data that covers most of the urban bus traffic and the results of our computation. Of the 21 bus lines have been considered 18 that accumulate to 2482 individual passenger trips. Additionally, computations have been also performed for the schedules for Saturdays and Sundays/holidays. Deadhead trips have been calculated for all pairs of end stations. Like in Szeged the computations have been performed on standard, commodity hardware.

Table 3 Results of the Ljubljana test data.

	Problem Trips	Depots	IP rows	IP cols	Buses (program)	Buses (current)
work.	2482	1	21178	250896	126	152
Sat.	1710	1	15070	181932	75	97
Sun.	993	1	8733	75960	64	82

If virtually no deadhead trips are used the software needs 152 buses to cover the normal schedule. This closely resembles the present practice of the company which uses deadhead trips mainly for exceptional situations. The relatively big reduction in the number of buses through the incorporation of deadhead trips into the regular schedule is promising and has increased the company's interest into the research.

Comparing with the data from Szeged one notices that although Ljubljana is about twice as big in size and has the double number of buses employed there are about the same number of passenger trips. Thus computationally the Ljubljana case is not really more difficult than Szeged's. The reason for this is that the bus lines in Ljubljana are much longer than those in Szeged and are typically running from one end of the city to the other. This also hinders the optimization software to achieve savings through the reassignment of the buses to the lines.

The public transportation company has already expressed its will to redefine the lines and to split them into smaller pieces yielding more and shorter bus lines. This would give the optimization software more flexibility in combining different bus lines what would result in bigger savings.

Further, it shall be noted that only one depot has been used here, multiple depots that actually make the MDVSP difficult to solve will be included in the new, refined test data. Thus these results are not to be taken as the last word, but only represent the current state of our research.

Figure 6 shows the number of parallel trips in a workday. The maximum lies at 116 what is the theoretical optimum for a schedule. Our value of 126 thus proves to be a good result. Nevertheless, the above difference shows that there might be some opportunity in designing more efficient timetabling without significantly increasing the vehicle costs.

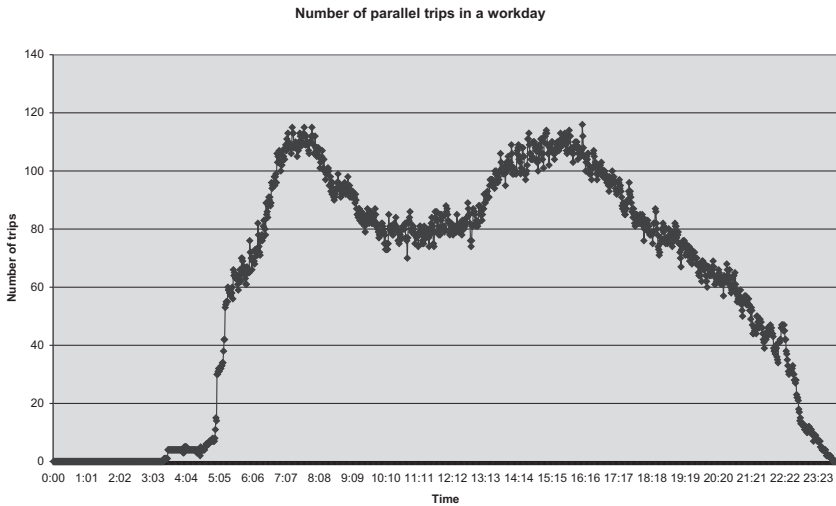


Fig. 6 Maximum number of parallel trips in Ljubljana.

7 Conclusions

In this paper we presented how to build a *modular* bus logistics management system. Its main building blocks reflect the usual stages (*vehicle scheduling*, *driver scheduling* and *driver rostering*), but as a new approach, the refinement in the modularization of the vehicle scheduling part makes it possible that vehicle-specific practical aspects (refuelling, parking, maintenance) are also considered.

We showed that the solution to the classical vehicle scheduling problem can be used as an input to the company-specific environment where vehicle assignment is performed. Consequently, this shows that vehicle scheduling can be used as a separate module in real life. Furthermore, the presented methodology shows us how the vehicle scheduler module can be used for operational goals and also for the logistics analysis. By the logistics analysis we mean adjusting the constraints like depot capacity, vehicle fleet, timetabling, etc.

To solve the vehicle scheduling problem we used a time-space network model based solution of the multiple depot vehicle scheduling problem. The solution uses

an integer programming approach. We applied our algorithm to two different cases: Szeged and Ljubljana. In both cases we observed a substantial possibility for the improvement in the operational costs. However, we observed that it is hard to improve the bus schedule when the lines (routes) are longer. This proved to be the case in the Ljubljana situation. However, this observation might influence the company to re-think the structure of routes – yet another example of the logistic analysis. We ran the program on a commodity computer and the solution was computed in a reasonable time.

Our future work includes solving other stages mentioned above. The companies were particularly interested in the logistics analysis and this shall be one of our next main focus of work. On a more technical part we intend to test the results using different IP solver and also parallelization of the program in a GRID environment.

Acknowledgements This research was partially supported by Szeged City Bus Company (Tisza Volán, Urban Transport Division) and by the Hungarian-Slovenian Intergovernmental Programme for 2008-2009 (project number *BI-HU/08-09-012*).

References

1. Balogh, J., Békési, J., Galambos, G., Krész, M.: Model and algorithm for a vehicle scheduling problem with refueling. In: *Proceedings of the 9th Workshop on Models and Algorithms for Planning and Scheduling Problems* (2009) to appear
2. Banihashemi, M., Haghani, A.: Optimization model for large-scale bus transit scheduling problems, Transportation Research Record 1733, PaperNo. 00-0738
3. Bertossi, A.A., Carraresi, P., Gallo, G.: On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks* 17 (1987) 271–281
4. Bodin, L., Golden, B., Assad, A., Ball, M.: Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers and Operations Research* 10 (1983) 63–211
5. Bunte, S., Kliwler, N.: An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport* 1 (2009), to appear
6. Cappanera, P., Gallo, G.: A multicommodity flow approach to the crew rostering problem. *Operations Research* 52 (2004) 583–596
7. Dell Amico, M., Fischetti, M., Toth, P.: Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problems. *Management Science* 39 (1993) 115–125
8. Dias, T.G., De Sousa, J.P., Cunha, J.P.: Genetic algorithms for the bus driver scheduling problem: a case study. *Journal of the Operational Research Society* 53 (2002) 324–335
9. European Union. 2006. Regulation (EC) No. 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport and amending Council Regulations (EEC) 3821/85 and (EC) 2135/98 and repealing Council Regulation (EEC) 3820/85. Official Journal of the European Union L 102, 11.04.2006
10. Hadjar, A., Marcotte, O., Soumis, F.: A branch-and-cut algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. Tech. rept. G-2001-25. Les Cahiers du Gerad, Montreal, (2001)
11. I. Juhos, M. Krész, A. Tóth: Combination of Exact and Heuristic Methods to Solve Large Scale Driver Scheduling Problems, in *Proceedings of the XXVIIIth Hungarian Operations Research Conference* (2009)
12. Kliwler N., Mellouli T., L. Suhl : A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research* 175 (2006) 1616–1627

13. Kokott, A., Löbel, A.: Lagrangean relaxations and subgradient methods for multiple-depot vehicle scheduling problems. ZIB-Report 96-22, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin, Germany (1996)
14. Kwan, R.S.K., Kwan, A.S.K., Wren, A.S.K.: Evolutionary driver scheduling with relief chains. *Evolutionary Computation* 9 (2001) 445–460
15. Li, J.: A self-adjusting algorithm for driver scheduling. *Journal of Heuristics* 11 (2005) 351–367
16. Löbel, A.: Optimal vehicle scheduling in public transit. Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin (1997)
17. Löbel, A.: Vehicle scheduling in public transit and lagrangian pricing. *Management Science* 44 (1998) 1637–1649
18. Meilton, M.: Selecting and implementing a computer aided scheduling system for a large bus company. In: Voss, S., Daduna, J.R., (eds.): *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*. Springer-Verlag, Berlin (2001) 203–214
19. Mesquita, M., Paixao, J.: Multiple depot vehicle scheduling problem: a new heuristic based on quasi-assignment algorithms. In: Desrochers, M., Rousseau, J.-M. (eds.): *Computer-Aided Transit Scheduling*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 386, Springer-Verlag, Berlin (1992) 167–180
20. Moz, M., Respício, A., Vaz Pato, M.: Bi-objective evolutionary heuristics for bus drivers rostering. Working paper 1-2007, Centro de Investigação Operacional, Universidade de Lisboa (2007)
21. Pepin, A.-S., Desaulniers, G., Hertz, A., Huisman, D.: Comparison of heuristic approaches for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Journal of Scheduling* 12(1) (2009) 17–30
22. Ribeiro, C.C., Soumis, F.: A column generation approach to the multiple-depot vehicle scheduling problem. *Operations Research* 42 (1994) 41–52
23. Wang, H., Shen, J.: Heuristic approaches for solving transit vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints. *Applied Mathematics and Computation* 190 (2007) 1237–1249
24. Weider, S.: Integration of vehicle and duty scheduling in public transport. Ph.D. thesis, Technical University of Berlin (2007)
25. Wren, A., Fores, S., Kwan, A.S.K., Kwan, R.S.K., Parker, M.E., Proll, L.: A flexible system for scheduling drivers. *Journal of Scheduling* 6(5) (2003) 437–455
26. Yunes, T., Moura, A., de Souza, C.: Hybrid column generation approaches for solving real world crew management problems. In: *Proceedings of the 27th Conferencia Latinoamericana de Informatica* (2001)

Modeling Container Terminal Scheduling Systems as Hybrid Flow Shops with Blocking Based on Attributes

Bin Li, Wen-feng Li, and Stefan Voß

Abstract Container terminal scheduling has been the focus of comprehensive research. However, most approaches concentrate on some specific sort of equipment or resource allocation without embedding them into a full-fledged terminal system optimization. This paper attempts to model the whole container terminal scheduling system by means of the hybrid flow shop problem with blocking based on attributes which is applicable to both scheduling partial and complete systems. This idea together with the concept of modeling terminal systems as multi-agent systems based on the Harvard architecture provides a systematic and applicable methodology for simultaneously accomplishing the scheduling, resource allocation as well as important decision-making processes at container terminals. The approach is validated by an initial simulation study investigating the case of single ship handling and transportation demonstrating the feasibility and creditability of the methodology.

1 Introduction

Since introduced in the 1960s, containers represent the standard unit load concept for international freight. Container terminals are the hinges between ocean shipping and land-carriage intermodal transportation and the basic transshipment nodes of international logistics networks. *Container terminal scheduling systems* (CTS) are in dire need of enhancement by effective and efficient planning and control of

Bin Li · Wen-feng Li
School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Heping Road 1040, 430063
Wuhan Hubei, CHINA
E-mail: {mse2007_lb, liwf}@whut.edu.cn

Stefan Voß
Institute of Information Systems, University of Hamburg, Von-Melle-Park 5, 20146 Hamburg,
GERMANY
E-mail: stefan.voss@uni-hamburg.de

the existing resources to improve the handling efficiency and to reduce the logistics cost of container transportation for ports and shippers. This is important as the competition between seaports, especially between geographically close ones, is increasingly severe [15]. Moreover, most scheduling problems on container terminals are NP-hard optimization problems; see, e.g., [1]. In recent years, many scholars have studied resource allocation and its optimization at container terminals; see the comprehensive literature surveys in [15, 4, 14]. Specific examples are as follows. Imai et al. [3] address the berth allocation problem at a multi-user container terminal with indented berths for fast handling of mega-containerships. Kim and Park [5] propose a branch and bound method to obtain the optimal solution of the quay crane scheduling problem. Ng and Mak [13] study the problem of scheduling a yard crane to perform a given set of loading/unloading jobs with different ready times. A yard storage allocation problem in a transshipment hub when the number of loading activities is larger than that of the unloading activities is studied in [6].

While CTS are inherently interrelated with respect to their specific handling equipment components, most research focuses on the scheduling of some specific type of equipment or resource without taking into account the interrelationships and integration with other facilities and resources. The optimization of one kind of resource does not mean the global optimization of a CTS due to the strong dependency relationships among the handling equipments and resources in the process of operating a terminal. In this paper we attempt to close this gap by modeling a CTS by using the *hybrid flow shop scheduling problem with blocking based on attributes* (HFS-BA) from the angle of integrated control and decision making. This approach is applicable to scheduling both partial as well as a whole CTS, to improve the efficiency of terminal logistics. At the same time, this is going to lay a solid modeling foundation for the idea to model container terminal logistics systems based on the Harvard architecture and multi-agent systems as discussed in [8, 9, 10, 11, 7] in detail. Both provide a systematic and applied methodology to support scheduling, resource allocation and important decision-making processes at container terminals.

The next two sections provide our modeling approach. This is followed by describing the simulation together with some analysis.

2 Modeling Preliminaries

Container terminals are the transshipment hinges of land-sea intermodal transportation, the links between waterway transportation and land transportation and an important stage of modern container logistics. The whole *container terminal logistics system* (CTL), which is a highly complex system consisting of a handling and transportation section, a scheduling section and information infrastructure, can be regarded as a “huge” data processing system. We draw a comprehensive analogy between a CTL and a computer system based on the Harvard architecture in [8], which includes organization, architecture, and operation. Based on that, we present a formal model and systemic solution of a CTL using the Harvard architecture and multi-

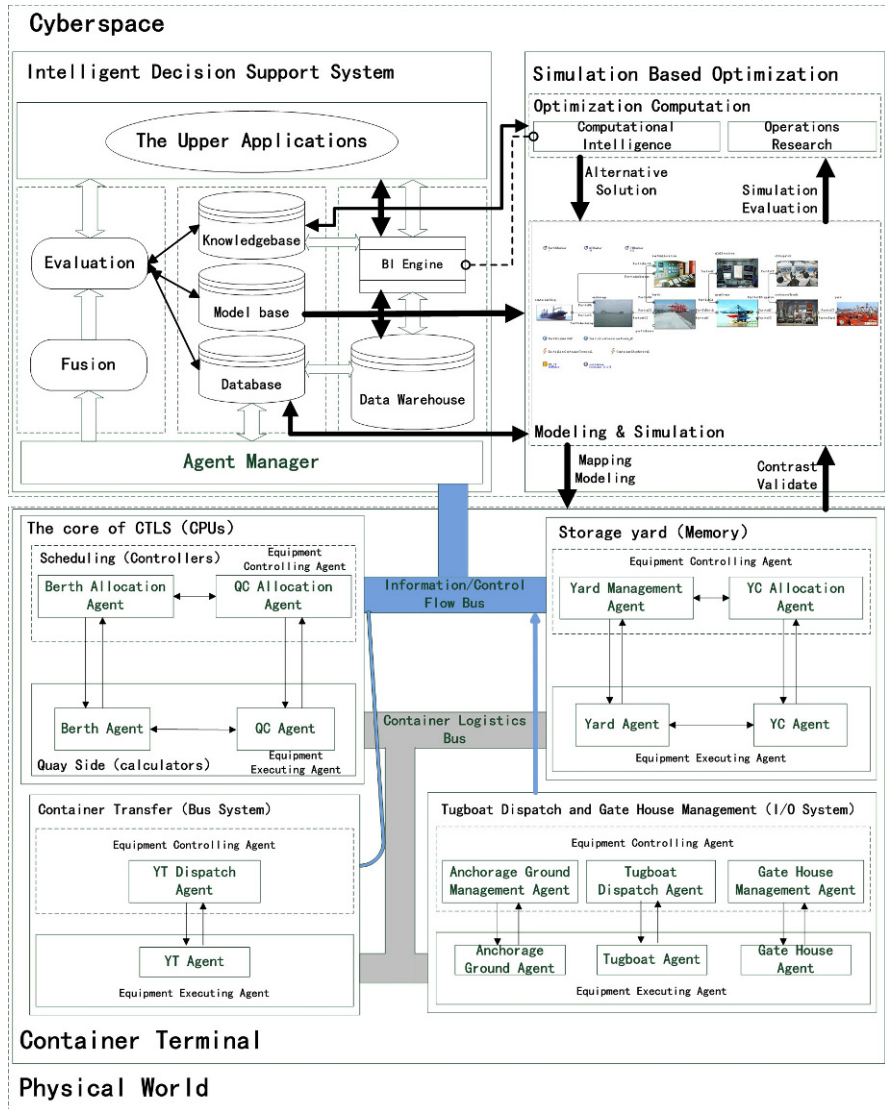


Fig. 1 Conceptual modeling framework of CTL.

agent systems to support the handling scheduling, resource allocation and decision-making at container terminals in [9, 10, 11], which is illustrated in Figure 1. This modeling framework brings forward an essential mapping relation between computer systems and a CTL. It makes use of the precise computational structure to model the complex system and fuses the agent-based computing, which is suggested by [2] to be applicable to domains that are distributed, complex, and heterogeneous

and provides a new and often more appropriate paradigm for the development of complex systems [16], at the same time striving for operational effects at terminals.

As we build a formal model of a CTL based on computer architectures, the design thinking in computer science is used as reference. The central processing unit (CPU) is the most important resource in a computer system, and an intriguing point of upgrading its speed is parallel processing. Most modern CPUs utilize a superscalar architecture and pipeline operations to improve the performance, and therefore the ideas of superscalar architecture and pipelining are considered as the core modeling ideas in CTS that can be seen as the kernel of CTL.

A superscalar processor is a kind of processor that consists of several independent instruction pipelines, which exploits the instruction-level parallelism adequately in the program instructions. Pipelining is an implementation technique whereby multiple instructions are overlapping in execution; it takes advantage of parallelism that exists among the actions needed to execute an instruction [17]. Today, superscalar architecture and pipelining are the key implementation techniques used to implement fast CPUs.

A pipeline bears similarities with an assembly line. In a computer pipeline, each step completes a part of an instruction. Like in assembly lines, different stations/steps are completing different parts of different instructions in parallel. Each of these steps is called a pipe stage or a pipe segment. The stages are connected with each other to form pipe-instructions entering at one end, progressing through the stages, and exiting at the other end, just as cars would in an assembly line. The pipeline designer's goal is to balance the length of each pipeline stage, just as the designer of the assembly line tries to balance the time for each step in the process. Pipelining yields a reduction in the average execution time per instruction. It has the substantial advantage that, unlike some speedup techniques, it is not visible to the programmer.

Since we build a formal model of a CTL based on the Harvard architecture and the operations of a CTL can be seen as the displacement of containers and inter-related freight, we investigate the scheduling and optimization mechanism in computer science, especially in the idea of CPU design, for understanding container terminal scheduling and handling systems. Upon that the ideas of a superscalar architecture and pipeline operations are used for reference. As its mathematical model is related to the hybrid flow shop scheduling problem with blocking, we build a model based on the HFS-BA according to operational characteristics.

3 Modeling of the Scheduling at Container Terminals

Although different seaport container terminals differ considerably in size, function, and geometric layout, they principally consist of the same sub-systems shown in Figure 2. The ship operation or berthing area is equipped with quay cranes for vessel loading and unloading. Import as well as export containers are stacked in a yard which is divided into a number of blocks. Special stacking areas are reserved for

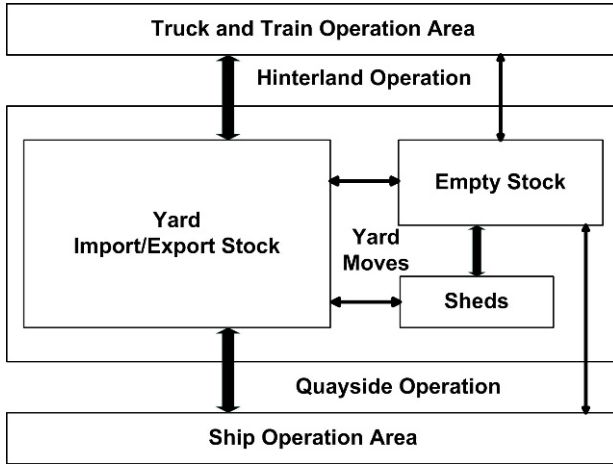


Fig. 2 Operation areas of a seaport container terminal and flow of transports [15].

reefer containers, which need electrical supply for cooling, or for storing containers with hazardous goods. Separate areas may be used for empty containers. Some terminals employ sheds for stuffing and stripping containers or for additional logistics services. The truck and train operation area links the terminal to outside transportation systems [18] in the hinterland.

A container terminal represents a complex system with highly dynamic interactions between the various handling, transportation, and storage units and incomplete knowledge about future events [4]. There are many decision problems related to logistics scheduling and control issues of seaport container terminals: tugboat scheduling, berth allocation, quay crane (QC) allocation, yard trailer (YT) dispatching, yard crane (YC) scheduling, slot assignment, container truck (CT) scheduling and so on. As pointed out by [15], various types of handling equipment imply different layout options as well as dispatching and scheduling mechanisms. For instance, note the difference between YTs and CTs. The former transfer containers from the quay side to the yard and vice versa, or within the yard, i.e., they only operate inside terminals. The latter connect terminals with the hinterland, such as shippers, which is of utmost importance regarding collecting and distributing containers. If we categorize the scheduling problems according to the service object, the entire scheduling at container terminals can be classified into two groups of problems. One aims (at a larger scale) at serving the ships while the other (at a smaller scale) is intended for the containers. Obviously, tugboat scheduling, berth allocation and QC scheduling belong to the former, while YT dispatching, YC scheduling, slot assignment and CT scheduling pertain to the latter.

In the following, we shall describe the inter-related two kinds of scheduling problems using the HFS-BA, respectively. In addition we combine both models into one from the point of view of integrated operation, which is on the basis of HFS-BA, too. Hence, the mathematical model based on HFS-BA simultaneously serves the turn to

both local and complete scheduling. It organically unifies the core scheduling and resource allocation in the process of handling and transportation at terminals.

3.1 Hybrid Flow Shop with Blocking Based on Attributes

Hybrid flow shop (HFS) scheduling is the combination and extendibility of a flow shop and parallel machine scheduling, both of which are classical scheduling problems. In a hybrid flow shop, machines are arranged into s stages in series. In each stage k ($k = 1, \dots, s$), there are m_k (usually) identical machines in parallel. Job j ($j = 1, \dots, n$) has to be processed on any of the machines at each stage. Job j has finite processing times at each stage ($p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{sj}$). Preemption is not allowed and each machine can process at most one operation at a time. The most common objective is to minimize the makespan. HFS scheduling may be viewed as a problem of simultaneously incorporating sequencing and assignment (or allocation) making it more challenging than the usual flow shop scheduling. HFS scheduling has been shown to be NP-hard as it resembles two NP-hard problems, namely flow shop scheduling and parallel machine scheduling [19]. Various practical problems in different industries may be modeled by means of the HFS; see, e.g., [20].

The HFS with blocking (HFS-B) means that there is no intermediate storage available for workpieces between processing machines at different stages. Many actual production conditions, such as in the metallurgical industry, petro-chemical industry, flow industry etc., can be classified as HFS-B. In some cases also limited storage instead of blocking becomes an option [21]. CTL also comprise the HFS-B assumptions. Furthermore, data of processed workpieces (vessels and containers) can be obtained by EDI (electronic data interchange) before handling and can be seen as the attributes of workpieces [22]. These parameters have a strong impact on terminal scheduling. Therefore, we use the HFS-BA to model a CTS.

3.2 Scheduling for Container Ships

In the macroscopical scheduling at container terminals, each container ship is the minimal unit. In terminal operations the control center needs to schedule and distribute the resources and the equipment for the vessels in the first place. When the ship arrives at the port, it might have to moor the anchorage ground (AG) to wait for further instructions from the port. The tugboats are scheduled to pull the vessel for mooring the preassigned berth on condition that there are idle berths and QCs. The appointed QCs begin loading/unloading containers on/off the deck/hold after the vessel has moored. When the vessel finishes the handling task, the tugboats are scheduled again to pull the vessel to unmoor the berth and return into the sea-route.

The coast line is the most valuable non-regenerative resource at container terminals that is determined exclusively by the factors of geography, water depth, tide,

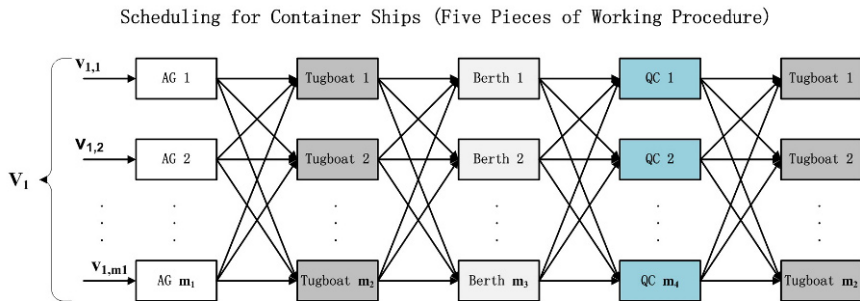


Fig. 3 Scheduling for container ships in port.

sea-route and so forth and is characteristic for tremendous construction investment, non-regeneration resource and exclusiveness. That is, the berth is the core resource in the above scheduling process. All scheduling, handling and transportation options are supposed to focus on improving the utilization efficiency of the berth, which leads to reducing the latency time of fetching port vessels, elevating the service level for vessels and promising a comprehensive income of the port.

In the above process of scheduling and handling, the vessels can be viewed as the work pieces of a flow shop. The vessel lying at the AG, the tugboat pulling the vessel from the AG to the berth, the vessel mooring the berth, the QC handling containers and the tugboat pulling the vessel back may be regarded as five working procedures. Furthermore, parallel processing exists in each of these procedures; see Figure 3 for AG assignment, tugboat dispatching (twice), berth allocation and QC allocation using HFS-BA.

Note especially that the third and the fourth working procedure are bound together. When the QCs start loading or discharging, the vessel occupies the corresponding berth until the handling tasks are finished by the QCs. At the same time, the assigned QCs can move from one berth to another in the process of operations for improving the overall efficiency and throughput of the terminal, which is exemplified by [23]. In addition, one vessel may need two or more tugboats to pull from the AG to the berth or vice versa, and also one vessel (at least the larger ones) is usually handled by more than one QC at a time, and even one vessel may tie up two berths as to sixth generation post-panamax container ships and has almost no opportunity to move from one berth to another in practice. That is, the scheduling for ships at container terminals may also be viewed as dynamic HFS with multiprocessor tasks in nature.

3.3 Dispatching for Containers

In the microscopic scheduling at container terminals a container is the smallest unit. As the container ship moors the berth, the QCs will start working to load or un-

load containers. The YTs transfer the containers from the quay side to the yard, or vice versa. The YCs load and unload containers on or off the YTs from or to the appointed slot. CTs transport the containers from the terminals to, e.g., shippers or forwarders and vice versa. Likewise, containers can be seen as work pieces in the flow shop in the above process of handling and transportation. QCs load and unload containers, YTs transfer containers, YCs load and unload containers, and the containers are stored in the stated location and the CTs transport containers and the requirement of collecting and distributing import and export containers can be treated as five pieces of a working procedure. Likewise, parallel processing exists in each of these procedures. We describe QC allocation, YT dispatching, YC allocation, slot assignment and CT dispatching using the HFS-BA as indicated in Figure 4.

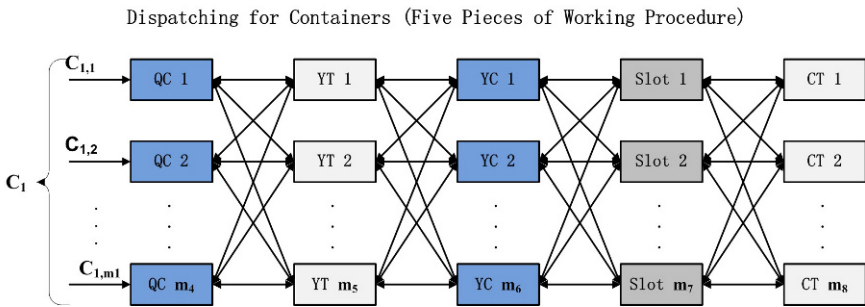


Fig. 4 Dispatching of containers in a port.

In the dispatching model for containers based on the HFS-BA, several points should be emphasized. Firstly, one processor at a certain phase can process more than one work piece at a time, such as one YT or CT can transfer two or three TEU containers. In addition, one QC can load or unload more than one container at a time with the improvement of handling techniques. This point is analogous to the case in the scheduling for container ships. Secondly, the dispatching model for containers is a bidirectional container logistics processing model. The transaction of import containers is opposite to that of export containers. This point is considerably different to the model of scheduling for container ships. Thirdly, using CTs is not the only approach to collect and distribute containers for a terminal. In intermodal ports trains or other conveyances are likely to do that. In that case CTs are replaced by trains or possibly others, but that does not influence the essence of the model. Last but not least, the dispatching model for containers is adjustable in terms of practical task conditions. An extreme case is that CTs run to the quay side directly, which happens now and then in practice (rarely but it does) if not in profession. CTs immediately load or unload containers from or to QCs in this case, which cuts down the middle processing phases. The parallel case holds true for the ship scheduling.

3.4 Integrated Bi-level Scheduling Model

According to the above description and analysis of scheduling for container ships and dispatching for containers, we can find that the whole container terminal scheduling can be described and modeled by HFS-BA. Furthermore, an integrated bi-level scheduling model for container terminals, which is shown in Figure 5, can be developed to improve the integration of the operations scheduling at terminals based on our elaboration above. The whole model is made up of three parts: the upper-level scheduling model, the lower-level one and the public communication system that is composed of the blackboard system and the mailbox system. The upper-level is the quay side scheduling model, which includes the AG, tugboats, berths, QCs etc., loading and unloading facilities and resources and provides the services for container ships. Minimizing the total time in port of arriving vessels and maximizing the revenues of the port or terminal operators are the ultimate objectives of the upper-level scheduling. The lower-level is a transfer dispatching model, which involves QCs, YTs, YCs, yard etc. equipments and resources. In the same manner, minimizing the total handling time is the ultimate objective of the lower-level dispatching. The public communication system is implemented on top of a database (DB). One point needs to be stressed: there are five processes or work pieces which may be referred to as flow shops for scheduling the container ships as well as the containers, respectively. However, only eight kinds of equipment and resources are set in the ten phase scheduling. This is because tugboats require scheduling twice and the QCs in the upper-level and the lower-level are the same set, i.e., both are the QCs at container terminals as indicated in Figure 5. The DB will track record and update two sorts of contents on-line. One is the task information which is concerned with the arriving vessels and the corresponding handling of containers; the other records the busy/idle states and functional parameters of the production resources and equipment at the terminal which is an important basis for scheduling. The feedback and reciprocity between the two sub-models form the approach and solution for container terminal scheduling. The container ships and corresponding containers are work pieces, respectively, in the sub-model, and QCs are the joint of the bi-level scheduling model, which is also the bridge between two kinds of work pieces. Based on that QC allocation is of utmost significance for the overall scheduling.

4 Simulation and Analysis

4.1 Simulation Platform

We simulate the container terminal handling and scheduling system on the AnyLogic platform to validate the rationality and creditability of the above modeling methodology. AnyLogic is an advanced dynamic simulation tool that brings together system dynamics, discrete event, and agent based approaches within one modeling

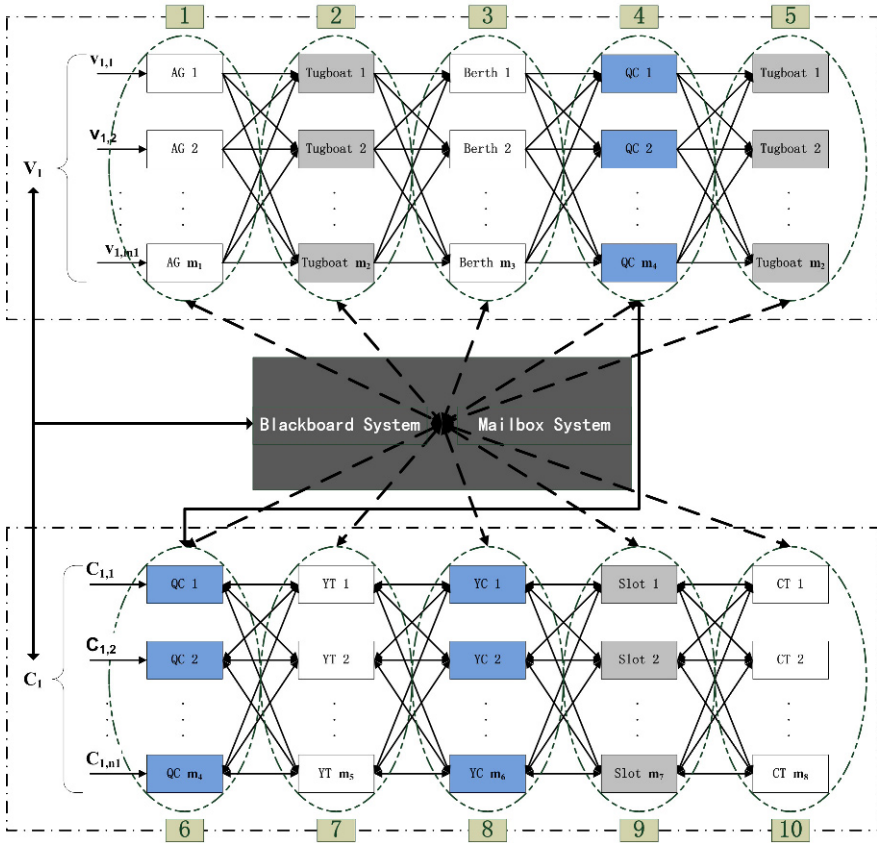


Fig. 5 Bi-level programming model for scheduling at container terminals.

language and one model development environment. The language of AnyLogic is Java allowing for sufficient flexibility and enabling the user to capture the complexity and heterogeneity of business, economic and social systems at any desirable level of detail. AnyLogic 6.3.1 is also based on Java and the Eclipse framework that has been adopted by leading companies as business application platform. If needed, the modeler can extend the functionality of AnyLogic graphical constructs with pieces of Java code, which gives virtually unlimited flexibility. Java makes AnyLogic models truly cross-platform; moreover, they even can be published as applets and run remotely in a web browser. The models can be integrated into larger IT infrastructures, such as corporate decision support systems.

The model based on AnyLogic possesses the open architecture, which can cooperate with any other office automation system, enterprise software platform and custom module based on Java or other programming languages which interact through the Java native interface (JNI). The model can read and write to Excel, databases, ERP and CRM systems dynamically or be embedded into real time operation cir-

cumstances. The outer program may be called in any segment of the model, and vice versa. The simulation model can also be called by an application programming interface (API) that is opened by the AnyLogic simulation engine.

4.2 Simulation Scenario

The above modeling concept is exemplified by means of a simulation scenario of handling a single ship and the respective transportation. Suppose that the vessel has been moored to a berth, the pertinent QCs have been situated on the appointed berth, and all the handled containers are export containers and have been collected onto the yard. This is representative of dispatching for containers as the scheduling on container ships has been specified. The involved resources and equipments at the container terminal are described as follows: The whole storage capacity is about 22000 TEU and the storage yard consists of 36 stacks of containers and is divided into two sections whose plain layout is illustrated by Figure 6. The import storage area where the import containers are stored is closer to the gate and the export storage area is closer to the quay side. Each stack has 216 containers when containers are stacked 3-high and 288 if stacked 4-high. Assuming stacking of 4-high, the maximum capacity of the storage yard is 10,368 containers. We assume that containers are 40-feet which gives a total capacity for the storage yard of 20,736 TEU. In addition to the storage yard, containers can also be stored at the gate buffer whose maximum storage capacity is 1,728 TEU giving a total storage capacity for the terminal of 22,464 TEU. The terminal dimensions are calculated to be 1,633*1,875 ft² (70.29 acres). As for the handling facilities, there are six QCs on the appointed berth and each of them is assumed to be able to perform up to 42 moves per hour per crane for combined loading / unloading; there is a YC in each container stack and each is assumed to perform up to 37 moves per hour per crane. In addition, there are 42 YTs for transfers. The number of export containers is 300 and the containers are distributed in the export container storage whose amount is 18. The speed of empty and loaded YTs is 16 km/h and 8 km/h, respectively. The terminal has strong similarities in layout and handling equipment with existing terminals in China as well as outside of China.

4.3 Formal Model

The above handling and transportation process of a single ship coincides with the scheduling model using the HFS-BA indicating that the scheduling model based HFS-BA is applicable to both local and complete scheduling at container terminals. Figure 7 illustrates the handling and dispatching of the simulation instance.

We present a formal model of single ship handling and transportation based on the HFS-BA in the case of export containers. In coping with the practical operational

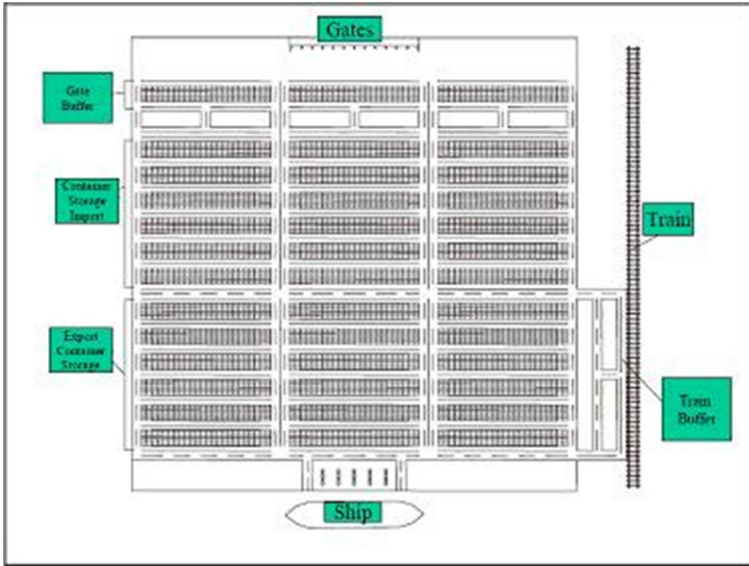


Fig. 6 Container terminal layout.

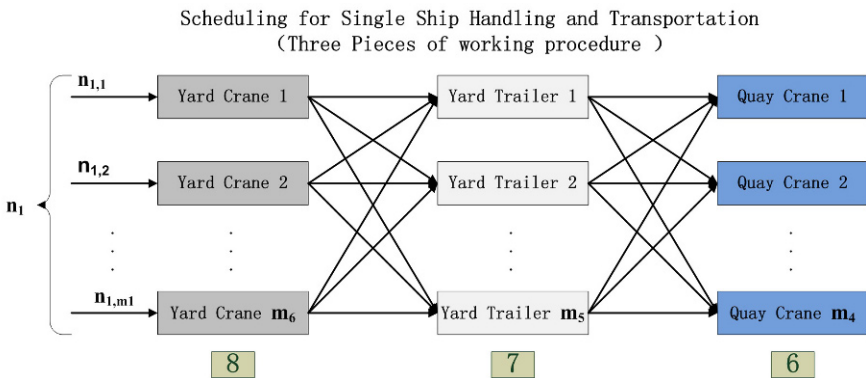


Fig. 7 Scheduling for single ship handling and transportation.

requirements at container terminals, we strive to ensure an all around engagement of the QCs on the quay side and the YCs on the yard. Goal is to minimize the completion time (makespan) of the operations as a replacement function for minimizing the time in port of the vessel.

Pertinent symbols and definitions are described as follows:

- V_l : speed of loaded YTs
- V_e : speed of empty YTs
- E_q : handling efficiency of QCs
- E_y : handling efficiency of YCs

- $C_{q,m}$: coordinates of QC m
 $C_{y,n}$: coordinates of YC n
 $D_{m,n}$: distance between the QC m and YC n according to the plain layout and the existing traffic regulations at a container terminal
 M_k : quantity of handling equipments at level k
 P_i : priority of container i , which exerts an influence on the handling sequence at YCs and QCs, determined by a pre-stowage plan and the distribution of containers on the yard
 V_s : value of the semaphore
 $F_{i,j,k}$: fulfillment time of container i on the equipment j , i.e., the time at which container i is processed on j until it leaves it; that includes the starting time of container i on j ($S_{i,j,k}$), the transaction time of i on j ($T_{i,j,k}$) and the blocking time of i after finishing the respective processes on j ($B_{i,j,k}$)
 $T_{i,j,k}$: transaction time of container i on the equipment j , which is on the level k of the HFS¹
 $B_{i,j,k}$: blocking time of container i after finishing its processing on equipment j , which is on the level k of the HFS²
 $P_{i,j,k}$: the preparing time of equipment j on level k of the HFS means that the equipment j receives handling or transporting instructions regarding container i , but it still needs a certain time of preparation for handling or transporting container i ³
 $x_{i,b}$: decision variable $x_{i,b} = 1$, if container i is stacked in block b in the process of collecting containers; $x_{i,b} = 0$ means that container i is not stacked in block b

¹ In the current simulation instance the pre-stowage and stacking plan have a large impact on $T_{i,j,k}$, k at levels 6 and 8, which cause a lot of fluctuation for $T_{i,j,k}$. We consider this in a simple way within the model, i.e., it is fixed at levels 6 and 8, determined by the average handling efficiency of the QC and the YC. That is the accustomed management mode at the terminal. $T_{i,j,k}$ is unfixed at level 7, which is determined by the equipment coordinates on levels 6 and 8, the terminal layout, traffic regulations, and the speed of YTs with load. The former three items determine the transfer distance, which is implemented by a distance matrix in the subsequent simulation.

² That is, if the equipment is not available on level $k + 1$, container i has to continue occupying ("blocking") the current equipment j . In the current simulation instance, $B_{i,j,k}$ is unfixed at levels 8 and 7, and $B_{i,j,k}$ is not necessary to be considered at level 6 in terms of export containers as it is the lattermost working procedure in the model described above for dispatching containers. $B_{i,j,k}$ between levels 8 and 7 is pertinent to the transfer time of the preceding container on the appointed YT, the speed of empty YTs etc. $B_{i,j,k}$ between levels 7 and 6 is correlated with the length of waiting YT queue under the corresponding QC and the combined loading and unloading efficiency, namely, the idle moment of the QC.

³ In the current simulation instance, $P_{i,j,k}$ on level 8 is related to the horizontal moving speed of YCs and the distribution of export containers on the yard which is determined by the yard stack plan and the practical process of collecting export containers. $P_{i,j,k}$ on level 7 is related to the YT running time in idle state, which is determined by the equipment coordinates on levels 6 and 8, the terminal layout, traffic regulations, and the speed of empty YTs. The former three items determine the idle running distance, which is also implemented by the distance matrix in our simulation. $P_{i,j,k}$ on level 6 is related to the horizontal moving speed of QCs and the pre-stowage plan of a ship which is acquired by EDI ahead of schedule.

On the basis of the given symbols and definitions a mathematical model may be formulated for which we provide an abbreviated version as follows. The objective may be assumed as

$$f = \min \left\{ \max_{i \in A, j \in B, k \in C} F_{i,j,k} \right\} \quad (1)$$

with $A = \{1, 2, \dots, n\}$, $B = \{1, 2, \dots, m_k\}$ for $k = 8, 7, 6$ and $C = \{6, 7, 8\}$. As constraints we need to consider that a container can only be handled by one specific equipment within the same working procedure at a time:

$$\sum_{j \in B} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall i, k \quad (2)$$

Moreover, we need to ensure that any container may only be handled under the condition that the current container has been handed over and that a container can start the next working procedure only on condition that it has completed the current working procedure:

$$S_{i,j,k} \geq F_{i-1,j,k} \quad (3)$$

$$S_{i,j,k+1} \geq F_{i,j,k} \quad (4)$$

with $F_{i,j,k} = S_{i,j,k} + T_{i,j,k} + B_{i,j,k}$ and $S_{i,j,k} = \max\{F_{i-1,j,k} + P_{i,j,k}, S_{i,j,k-1} + T_{i,j,k-1}\}$. Specific values in this respect may be assumed as follows: $P_{i,j,k} = 0$ for $k = 6, 8$ and $P_{i,j,7} = \frac{D_{m,n}}{V_e}$; $T_{i,j,8} = \frac{60}{E_y}$, $T_{i,j,7} = \frac{D_{m,n}}{V_l}$, $T_{i,j,6} = \frac{60}{E_q}$.

Finally, the blocking times are specified as follows for all i, j :

$$B_{i,j,k} = \max\{(F_{i-1,j,k} + P_{i,j,k}) - (S_{i,j,k-1} + T_{i,j,k-1}), 0\} \text{ for } k = 8, 7 \text{ and } B_{i,j,6} = 0.$$

4.4 Simulation Modeling

On the basis of the modeling mentioned above, we utilize the Harvard architecture and multi-agent systems to design the simulation of single ship handling and transportation processes on the platform of AnyLogic 6.3.1 and SQL Server 2005 whose model thinking has been discussed in [8, 9, 10, 11] in detail. The detailed simulation design may be specified as follows.

Active objects which are essentially Java classes are the main building blocks of the AnyLogic model and are the natural basis for developing agents as they possess all necessary properties: within an active object one can define variables, events, state-charts, system dynamics stock and flow diagrams. We can define as many active object classes in our model as there are different types of agents to model very diverse objects at a terminal. We model the interaction of agents in a simulation via a UML sequence diagram as Figure 8 illustrates. As the sequence diagram is semantically equivalent to the communication diagram to express the communication among agents in simulation, Figure 8 also indicates the communication between agents in the model.

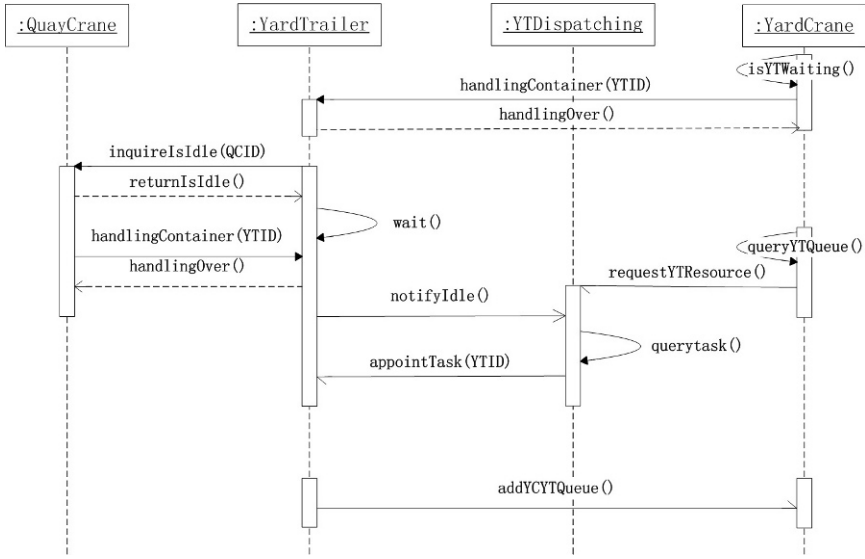


Fig. 8 Sequence diagram of single ship handling and transportation.

The foundation of a communication mechanism in multi-agent systems is of significance, enabling each agent to comprehend with one another on a semantic level, for the sake of structuring an organic whole to accomplish the task through cooperation. Furthermore, the communication mechanism is supposed to support synchronous and/or asynchronous communication, and one-to-one, one-to-many and broadcast communication. AnyLogic supports four continuous and discrete time active object interaction mechanisms: calling methods, variables connection, message passing and parameter propagation. The regular AnyLogic inter-object communication facilities are the same with agents in the practical modeling as they are subclasses of the AnyLogic built-in class Agent which extends the class ActiveObject. When we declare the active objects as Agent and have them in the same environment, we can get one more way of agent communication: message passing via environment. The involved agents in single ship handling and transportation are QC agents, YC agents, YT agents and a YT scheduling agent. We fuse the blackboard system and message/conversation to form the communication mechanism in single ship handling and transportation, which adapts to high capacity with low frequency and low capacity with high frequency with simultaneity. The blackboard system is implemented by the database, which is discussed in the next section.

The message/conversation is designed as follows. We center the YT scheduling agent in the model, it sends the scheduling instructions to the corresponding production equipments, receives their resource demands and gains the busy/idle state of facilities in virtue of the above five communication mechanisms. In the simulation, containers are also regarded as the messages which are passed from yard agents to CT agents and from CT agents to QC agents, and vice versa. In the implementa-

tion of container logistics, all the agents build a network and the network is dynamic as the relations between agents are less persistent, i.e., each container is handled by various facilities in different stages and we adopt a dynamic scheduling policy for YT scheduling.

4.5 Data Driven Simulation

A few weeks or days before a vessel arrives, terminal planners determine the sizes and locations of storage areas for the containers to be loaded onto the vessel, and then determine the position of containers to be stacked in the appointed storage area later in the process of collecting containers. A few hours before a vessel arrives, they determine the sequence of discharging and loading containers for the vessel, and the berth and QCs are going to be assigned to the vessel. Once handling operations start on the vessel, handling jobs of the QC will generate transportation jobs for the YTs and handling jobs for the YC. The transportation jobs are dispatched to highly mobile YTs on a real-time basis through voice communication or a wireless computer network. On the basis the above work flow, the information regarding the vessel and interrelated containers can be obtained through EDI, radio frequency identification (RFID), enterprise portal etc. Upon that we expect that the simulation which is data driven can produce the corresponding schedules, which are stored in the database and can be accessed by the other applications, to guide the production and improve the operations efficiency, or evaluate the effort of the corresponding scheduling policy. In the process of simulation, the database is the blackboard system that provides a shared area in which the agents may exchange data, information and knowledge. Moreover, the blackboard system is carved up several districts according to information purpose for optimization. Each table in the given database is just an inherent district and the database guarantees the atomicity, consistency, isolation and durability (ACID) characteristics of transactions processing which is triggered by the event handling in the simulation. The database also provides concurrency for the read-write channel between simulation and backgrounding. The scheduling plan generated by simulation may be considered as the program stored in the database, which can be regarded as the hard disk of CTL, to drive the container terminal operation. The model and simulation will evolve according to the practical scheduling effort and adjust the parameters by the information collected through the IT infrastructure.

4.6 Scheduling Principle

We model the single ship handling and transportation using the Harvard architecture, and then we introduce the resource allocation policies and algorithms of the operation system (OS) to schedule YTs. In our modeling thought, the YTs are resources

in substance and the exclusive equipments. We introduce the semaphore mechanism that is a highly effective tool for the synchronization and mutex of process in OS into the YT scheduling at terminals. We set up the resource record table in the background database and note the idle and busy status of the YTs. We regard the YTs as the semaphore, i.e., integer variables. The physical meaning of semaphore is the usable number for YT resources when the semaphore is greater than or equal to zero; the absolute value of the semaphore is the blocked YT requests when the semaphore is smaller than zero. In the practical handling at terminals, we should avoid that QCs and YCs suspend for waiting for YTs, especially for QCs. When the waiting YT's queue length under a QC or YC is smaller than a certain valve value, the QC or YC sends the request for yard trailers. Therefore, the case that a QC or YC waits for YTs for transfer has little chance to happen. In the case of export containers, we rank the YCs according to the difference between the waiting YT queue length under the YC and the corresponding YC request numbers with sort ascending and dispatch the YT resources in turn [7]. The case of import containers is similar to the above scheduling. In scheduling simulation, there are a mass of parallel requests and read-write to database whether the simulation or the communication between AnyLogic and the database (SQL Server 2005). In the simulation, we define the relevant dynamic events that are defined in AnyLogic in advance and multiple instances of the same dynamic event can be scheduled concurrently in the model. SQL Server 2005 provides the mechanism to guarantee the rationality of parallel read-write between AnyLogic and the background database as mentioned above.

4.7 Simulation Results

According to the above modeling approaches, we simulate the instance of a single ship handling and transportation on the AnyLogic platform. The handling equipment involves 6 QCs, 18 YCs and 42 YTs and the operational parameters are in accordance with the statements in the simulation scenario. All the 300 export containers are 40 feet (2 TEU), and every YT can only transfer one container at a time. Considering the option of a pre-stowage plan in practice, the handling number of each quay crane is 52, 49, 52, 43, 52 and 52, respectively, and the number of waiting handled containers in the 18 yard zones is 18, 18, 17, 14, 18, 18, 18, 9, 18, 18, 16, 16, 18, 18, 18, 17, 16 and 15, respectively. The initialization for the distribution of YTs in these zones is 1, 4, 4, 1, 4, 4, 2, 2, 1, 3, 1, 2, 4, 0, 0, 4, 3 and 2, respectively.

Zhang and Wang [22] simulate the same instance in eM-Plant, in which the ultimate completion time for a static scheduling policy is 02:11 (two hours and eleven minutes), and the time for dynamic scheduling based on a genetic algorithm (GA) is 01:56. In [8, 9, 10, 11], we have discussed the formalization modeling framework of a CTL based on the Harvard architecture and multi-agent systems. Here we introduce the semaphore mechanism that is a highly effective tool for the synchronization and mutex of processes in OS into this instance. We set up the resource record table in the background database. Based on the idea of load balancing and

the practical situations at container terminals, QCs and YCs are supposed to be kept busy all around. So the table mostly notes the idle and busy status of the YTs. We regard the YTs as the semaphore by means of integer variables. The physical meaning of semaphore is the useable number for YT resources when the semaphore is greater than or equal to zero; the absolute value of the semaphore is the blocked YT requests when the semaphore is smaller than zero. In this instance, we should avoid that QCs and YCs become idle as they are waiting for YTs. When the waiting YT queue length under a QC or a YC is smaller than a certain valve value, the QC or YC sends the request for YTs. Therefore, a QC or YC usually need not wait for some YTs for transfer. In the case of export containers, we rank the YCs according to the difference between the waiting YT queue length under a YC and the corresponding YC request numbers sorted in ascending order and dispatch the YT resources in turn. We set the semaphore to 2 and get the total time of handling and transportation as 01:50. The pertinent results are shown and compared in Table 1. If we keep the container distribution to QCs and YCs in accordance with the pre-stowage plan, the YTs are scattered on the 18 yard zones at random, which cause that every yard zone possesses from 0 to 4 YTs. We run the simulation on a notebook PC configured with Intel Core™ Duo CPU T5250 (1.50 GHZ * 2) and 3G main memory under the Windows Vista™ Home Basic operation system. We set the maximum available memory of AnyLogic to 512 MB, and simulate the instance 1000 times, which consumes 5931.8 seconds in experimentation. We obtain the following result (see Figure 9): the minimal transfer time is 01:25, the maximal one is 02:19, the average time is 01:41 and the standard deviation is 9.3633.

Table 1 Comparison of simulation results.

Scheduling policy	Completion Time (Hour: Minute)	Max Waiting YTs under QCs	Max Waiting YTs under YCs
Semaphore mechanism	1:50	8	3
Genetic algorithm	1:56	7	3
Static scheduling	2:11	4	3

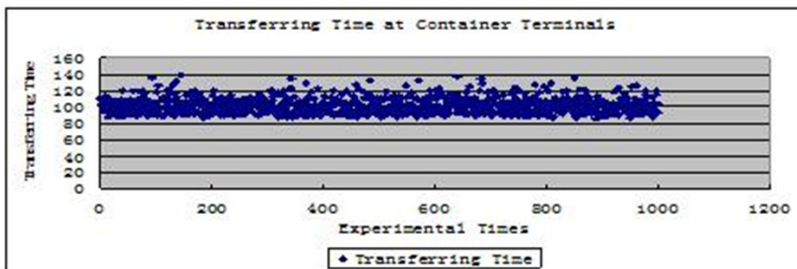


Fig. 9 Experimental results.

5 Simulation Based Optimization for CTS

The results of the above mentioned simulation outperform previously known results, but we need to investigate whether it matches the optimization results under the current handling facilities and yard resources. Since we built the CTS based on the HFS-BA, we can try to regulate the number of processors at every stage and the correlative working parameters to obtain a better solution.

We redesign the model under the direction of simulation based optimization (SBO) whose fundamental idea is to simulate the operations of complex systems and evaluating the performance, and the topper optimizer, which is based on computational intelligence (CI), optimizing the system according to the simulation results. In the SBO, the objective functions and constraints of an analytical model are substituted by a simulation model, and optimization algorithms generate initial solutions of decision variables and import them into the simulation model. The model exports one or several response values that indicate the performance index of the system, and feed them back into the optimization algorithm as the evidence for the new search direction, and the search result is going to be imported again. The above processing will not suspend until meeting some pre-established termination conditions; cf. Figure 10.

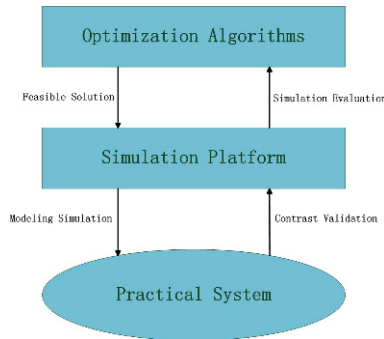


Fig. 10 Basic principle of SBO.

AnyLogic is provided with the open applications architecture (OAA) as mentioned above, and AnyLogic optimization is built on top of the OptQuest Optimization Engine, which is one of the most flexible and user-friendly optimization tools within simulators today. The OptQuest Engine incorporates metaheuristics to guide its search algorithm towards better solutions. The OptQuest Engine combines tabu search, scatter search, integer programming, and neural networks into a single, composite search algorithm providing support for identifying new scenarios, which provides the CI engine for the SBO. On the other hand, AnyLogic offers many types of frameworks for experimentation that include the one for SBO. It is intended to determine good parameter combinations resulting in finding best possible solutions.

The system behavior can be observed under various conditions, as well as an improvement of system performance.

We set the number of QCs, YTs and YCs, i.e., the processor configuration, the speed of loaded and empty YTs, the handling efficiency of QCs and YCs and the value of the semaphore, which are the process control settings of processors at each machining phase, as decision variables.

Considering the modeling idea of Section 4.3 we assume the following constraints on the control settings of the processors:

$$6 \leq V_l \leq 18 \tag{5}$$

$$12 \leq V_e \leq 36 \tag{6}$$

$$V_e = 2 \times V_l \tag{7}$$

$$30 \leq E_q \leq 45 \tag{8}$$

$$25 \leq E_y \leq 40 \tag{9}$$

$$5 \leq E_q - E_y \leq 10 \tag{10}$$

$$1 \leq V_s \leq 5 \tag{11}$$

We run the simulation on a notebook PC configured with Intel Core™ Duo CPU T5250 (1.50 GHZ * 2) and 3G main memory under the Windows Vista™ Home Basic operation system. We set the optimization iteration count to be 1000 and the maximum available memory of AnyLogic at 256 MB, and get the best solution by performing the SBO experiment on AnyLogic which consumes 3710.5 seconds in experimentation.

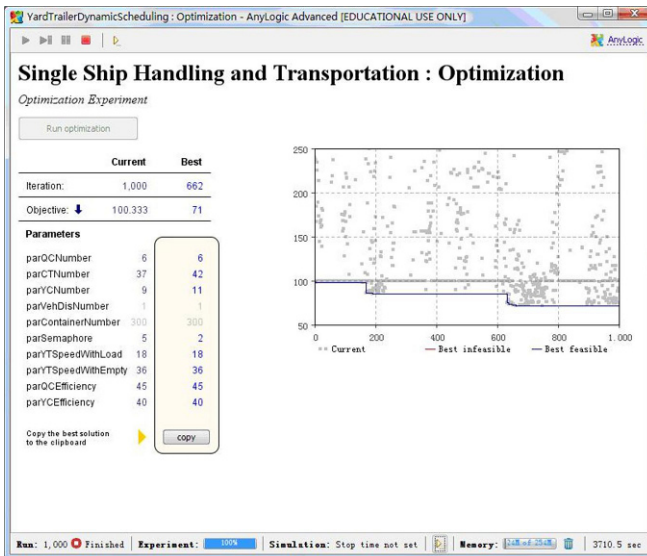


Fig. 11 SBO for single ship handling and transportation.

As Figure 11 shows, we find the best solution at generation 662. The best solution is described as follows: the number of QCs, YTs and YCs are 6, 42 and 11, respectively, and the semaphore value, the speed of YTs with load, the speed of empty running YTs, the handling efficiency of the QCs and the handling efficiency of YCs are 2, 18, 36, 45 and 40, respectively. The total handling and transportation time is 01:11, and the maximum number of YTs waiting under the QCs is still 8 and the maximum number of waiting YTs under YCs turns into 4. If we keep the parameters of the handling equipment as in the aforementioned simulation scenario, we only set the number of QCs, YTs, YCs and the semaphore value as the optimization parameters, and run the similar SBO experimentation on AnyLogic with the same software setting and hardware configuration. We obtain the best solution at generation 284 and the experimentation consumes 4337.8 seconds overall. The best solution has a number of 6 QCs, 38 YTs, and 11 YCs, respectively, and the semaphore value is 1. The total handling and transportation time is 01:18, and the maximum number of waiting YTs under the QCs is still 8 while the maximum number of waiting YTs under YCs is 4, too.

Through the above simulation and optimization, we conclude that the methodology utilizing HFS-BA as the model of CTS and building the corresponding formalization model on the basis of the Harvard architecture and multi-agent system can not only put forward an integrated solution for container terminal scheduling problems but also provide engineering value. The methodology may be implemented as simulation platform or tool, and with this as a part of intelligent decision support systems, which not only assists the dispatchers by shaping the routine scheduling at container terminals but also supports tactical and strategic decision-making in ports, e.g., for the configuration of facilities for combined loading/unloading and the speed of YTs for transfer etc.

6 Conclusions

Container terminal scheduling systems may be classified as typical discrete element dynamic systems (DEDS) whose characteristics may be found in logistics systems as well as in flexible manufacturing. In this paper we built on these commonalities and utilized the hybrid flow shop problem with blocking based on attributes to develop a model for container terminal scheduling systems. Based on this idea we have investigated the Harvard architecture and a multi-agent approach for presenting a systemic and effective methodology for simultaneous scheduling and resource allocation. Simulation results have indicated that this methodology provides research meaning as well as practical (engineering) value.

Acknowledgements The work has been supported by the National Key Technology R&D Program of China during the 11th Five-Year Plan Period (No. 2006BAH02A06) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60475031).

References

1. Hartmann, S.: Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics. *OR Spectrum* 26 (2004) 171–192
2. Henesey, L., Davidsson P., Persson, J.A.: Agent based Simulation architecture for evaluating operational policies in transshipping containers. In: 4th German Conference, MATES 2006 Erfurt, Germany. LNCS, vol. 4196, Springer, Heidelberg (2006) 73–85
3. Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., Papadimitriou, S.: Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research* 179 (2007) 579–593
4. Iris, F.A., de Koster, R.: Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European of Operational Research* 147 (2003) 1–16
5. Kim, K.H., Park, Y.-M.: A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research* 156 (2004) 752–768
6. Lee, L.H., Chew, E.P., Tan, K.C., Han, Y.: An optimization model for storage yard management in transshipment hubs. *OR Spectrum* 28 (2006) 539–561
7. Li, B., Li, W., Zhang, Y.: Agent-based modeling and simulation for vehicle dispatching at container terminals. *Journal of System Simulation* 20 (2008) 5158–5161+5198
8. Li, B., Li, W., Zhang, Y., Zhang M.: Modeling of container terminal logistics system based on multi-agent. *Journal of Southeast University (English Edition)* 23 (2007) 146–150
9. Li, B., Li, W., Zhang, Y.: Study on modeling of container terminal logistics system using agent-based computing and knowledge discovery. In: International Symposium on Advances in Computer and Sensor Networks and Systems. Aardvark Global Publishing, Salt Lake City (2008) 164–171
10. Li, W., Li, B., Zhang, Y.: Container terminal scheduling and decision-making using simulation based optimization and business intelligence. In: 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE Press, New York (2008) 1053–1058
11. Li, B., Li, W., Zhang, Y.: Modeling of container terminal logistics system using multi-agent and data mining. In: 4th International Conference on Intelligent Logistics Systems. Nanjing University Press, Nanjing (2008) 164–170
12. Li, B., Li, W.: Research on RFID oriented information fusion in intelligent logistics. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China* 36 (2007) 1329–1332+1349
13. Ng, W.C., Mak, K.L.: Yard crane scheduling in port container terminals. *Applied Mathematical Modelling* 29 (2005) 263–276
14. Stahlbock, R., Voß, S.: Operations research at container terminals: A literature update. *OR Spectrum* 30 (2008) 1–52
15. Steenken, D., Voß, S., Stahlbock, R.: Container terminal operation and operations research – A classification and literature review. *OR Spectrum* 26 (2004) 3–49
16. Luck, M.: Agent-based Computing. *GEOconnexion International* 5 (2006) 36–37
17. Hennessy, J.L., Patterson, D.A.: *Computer Architecture: A Quantitative Approach*, Fourth Edition. Morgan Kaufmann, San Francisco (2007)
18. Günther, H.O., Kim, K.H.: Container terminals and terminal operations. *OR Spectrum* 28 (2006) 437–445
19. Pinedo, M.: *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Third Edition. Springer, New York (2008)
20. Voß, S., Witt, A.: Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application. *International Journal of Production Economics* 105 (2007) 445–458
21. Witt, A., Voß, S.: Simple heuristics for scheduling with limited intermediate storage. *Computers & Operations Research* 34 (2007) 2293–2309
22. Zhang, Y., Wang, S.: The research of trailer scheduling based on the hybrid flow shop problem with blocking. In: 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE Press, New York (2008) 3936–3940
23. Zhang, Y., Wang, S.: Research of dynamic berth allocation of continuous case based on GA. *Journal of System Simulation* 19 (2007) 2161–2164

Supporting the Definition of Strategies for the Configuration of Health Care Supply Chains

Nazaré Rego and Jorge Pinho de Sousa

Abstract This paper presents an innovative approach for supporting the definition of strategies in designing alternative configurations of hospital supply chains. This approach was developed around a hybrid Tabu Search / Variable Neighborhood Search metaheuristic that uses several neighborhood structures. The flexibility of the procedure allows its application to supply chains with different topologies and atypical cost characteristics. The approach has been tested on a group of problem instances based on real data and constructed with the support of hospital supply departments. Preliminary computational results show its potential in solving large scale, diversified supply chain configuration problems.

Key words: supply chain configuration, health care, hospitals, metaheuristics, Tabu Search, VNS

1 Introduction

1.1 Background and Research Motivations

In the last decades, we have seen a significant and persistent increase in the effort represented by health care expenditures in many countries' economies (see Figure 1). Probably as a consequence of this trend, many academics and consultants (see

Nazaré Rego

Department of Management, Escola de Economia e Gestão, Campus de Gualtar, University of Minho, 4710-057 Braga, PORTUGAL
E-mail: nazare@eeg.uminho.pt

Jorge Pinho de Sousa

INESC Porto / Faculty of Engineering, University of Porto, Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, PORTUGAL
E-mail: jsousa@inescporto.pt

[21] or [5]) have been claiming that Supply Chain Management (SCM) principles should be applied to the health care industry, as a way to simultaneously achieve a considerable cost reduction and an improved service quality (for example, through increased service and materials availability and medical errors reduction).

In Portugal, in 2004, public hospitals were accountable for approximately 21% of total national expenditure on health and supply costs representing as much as 27% of a hospital’s total costs [39]. Therefore, we can estimate that hospital’s supply costs represent around 6% of total national expenditure on health.

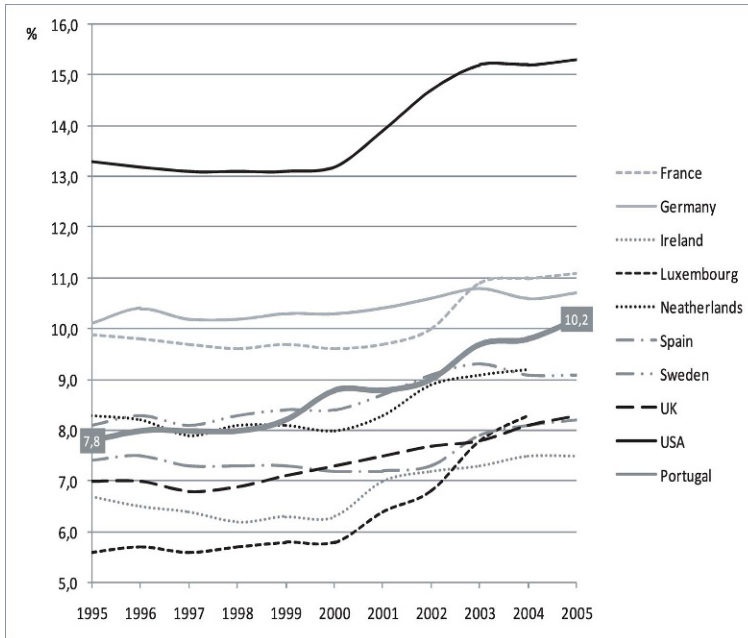


Fig. 1 Total expenditure on health as share of GDP, 1995–2005 (source: OECD Health Data 2007).

In the USA, the EHCR report [20] estimated that savings of roughly 13% of supply expenditures could be achieved through improved flows of product, cash and information without harming quality of service. However, promising results reported by ongoing projects with the aim of improving logistic activities (see [22]) make us believe that the positive impact of such initiatives at Portuguese hospitals may be significantly higher.

The work presented in this paper intends to contribute to the improvement of the logistic organization of health care services, through the development of an approach to support the formulation and implementation of their supply chain configuration strategies, with positive impacts on costs, on service quality and on the time and the space available to perform health care provision (to be gained by enhanced logistic activities).

1.2 The Health Care Supply Chain

The health care supply chain is particularly complex when compared with those of other industries (Figure 2 shows a schematic representation of the Portuguese health care supply chain).

One of the main reasons for this complexity is the great variety of services and products provided to fulfill the needs of multiple internal and external clients – the patients [19, 44], the hospitals and primary care centers, which are the final institutional clients [10], the persons in charge of material orders and supplier choice (these may be physicians, pharmacists, managers, etc.) [10], the professionals (physicians, nurses, etc.) that serve the patients [44], and the payers of the health care service (in case of a public provider, the state, i.e., the tax payers) [44]. This supply system must assure a high service level, as the occurrence of stock-outs can damage the health care system image or, in extreme situations, threaten the patients’ life, involves very large costs, particularly concerning medical-surgical supplies and pharmaceuticals, and is highly conditioned by existing legislation (e.g., reimbursement systems).

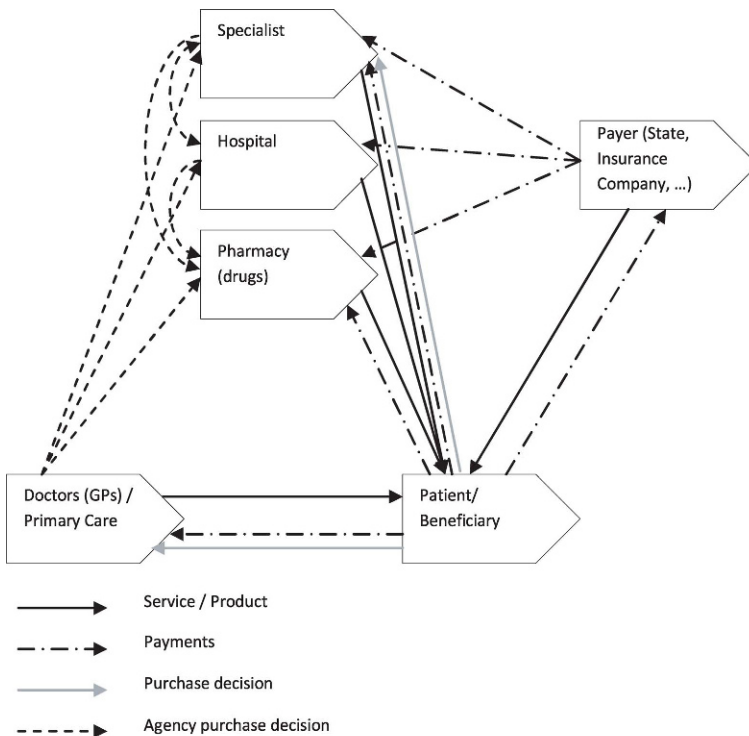


Fig. 2 Portuguese health care supply chain (adapted from [21]).

Furthermore, the health care supply chain is managed through a complex line of command based on a sensitive balance of power relationships among diverse highly trained professional groups (managers, physicians, nurses, pharmacists, etc.) that work at autonomous units [17]. The system is also highly dependent on the role physicians play in its management [44], as they perform the diagnosis and decide treatment paths, evaluate the demand of goods/services required by each patient, influence the time that each patient spends in the hospital (and this impacts the consumption of materials/services), develop long run relationships with suppliers and preferences on specific materials and products, reflecting, e.g., their education in specific medical schools.

Besides the management of the flows and inventories of materials, the health care supply chain involves issues related to the availability of the appropriate facilities, equipments and human resources at the right time and place, and to the flows of people (personnel, patients and visitors) at the services and when providing domiciliary care, but Burns [10] emphasizes that hospitals and their (internal and external) supply networks are responsible for much of this complexity, as illustrated in Figure 3 and Figure 4.

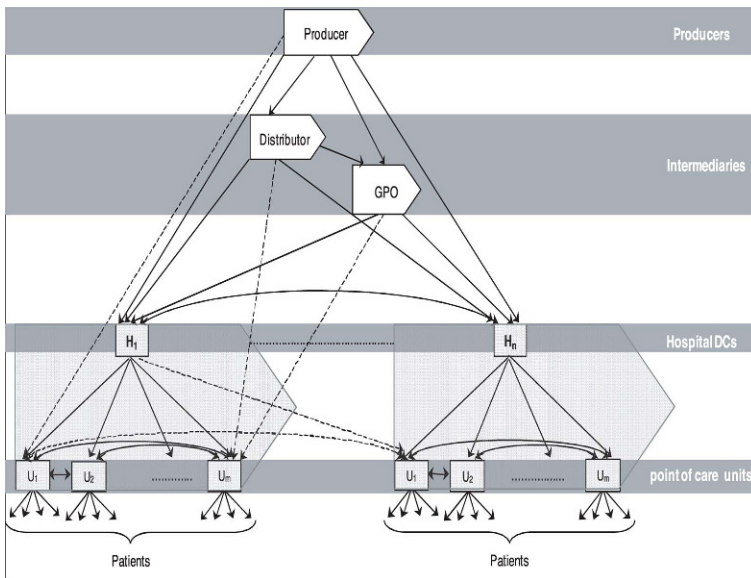


Fig. 3 Hospital supply chain.

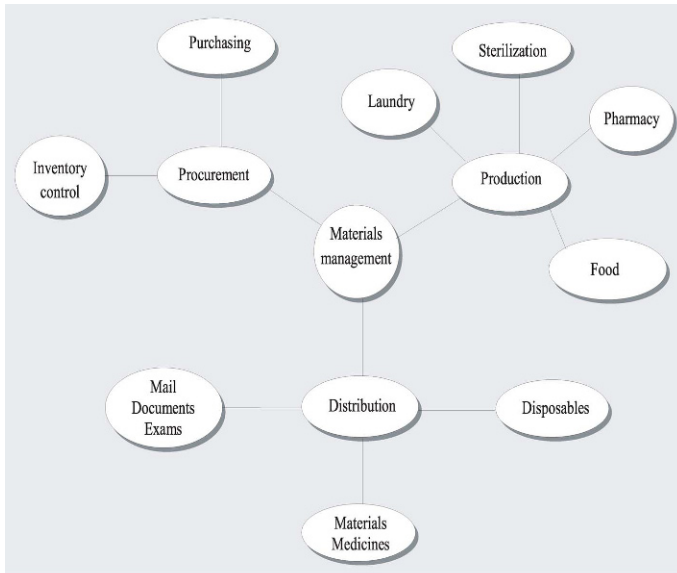


Fig. 4 Hospital logistic activities (adapted from [3]).

1.3 The Health Care Supply Chain Configuration Problem

Our definition of the problem is an adaptation of the general supply chain configuration problem concept proposed by Graves and Willems [28] to the health care industry. Thus, the health care supply chain configuration problem consists on deciding whether, when, and how to use an existing supply chain structure (e.g., deciding where to locate storage points, how to use those locations in the existing facilities, and how to move materials/people between those points).

1.4 Literature Review

Existing empirical studies concerning supply chains in the health care industry are relatively scarce and can be categorized as follows:

- I. Studies that solve the problem of determining the best blood supply chain: Prastacos [38] presents a review of works in this area from the 60's to the 80's; Pier-skalla [37], Ryttilä and Spens [41] and Katsaliaki and Brailsford [29] are examples of recent research in this area.
- II. Qualitative empirical studies (mainly descriptive) concerning the whole supply chain, e.g., Burns [8], Beaulieu & Patenaude [4], Schneller & Smeltzer [44].
- III. Studies that focus on a specific aspect of the health care supply chain (Table 1 presents some examples).

Table 1 Examples of studies that focus on a specific aspect of the health care supply chain.

Aspect studied	Examples
Group purchasing organizations (GPOs)	[43], [35], [9]
Resources pooling	Pasin et al. [36] evaluate the effect of domiciliary care equipment pooling among a group of centers in the Montreal region; Danas et al. [14], [15] propose a virtual pharmacy system to allow sharing of pharmaceutical inventory among hospitals.
The stockless system	Rivard-Royer et al. [40] analyze the implementation of a hybrid stockless system in the urology unit of one hospital; Nicholson et al. [34] compare analytically a traditional 3-echelon distribution scheme with the stockless system (outsourcing inventory decisions).
Vendor Managed Inventory (VMI)	Tsui et al. [45] evaluate the implementation of a VMI system on the pharmacy services of an Australian teaching hospital; Danese [16] studies a VMI implementation in the downstream and upstream supply network coordinated by GlaxoSmithKline to co-ordinate material and information flows among different suppliers, manufacturing and distribution plants.
E-commerce and e-communication	More and McGrath [32] evaluate the Australian health care industry e-communication project; Breen and Crawford [6] analyze the role of e-commerce in the acquisition of pharmaceutical products; Zheng et al. [46] analyze the linkages between e-adoption and the supply chain strategy.

From this review we can conclude that the research concerning the structure of the whole supply chain applied to the health care industry is still in its early stages as there is a lack of correlation and causal studies that use quantitative methods (namely in the field of operational research) and analyze the whole supply chain.

On the other hand, if we do not consider only the specific literature on the health care industry, there is a vast amount of scientific work related to the design of supply chains and related practical applications (Table 2 presents a summary of some of the most important models in this area). The approaches that have been used to solve supply chain configuration problems can be divided in five main categories: network optimization and/or mixed integer programming (MIP), stochastic optimization (see, e.g., [42]) and robust optimization, heuristic methods, simulation and hybrid methods, that is, methods that combine various of the above approaches (see, e.g., [18]). We are particularly interested in heuristic, simulation and/or hybrid methods as they are more suitable to analyze real life, highly combinatorial problems and provide the necessary flexibility to cope with a great diversity of problems.

Table 2 Supply chain design problem: summary of reference models.

	Lakkhal et al. [30]	Arntzen et al. [2]	Cohen and Moon [11]	Cohen et al. [12]	Cohen and Lee [13]	Brown et al. [7]	Glover et al. [25]	Geoffrion et al. [23]	Geoffrion and Graves [24]
Practical application		✓				✓	✓	✓	✓
Number of periods									
Single-period	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
Multi-period		✓		✓					
Capacity restrictions									
Production (at plants)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Supply (of vendors)	✓		✓	✓	✓				
Distribution centre (DC)		✓					✓		✓
Storage	✓						✓		
Others							✓		
Objective function									
Cost minimization			✓			✓	✓	✓	✓
Profit maximization	✓			✓	✓		✓	✓	
Plant expansion minimization						✓			
Multi-attribute		✓							
Multi-objective									
Nonlinear costs		NC							
DC costs								✓	✓
Production costs			✓						
Transportation costs									
Acquisition costs									
Fixed costs	NC								
Production costs		✓	✓	✓	✓	✓			
Installation costs					✓	✓	✓	✓	✓
Vendor costs				✓	✓				
Production costs							✓		
Manufacturing line costs		✓							
Solution methods									
Benders decomposition								✓	✓
Decomposition with com goal constraints						✓			
A variant of Benders decomposition			✓						
Factorization		✓							
Heuristic method	✓			✓					
Commercial MIP solver	✓								
LP by fixing binary variables					✓				
Network optimization (algorithm included in a commercial software package)							✓		
NC: Not clearly stated in the paper									

2 Problem Formulation

2.1 Model Description

Our model was inspired by the Ahuja et al. [1] formulation of the multi-stage, multi-level, multi-product production-distribution system planning problem, based on a graph representation of the problem. The multi-period dimension of the problem is incorporated in the model through the replication of the supply chain with “inventory edges” connecting storage areas (i.e., at hospital distribution centers and point of care units) in subsequent periods. Figure 5 illustrates the application of this modeling logic to the planning of a very simple supply chain: two producers (P_1 and P_2), one intermediary, e.g., a GPO or a medical supplies distributor (I_1), and two hospitals with two point of care units each (U_{11}, U_{12}, U_{21} and U_{22}), during three periods.

The model considers: (1) fixed administrative costs for establishing commercial relationships between a supplier and a customer, e.g., costs of negotiation and contracts; (2) fixed transportation costs; (3) variable transportation costs; (4) acquisition costs, including intermediary margins; and (5) inventory carrying costs.

Due to the nature of the acquisition costs and inventory carrying costs considered, our mathematical formulation cannot be based on the structure that is frequently found in the literature (some examples can be found in [33]), that associates the decision variables to the quantities that flow through the network edges. Therefore, as any item flowing through a specific edge can have different costs, depending on the edges previously used to get to that point (as illustrated by the situations presented at Table 3), we developed a formulation that associates the quantities supplied to the supply paths that have been used.

Before presenting a MIP formulation for the problem, we introduce the notation used throughout the paper. We assume that all relevant data (costs, capacities, and

Table 3 Examples of the formation of an item unit cost at the demand point.

Unit costs	Situation 1	Situation 2	Situation 3
Acquisition cost	120	110	120
Intermediary margin	10%	10%	15%
Inventory cost rate	0,5%	0,5%	0,5%
Cost at demand point	132,66	121,605	138,69

Situation 1: Supply path: producer 1, intermediary 1, 1 period storage at hospital 1 distribution centre, consumption at care unit 1 of hospital 1

Situation 2: Supply path identical to situation 1 except that acquisition is from producer 2

Situation 3: Supply path identical to situation 1 except that acquisition is from intermediary 2

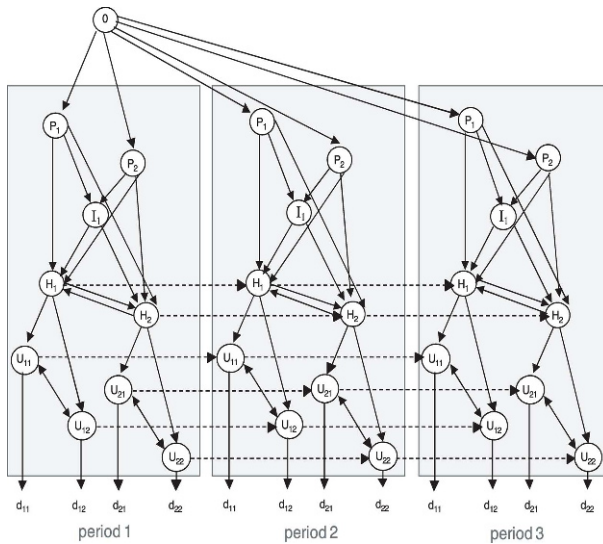


Fig. 5 Illustration of the model.

other parameters) have been collected using appropriate estimation / forecasting methods and company-specific business analyses.

2.2 Notation and Definition of Decision Variables

Index sets

- $G = \{1, 2, \dots\}$ – items
- $K = \{1, 2, \dots\}$ – network paths
- $R = \{1, 2, \dots, i, j, \dots\}$ – network entities (i.e., producers, intermediaries, hospitals and point of care units)
- $E = \{1, 2, \dots\}$ – demand entities (i.e., point of care units). E is a subset of R
- $S = \{1, 2, \dots, p, t, \dots, smax\}$ – periods

The way each node or edge is identified according to its indices is illustrated in Figure 6. Each network edge can be classified as a “supply edge”, if it links different entities in the same period, i.e., when $(i \neq j) \wedge (p = t)$, or as a storage edge if it links one entity in different, consecutive periods, i.e., when $(i = j) \wedge (t = p + 1)$.

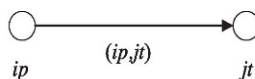


Fig. 6 Edge (ip, jt) links entity i in period p to entity j in period t .

Costs

- a_{ij} = fixed administrative cost of establishing a commercial relationship between entity i and entity j .
- f_{ij} = fixed transportation cost from entity i to entity j .
- v_{gij} = cost of transporting one unit of item g from entity i to entity j .
- h_{gip} = rate (applied to the aggregated acquisition cost) used to calculate the cost of maintaining one unit of item g stored at entity i from period p until period $p + 1$.
- w_{gi} = price at which supplier i sells each unit of item g .
- m_{gij} = commercial margin that intermediary j adds to the acquisition cost of item g when he/she buys one unit of it from supplier i .

Parameters

- d_{gjt} = demand of item g by entity j in period t .
- SC_i = storage capacity of entity i .
- FC_{gip} = supply capacity of item g by entity i in period p .

Decision variables

- Q_{gk} = quantity of item g that flows through path k .
- $X_{ipjtk} = \begin{cases} 1, & \text{if edge } (ip, jt) \text{ belongs to path } k, \text{ with } (j \geq i) \wedge (t \geq p) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

Intermediate variables

- $Y_{ipjt} = \begin{cases} 1, & \text{if edge } (ip, jt) \text{ is a supply edge, i.e., if } (p = t) \wedge (i \neq j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $Z_{ipjt} = \begin{cases} 1, & \text{if edge } (ip, jt) \text{ is a storage edge, i.e., if } (t = p + 1) \wedge (i = j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if the supply link between } i \text{ and } j \text{ is used, i.e., if} \\ & \sum_g \sum_i \sum_p \sum_j \sum_t X_{ipjtk} Y_{ipjt} \cdot Q_{gk} \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- e_{gkrs} = acquisition cost of one unit of item g at the entry of node rs (that is, at the entry of entity r at the beginning of period s) belonging to path k .
- o_{gkrs} = aggregated inventory carrying cost of one unit of g at the entry of node rs (that is, at the entry of entity r at the beginning of period s) belonging to path k .

2.3 Formulation

The regarded costs are given as follows:

$$\text{fixed administrative cost} = \sum_i \sum_j A_{ij} a_{ij} \tag{1}$$

$$\text{fixed transportation cost} = \sum_k \sum_i \sum_p \sum_j \sum_t X_{ipjtk} Y_{ipjt} f_{ij} \tag{2}$$

$$\text{variable transportation cost} = \sum_k \sum_i \sum_p \sum_j \sum_t X_{ipjtk} Y_{ipjt} Q_{gk} v_{gij} \tag{3}$$

$$\text{aquisition costs} = \sum_g \sum_k e_{gkip} Q_{gk}, \quad \forall i \in E, \forall p \in S \tag{4}$$

where e_{gkrs} can be further described as follows:

$$e_{gkrs} = \begin{cases} e_{gkip}, & \text{if } Z_{iprs} = 1, \\ \sum_i \sum_p \sum_j \sum_t^{j < r t \leq s} (w_{gi} X_{ipjtk} Y_{ipjt}) \cdot \prod_i \prod_p \prod_j \prod_t^{j < r t \leq s} [1 + (m_{gij} X_{ipjtk} Y_{ipjt})], & \\ & \text{if } Y_{iprs} = 1, \quad \forall g \in G, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall s \in S \end{cases}$$

Furthermore, inventory carrying costs are given as follows:

$$\text{inventory carrying cost} = \sum_g \sum_k o_{gkip} Q_{gk}, \quad \forall i \in E, \forall p \in S, \tag{5}$$

where o_{gkrs} can be further described as follows:

$$o_{gkrs} = \begin{cases} o_{gkip}, & \text{if } Y_{iprs} = 1, \\ o_{gkip} + (e_{gkrs} + o_{gkip}) \cdot h_{grs} X_{iprsk} Z_{iprs}, & \\ & \text{if } Z_{iprs} = 1, \\ & \forall g \in G, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall s \in S, \text{ with } i \in R, p \in S \end{cases}$$

The objective function can be stated as follows:

$$\begin{aligned} \min & \sum_i \sum_j A_{ij} a_{ij} + \sum_k \sum_i \sum_p \sum_j \sum_t X_{ipjtk} Y_{ipjt} f_{ij} \\ & + \sum_k \sum_i \sum_p \sum_j \sum_t X_{ipjtk} Y_{ipjt} Q_{gk} v_{gij} \\ & + \sum_g \sum_k e_{gkip} Q_{gk} \\ & + \sum_g \sum_k o_{gkip} Q_{gk} \end{aligned} \tag{6}$$

Subject to:

$$\sum_j \sum_t X_{00jtk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_p X_{iprsk} = 1 \quad \forall k \in K, \forall r \in R, \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_j \sum_t X_{rsjik} = 1 \quad \forall k \in K, \forall r \in R, \forall s \in S \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_k \sum_i \sum_p^{s_{max}} Q_{gk} X_{iprsk} Y_{iprs} + \sum_k \sum_i \sum_p Q_{gk} X_{iprsk} Z_{iprs} \\ & \sum_k \sum_j \sum_t Q_{gk} X_{rsjtk} Y_{rsjt} \\ & - \sum_k \sum_j \sum_t Q_{gk} X_{rsjtk} Z_{rsjt} = d_{grs} \quad \forall g \in G, \forall r \in R, \forall s \in S \quad (10) \end{aligned}$$

$$\sum_k \sum_j \sum_p Q_{gk} X_{ipjtk} Y_{ipjt} \leq FC_{gip}, \quad \forall g \in G, \forall i \in R, \forall p \in T \quad (11)$$

$$\sum_g \sum_k \sum_i \sum_p Q_{gk} X_{ipjtk} Z_{ipjt} \leq SC_i, \quad \forall i \in R \quad (12)$$

$$Q_{gk} \geq 0 \text{ and integer,} \quad \forall g \in G, \forall k \in K \quad (13)$$

$$X_{ipjtk}, Y_{ipjt}, Z_{ipjt}, A_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in R, \quad \forall p, t \in T, \forall k \in K \quad (14)$$

The objective (6) is to minimize the sum of fixed administrative costs (1), fixed transportation costs (2) and variable transportation costs (3), acquisition costs (4) and inventory carrying costs (5). Constraints (7) assure that all paths begin at the network artificial node 00, and constraints (8) and (9) assure that, for each path k , only one edge arrives at each node rs and only one edge departs from each node rs , guaranteeing that paths are formed to serve demand entities. Constraints (10) assure flow conservation at the entities and impose that all demand is satisfied. Constraints (11) and (12) impose capacity bundle restrictions: they ensure that all supply capacity (11) and warehouse storage (12) limitations are taken into account. Supply capacity difficulties occur episodically while the warehouse storage restrictions are constant during the whole planning horizon. Finally, constraints (13) and (14) define the domain for the decision variables.

3 Solving the Model

3.1 General Description of Algorithms

We developed two alternative approaches to solve the model: a Tabu Search (TS) algorithm (see Figure 7) and a hybrid algorithm based on TS and VNS (Variable Neighbourhood Search; see Figure 8).

Tabu Search is a very well-known and broadly used metaheuristic that was first presented by Glover [27, 26]. The main characteristics of this method include the possibility for forbidding certain movements in order to diversify the search, and the use of memory. Both characteristics guide the heuristic to continue the exploration of the solution space when no improvement movements can be found, without falling back into the local optimum from which it previously emerged. To do this, TS stores in memory, the solutions, classified as tabu, that contain these tabu-active attributes for a determined number of iterations. The main competitive advantage of this metaheuristic with respect to alternative heuristics, also based on local search, is the intelligent use of the past history of the search to influence its future steps.

```
Generate initial solution, X
Initialize tabu_list
Set X* = X
Set aspiration criterion
While stopping criterion is not met
    Generate n neighbors of X
    Choose Y the best neighbor of X
        that is not in the tabu_list or
        that satisfies the aspiration criterion
    If f(Y) is better than f(X*)
        X*=Y
    Update tabu_list
Return X*
```

Fig. 7 Tabu Search.

VNS, developed by Hansen and Mladenovic [31], is a relatively new and widely applicable metaheuristic, based on dynamically changing the neighborhood structures during the search process. The Variable Neighborhood Descent (VND), adopted in our algorithm, changes the neighborhood structures when the search is unable to find a better solution in the current neighborhood.

Our hybrid algorithm combines the search scheme of a Tabu Search, by incorporating a tabu list that forbids repetition of recent moves, with the diversification of VNS, by changing the neighborhood structure when the search seems unable to improve the current solution.

3.2 Initial Solution

Feasibility was considered an important requirement of the initial solution, since the restrictive characteristics of the problem may complicate the attainment of a feasible solution during the search.

```

Generate initial solution, X
Initialize tabu_list
Set X* = X
Set aspiration criterion

While stopping criterion is not met
  Choose the h neighborhood structure at random
  Generate n neighbors of X
  Choose Y the best neighbor of X
    that is not in the tabu_list or
    that satisfies the aspiration criterion
  If f(Y) is better than f(X*)
    X*=Y
  Else
    Increase the size of neighborhood structure
    parameter p=p+1
  If p> PMax change the neighborhood structure: h=h+1
  Update tabu_list
Return X*

```

Fig. 8 Hybrid Algorithm.

We tested three alternative construction algorithms for the initial solution, aiming at including the particular characteristics of the problem into the solving approach, namely: 1) a random generation procedure; 2) a modified version of the Dijkstra algorithm, for variable costs minimization; 3) another version of the Dijkstra algorithm, for the minimization of fixed costs.

The random initial solution is constructed through an iterated creation of paths until all demand is satisfied. Each path is formed starting at a point of care unit and adding edges until the network artificial node 00 is reached. The edge that arrives at the last node that was included in the path is chosen by selecting randomly its node of origin from all possible origins (all of these nodes have the same probability of being selected). This procedure led to better results on the computational tests performed, and therefore the procedure incorporated in our final algorithms was option 1) above.

3.3 Objective Function

The objective function implemented, $f(X)$, has two components: the original objective function of the problem (see Section 2.2) plus a function P that penalizes infeasibility (15).

$$P = \left[\sum_g \sum_k (\text{capacity excess}_{gk} \times \eta_g) \right] \times \varepsilon, \quad (15)$$

where:

- I. capacity excess $_{gk}$ is the sum of the excess quantities of item g that flow through path k relatively to the limits imposed by storage and supply constraints,
- II. ηg is a parameter that adjusts the penalization to the scale of the costs considered (in our algorithms, ηg is the higher unit price established by suppliers of item g), and
- III. ε is a dynamic parameter (updated every κ iterations) that is multiplied (divided) by 2 if the search stays in infeasible (feasible) regions (in our algorithms, ε is initially 1, and $\kappa = 10$).

For efficiency reasons, when we use neighborhood structures that swap paths taking the impact of their substitution on the costs into account, the solutions evaluation is based on an approximated total cost. The cost will only be exactly calculated when a new current solution is adopted.

3.4 Neighborhood Structures

Due to the specific characteristics of the costs considered in our model, where the cost of sending a given quantity through one edge depends on the supply path that quantity travelled before, we could not employ the most usual and simple moves, such as insertion or swapping of elements, to reach neighbor solutions. Therefore, we move to a neighbor solution by swapping supply paths (see Figure 9). During the search process we allow the temporary occurrence of infeasibility.

We developed three neighborhood structures using (complete or partial) path substitution. The two first procedures (NS1 and NS2) are used by the TS algorithm, and the third (Combined) combines NS1, NS2 and a random neighborhood scheme. This combination is achieved by running each of these three neighborhood structures during a given number of iterations, pmax (in our algorithm, pmax = 500).

NS1 selects the paths through the minimum unit cost, ignoring the current solution structure (i.e., the selection does not take into account the fact that other paths of the current solution may use common edges of the path under examination). NS2 selects the paths through the minimum unit cost but considering the current solution structure. The random neighborhood structure selects a new path by randomly choosing the chain elements in a way that the capacity constraints are satisfied.

The tabu list stores the last edge of a number of recently replaced paths (i.e., the combination edge \times path \times item), so that it is not possible to include these edges on the paths that will be tested to form new solutions. The tenure of the tabu list is randomly determined using a uniform distribution – Uniform $[\lambda \delta]$, where λ is the number of network elements/3 and δ is the number of network nodes.

We use an aspiration criterion based on the global objective which accepts a tabu solution if it yields the best solution ever found, even if it results from a tabu move.

```

Initialize
Let X* be the current solution;
MinorCost=∞;
MinorTabuCost=∞;
While all neighbor solutions have not been generated
For each item g
  For each path k with flow of item g
    For entity i
      Determine new path (by NS1, NS2 or combined) and so
        generate a neighbor of X, Y
      Calculate new approximate_unit_cost, c = [f'(Y)]/Qgk
      If capacity constraints are not satisfied
        c = c + Pgk / Qgk
      If new path is not tabu
        If c is better than Minor_c
          Save Y and Minor_c=c
        Else
          If c is better than MinorTabu_c
            Save Y as Y_tabu and MinorTabu_c=c
      Update X*
        Determine Fixed_Cost of Y and Y_tabu
        Determine Total_Cost, f(Y), and f(Y_tabu)
        If f(Y_tabu)>f(Y)
          X*=Y and f(X*)=f(Y)
        Else
          If Y_tabu satisfies the aspiration criterion
            X*= Y_tabu and f(X*)=f(Y_tabu)

```

Fig. 9 Neighborhood structures algorithm.

4 Illustrative Example

Assume we would like to configure a health care supply chain with 2 producers, 1 GPO, 5 hospitals and 5 point of care units per hospital (165 network nodes) for two items, during 5 periods. We randomly generated demand, costs and constraints. The point of care units were classified as units of high demand or units of low demand according to a binomial distribution with $p = 0,5$. Demand was determined through a normal distribution: $N(\mu = 100, \sigma = 20)$ or $N(\mu = 50, \sigma = 20)$ for high or low units demand, respectively. Costs were generated using the distributions shown in Table 4.

The algorithms were implemented in C++ and executed on a PC Intel Core 2 CPU 4300 1,8 Ghz. We performed several computational tests using different procedures for the most important algorithm components (initial solution, neighborhood structure and tabu tenure) in order to find the best algorithm configuration. Each algorithm configuration was run ten times. The selection of components was based on the results (i.e., objective function values) each procedure was able to attain, and on the dispersion of the obtained solution values. Analyzing the results (see Figure 10) we can confirm that the random initial solution leads to the better values for all the neighborhood structures considered. It is interesting to note that starting with diversified initial solutions we can reach search regions with smaller costs. However, as expected this procedure is less consistent in terms of results.

Figure 11 shows the solution values obtained with different tabu tenures. For NS1 the minimum values were obtained with the intervals $[66, 99[$ and $[11, 165[$, for NS2

Table 4 Distributions used to generate data.

fixed administrative costs	<i>producer</i> → <i>GPO</i> <i>producer</i> → <i>hospital</i> <i>GPO</i> → <i>hospital</i> Uniform [1000, 1500]	<i>producer</i> → <i>care unit</i> <i>GPO</i> → <i>care unit</i> <i>hospital</i> → <i>hospital or care unit of other hospital</i> distribution identical to the one of the hospital where the care unit belongs	<i>hospital</i> → <i>hospital</i> Uniform [500, 1000]
fixed transportation cost	<i>producer</i> → <i>GPO</i> <i>producer</i> → <i>hospital</i> <i>GPO</i> → <i>hospital</i> <i>hospital</i> → <i>hospital</i> Uniform [200, 500]	<i>producer</i> → <i>care unit</i> <i>GPO</i> → <i>care unit</i> <i>hospital</i> → <i>hospital or care unit of other hospital</i> distribution identical to the one of the hospital where the care unit belongs	<i>hospital</i> → <i>care unit of the same hospital</i> <i>care unit</i> → <i>care unit of the same hospital</i> Uniform [10, 20]
variable transportation cost	<i>producer</i> → <i>GPO</i> <i>producer</i> → <i>hospital</i> <i>GPO</i> → <i>hospital</i> Uniform [1, 10]	<i>producer</i> → <i>hospital</i> <i>hospital</i> → <i>care unit of other hospital</i> Uniform [5, 10]	<i>GPO</i> → <i>hospital</i> <i>care unit of the same hospital</i> <i>care unit</i> → <i>care unit of the same hospital</i> Uniform [5, 15] Uniform [10, 20]
acquisition cost	Base cost <i>Item1:</i> Uniform [100, 120]; <i>Item2:</i> Uniform [50, 70]	Quantity discount structure	
		Order quantity	Discount
		[0, <i>LS1</i> [0%
		[<i>LS1</i> , <i>LS2</i> [Uniform [0%, 5%]
		[<i>LS2</i> , <i>LS3</i> [Uniform [5%, 10%]
		[<i>LS3</i> , +∞[Uniform [10%, 20%]
inventory carrying cost	Uniform [1/1000, 3/1000]		
commercial margin	<i>producer</i> → <i>GPO</i> Uniform [-10%, -1%]	<i>producer</i> → <i>care unit</i> <i>GPO</i> → <i>care unit</i> <i>hospital</i> → <i>hospital or care unit of other hospital</i> Uniform [5%, 10%]	<i>GPO</i> → <i>hospital</i> <i>hospital</i> → <i>hospital</i> Uniform [2%, 7%]

Note:

LS1 = 25% of total demand/no. of periods

LS2 = 50% of total demand/no. of periods

LS3 = 75% of total demand/no. of periods

with the intervals [33, 132[and [5, 66[and for the combined neighborhood structure with the interval [66, 99[.

Analyzing the stability of the solution values obtained with each of these intervals through their average and standard deviation (see Figure 12), we notice that NS1 and NS2 have higher dispersion and worse average values. The hybrid algorithm achieved the most consistent results.

Taking into account the results of these experiences, the algorithm configuration chosen for the TS algorithm was defined using NS2, with a random initial solution and a dynamic tabu tenure varying in the interval [33, 132]. For the hybrid algorithm, we decided to use the random initial solution and a tabu tenure varying in the interval [66, 99]. Table 5 shows the solution values obtained with these two algorithms.

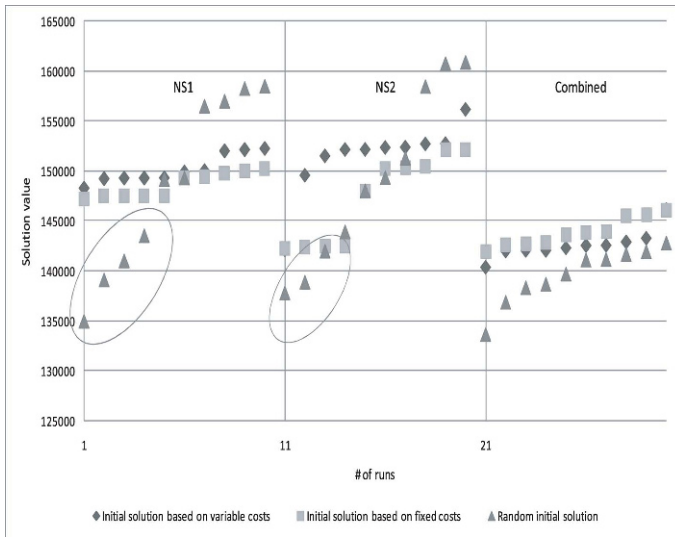


Fig. 10 Solutions obtained with different initial solution procedures.

Table 5 Results for the two approaches under analysis.

	Tabu search (NS2)	Hybrid (combined)
Minimum	130288	133494
1st quartile	140975	135354
Median	144776	140204
3rd quartile	152213	142103
Maximum	160474	142472
Average	146006	138857
Standard deviation	8616	3814
Variation coefficient	0,059	0,027

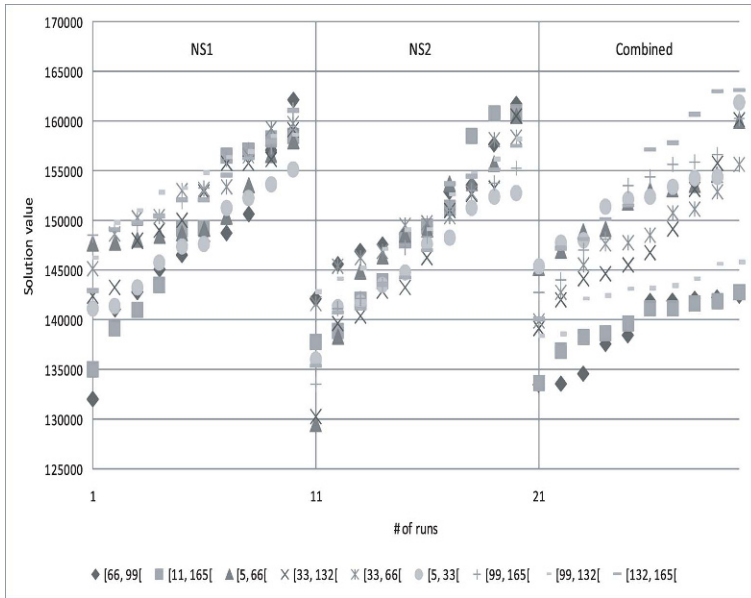


Fig. 11 Solutions obtained with different tabu tenures.

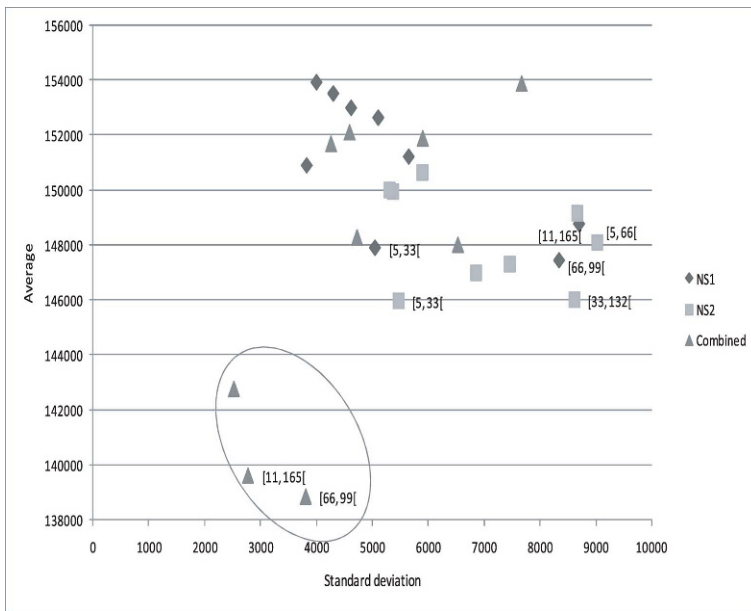


Fig. 12 Stability of the solution values for the different neighborhood structures.

5 Conclusion

The model proposed in this paper, along with the described resolution procedures, can be effectively used to design and evaluate alternative strategies for the configuration of hospital supply chains. Given the combinatorial nature of the problem and the dimension of real life instances, we have designed an approach based on metaheuristics. The flexibility of the developed algorithms allows their application to supply chains with different topologies and atypical cost characteristics.

Preliminary computational experiments show the potential of the developed approach in solving large scale, diversified supply chain configuration problems. Nevertheless, it should be noted that for now these experiments have been designed for illustrative purposes, and further work and additional algorithmic tuning are clearly required. We believe that the future incorporation of this approach in a Decision Support System (DSS) can significantly contribute to an increase of health care supply chains efficiency and encourage the establishment of collaborative partnerships between their members.

References

1. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B.: *Network flows – theory, algorithms and applications*. Prentice Hall, New Jersey (1993)
2. Arntzen B.C., Brown G.G., Harrison T.P., Trafton L.L.: Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces* 25 (1995) 69–93
3. Beaulieu M., Landry S.: Évolution de la fonction approvisionnement dans le secteur de la santé: synthèse de la littérature, Cahier de recherche Nr 99–02. *Cahiers de recherche. Groupe Chaîne, HEC Montréal* (1999)
4. Beaulieu M., Patenaude G.: La gestion des approvisionnements en réseau: le cas du Centre hospitalier Notre-Dame de la Merci. *Logistique & Management Numéro spécial* (2004) 59–64
5. Blamey J.: *Introdução à Logística Hospitalar - Tendências e Melhores Práticas (DHL Healthcare, experience within hospital logistics)*. Presentation at Reunião Temática “Programa do Medicamento e Melhores Práticas de Logística Hospitalar”, 9th November. *Infarmed, Lisboa* (2007)
6. Breen L., Crawford H.: Improving the pharmaceutical supply chain: Assessing the reality of e-quality through e-commerce application in hospital pharmacy. *International Journal of Quality & Reliability Management* 22 (2005) 572–590
7. Brown G.G., Graves G.W., Honkzarenko M.D.: Design and operation of a multicommodity production/distribution system using primal goal decomposition. *Management Science* 33 (1987) 1469–1480
8. Burns L.R. (ed.): *The Health Care Value Chain – Producers, Purchasers and Providers*. Jossey-Bass, San Francisco (2002)
9. Burns L.R.: Role of Group Purchasing Organizations (GPOs). In: Burns L.R. (ed.): *The Health Care Value Chain – Producers, Purchasers, and Providers*. Jossey-Bass, San Francisco (2002) 59–125
10. Burns L.R.: How the Health Care Value Chain Operates. In: Burns L.R. (ed.): *The Health Care Value Chain: Producers, Purchasers, and Providers*. Jossey-Bass, San Francisco (2002) 41–56

11. Cohen M.A., Moon S.: An integrated plant location model with economies of scale and scope. *European Journal of Operational Research* 50 (1991) 266–279
12. Cohen M.A., Fisher M., Jaikumar R.: International manufacturing and distribution networks: A normative model framework. In: Ferdows K. (ed.): *Managing international manufacturing*. North-Holland, Amsterdam (1989) 67–93
13. Cohen M.A., Lee H.L.: Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks. *Journal of Manufacturing Operations Management* 2 (1989) 81–104
14. Danas K., Roudsari A.V., Ketikidis P.: A virtual hospital pharmacy inventory: an approach to support unexpected demand. *International Journal of Medical Marketing* 2 (2002) 125–129
15. Danas K., Roudsari A.V., Ketikidis P.: The applicability of a multi-attribute classification framework in the healthcare industry. *Journal of Manufacturing Technology Management* 17 (2006) 772–785
16. Danese P.: The extended VMI for coordinating the whole supply network. *Journal of Manufacturing Technology Management* 17 (2006) 888–907
17. De Vries G., Bertrand J.W.M., Vissers J.M.H.: Design requirements for health care production control systems. *Production Planning & Control* 10 (1999) 559 – 569
18. Ding H., Benyoucef L., Xie X.: A simulation optimization methodology for supplier selection problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 18 (2005) 210–224
19. EGP: *A Logística Hospitalar. Artigos de Atualidade de Gestão*. EGP, Porto (2004)
20. EHCR: *Efficient Healthcare Consumer Response: Improving the Healthcare Supply Chain*. American Society for Healthcare Materials Management, Chicago (1996)
21. Ford E.W., Scanlon D.P.: Promise and problems with supply chain management approaches to health care purchasing. *Health Care Management Review* 32 (2007) 192–202
22. Gaspar H.: *Hospital de Santa Maria – Reestruturação dos Processos Logísticos: Caso Prático*. Presentation at Reunião Temática “Programa do Medicamento e Melhores Práticas de Logística Hospitalar” de 9 de Novembro. Infarmed, Lisboa (2007)
23. Geoffrion A.M., Graves G.W., Lee S.J.: Strategic distribution system planning: A status report. In: Hax A.C. (ed.): *Studies in Operations Management*. North-Holland, Amsterdam (1978) 179–204
24. Geoffrion A.M., Graves G.W.: Multicommodity distribution system design by Benders decomposition. *Management Science* 20 (1974) 822–844
25. Glover F., Jones G., Karney D., Klingman D., Mote J.: An integrated production, distribution, and inventory planning system. *Interfaces* 9 (1979) 21–35
26. Glover F.: Tabu Search – Part I. *ORSA Journal on Computing* 1 (1989) 190–206
27. Glover F.: Tabu Search – Part II. *ORSA Journal on Computing* 2 (1990) 4–32
28. Graves S.C., Willems S.P.: Supply Chain Design: Safety Stock Placement and Supply Chain Configuration. In: De Kok A.G., Graves S.C. (eds.): *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*. Elsevier, Amsterdam (2003)
29. Katsaliaki K., Brailsford S.: Using simulation to improve the blood supply chain. *Journal of the Operational Research Society* 58 (2007) 219–227
30. Lakhil S., Martel A., Kettani O., Oral M.: On the optimization of supply chain networking decisions. *European Journal of Operational Research* 129 (2001) 259 –170
31. Mladenovic N., Hansen P.: Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research* 24 (1997) 1097–1100
32. More E., McGrath M.: An Australian case in e-health communication and change. *Journal of Management Development* 21 (2002) 621–632
33. Muriel A., Simchi-Levi D.: Supply Chain Design and Planning. In: Kok A.G., Graves S.C. (eds.): *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*, Vol. 11. Elsevier, Amsterdam (2003) 17–94
34. Nicholson L., Vakharia A., J., Erengüç S.S.: Outsourcing inventory management decisions in healthcare: Models and application. *European Journal of Operational Research* 154 (2004) 271–290
35. Nollet J., Beaulieu M.: Should an organisation join a purchasing group? *Supply Chain Management: An International Journal* 10 (2005) 11–17

36. Pasin F., Jobim M., Cordeau J.: An application of simulation to analyse resource sharing among health-care organisations. *International Journal of Operations & Production Management* 22 (2002) 381–393
37. Pierskalla W.P.: Supply chain management of Blood Banks. In: Brandeau M.L., Sainfort F., Pierskalla W.P. (eds.): *Operations Research and Health Care*. Kluwer Academic Publishers, Boston (2004) 103–145
38. Prastacos G.P.: Blood inventory management: an overview of theory and practice. *Management Science* 30 (1984) 777–800 Rego
39. Rego N.G.G.: Apoio à definição de estratégias para a configuração de cadeias de abastecimento hospitalares. Escola de Gestão do Porto, Vol. Métodos Quantitativos em Gestão. Universidade do Porto, Porto (2007)
40. Rivard-Royer H., Landry S., Beaulieu M.: Hybrid stockless: a case study. Lessons for health-care supply chain integration. *International Journal of Operations & Production Management* 22 (2002) 412–424
41. Ryttilä J.S., Spens K.M.: Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. *Management Research News* 29 (2006) 801–819
42. Santoso T., Ahmed S., Goetschalckx M., Shapiro A.: A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research* 167 (2005) 96–115
43. Schneller E.S.: The value of group purchasing in the health care supply chain. School of Health Administration and Policy, Arizona State University College of Business, Tempe (2000)
44. Schneller E.S., Smeltzer L.R.: *Strategic Management of the Health Care Supply Chain*. Jossey-Bass, San Francisco (2006)
45. Tsui M., Wilson D.I., Merry H., Phulwani K., Dooley M.J.: Implementing a Hospital Vendor-Managed Inventory System. *Journal of Pharmacy Practice and Research* 38 (2008) 40–43
46. Zheng J., Bakker E., Knight L., Gilhespy H., Harland C., Helen W.: A strategic case for e-adoption in healthcare supply chains. *International Journal of Information Management* 26 (2006) 290–301

A Late Acceptance Algorithm for the Lock Scheduling Problem

Jannes Verstichel and Greet Vanden Berghe

Abstract In this paper we present a number of (meta-)heuristics for tackling the lock scheduling problem. The lock scheduling problem is introduced as the problem of minimising both the water usage of the lock and the waiting time of all the ships. The performance of several local search heuristics with the best improving criterion and the late acceptance criterion is examined. First parameter values for the late acceptance list length are determined. With these values all heuristics and criteria are applied to a large test set. From these experiments we conclude that the performance of the heuristics is increased by the late acceptance criterion.

1 Introduction

Many goods are transported by ship over the sea and on waterways by sea ships and by inland ships. In order to moor at the docks of a port, sea ships have to pass one or more locks. These locks ensure that the water level does not change while ships are (un)loading at the docks. Inland ships moreover pass several locks when travelling on a network of waterways.

Each lock has at least one chamber, but often it consists of multiple parallel chambers of different dimensions. A chamber has a limited capacity and it has a certain lockage time (i.e., time needed to change the water level in the chamber from the level at one side to the level at the other side). The purpose of a lock is to keep the water at the upstream side of the lock at a constant, navigable level. Hence the chambers should preferably not go in lockage empty or with only a small part of their capacity used, as this will result in excessive water usage and possible

Jannes Verstichel · Greet Vanden Berghe
KaHo Sint-Lieven, Information Technology, Gebroeders Desmetstraat 1, 9000 Gent, BELGIUM,
K.U.Leuven, Department of Computer Science, Celestijnenlaan 200A, 3001 Leuven (Heverlee),
BELGIUM
E-mail: {jannes.verstichel, greet.vandenberghel}@kahosl.be

disruption of the upstream water level. Letting the chambers go in lockage too few times will result in very long waiting times for the ships and associated high costs for the skippers/shipping companies.

Efficiently handling the ship operations is important due to the increasing occupation of logistic infrastructure in ports and on waterways. Especially the transfer of goods using containers increases at a high rate. This increasing number of container shipments causes higher demands on the seaports. An efficient handling of the ships can reduce their *time in port* and make a seaport economically more attractive. This leads to a strong competition between seaports [1, 3, 4, 5, 8]. Extensive research has been carried out on most aspects of handling ships and containers in seaports. For an overview we refer to [8]. Optimal sequencing of tows/barges for single chamber locks with setup times is presented in [6]. The approach allows one tow/barge to be transferred at a time. Furthermore, it considers all tows/barges to be present at the lock before the first lockage. Reducing the water usage is not an issue. The applicability of different queueing models for lock capacity analysis is researched in [10]. The research shows that good queueing models exist for single chamber locks, but not for locks with parallel chambers. The problem with multiple chamber locks is, to the best of our knowledge, new to the operational research community.

The lock scheduling problem is a multi objective optimisation problem that aims at minimising the water usage of the lock and the waiting time of the ships. We distinguish between normal and priority ships. It is especially important to keep the waiting time of priority ships as low as possible. Minimising the water usage is modelled as minimising the total number of lockages of the chambers. The problem shows characteristics of scheduling and packing problems.

In order to tackle this problem, we combine a late acceptance criterion (LA) [2] with several local search heuristics. The late acceptance criterion compares the new candidate solutions to an ‘old’ solution that was current several steps before. If the candidate solution has a lower cost than this ‘old’ solution, it will be accepted and the ‘old’ solution’s cost will be replaced by the new candidate solution’s cost. The LA algorithm compares solution costs in order to make a decision on accepting/rejecting a solution. The idea behind this criterion is that comparing current candidates with previously visited solutions manages better to avoid local optima than comparing with the best solution found so far. This criterion is further explained in Section 3.4.2. We investigate the performance by experimenting with several heuristics: multiple neighbourhood search, variable neighbourhood search and a composite neighbourhood search. In addition, we compare the performance of the late acceptance criterion and the best improving criterion.

The structure of the paper is as follows: the problem definition and model are introduced in Section 2. In Section 3 we present the algorithms. We determine the best parameter settings for the late acceptance criterion in Section 4 and discuss the computational results in Section 5. Conclusions are drawn in Section 6.

2 Problem Definition and Model

In this section we delineate the Lock Scheduling Problem and present a model. The smallest part of the problem is a ship. Each ship has a width, a length, a direction (upstream/downstream) and an estimated time of arrival (ETA) at the lock. By considering rectangular shaped ships, we simplify the evaluation of the placement constraints. This simplification is necessary, as the exact shape of the ships is normally not available to lock operators. We assume no uncertainty in the ETA of the ships. The second part of the problem involves the lock. A lock consists of multiple chambers. Each chamber has a width, a length, a state (either upstream, downstream or in lockage) and a lockage time. The latter is the time it takes for the chamber to go from the upstream state to the downstream state or vice versa. The initial state of a chamber is either upstream or downstream. Each problem instance has only one lock.

The lock scheduling problem has multiple objectives. The goal is to minimise the total number of lockages of the lock's chambers, the waiting time of the normal ships and the waiting time of the priority ships. A ship's waiting time is the time between its arrival at the lock and its lockage time.

Solving the problem requires 1) assigning a chamber for each ship, 2) assigning a position for the ship in the chamber, 3) assigning a sequence of lockage times for each chamber. These three decisions are strongly connected. A better placement of the ships within a chamber may enable placing an extra ship for the lockage. The selection of a larger/smaller chamber may result in a better usage of its capacity.

Arranging ships into a chamber is subject to a number of placement constraints. The first constraint is a size constraint. The unoccupied space in the selected chamber must be at least as wide and at least as long as the candidate ship to be placed. The second constraint prevents overlap between two ships in a chamber. The third constraint is the drifting constraint. During the lockage every ship must be moored either to another ship or to the quay. The last constraint is the mooring constraint. A ship should not be moored to a smaller ship. The constraints are visualised in Figure 1. The size constraint is violated in (a) as the entering ship is larger than the remaining free space in the lock. In (b) the overlap constraint is violated as two ships 'share' a part of the chamber's surface. The drifting constraint is violated in (c) because one ship is not moored. In (d) the mooring constraint is violated because the largest ship is moored to the smaller ship at its left side. Figure 1 (e) shows a feasible arrangement of the ships in the chamber.

The selection of ships for a lockage is subject to one hard constraint: the time constraint. The chamber cannot go into lockage before all the ships have arrived at the lock. We ignore the time needed to physically arrange the ships in the chambers when determining the lockage time of the chamber. As we currently only consider locks for inland waterways, this is a minor simplification.

Another constraint concerns the level of a chamber. If the chamber has been in lockage from the upstream state to the downstream state, then the next lockage of the chamber must be from the downstream state to the upstream state and vice versa. In other words this constraint states that a chamber cannot go into lockage from the

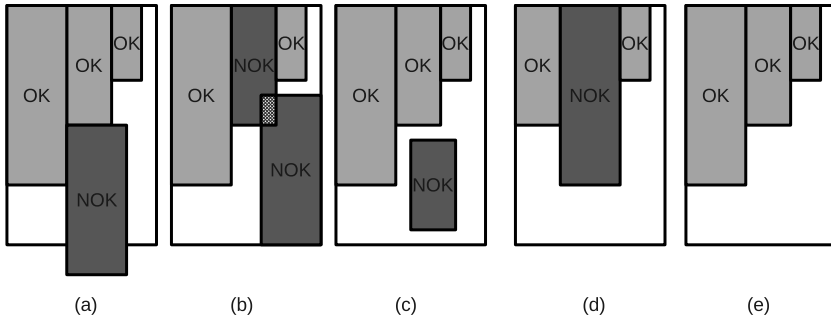


Fig. 1 A visual representation of the placement constraints.

upstream to the downstream state if it is currently in the downstream state, due to physical water level restrictions. If traffic imbalance would give rise to consecutive lockages in the same direction, it would induce an empty lockage between these lockages.

A solution for the lock scheduling problem is a schedule that contains a list of events. An event determines the lockage times for a chamber. It also defines the ships that are assigned to that lockage and their position within the chamber.

3 Solution Method

Four different algorithms were developed for solving the lock scheduling problem:

- A constructive heuristic to create an initial solution (Section 3.1)
- A timing algorithm for the lockage times of the chambers (Section 3.2)
- A filling heuristic that places the ships into the chambers (Section 3.3)
- Optimisation heuristics to improve the solutions (Section 3.4)

For evaluating a solution, four different cost functions were implemented.

- LockageCost: the total number of lockages of the chambers
- TimeCost: the total waiting time of normal ships
- PriorityTimeCost: the total waiting time of priority ships
- CombinedCost: a combination of the lockage cost and the time costs

3.1 Constructive Heuristic

The constructive heuristic generates twice as many *ship lists* as there are chamber types. Chambers with the same dimensions are considered equal, so if there are two chambers with dimensions (x_1, y_1) and one chamber with dimensions (x_2, y_2) ,

four different ship lists are constructed: a downstream and an upstream list for the first type of chamber and a downstream and an upstream list for the second type of chamber.

The constructive heuristic applies a width criterion to determine the ship list each ship is added to. If the width of the ship is larger than a factor times the width of the chamber, the ship will be placed in the ship list of a larger chamber, unless the current chamber is already the largest one. For example, if the factor is 0.5, the ship will be moved to the list of a larger chamber if its width is more than half the width of the current chamber. If the ship's width is more than half the width of the largest chamber, it will be added to the ship list of that chamber despite the violation of the criterion.

3.2 Timing Algorithm

The timing algorithm generates the events that represent the lockages of the chambers. It uses the filling heuristic (Section 3.3) to place ships in a chamber i . A chamber goes into lockage when the last ship of the *filling* has arrived ($T_{i,last}$). The chamber becomes available again at $T_{i,ready} = T_{i,last} + T_{lock}$ with T_{lock} the lockage time of the chamber. Initially the algorithm

- I. computes the first lockage time of each chamber, the time at which the chamber is available after lockage and the events for these lockages;
- II. adds the event representing the chamber that finishes lockage first (chamber j) to the event list of the timing algorithm;
- III. computes the next lockage time of chamber j and returns to step 2 until all the ships have been transferred.

This procedure results in a time scheme with a chronological list of all the events. The process of the timing algorithm is visualised in Figure 2. On the left hand side of this figure we see the order in which the chambers are selected for lockage. This order is defined by the lockage time of each chamber ti . The right hand side of the figure shows a part of the resulting solution's event list.

3.3 Filling Heuristic

The filling heuristic assigns ships from the ship list to the selected chamber as long as they differ from a *dummy ship* and fit into the chamber. A dummy ship is a ship with width and length equal to zero. It is used to stop the filling of a chamber before it is full. After the filling heuristic has finished, the timing algorithm computes the lockage time of the chamber and creates the associated event. We applied three heuristics to place the ships in the chamber. They are executed sequentially.

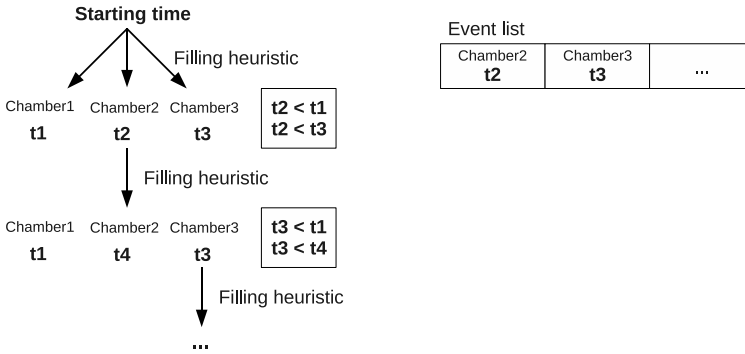


Fig. 2 A visual representation of the timing algorithm for a lock with three chambers.

The first heuristic is the *Left Right-Left-Back* placing heuristic. A ship that is presented to the chamber is positioned according to Figure 3. In a first attempt the ship is placed at the left side of the chamber, behind the other ships that have been placed at the left side (position A&E). Next, we try to place the ship at the right side of the chamber, behind other ships already placed at the right side of the chamber (position B&F). The ship will be positioned where it is closest to the front of the chamber: *Left Right*. If that is the right side, an additional movement is performed. The ship is moved to the left side until it neighbours another ship: *2nd Left* (position C&G). Next, the ship is moved behind this neighbouring ship in an attempt to create more space on the right side of the chamber (position D&H). If the current ship fits in the rectangle formed by the ship in front and its left hand neighbour, it stays there: *Back* (position D), otherwise it returns to its previous position (position G). This procedure is visually explained in Figure 3 (a) and (b). The different possible positions of the inserted ship are visualised in the top figures. The resulting filling is visualised in the bottom figures. The *Left Right-Left-Back* heuristic moors all the ships to the left side or to their left neighbours.

The *Move to the Right Side* heuristic moors the rightmost ships to the right side of the chamber, unless a ship itself is moored to the left side of the chamber. This heuristic is visualised in Figure 3 (c). The two possible positions of the ship are presented in the top figure. The resulting filling is visualised in the bottom figure.

Due to the actions performed in the *Move to the Right Side* heuristic, some ships may end up drifting (i.e., they are not moored to the chamber or to another ship). In this case the ship is moved towards its largest neighbour and moored to that ship by the *Move drifting ships* heuristic.

The combination of the above heuristics leads to solutions that do not violate any constraint.

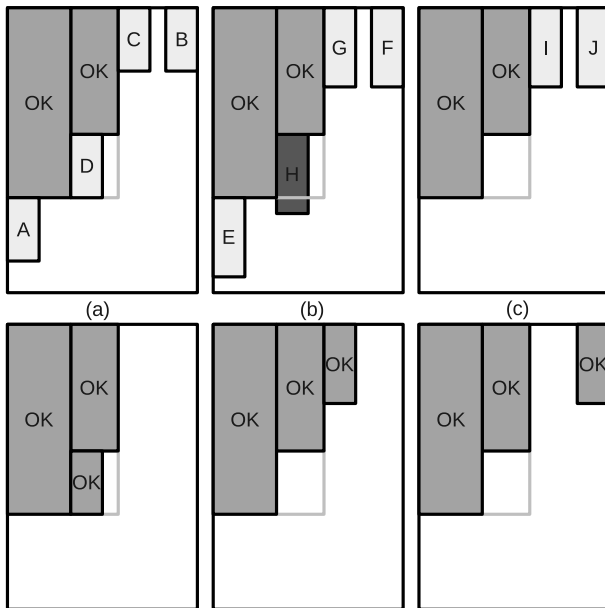


Fig. 3 A visual representation of the Left Right-Left-Back heuristic.

3.4 Optimisation Heuristic

We developed several (meta-)heuristics for solving the lock scheduling problem and compare their performance. All the approaches are local search heuristics that apply a set of neighbourhoods, different meta-heuristics and a few acceptance criteria.

3.4.1 Neighbourhoods

The local search heuristics used to improve the initial solution make use of the following neighbourhoods.

The *AddDummy* neighbourhood contains all the solutions that can be generated by adding one dummy ship to a ship list of the solution. An *AddDummy* move inserts a dummy ship in the ship list of a given chamber.

The *RemoveDummy* neighbourhood is analogous to the *AddDummy* neighbourhood but instead of adding one dummy ship, one is removed in each neighbouring solution.

The *ChangeChamber* neighbourhood of a solution is the collection of all the solutions in which one ship is moved to another chamber. A *ChangeChamber* move removes a ship from the ship list of one chamber and inserts it in another chamber's ship list. We define a range r for insertion of the ship into the other chamber's ship list. When the ship's index in the source ship list is i , the ship's index in the destina-

tion ship list must be between $i - r$ and $i + r$. This is an application of the corridor method [7]. This range was introduced to limit the size of the neighbourhood and to reduce the chance to add the ship to a much earlier or much later lockage (which would result in a much longer waiting time for the other ships in that lockage or for the moved ship).

The *ShiftPlace* neighbourhood only affects the ship order within one chamber. A *ShiftPlace* move shifts a ship in a chamber's ship list to another position in the same ship list. Again, a range r' limits the shifting, in order to avoid ships to be moved more than r' places forward or backward. This range was introduced for the same reason as in the *ChangeChamber* neighbourhood.

The fifth neighbourhood is the *SwapShips* neighbourhood. A corresponding move swaps two ships (within the same or between two different ships lists). This neighbourhood also has a range r'' which defines the maximum difference between the indices of the ships.

3.4.2 Heuristics

We applied several local search heuristics to the lock scheduling problem.

The *Multiple Neighbourhood Search* (MNS), explores the neighbourhoods separately using the same starting solution. The best solution resulting from these searches is selected as a new starting solution. This process is repeated until none of the neighbourhoods generate an improvement.

The *Variable Neighbourhood Search* heuristic (VNS) explores the neighbourhoods one after another. The solution resulting from the first search is used as the starting solution for the next neighbourhood search. That process continues until all the neighbourhoods have been explored without finding a better solution.

The *Composite Neighbourhood Search* heuristic (CNS) explores the neighbourhood that consists of all the candidate solutions that are generated by the different neighbourhoods. The heuristic keeps exploring this neighbourhood as long as improvements are found.

All the above heuristics have been applied to the problem using two different acceptance criteria. The *Best Improving criterion* sets the best improving candidate solution from the neighbourhood that is being explored as the next current solution. The second criterion is the *Late Acceptance criterion* [2]. It depends on one parameter L , which is the length of the acceptance list. The acceptance list contains the fitness of the L last accepted solutions. When exploring the neighbourhoods, a candidate solution is considered acceptable if it is better than the 'oldest' solution in the acceptance list. Due to the comparison with old solutions, this criterion allows worsening moves. Experimenting with L determines the amount of quality decrease that is acceptable. In any case, the best of all the moves is selected to generate the next solution and to update the acceptance list. If no improving solution can be found, the heuristic stops.

3.5 Cost Functions

The LockageCost determines, for a solution, the total number of lockages needed to handle all the ships. The TimeCost equals the total waiting time for the normal ships and the PriorityTimeCost equals the total waiting time for priority ships within a solution. The CombinedCost presents the total number of lockages and the total waiting times. With respect to this cost function, we consider a solution better if it has a lower number of lockages. If the number of lockages of two solutions is the same, the solution with the lowest waiting time for both normal and priority ships is considered the better one.

4 The Late Acceptance List Length

In order to find a good setting for the length of the late acceptance list L , experiments have been carried out with the three optimisation heuristics. Test instances traffic was randomly generated using four parameters. The first parameter is the average inter arrival time of the ships. The second parameter defines the time horizon, i.e., the number of ships that have to be transferred. The third parameter is used to set the fraction of ships that travel upstream and the last parameter defines the percentage of priority ships (here always set to 5%). An example of a test instance is $R_5_100_0.5$: the arrival times are randomly distributed with a mean of 5 minutes and a value between 0 and 10 minutes. The time horizon is 100 ships and 50% of the ships travel upstream. The lock layout and chamber properties used for the test set are based on the existing lock of the ‘Albert Kanaal’ in Wijnegem, Belgium.

The values of the three neighbourhood parameters (Section 3.4.1) are:

- *ChangeChamber*: 10 (r)
- *ShiftPlace*: 10 (r')
- *SwapShips*: 4 (r'')

In order to find a proper length of the late acceptance list (L), the effect of the parameter on the solution cost was tested using a large interval for L . The $R_5_100_0.5$ test instance has been addressed using every value of L between 5 and 100 with a step of 5. The values for $L = 1$ correspond to the results determined with the best improving criterion. The results of the tests are summarised in Figure 4, in which Figure 4.1 shows the total waiting time for each heuristic. The total priority waiting time is visualised in Figure 4.2. The different computation times can be found in Figure 4.3. As all solutions had the same number of lockages (=22) this information was not included in the figure.

The results show that, especially for the MNS and CNS heuristics, even a very small L leads to a considerable improvement of the solution quality. This improvement is also visible when looking at the VNS heuristic, but this heuristic requires a longer late acceptance list. We can conclude that interval $L = [1, 20]$ is worth further investigation as this is the interval in which a change in L leads to large differences in

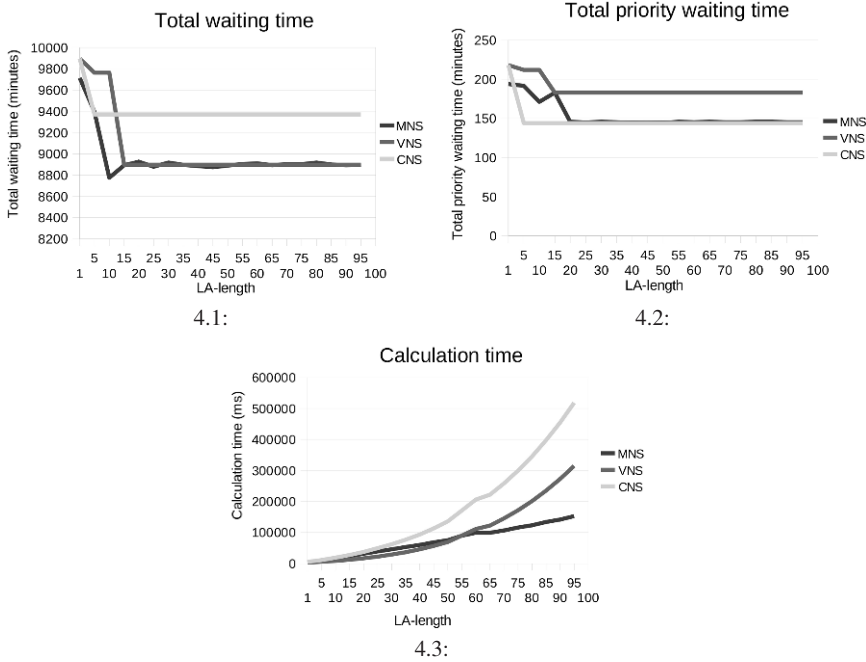


Fig. 4 The waiting time, priority waiting time and computation time of the *R_5_100_0.5* test instance in function of the late acceptance list length L .

the solution quality. Especially the minimum value of the waiting time curve when L is equal to 10 deserves attention. Additional tests were performed with values for L between 1 (Best Improving) and 20 with a step of 1. In order to avoid finetuning the late acceptance list length for one test instance, we executed the heuristics on three different test instances with a time horizon of 100 ships and an upstream fraction of 50%.

The results for the test instance with an average inter arrival time of five, ten and thirty minutes are summarised in Figures 5, 6 and 7.

From Figure 5 we find that for the *R_5_100_0.5* test instance, the solution quality shows large differences depending on the length of the late acceptance list. As the number of lockages (= 22) is the same for all the heuristics, these values have not been included in the figure.

For the late acceptance MNS, the differences in total waiting time do not show a trend in function of L but there clearly is an optimum for $L = 11$ and a runner up for $L = 15$. Experiments with larger L would be required to investigate if this behaviour continues for increasing L .

The solution quality of the late acceptance VNS on the other hand shows a transition point when going from $L = 12$ to $L = 13$. It appears that a late acceptance length of thirteen or more allows the heuristic to successfully avoid certain local op-

tima. Again, experiments with larger L would be required to determine the existence of other transition points.

The influence of the list length on the late acceptance CNS is rather small. Up to $L = 4$ the late acceptance criterion helps the CNS to avoid certain local optima but increasing L beyond this number only affects the computation time. Considering the computation time, the late acceptance VNS is a clear winner in this range of L .

We conclude that, for the $R_5_{100}.0.5$ test instance the late acceptance VNS with $L = 13$ or higher is the most promising combination.

Analysing the results in Figure 6, we find that for the $R_{10}_{100}.0.5$ test instance the influence of increasing L is smaller for the late acceptance VNS and CNS. The number of lockages (= 23) is the same for all the heuristics, except for the late acceptance VNS with $L = 3$ which has 24 lockages. For this heuristic the solution quality reaches an optimum for $L = 5$. Here it is once more clear that the late acceptance criterion effectively helps the heuristic to find better solutions.

The same can be seen when looking at the results for the late acceptance CNS. A late acceptance list length of more than two does not seem to be better. The overall influence of the criterion on the solution quality is also much smaller.

The late acceptance MNS starts showing a trend of increasing solution quality with increasing L . This trend is clear when looking at the total priority waiting time but for the total waiting time, the trend is not very pronounced. Further experiments with larger L should be performed to find out if the solution quality for the late acceptance MNS increases any further. When looking at computation times the late acceptance VNS is still the best performing heuristic.

The late acceptance VNS with $L = 5$ is best performing for this test instance, but larger values of L should be investigated to find out whether the late acceptance MNS will keep on following the trend of increasing solution quality for increasing L .

The results in Figure 7 show that for the $R_{30}_{100}.0.5$ test instance, the number of lockages differs for the different heuristics. When using the VNS with the late acceptance criterion instead of the best improving criterion, the total number of lockages decreases from 25 to 23. However, this improvement also leads to a higher total waiting time and only a slightly lower priority waiting time.

The CNS heuristic requires a late acceptance list length of four to reduce the number of lockages to 23. Unlike the VNS, this heuristic manages to simultaneously decrease the number of lockages and the total waiting time for both normal and priority ships. The computation time, however, doubles when going from $L = 3$ to $L = 4$, so this improvement comes at a high computational cost.

The late acceptance MNS shows the best performance when looking at the total waiting time, but requires more lockages than the other heuristics and has a very unstable performance with respect to the total waiting time of the priority ships. The heuristic does show a clear optimum for $L = 18$ requiring 24 lockages but decreasing the total waiting time for normal ships by 19% compared to the average waiting time with 24 lockages. This improvement also comes at a high computational cost as the heuristic requires one more process iteration to find this solution. There are several

peaks in the computation time of the late acceptance MNS. These peaks coincide with a higher number of process iterations of the heuristic.

We can conclude that the late acceptance CNS with $L = 4$ is the best performing for this test instance when computation time is not an issue. When computation time is important, the late acceptance VNS is a clear winner needing only 1/3 of the computation time while obtaining the same number of lockages.

The above analysis gives some insight in the influence of the late acceptance list length on the solution quality. We selected the values 5 and 15 for the experiments in Section 5. In order to allow the detection of transition points for larger values of L , we also conducted tests with $L = 50$.

5 Computational Results

After having defined interesting values of the late acceptance list length L we applied all heuristics to a large test set [9]. The test set was generated using the following parameters and the same lock layout as mentioned before.

- Average inter arrival time: 5, 10 and 15 minutes
- Time horizon: 100 and 1000 ships
- Upstream fraction: 50% and 30%
- Priority percentage: 5%

5.1 Results for Balanced Upstream/Downstream Traffic

The results of the heuristics for the test instances with a time horizon of 100 ships and an upstream fraction of 50% are summarized in Figures 8, 9 and 10. All the results are averaged over 10 runs.

From these results we can conclude that the application of the late acceptance criterion always leads to a better solution quality when compared to the best improving criterion. There is no difference in the number of lockages, so the solution quality is determined solely by the (priority) waiting time. For the test instances with a time horizon of 100 ships, the MNS and VNS heuristics perform almost equally well when looking at the solution quality, but the VNS has a lower computation time.

The results in Figure 9 show once more that an increase of the late acceptance list length leads to a better solution quality.

The results when applying the heuristics to the test instances with a time horizon of 1000 ships and an upstream fraction of 50% are summarized in Figures 11, 12 and 13. All the results are averaged over 10 runs.

The experiments indicate that on average the late acceptance MNS manages best to reduce the number of lockages while simultaneously reducing the total (priority) waiting time.

5.2 Results for Unbalanced Upstream/Downstream Traffic

The results when applying the heuristics to test instances with a time horizon of 100 ships and an upstream fraction of 30% are summarized in Figures 14, 15 and 16. The results are averaged over 10 runs.

The figures show that the late acceptance CNS performs best on the instances with unbalanced upstream/downstream traffic and a time horizon of 100 ships. In the case of an average inter arrival time of 10 minutes, this heuristic even manages to transfer all the ships with only half of the total waiting time of the other heuristics (54%). The total priority waiting time is almost reduced to one fourth of the results from the other heuristics while using the same number of lockages (29%).

For the instances with a time horizon of 1000 ships and an upstream fraction of 30%, the results are summarized in Figures 17, 18 and 19. All the results are averaged over 10 runs.

For the first instance (Figure 17) the late acceptance CNS outperforms the other heuristics leading to fewer lockages without an increase in the total (priority) waiting time. For the second test instance, the difference is less pronounced and overshadowed by the fact that the late acceptance CNS requires twice as much computation time as the other heuristics. The late acceptance MNS with $L = 15$ outperforms the other heuristics for the last instance. It leads to fewer lockages than the other heuristics while requiring the same computation time.

6 Conclusion and Further Research

The lock scheduling problem is a new problem that promises to be an interesting field of study. It is an addition to the set of optimisation problems in ports. By reducing the number of lockages and the waiting times for both priority and normal ships, the water usage and throughput of locks can be improved.

The test instances that were used in this paper are made available to the research community [9]. Experiments showed that the application of the late acceptance criterion within local search heuristics improves the solution quality for every test instance. A late acceptance list of only two elements already has a positive effect on the performance of the heuristics, but a higher number of elements in this list leads to significant improvement of the solution quality while maintaining (in most cases) a computation cost that is linear in L .

Experiments also revealed that the performance of the late acceptance criterion shows transition points where adding one more element to the late acceptance list results in large improvements of the solution quality. We believe that these transition points represent lengths of the late acceptance list that are most suitable to avoid getting stuck in local optima of the problem.

We conclude that the multiple neighbourhood search, variable neighbourhood search and composite neighbourhood search all greatly benefit from the late accep-

tance criterion. The variable neighbourhood search approach slightly outperforms the other two.

In the next phase of the research we plan to develop a real multi-objective model for the number of lockages, the priority waiting time and the waiting time for normal ships. We will also reduce the simplifications in the model in order to achieve a better approximation of the real-life problem. The challenges include using the real water usage instead of the number of lockages and extending the model to seaport locks.

Acknowledgements We wish to thank TINC Associates, Belgium for providing the lock scheduling specifications, and the students of KaHo St-Lieven who first modelled the problem.

References

1. Bish, E.K.: A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal. *European Journal of Operational Research* 144(1) (2003) 83–107
2. Burke, E.K., Bykov, Y.: A late acceptance strategy in hill-climbing for exam timetabling problems. In: Burke, E., Gendreau, M., (eds.): *Proc. of the 7th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*, Montreal (2008)
3. Chen, L., Bostel, N., Dejax, P., Cai, J., Xi, L.: A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal. *European Journal of Operational Research* 181(1) (2007) 40–58
4. Cullinane, K., Khanna, M.: Economies of scale in large containerships: optimal size and geographical implications. *Journal of Transport Geography* 8 (2000)
5. Meersmans, P.: *Optimization of Container Handling Systems*. PhD thesis, Tinbergen (2002)
6. Nauss, R.M.: Optimal sequencing in the presence of setup times for tow/barge traffic through a river lock. *European Journal of Operational Research* 187 (2008) 1268–1281
7. Sniedovich, M., Voß, S.: The corridor method: a dynamic programming inspired metaheuristic. *Control and Cybernetics* 35 (2006) 551–578
8. Stahlbock, R., Voß, S.: Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum* 30 (2008) 1–52
9. Verstichel, J.: Project web page of lock scheduling with parallel chambers. <http://allserv.kahosl.be/~jannes/lockplanning>
10. Wilson, H.G.: On the applicability of queueing theory to lock capacity analysis. *Transportation Research* 12 (1978) 175–180

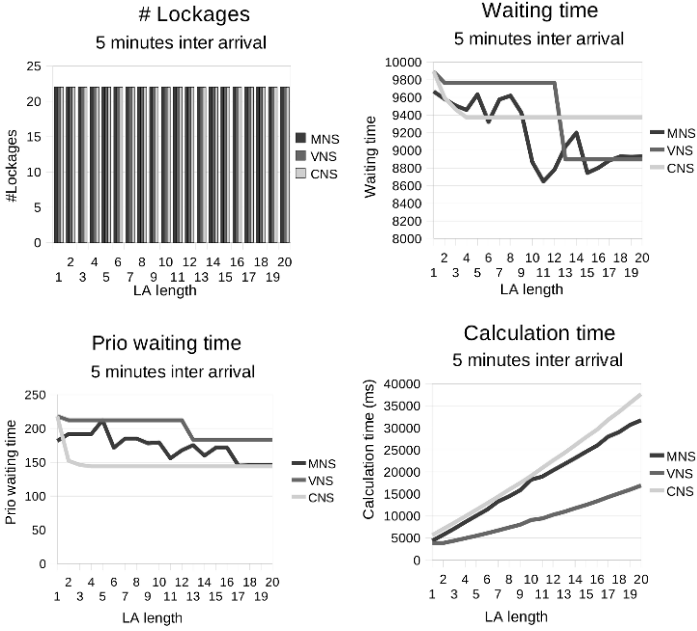


Fig. 5 Costs and computation time for the *R_5_100_0.5* test instance in function of the late acceptance list length *L*.

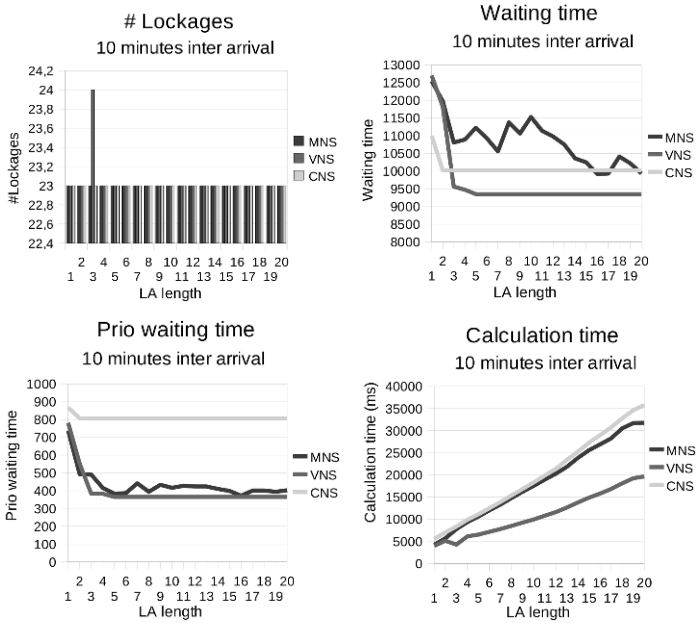


Fig. 6 Costs and computation time for the *R_10_100_0.5* test instance in function of the late acceptance list length *L*.

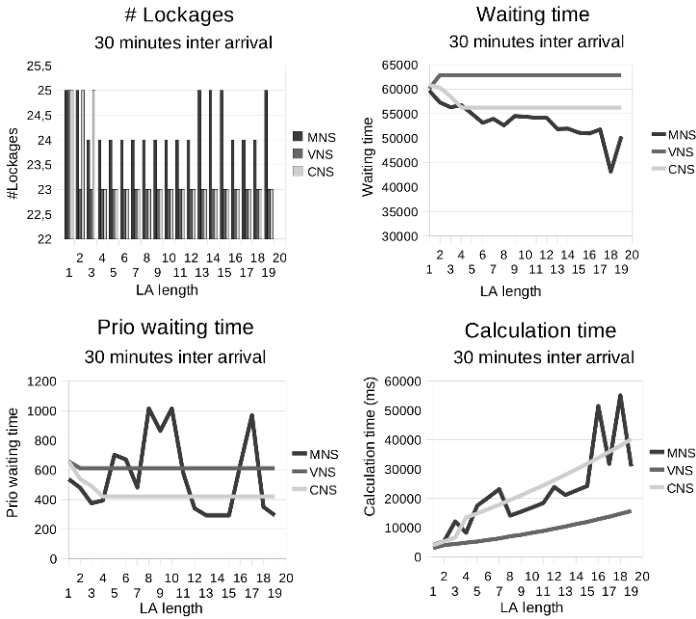


Fig. 7 Costs and computation time for the $R_{30_100_0.5}$ test instance in function of the late acceptance list length L .

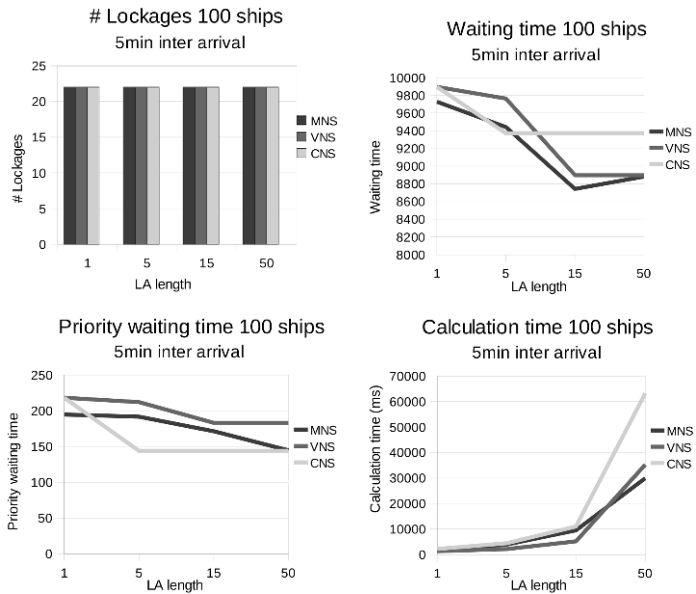


Fig. 8 Results for the $R_{5_100_0.5}$ test instance.

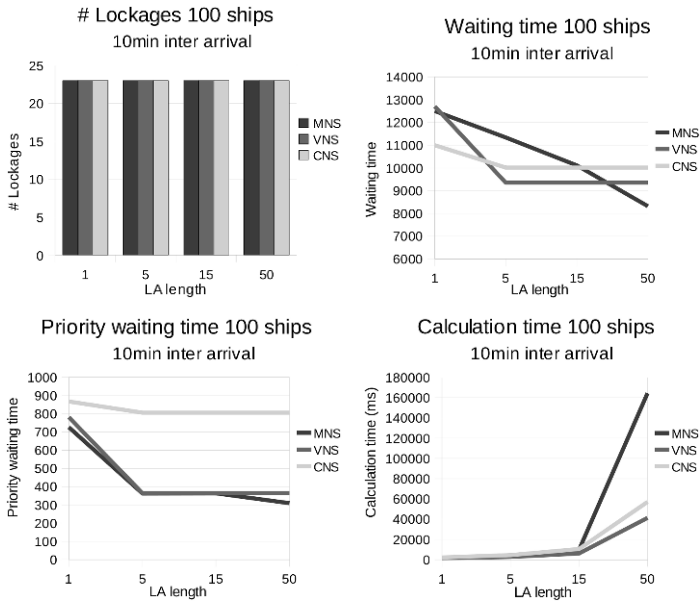


Fig. 9 Results for the $R_{10-100-0.5}$ test instance.

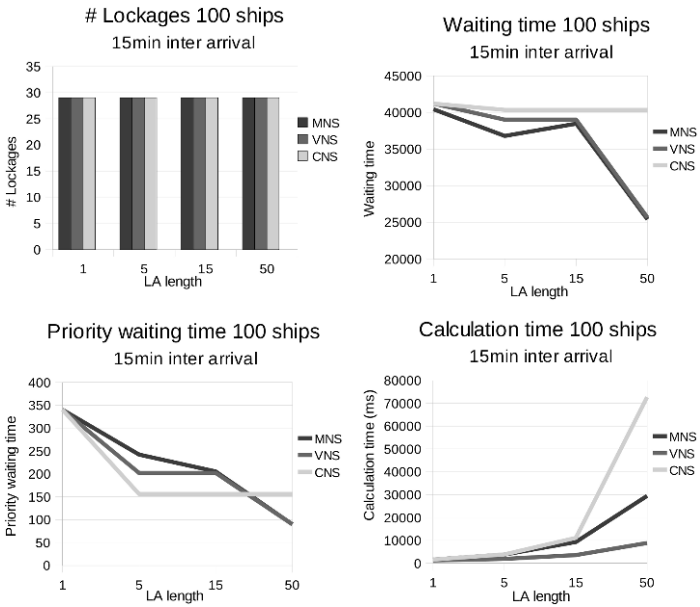


Fig. 10 Results for the $R_{15-100-0.5}$ test instance.

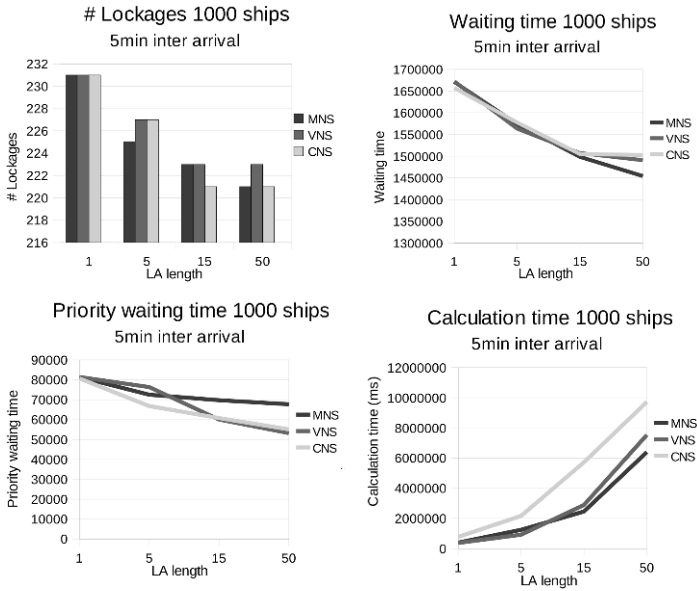


Fig. 11 Results for the $R_5\text{-}1000\text{-}0.5$ test instance.

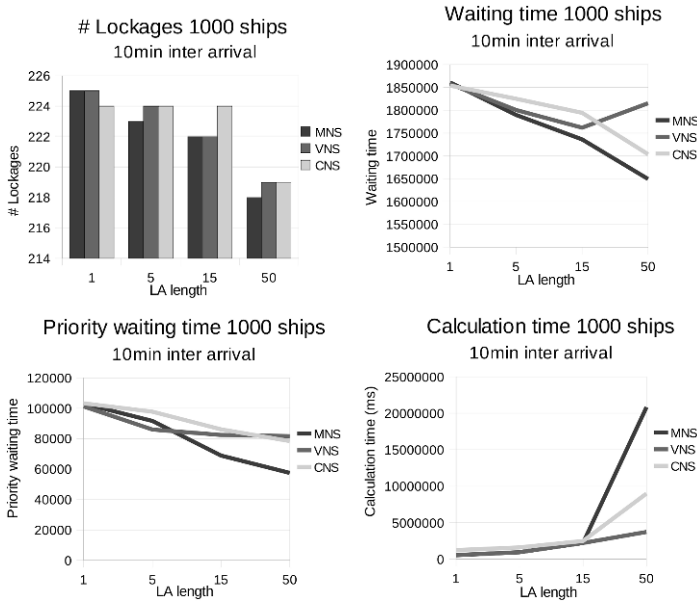


Fig. 12 Results for the $R_{10}\text{-}1000\text{-}0.5$ test instance.

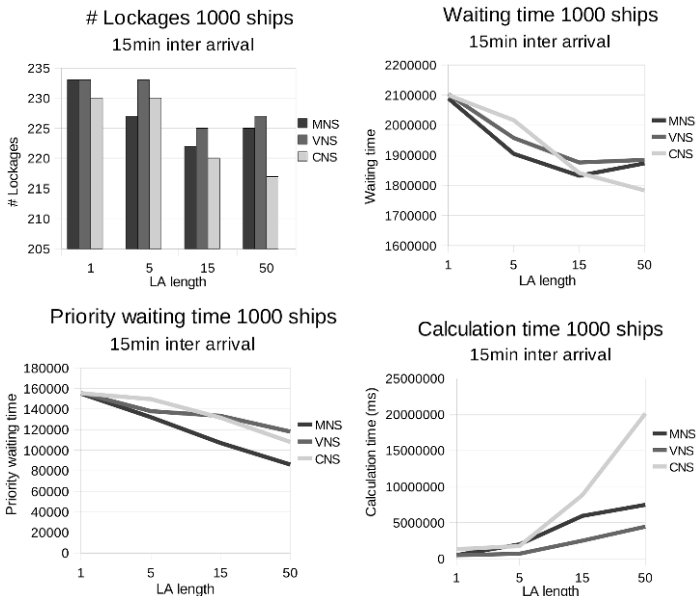


Fig. 13 Results for the $R_{15-1000-0.5}$ test instance.

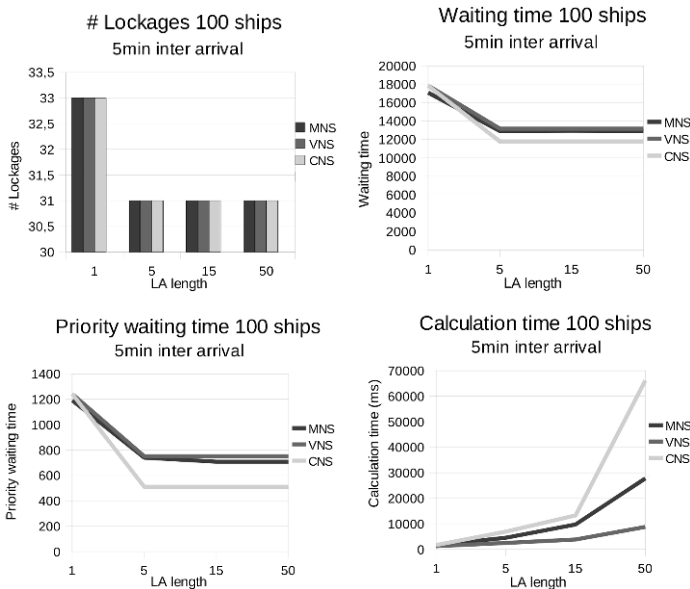


Fig. 14 Results for the $R_{5-100-0.3}$ test instance.

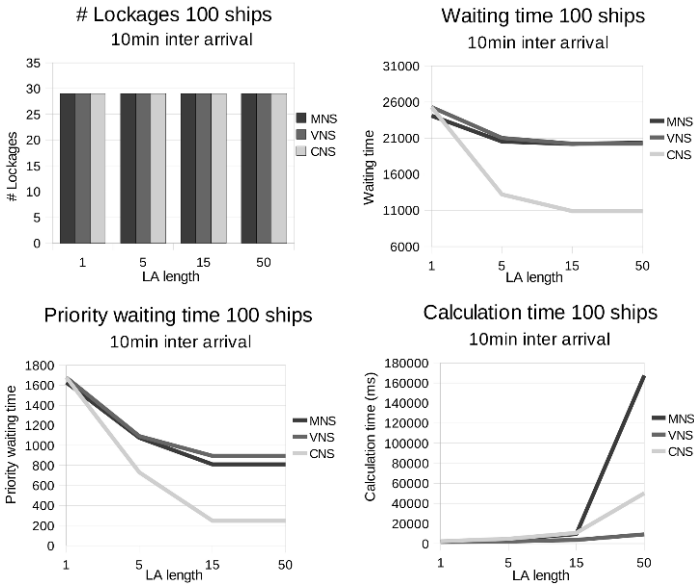


Fig. 15 Results for the $R_{10-100-0.3}$ test instance.

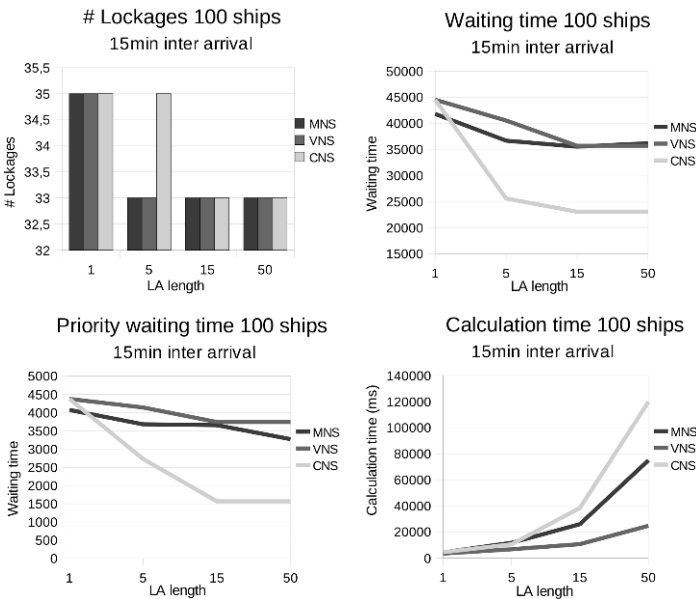


Fig. 16 Results for the $R_{15-100-0.3}$ test instance.

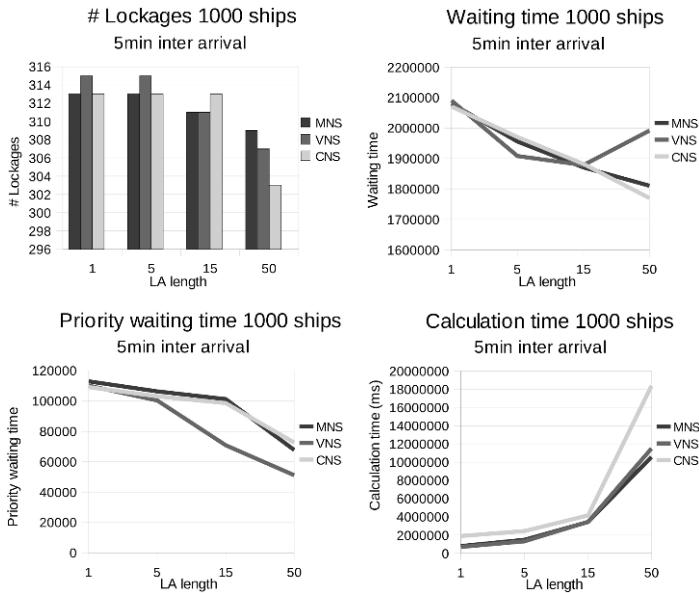


Fig. 17 Results for the $R_5_{1000}_{0.3}$ test instance.

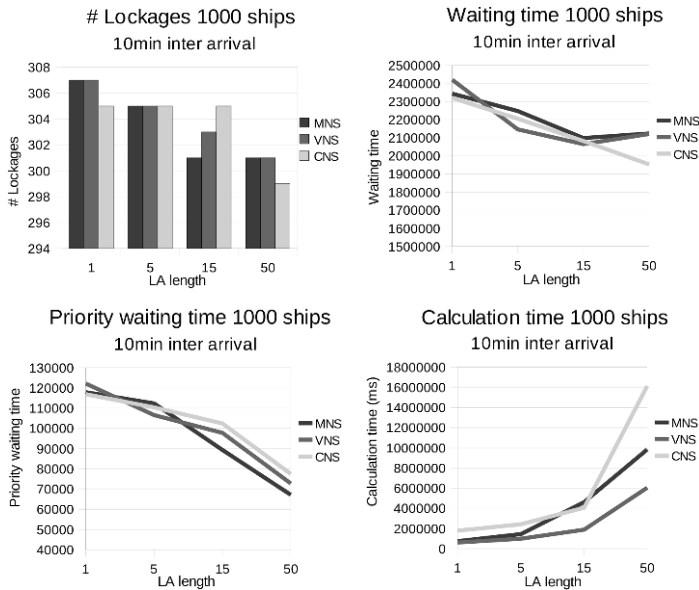


Fig. 18 Results for the $R_{10}_{1000}_{0.3}$ test instance.

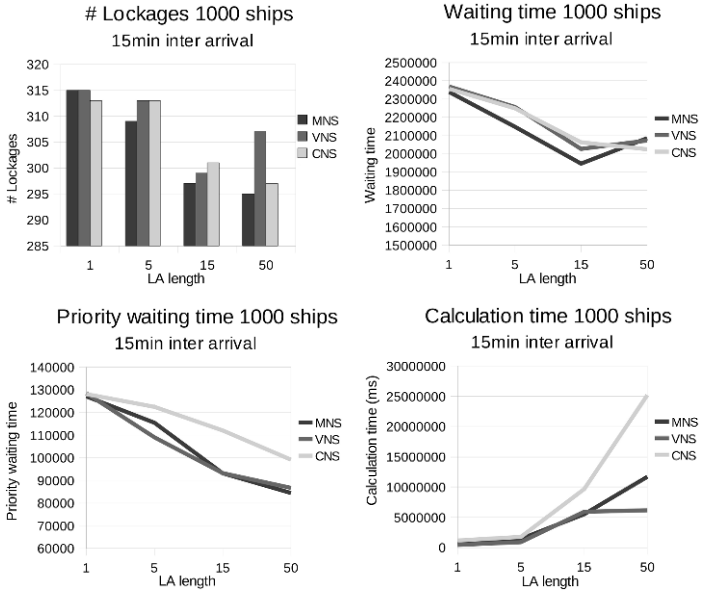


Fig. 19 Results for the $R_{15-1000.0.3}$ test instance.