

Schodl, Reinhold

Book — Digitized Version

Systematische Analyse und Bewertung komplexer Supply Chain Prozesse bei dynamischer Festlegung des Auftragsentkopplungspunkts

Forschungsergebnisse der Wirtschaftsuniversität Wien, No. 28

Provided in Cooperation with:

Peter Lang International Academic Publishers

Suggested Citation: Schodl, Reinhold (2008) : Systematische Analyse und Bewertung komplexer Supply Chain Prozesse bei dynamischer Festlegung des Auftragsentkopplungspunkts, Forschungsergebnisse der Wirtschaftsuniversität Wien, No. 28, ISBN 978-3-631-75457-3, Peter Lang International Academic Publishers, Berlin, <https://doi.org/10.3726/b13974>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/182861>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Reinhold Schodl

**Systematische Analyse
und Bewertung
komplexer Supply
Chain Prozesse
bei dynamischer
Festlegung des
Auftragsentkopplungs-
punkts**



Reinhold Schodl

Systematische Analyse und Bewertung komplexer Supply Chain Prozesse bei dynamischer Festlegung des Auftragsentkopplungspunkts

Ein entscheidender Erfolgsfaktor jeder Supply Chain ist das adäquate Design ihrer Leistungserstellungsprozesse. Da diese Prozesse regelmäßig durch einen hohen Grad an Komplexität gekennzeichnet sind, stellt deren Gestaltung eine große Herausforderung dar. In dieser Forschungsarbeit wird deshalb die Frage behandelt, wie komplexe Leistungserstellungsprozesse einer Supply Chain effektiv und effizient verbessert werden können. Dazu wird eine systematische Vorgehensweise für die Analyse und Bewertung von Supply Chain Prozessen vorgestellt und im Rahmen einer Fallstudie auf eine reale Logistikkette in der Elektronikindustrie angewandt. Bei der Prozessanalyse wird eine Reduktion der Komplexität durch eine Kombination von analytischen Methoden und Simulation erzielt, sodass nicht nur die Validität der Ergebnisse, sondern auch die praktische Umsetzbarkeit gewährleistet ist. Die Bewertung von alternativen Prozessdesigns erfolgt multikriteriell und strategiebasierend, damit sowohl Zielkonflikte als auch die verfolgte Strategie der Logistikkette Berücksichtigung finden. Generell spielt die Wahl des marktbezogenen Produktionstyps (z. B. Make-to-Order, Make-to-Stock) bei der Verbesserung von Supply Chain Prozessen eine entscheidende Rolle. Daher wird auf diesen Aspekt besonders eingegangen, wobei der hybride Produktionstyp Make-to-Forecast in einem Supply Chain-Kontext in der Fallstudie implementiert wird.

Reinhold Schodl absolvierte nach einer technischen Ausbildung ein Diplomstudium der Betriebswirtschaft sowie ein Doktoratsstudium an der Wirtschaftsuniversität Wien. Als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement der Wirtschaftsuniversität Wien war er in Forschung und Lehre beschäftigt und ist nunmehr in der Unternehmensberatung sowie als Vortragender tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte bilden das Prozessmanagement und Supply Chain Management.

**Systematische Analyse und Bewertung komplexer Supply Chain Prozesse
bei dynamischer Festlegung des Auftragsentkopplungspunkts**

Forschungsergebnisse der Wirtschaftsuniversität Wien

Band 28



PETER LANG

Frankfurt am Main · Berlin · Bern · Bruxelles · New York · Oxford · Wien

Reinhold Schodl

**Systematische Analyse
und Bewertung komplexer
Supply Chain Prozesse
bei dynamischer Festlegung
des Auftragsentkopplungspunkts**



PETER LANG

Internationaler Verlag der Wissenschaften

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

Open Access: The online version of this publication is published on
www.peterlang.com and www.econstor.eu under the international
Creative Commons License CC-BY 4.0. Learn more on how you
can use and share this work: [http://creativecommons.org/licenses/
by/4.0](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).



This book is available Open Access thanks to the kind support of
ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft.

Umschlaggestaltung:
Atelier Platen, nach einem Entwurf der
Werbeagentur Publique.

Universitätslogo der Wirtschaftsuniversität Wien:
Abdruck mit freundlicher Genehmigung
der Wirtschaftsuniversität Wien.

Gefördert durch die Wirtschaftsuniversität Wien.

Gedruckt auf alterungsbeständigem,
säurefreiem Papier.

ISSN 1613-3056
ISBN 978-3-631-57961-9
ISBN 978-3-631-75457-3 (eBook)

© Peter Lang GmbH
Internationaler Verlag der Wissenschaften
Frankfurt am Main 2008

Vorwort

Der Autor möchte an dieser Stelle folgenden Personen seinen Dank aussprechen, welche maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Dissertation beigetragen haben.

Ich darf mich sehr herzlich bei Univ.-Prof. Dr. Werner Jammernegg und Univ.-Prof. Dr. Alfred Taudes bedanken, die mich bei der Erstellung der Arbeit umfassend betreut haben.

Ich bedanke mich ebenfalls bei meinen Ansprechpartnern der Fallstudie und meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Produktionsmanagement der Wirtschaftsuniversität Wien für die freundliche Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr. Gerald Reiner für seine wertvollen Ratschläge.

Nicht zuletzt ein großes Dankeschön an Maria und meine Familie, die mir stets zur Seite standen.

Wien, September 2007

Reinhold Schodl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Problemstellung	13
1.2	Struktur der Arbeit	14
1.3	Methodologische Positionierung	14
2	Theoretische Grundlagen	17
2.1	Analyse von Supply Chain Designs.....	17
2.1.1	Methodische Grundlagen	17
2.1.2	Methodische Hybridformen	21
2.1.3	Komplexität von Systemen	28
2.1.4	Modell zur Analyse komplexer Supply Chains	33
2.2	Bewertung von Supply Chain Designs	36
2.2.1	Supply Chain Kennzahlen.....	36
2.2.2	Supply Chain Strategie.....	40
2.2.3	Multikriterielle Bewertung.....	42
2.2.4	Modell zur Bewertung komplexer Supply Chains	45
2.3	Marktbezogene Produktionstypen	51
2.3.1	Grundformen	51
2.3.2	Hybridform Make-to-Forecast	52
3	Fallstudie	57
3.1	Problemformulierung.....	57
3.1.1	Untersuchungsgegenstand.....	57
3.1.2	Problemstellung	59
3.2	Vorgehensweise	62
3.2.1	Anforderungen	62
3.2.2	Prüfung potenzieller Vorgehensweisen	63
3.2.3	Festlegung der Vorgehensweise.....	66
3.3	Lösungskonzept	68
3.3.1	Szenarien	68
3.3.1.1	Darstellung der Ist-Situation.....	68

3.3.1.2	Definition von Verbesserungsstrategien.....	71
3.3.1.3	Ableitung von Szenarien	75
3.3.2	Modellgrößen	78
3.3.3	Kennzahlen.....	80
3.4	Analytisches Modell	86
3.4.1	Modellerstellung	86
3.4.2	Verifizierung und Validierung	91
3.4.3	Experimentelles Design	92
3.4.4	Ergebnisanalyse.....	92
3.5	Komplexitätsreduktion.....	94
3.5.1	Grundlagen der Komplexitätsreduktion.....	94
3.5.2	Durchführung der Komplexitätsreduktion	97
3.6	Simulationsmodell	101
3.6.1	Modellerstellung	101
3.6.1.1	Inputdaten	102
3.6.1.2	Modellaufbau.....	105
3.6.1.3	Outputdaten	115
3.6.2	Verifizierung und Validierung	116
3.6.3	Experimentelles Design	120
3.6.4	Ergebnisanalyse.....	124
3.6.4.1	Signifikanz des Unterschieds der Alternativen ...	124
3.6.4.2	Alternativenvergleich anhand der Kennzahlen....	126
3.6.4.3	Einfluss des Prognosehorizonts	131
3.6.4.4	Einfluss des Prognoserisikos	132
3.7	Bewertung.....	133
3.8	Ergebnisinterpretation.....	137
3.8.1	Fallbezogene Ergebnisse	138
3.8.2	Allgemeine Erkenntnisse	140
4	Zusammenfassung.....	143
5	Quellenverzeichnis	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anpassung der Systemgrenzen	31
Abbildung 2: Anpassung der Anzahl der Alternativen.....	32
Abbildung 3: Vorgehensmodell zur Analyse komplexer Supply Chains	34
Abbildung 4: Integriertes Analyse- und Bewertungsmodell	50
Abbildung 5: Hybride marktbezogene Produktionstypen	53
Abbildung 6: Einfluss der Prognosequalität bei Make-to-Forecast.....	55
Abbildung 7: Produktionsprozess.....	58
Abbildung 8: Struktur des Simulationsmodells.....	105
Abbildung 9: Bestandsentwicklung	122
Abbildung 10: Vergleich der Kundenauftragsdurchlaufzeit.....	126
Abbildung 11: Vergleich der Liefertreue.....	128
Abbildung 12: Vergleich der Auslastung	129
Abbildung 13: Vergleich der Herstellkosten einer Periode	130
Abbildung 14: Vergleich der Bestandsreichweite	131
Abbildung 15: Einfluss des Prognosehorizonts auf die Liefertreue	132
Abbildung 16: Einfluss des Prognoserisikos auf die Liefertreue	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Quellen und Formen von Variabilität	29
Tabelle 2: Kennzahlen in der Supply Chain Management Literatur	37
Tabelle 3: Praxisorientierte Implementierung von Kennzahlen der Literatur	39
Tabelle 4: Risikoabhängige Supply Chain Strategien	41
Tabelle 5: Komplexitätsumfang.....	63
Tabelle 6: SWOT-Analyse.....	71
Tabelle 7: Szenarien.....	78
Tabelle 8: Ergebnis des analytischen Modells.....	93
Tabelle 9: Ergebnis der Komplexitätsreduktion	100
Tabelle 10: Abweichung der Kundenauftragsdurchlaufzeit	116
Tabelle 11: Ergebnis des Zweistichproben-F-Tests.....	118
Tabelle 12: Ergebnis des Zweistichproben-t-Tests.....	119
Tabelle 13: Alternativen des experimentellen Designs	121
Tabelle 14: Bestimmung der Anzahl der Replikationen.....	123
Tabelle 15: Differenz der Kundenauftragsdurchlaufzeit	125
Tabelle 16: Gewichte der Ziele bei moderat agiler Strategie	135
Tabelle 17: Gewichte der Ziele bei schlanker und agiler Strategie	136
Tabelle 18: Gewichte der Abweichungen.....	136
Tabelle 19: Ergebnis der Bewertung	137
Tabelle 20: Handlungsempfehlungen	138

1 Einleitung

Einleitend werden die Problemstellung, die Struktur und die methodologische Positionierung der Arbeit erläutert.

1.1 Problemstellung

Das Design von Supply Chain Prozessen bestimmt deren Performance und entscheidet somit über den Erfolg von Logistikketten und über das Bestehen der beteiligten Unternehmen. Es sind die lang- und mittelfristigen Entscheidungen auf der strategisch-taktischen Ebene, welche die Basis für die Erfüllung einzelner Kundenaufträge schaffen. Aus diesem Grund hat das Verständnis um eine angemessene Vorgehensweise bei der Wahl von strategisch-taktischen Handlungsalternativen einen hohen Stellenwert. Gegenwärtige Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit einer Vielzahl an Problemen der strategisch-taktischen Ebene des Supply Chain Managements. In der Regel behandeln diese Beiträge spezifische Problemstellungen mit einem hohen Detaillierungsgrad, um die Validität wissenschaftlicher Aussagen für einen abgegrenzten Sachverhalt garantieren zu können. Der Entscheidungsträger ist in der Praxis jedoch vielfach mit einer großen Zahl an Handlungsmöglichkeiten konfrontiert und trifft seine Wahl meist unter Zeitdruck. Dann ist vielmehr die Reduktion der Komplexität ein vorrangiges Anliegen. Idealerweise soll die Vorgehensweise beim Design von Supply Chain Prozessen den Wissensstand aktueller Forschungsarbeiten berücksichtigen und die praktische Anwendbarkeit garantieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher folgende Forschungsfrage behandelt: Wie können komplexe Leitungserstellungsprozesse einer Supply Chain effektiv und effizient verbessert werden? Zur Beantwortung dieser Frage wird untersucht, ob folgende Hypothese zutreffend ist: Eine systematische Vorgehensweise, welche analytische Methoden und Simulation bei der Prozessanalyse kombiniert und die Strategie der Supply Chain sowie Zielkonflikte bei der Prozessbewertung berücksichtigt, ermöglicht eine effektive und effiziente Verbesserung komplexer Supply Chain Prozesse.

Dieser Hypothese liegt die Idee zugrunde, dass Entscheidungen, welche nicht als Ergebnis eines systematischen Prozesses gefällt werden, tendenziell zu suboptimalen Resultaten führen. Daher wird in dieser Arbeit eine systematische Vorgehensweise entwickelt, um dann deren Möglichkeiten zur Steigerung der Performance von Supply Chain Prozessen zu testen. Dabei wird nicht nur ein effektives Ergebnis, sondern auch ein effizienter Mitteleinsatz bei der Verbesserung von

Supply Chain Prozessen angestrebt. Die Vorgehensweise umfasst zwei Aufgabenbereiche, nämlich die Analyse und die Bewertung von Supply Chain Designs. Die Hypothese geht davon aus, dass bei der Prozessanalyse durch eine Kombination von analytischen Methoden und Simulation eine Komplexitätsreduktion erreicht wird, sodass die geforderte Validität der Ergebnisse und die praktische Umsetzbarkeit gewährleistet sind. Die Hypothese fordert bei der Bewertung eine Einbeziehung der Supply Chain Strategie, damit das Design der Prozesse mit den Zielen der Logistikkette im Einklang steht, sowie eine Berücksichtigung von Zielkonflikten, da diese für die Beurteilung der Performance von Supply Chain Prozessen eine bedeutsame Rolle spielen.

1.2 Struktur der Arbeit

Eingangs werden die theoretischen Grundlagen zur Beantwortung der Forschungsfrage erarbeitet. Dazu stehen zwei Themen im Fokus, nämlich die Analyse und die Bewertung von Supply Chain Designs. Für beide Bereiche wird der gegenwärtige Forschungsstand kritisch betrachtet. Darauf aufbauend wird einerseits ein Vorgehensmodell zur Analyse und andererseits ein Modell zur Bewertung von Supply Chain Designs entwickelt, wobei die Modelle insbesondere den Anforderungen komplexer Systeme gerecht werden. Da die Wahl des marktbezogenen Produktionstyps, wie zum Beispiel Make-to-Order oder Make-to-Stock, eine elementare Rolle bei der Verbesserung von Supply Chain Prozessen spielt, wird auf diesen Aspekt speziell eingegangen. Den Kern der Arbeit bildet eine Fallstudie, welche anhand eines realen Beispiels die integrierte Anwendung der entwickelten Modelle zeigt. Die Fallstudie dient sowohl der Präzisierung als auch der Prüfung der Anwendbarkeit der Modelle. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse.

1.3 Methodologische Positionierung

Die vorliegende Arbeit ist dem Operations Management und insbesondere dem Bereich Supply Chain Management zuzuordnen. Sie folgt einem quantitativen Forschungsansatz, das heißt, das primäre Ziel ist nicht das Entwickeln von Theorien aus qualitativ erhobenen Daten der sozialen Wirklichkeit, sondern das Prüfen einer aufgestellten Hypothese zur Ableitung allgemeingültiger Gesetzmäßigkeiten. Im Gegensatz zu einem qualitativen Ansatz wird die Realität als objektiv angesehen, nämlich als außerhalb des Individuums liegend und wissenschaftlich zugänglich. Die Arbeit beschränkt sich nicht auf die Analyse eines Systems, um

dessen Charakteristik zu verstehen, sondern zielt auf die Ableitung nützlicher Strategien ab, um ein Problem zu lösen. Somit wird normative Forschung betrieben. Der Forschungszugang der Arbeit ist modellorientiert, das heißt, Sachverhalte der Realität werden abstrahiert und vereinfacht abgebildet. Als Methoden zur Analyse und Bewertung kommen sowohl analytische Methoden als auch Simulation zum Einsatz, um deren Potenziale zu kombinieren.

2 Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden theoretische Grundlagen zur Beantwortung der Forschungsfrage erörtert. Es wird der gegenwärtige Forschungsstand bezüglich relevanter Aspekte für die Analyse und Bewertung von Supply Chain Designs diskutiert, und darauf aufbauend werden Modelle zur Unterstützung von Prozessverbesserungen im Supply Chain Management entwickelt. Die Wahl des marktbezogenen Produktionstyps bestimmt die Performance der Supply Chain grundlegend, weshalb abschließend diese Thematik für die Verbesserung von Supply Chain Prozessen behandelt wird.

2.1 Analyse von Supply Chain Designs

Dieses Kapitel beschäftigt sich eingangs mit methodischen Möglichkeiten zur Analyse von Supply Chain Designs. Im Rahmen der Arbeit wird ein Vorgehensmodell entwickelt, welches durch eine Kombination von analytischen Methoden und Simulation die Analyse von komplexen Systemen ermöglicht. Daher wird auf Hybridformen eingegangen, welche analytische Methoden und Simulation kombinieren, sowie die Analyse von Systemen mit hoher Komplexität behandelt. Die Grundlagen werden dann für ein innovatives Vorgehensmodell zur Analyse komplexer Systeme im Supply Chain Management weiter entwickelt.

2.1.1 Methodische Grundlagen

Es werden nun methodische Grundlagen zur Analyse von Supply Chain Designs diskutiert. Dazu werden theoretische Ansätze in einen logischen Zusammenhang gebracht sowie die Möglichkeiten von analytischen Methoden und Simulation zur Analyse von Supply Chain Designs verglichen.

Die Analyse von Supply Chain Designs bedarf der Untersuchung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Systemen. „Systeme sind charakterisiert durch ihre Elemente und die Beziehungen (Relationen) zwischen ihren Elementen und zwischen den Systemelementen und der Systemumgebung“ [Werners (2006), S. 248]. Supply Chain Management beschäftigt sich mit dem System Supply Chain, wobei unter einer prozessorientierten Sichtweise insbesondere die Leistungserstellungsprozesse der Supply Chain im Mittelpunkt stehen. Ein Leistungserstellungsprozess besteht aus einer Menge an Aktivitäten, die in einem logischen Zusammenhang stehen und Wertschöpfung erzeugen, indem sie, unter Verwendung von Res-

sourcen und Informationen, einen Input in einen Output transformieren [vgl. Anupindi et al. (1999), S. 4f.]. Zur Analyse der Leistungserstellungsprozesse können entweder im real existierenden System Experimente durchgeführt werden oder es wird ein Modell des real existierenden Systems erstellt und für Analysen herangezogen. Der erste Fall impliziert, dass das System existiert und Einwirkungen wirtschaftlich, technisch und organisatorisch opportun sind. Diese Bedingungen sind in der Praxis zumeist nicht erfüllt. Oftmals ist die Umsetzung einer Maßnahme mit Investitionen verbunden und deshalb ein Experiment wirtschaftlich nicht gerechtfertigt. Darüber hinaus wird vielfach eine Störung des Systems, welche ein Experiment mit sich brächte, aus technischer Sicht (z. B. Unterbrechung kontinuierlicher Prozesse) oder organisatorischen Gründen (z. B. Änderung kritischer Prozesse im laufenden Betrieb) nicht möglich sein. Aus diesen Gründen ist regelmäßig die Erstellung eines Modells zweckmäßig. „Ein Modell ist ein zweckorientiertes, ggf. vereinfachtes Abbild eines Ausschnitts der Realität, welches hinsichtlich der interessierenden Zusammenhänge strukturähnlich oder strukturgleich ist“ [Werners (2006), S. 3].

Prozesse des Supply Chain Managements lassen sich in einer abstrahierten Form untersuchen, weshalb nicht-physische, abstrakte Modelle zur Anwendung kommen. Nach der Art der verarbeiteten Informationen können diese in qualitative und quantitative Modelle unterschieden werden. Die Ursache-Wirkungs-Beziehungen von qualitativen Modellen werden nicht quantifiziert, sondern anhand ordinal oder nominal skalierten Daten beschrieben. Zu qualitativen Modellen zählen grafische Modelle, wie beispielsweise Kausaldiagramme. Qualitative Modelle können das Problemverständnis und die Nachvollziehbarkeit fördern und daher als Ergänzung zu quantitativen Modellen für Analysen im Supply Chain Management dienen [vgl. Thorn (2001), S. 48]. Damit eine intersubjektive Überprüfbarkeit von Ergebnissen gewährleistet ist und mathematische Gesetzmäßigkeiten zur Lösungsermittlung angewandt werden können, sind insbesondere bei komplexen Problemstellungen des Supply Chain Managements quantitative Modelle unverzichtbar [vgl. Thorn (2001), S. 48]. „Quantitative models are based on a set of variables that vary over a specific domain, while quantitative and causal relationships have been defined between these variables“ [Bertrand/Fransoo (2002), S. 242]. Quantitative Modelle werden auch als mathematische Modelle bezeichnet und basieren ausschließlich auf kardinal messbaren Daten. Um wichtige Faktoren nicht unberücksichtigt zu lassen, müssen qualitative Informationen, wie zum Beispiel die Kundenzufriedenheit, durch repräsentative quantitative Äquivalente, wie etwa die Höhe der Wiederkaufrate, im Modell repräsentiert werden.

Je nachdem ob ein Modell der Betrachtung eines Systems zu einem Zeitpunkt oder im Zeitablauf dient, ist zwischen statischen und dynamischen Modellen zu unterscheiden. Der Vorteil einer statischen Betrachtung liegt in deren Einfachheit.

Unter einer prozessorientierten Sichtweise ist eine Berücksichtigung der Dimension Zeit jedoch unerlässlich, da gerade das dynamische Verhalten von Supply Chain Prozessen ein entscheidendes Faktum darstellt.

Die Eigenschaften der Elemente eines Systems und deren Beziehungen sind vielfach nicht deterministischer, sondern stochastischer Natur. Im Supply Chain Management kommen derart Prozessrisiken zum Ausdruck, welche das Verhalten und die Performance vieler Leistungserstellungsprozesse entscheidend bestimmen. Es kommen daher stochastische Modelle zur Anwendung, wo im Gegensatz zu deterministischen Modellen, Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet werden.

Quantitative Modelle sind entweder präskriptiv oder deskriptiv. Präskriptive Modelle beziehungsweise Optimierungsmodelle beinhalten neben Ursache-Wirkungs-Beziehungen auch Zielrelationen, um eine optimale Konfiguration des Systems zu bestimmen [vgl. Evans/Olson (2001), S. 3f.]. Als Beispiel für präskriptive Modelle können lineare Programmierungsmodelle genannt werden. Präskriptive Modelle werden als durchgängiges Gleichungssystem modelliert und analytisch gelöst, weshalb sie zur Gruppe der analytischen Modelle zählen. „If the relationships that compose the model are simple enough, it may be possible to use mathematical methods (such as algebra, calculus, or probability theory) to obtain exact information on questions of interest; this is called an analytic solution“ [Law/Kelton (2000), S. 1]. Die optimale Lösung lässt sich entweder exakt mittels Algorithmen oder näherungsweise durch die Anwendung von Heuristiken ermitteln [vgl. Simchi-Levi et al. (2000), S. 30].

Eine Alternative zu präskriptiven Modellen sind deskriptive Modelle, welche auch Analysemodelle genannt werden. Deskriptive Modelle beinhalten keine Zielrelationen, das heißt, sie sind zum Bestimmen einer optimalen Systemkonfiguration nicht tauglich [vgl. Evans/Olson (2001), S. 4]. Vielmehr können für gegebene Konfigurationen und Zustände des Systems auf Grundlage bekannter Ursache-Wirkungs-Beziehungen die Ausprägungen von Parametern, wie etwa Leistungsindikatoren, ermittelt werden. Deskriptive Modelle dienen dem Vergleich von alternativen Prozessdesigns, dem Studium des Prozessverhaltens bei unterschiedlichen Bedingungen und dem Prognostizieren des zukünftigen Prozessverhaltens. Zu deskriptiven Modellen zählen analytische Modelle und Simulationsmodelle [vgl. Evans/Olson (2001), S. 4]. Ein deskriptives, analytisches Modell beschreibt die Ursache-Wirkungs-Beziehungen des Systems in Form eines exakt berechenbaren Gleichungssystems, um für gegebene Werte unabhängiger Variablen die Werte abhängiger Variablen zu berechnen. Ein Beispiel für deskriptive, analytische Modelle im Supply Chain Management sind Warteschlangenmodelle. Eine methodische Alternative zu analytischen Modellen bieten Simulationsmodelle. Ursache-Wirkungs-Beziehungen des Systems werden formal beziehungsweise logisch im dynamischen Simulationsmodell beschrieben, jedoch nicht als exakt berechnen-

bares Gleichungssystem repräsentiert. Es wird vielmehr der zeitliche Ablauf des Systems nachgestellt, welcher auf diesen Ursache-Wirkungs-Beziehungen basiert. Wird das Ablaufen von Prozessen rechnergestützt abgebildet, spricht man von Computersimulation. „Computer simulation refers to methods for studying a wide variety of models of real world systems by numerical evaluation using software designed to imitate the system's operations or characteristics, often over time“ [Kelton et al. (2002), S. 7]. Im Rahmen von Simulationsexperimenten wird so das Systemverhalten unter verschiedenen Systemkonfigurationen und -zuständen analysiert.

Analytische Methoden und Simulation sind jeweils durch spezifische Stärken und Schwächen gekennzeichnet. Simulation bietet gegenüber analytischen Methoden folgende Vorteile:

- Viele Systeme der Realität sind hoch komplex und die beschreibenden Modelle sind ihrerseits komplex, weshalb eine analytische Lösung oftmals verwehrt bleibt [vgl. Law/Kelton (2000), S. 5]. Die Anwendung analytischer Lösungen übersteigt vielfach die Grenzen mathematischer Möglichkeiten, wenn die Modellierung einer großen Anzahl an Variablen, insbesondere Zufallsvariablen, bedarf. Im Falle dynamischer Modelle kann das Systemverhalten mit Differenzialgleichungen beschrieben werden. Die Umformung dieser Gleichungen ist jedoch nur für lineare Differenzialgleichungen und einige nicht-lineare Differenzialgleichungen möglich. Da komplexe dynamische Systeme häufig ein nicht-lineares Verhalten aufweisen, ist das analytische Ableiten einer Lösungsfunktion regelmäßig nicht durchführbar. Ein fundamentaler Vorteil von Simulation ist, dass auch komplexe Modelle, welche umfangreiche Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Stochastik abbilden, analysiert werden können.
- Werden die Ursache-Wirkungs-Beziehungen eines Simulationsmodells mit statistischen Verteilungen beschrieben, so können näherungsweise nicht nur Mittelwerte, sondern auch Verteilungen der Outputvariablen ermittelt werden. Im Gegensatz zu analytischen Warteschlangenmodellen können mit Simulation nicht nur die Mittelwerte einer Periode, sondern kann auch die Streuung der Werte einer Periode für Leistungsindikatoren bestimmt werden. Da Entscheidungen des Supply Chain Managements vielfach unter Risiko erfolgen, liefert dies einen wertvollen Beitrag zur fundierten Entscheidungsfindung.
- Ein weiterer Vorteil von Simulationsmodellen ist, dass diese tendenziell leichter verständlich sind als analytische Modelle. Das Nachstellen von Prozessen bedarf in der Regel einer geringeren Abstraktion als die analytische Modellierung. Außerdem können Simulationsmodelle zur Unterstützung der Vorstellungskraft mit Animation versehen werden. Dies kann dazu beitragen, dass die Ergebnisse eines Simulationsmodells eine hohe Akzeptanz genießen.

Dem stehen folgende Nachteile von Simulation im Vergleich zu analytischen Methoden gegenüber:

- Analytische Methoden können für präskriptive und deskriptive Modelle angewandt werden, während Simulationsmodelle ausschließlich deskriptive Modelle sind. Simulation kann demnach punktuell für gegebene, unabhängige Variablen den Wert abhängiger Variablen ermitteln, aber nicht direkt ein Optimum finden.
- Bei stochastischer Simulation umfasst der Output Zufallsvariablen. Als Ergebnis wiederholter Simulationsläufe wird für die Analyse eine Stichprobe von Outputwerten gebildet. Aussagen auf Grundlage des Simulationsmodells sind dann risikobehaftet, da sie sich lediglich auf eine betrachtete Stichprobe beziehen.
- Simulationsmodelle werden in der Regel für jede Problemstellung neu erstellt. Der Aufwand hierzu ist größer als bei der Adaption und Anwendung eines bestehenden analytischen Modells.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass wenn der Einsatz analytischer Methoden verwehrt bleibt, die Anwendung von Simulation, trotz methodischer Schwächen, ein angemessenes Mittel ist. Diese Arbeit bedient sich analytischer Methoden und Simulation, wobei die Modelle quantitativ, dynamisch, stochastisch und deskriptiv sind.

2.1.2 Methodische Hybridformen

Die Anwendung von analytischen Methoden und Computersimulation im Supply Chain Management hat jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Zumeist wird anhand der Anforderungen der Problemstellung die Wahl für eine der beiden Methoden getroffen. Es ist jedoch auch eine Kombination von analytischen Methoden und Computersimulation möglich, damit innerhalb eines Anwendungsfalls das Potenzial beider Zugänge genutzt werden kann. Im Folgenden wird die Kombination von analytischen Modellen und Simulationsmodellen diskutiert, es werden unterschiedliche Formen erörtert und Einsatzmöglichkeiten für das Prozess- und Supply Chain Management aufgezeigt.

Die Idee zur Kombination von analytischen Modellen und Simulationsmodellen reicht in die Anfangszeit der Computersimulation zurück. Bereits 1969 widmet sich eine Arbeit auf dem Gebiet des Gesundheitswesens der Anwendung eines Hybridmodells [vgl. Fetter/Thompson (1969), S. 450ff., zitiert in Sargent (1994), S. 385]. Nolan und Sovereign integrieren analytische Methoden und Simulation in einer frühen Arbeit aus dem Bereich Logistik [vgl. Nolan/Sovereign (1972), S.

676ff.]. In den späten 1970er und den frühen 1980er Jahren wurde eine Vielzahl an Arbeiten veröffentlicht, welche sich der Entwicklung und Anwendung von hybrider Modellierung beziehungsweise Hybridmodellen (zur Unterscheidung siehe weiter unten) in unterschiedlichen Fachbereichen widmen [vgl. Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1038ff.]. Mitte der 1980er Jahre nahm das Interesse an hybrider Modellierung und Hybridmodellen tendenziell wieder ab [vgl. Sargent (1994), S. 386]. Mit zunehmender Konzentration auf Problemstellungen des Supply Chain Managements ab den 1990er Jahren wurde die Kombination von analytischen Methoden und Simulation auch in diesem Bereich umgesetzt, wenngleich derartige Anwendungen eine Minderheit bilden.

Bei der Auswahl der Methoden für Problemstellungen im Supply Chain Management sind generell die Kosten für den Einsatz, der Zeitbedarf für die Umsetzung und die Qualität der Ergebnisse ausschlaggebend. Durch Anwendung hybrider Formen werden die Möglichkeiten erweitert, um fallspezifischen Anforderungen bezüglich Kosten, Zeit und Qualität gerecht zu werden. Für eine strukturierte Wahl zwischen analytischen Methoden, Simulation und Hybridformen kann eine Nutzwertanalyse Anwendung finden, welche sich an den genannten Dimensionen orientiert [vgl. Hsieh (2002), S. 94].

Im Folgenden werden unterschiedliche Formen der Kombination von analytischen Methoden und Computersimulation erörtert. Dabei kann nach der Stärke der Integration, der Art der zeitlichen Integration, der Art der hierarchischen Integration und dem Anwendungszweck unterschieden werden.

Unterscheidung nach der Stärke der Integration

Anhand der Stärke der Integration von analytischen Methoden und Simulation kann zwischen hybrider Modellierung und Hybridmodellen unterschieden werden:

- „Hybrid modeling consists of building independent analytic and simulation models of the total system, developing their solution procedures, and using their solution procedures together for problem solving“ [Sargent (1994), S. 383].
- „A hybrid simulation/analytic model is a mathematical model which combines identifiable simulation and analytic models“ [Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1033].

Hybride Modellierung stellt demgemäß eine weniger starke Integration der beiden Methoden dar, indem ein analytisches Modell und ein Simulationsmodell unabhängig voneinander erstellt und angewandt werden, um eine Problemstellung durch Kombination des Outputs beider Modelle zu lösen. Dem stehen Hybridmo-

delle gegenüber, welche durch eine Kombination von analytischen Methoden und Simulation gebildet werden, wobei der Output des Hybridmodells die Problemstellung löst. Die Grenze zwischen hybrider Modellierung und Hybridmodellen kann jedoch oftmals fließend sein.

Im Gegensatz zu hybriden Modellen liegt bei hybrider Modellierung im Ergebnis je ein Output des analytischen Modells und ein Output des Simulationsmodells vor. Der Output wird voneinander unabhängig gewonnen und zur Lösung einer Problemstellung kombiniert. So ist beispielsweise die Bewertung von Alternativen anhand der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit durch ein analytisches Modell und der operativen Umsetzbarkeit durch ein Simulationsmodell möglich. Im Gegensatz zur Ergänzung des Outputs des analytischen Modells durch den Output des Simulationsmodells besteht eine weitere Anwendung in der parallelen Ermittlung gleicher Modellgrößen. So kann eine Verifikation des Outputs eines analytischen Modells durch ein eigenständiges Simulationsmodell durchgeführt werden. Ein Beispiel hierzu ist eine Arbeit von Jammernegg und Reiner, welche die Leistungserstellungsprozesse eines Unternehmens in der Elektronikindustrie mittels Rapid Modeling analysieren und die analytischen Ergebnisse mit diskreter, ereignisorientierter Simulation verifizieren [vgl. Jammernegg/Reiner (2001), S. 237ff.]. Im Supply Chain Management wird dieser Zugang beispielsweise in einer Arbeit von Verma angewandt [vgl. Verma (2006), S. 445ff.]. Mit einem analytischen Base Stock-Modell werden kostenoptimale Meldebestände für eine dreistufige Supply Chain errechnet. Anschließend wird ein Simulationsmodell des gleichen Systems zur Verifizierung des Base Stock-Modells erstellt.

Zu Zwecken der Abgrenzung sei auf die Verwendung des Begriffs des hybriden Modells in einem anderen Zusammenhang hingewiesen. So ist für ein Modell, welches entweder unterschiedliche Arten analytischer Methoden oder verschiedene Typen von Simulation in einem Modell kombiniert, ebenfalls als die Bezeichnung hybrides Modell geläufig. Als Beispiel im Supply Chain Management kann die integrierte Anwendung von diskreter, ereignisorientierter Simulation und System Dynamics zur Analyse der Auswirkung von Postponement in einer Logistikkette der Elektronikindustrie genannt werden [vgl. Reiner (2005), S. 381ff.]. Ein weiteres Beispiel ist die Integration von System Dynamics auf der taktischen Ebene und diskreter, ereignisorientierter Simulation auf der operativen Ebene zur hierarchischen Produktionsplanung [vgl. Rabelo et al. (2003), S. 1125ff.; Venkateswaran et al. (2004), 1094ff.].

Hybride Modelle, welche eine stärkere Integration der Methoden darstellen, werden im Folgenden behandelt.

Unterscheidung nach der zeitlichen Integration

Shanthikumar und Sargent haben eine Klassifizierung für hybride Modelle vorgestellt, indem sie vier Modelltypen definieren [vgl. Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1030ff.]. Nach der Art der zeitlichen Integration wird dabei unterschieden:

- Hybrides Modell Typ I: „A model whose behavior over time is obtained by alternating between using independent simulation and analytic models. The simulation (analytic) part of the model is carried out without intermediate use of the analytic (simulation) part“ [Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1034].
- Hybrides Modell Typ II: „A model in which a simulation model and an analytic model operate in parallel over time with interactions through their solution procedure“ [Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1034].

Ausschlaggebend für die Unterscheidung zwischen einem hybriden Modell vom Typ I und Typ II ist somit die Möglichkeit der zeitlichen Entkoppelung des analytischen Modells vom Simulationsmodell. Ist diese Entkoppelung möglich, so liegt ein Modell vom Typ I vor, beim Typ II ist hingegen eine simultane Anwendung erforderlich.

Der Modelltyp II bietet gute Möglichkeiten für das Prozess- und Supply Chain Management, wie eine Arbeit von Lee und Kim illustriert [vgl. Lee/Kim (2002), S. 169ff.]. Sie wenden ein hybrides Modell vom Typ II zur Produktions- und Distributionsplanung an. Es wird ein analytisches Modell mit stochastischen Kapazitäten der Produktion und der Distribution erstellt und parallel dazu das System als Simulationsmodell abgebildet. Anhand der analytisch gewonnenen Produktions- und Distributionsraten wird der Prozess simuliert. Die Kapazitätsbedingungen des analytischen Modells werden solange adaptiert, bis das Simulationsmodell die Durchführbarkeit der Produktion und Distribution bei gegebenen Kapazitäten nachweist. Dieser Zugang vereint ein rasches Finden optimaler Produktions- und Distributionsraten durch das analytische Modell mit einer realitätsnahen Analyse des Prozesses mittels Simulation.

Unterscheidung nach der hierarchischen Integration

Die folgenden Formen von hybriden Modellen sind dadurch gekennzeichnet, dass ein Gesamtsystem entweder als analytisches Modell oder Simulationsmodell repräsentiert wird. Im ersten Fall wird zusätzlich ein Teilsystem simuliert, dessen Output den notwendigen Input des analytischen Modells bildet. Im zweiten Fall wird ein Teilsystem durch ein analytisches Modell abgebildet, welches den notwendigen Input für das Simulationsmodell liefert. Dementsprechend wird in der

Literatur zwischen einem hybriden Modell vom Typ III und Typ IV unterscheiden.

- Hybrides Modell Typ III: „A model in which a simulation model is used in a subordinate way for an analytic model of the total system“ [Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1034].
- Hybrides Modell Typ IV: „A model in which a simulation model is used as an overall model of the total system, and it requires values from the solution procedure of an analytic model representing a portion of the system for some or all of its input parameters“ [Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1034f.].

Vor allem Modelle vom Typ IV finden im Prozess- und Supply Chain Management Anwendung. Ein Beispiel ist die Optimierung eines Lagersystems mit einer von der Lieferzuverlässigkeit abhängigen Nachfrage [vgl. Merkurjev et al. (2003), S. 509ff.]. Der Prozess wird dazu simuliert, wobei die Nachfrage eine Eingangsgröße im Modell darstellt. Die Nachfrageparameter werden, basierend auf der durch die Simulation ermittelten Servicequalität, durch ein analytisches Modell berechnet und für die Simulation bereitgestellt.

Zusätzlich zu den genannten Typen ist die Definition eines weiteren Typs von hybriden Modellen zweckmäßig:

- Hybrides Modell mit hierarchisch gleichgestellten Modellen: Dies ist ein Modell, welches ein System durch ein analytisches Modell und ein Simulationsmodell abbildet, wobei beide Modelle das System zur Gänze abbilden. Dabei können theoretisch zwei Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall benötigt das analytische Modell den Output des Simulationsmodells als Input und im zweiten Fall ist der Output des analytischen Modells der notwendige Input des Simulationsmodells. Der zweite Fall findet in der vorliegenden Arbeit Anwendung. Es wird ein hybrides Modell erstellt und angewandt, welches die Analyse komplexer Supply Chains erlaubt. Dieses Modell wird im Kapitel 2.1.4 vorgestellt.

Unterscheidung nach dem Anwendungszweck

Es können folgende drei bedeutsame Anwendungsfelder für hybride Modelle identifiziert werden:

- Finden verbesserter Prozesskonfigurationen
- Modellbildung
- Komplexitätsreduktion

Zum Finden verbesserter Prozesskonfigurationen kann ein hybrides Modell zur Bestimmung von Parameterwerten beziehungsweise zur Wahl von Alternativen herangezogen werden. Dies stellt einen häufigen Anwendungsfall hybrider Modelle im Prozess- und Supply Chain Management dar. Es wird hierzu ein Überblick gegeben, indem Beispiele aus der Literatur dargestellt werden. Bei folgenden drei Arbeiten dienen analytische Methoden als Ausgangspunkt, welche lineare Programmierung und genetische Algorithmen anwenden, um die Grundlage für die Simulation des Prozesses zu schaffen:

- Gegenstand eines Hybridmodells ist das Distributionsnetzwerk eines Logistik Service Providers mit einer Vielzahl an Lagern [vgl. Ko et al. (2006), S. 440ff.]. Ein Optimierungsmodell, welches die aggregierte Nachfrage und Kostenfaktoren berücksichtigt, bestimmt mittels eines genetischen Algorithmus, von welchem Lager welcher Kunde beliefert wird und welche Lager geschlossen werden sollen. Dieses Ergebnis sowie die detaillierte Nachfrage und weitere Prozessdaten bilden den Input für ein Simulationsmodell zur Prüfung der Performance bezüglich der Lieferzeiten und gegebenenfalls zur Anpassung des Optimierungsmodells.
- Ein Produktionsplanungsproblem mit einer Vielzahl an Produkten und mehreren Perioden kann mittels eines hybriden Modells gelöst werden [vgl. Byrne/Bakir (1999), S. 305ff.; Kim/Kim (2001), S. 165ff.]. Mit linearer Programmierung wird die kostenoptimale Produktionsmenge ermittelt. Auf dieser Basis wird anschließend mittels Simulation auf ausreichende Kapazitäten geprüft. Gegebenenfalls werden die Kapazitätsannahmen des analytischen Modells adaptiert und wird eine erneute Prüfung durchgeführt.
- Ein hybrides Modell, welches gemischte, ganzzahlige lineare Programmierung und diskrete, ereignisorientierte Computersimulation verbindet, wird zur Losgrößen- und Terminplanung in einer Supply Chain der Automobilindustrie eingesetzt [vgl. Gnomi et al. (2003), S. 251ff.]. Das Problem umfasst mehrere Produktionsstandorte mit Kapazitätsbeschränkungen und eine Vielzahl an Produkten mit variabler Nachfrage. Unter Berücksichtigung gegebener Kapazitäten liefert das analytische Modell Losgrößen und Produktionspläne als Input für das Simulationsmodell, welches die Performance des Prozesses ermittelt. Getrieben durch die Ergebnisse der Simulation folgt eine iterative Anpassung des analytischen Modells, bis einer angestrebten Performance entsprochen wird.

Im Gegensatz dazu beschäftigt sich folgende Arbeit mit einem Dienstleistungsprozess, wobei nun ein Simulationsmodell als Grundlage für ein analytisches Modell erstellt wird:

- Der Check-in-Prozess an einem Flughafen wird mittels diskreter, ereignisorientierter Simulation zur dynamischen Bestimmung der Kapazitätsanforderun-

gen, unter Einhaltung gewünschter Servicelevel, abgebildet. Dies ist der Input für ein analytisches Modell, welches mit ganzzahliger linearer Programmierung die Allokation der Schalter optimiert, das heißt die Anzahl der Schalter beziehungsweise deren Öffnungszeit wird minimiert [vgl. van Dijk/van der Sluis (2006), S. 1152ff.].

Wie dargestellt, können analytische Methoden und Simulation in einem Modell kombiniert werden, um Problemstellungen zu lösen. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Bildung von Modellen, wobei analytische Methoden und Simulation nicht unmittelbar, sondern mittelbar zu einer Problemlösung beitragen. Erkenntnisse über das Systemverhalten werden durch die Anwendung eines Simulationsmodells gewonnen, um dann in die Erstellung eines analytischen Modells einzufließen. Es gilt hierbei folgende Definition: „The proposed new class uses simulation results under different scenarios to probe the dynamic behavior of complex problems. In addition, an analytic model is constructed as a result based on the simulation results“ [Hsieh (2002), S. 92]. Dieser Typ von hybriden Modellen erlaubt die Erstellung eines analytischen Modells, welches den Output des Simulationsmodells für unterschiedliche Szenarien generalisiert. Das analytische Modell kann dann mit geringem Aufwand zur laufenden Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden. Hsieh setzt diese Vorgehensweise zum Design einer Fertigungslinie mit mehreren Stufen und Puffern und zur Optimierung des Produktionsplanes ein [vgl. Hsieh (2002), S. 87ff.].

Eine weitere Anwendung von hybriden Modellen kann der Komplexitätsreduktion dienen. Die Lösung von Problemstellungen des Supply Chain Managements wird oftmals durch einen hohen Komplexitätsgrad erschwert. Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, wie der Einsatz eines hybriden Modells die Komplexität soweit reduziert, dass eine Lösung mit vertretbarem Aufwand erreicht wird. Ziel ist das Finden einer verbesserten Prozesskonfiguration, wobei die Kombination eines analytischen Modells und eines Simulationsmodells der Komplexitätsreduktion dient. Grundlagen dazu werden im Kapitel 2.1.3 behandelt, ehe im Kapitel 2.1.4 ein Vorgehensmodell erörtert wird.

Es wurden Arten der Kombination von analytischen Methoden und Simulation klassifiziert und Beispiele für das Prozess- und Supply Chain Management beleuchtet. Es muss dabei festgehalten werden: „(The) boundary between hybrid simulation/analytic modeling and models are thin, as are the boundaries between the different classes of hybrid simulation/analytic models“ [Shanthikumar/Sargent (1983), S. 1046].

2.1.3 Komplexität von Systemen

Die Komplexität zu untersuchender Systeme stellt eine besondere Herausforderung bei deren Analyse im Supply Chain Management dar. Im Folgenden wird die Komplexität von Systemen erörtert und es werden gebräuchliche Möglichkeiten zur Analyse komplexer Systeme dargestellt. Anschließend wird speziell auf den Einsatz hybrider Modelle zur Analyse komplexer Systeme eingegangen.

Es besteht keine allgemeingültige Definition für die Komplexität eines Systems, weshalb für diese Arbeit folgende Begriffsbestimmung festgelegt wird: Die Komplexität eines Systems ist ein Maß für den Aufwand, welcher zu dessen Analyse und Bewertung notwendig ist. Allgemein gilt, dass ein System aus Elementen und deren Beziehungen besteht und zur Umwelt abgegrenzt ist. Der Aufwand für die Analyse und Bewertung eines Systems wird im Supply Chain Management vorwiegend durch folgende Faktoren bestimmt:

- Anzahl der Elemente des Systems und der Grad der Interaktion der Elemente: Gemäß einer prozessorientierten Sichtweise entsprechen die Objekte des Systems den Elementen der betrachteten Prozesse. Demnach wird die Komplexität entscheidend durch die Anzahl und den Grad der Interaktion der Inputs, Aktivitäten, Puffer, Informationen, Ressourcen, Outputs und sonstigen Elemente der Prozesse des Systems bestimmt. Der Grad der Interaktion wird beispielsweise durch Ressourcenkonflikte oder den Umfang beziehungsweise die Unterschiedlichkeit von Arbeitsplänen bestimmt.
- Variabilität im System: Die Variabilität der betrachteten Prozesse des Systems ist ein fundamentaler Treiber für die Komplexität und wird vielfach durch Risiken bedingt. Generell können interne Supply Chain Risiken, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten durch die Supply Chain Partner beeinflussbar sind, und externe Supply Chain Risiken, welche extern gegeben sind, unterschieden werden. Beispiele für interne Risiken sind Lager-, Transport-, Produktions-, IT-, Finanz- und Netzwerkrisiken (z. B. Missbrauch vertraulicher Informationen und Daten), während als externe Risiken Naturkatastrophen, Streiks und das Verhalten der Mitbewerber genannt werden können [vgl. Kajüter (2003), S. 107ff.]. Variabilität tritt in den Prozessen in vielfachen Formen auf. Es kann zwischen Variabilität mit externen und internen Ursachen aus der Sicht eines Supply Chain Partners differenziert werden. Außerdem kann zufällig eintretende Variabilität von prognostizierbarer Variabilität unterschieden werden. In Tabelle 1 werden anhand dieser Quellen und Formen von Variabilität einer Supply Chain entsprechende Beispiele genannt [vgl. Klassen/Menor (2006), im Druck].

	Zufällig	Prognostizierbar
Intern	Ausschuss, Maschinenausfall, Abwesenheit von Mitarbeitern	Vorbeugende Instandhaltung, Rüstzeiten, Produktportfolio
Extern	Ankunft der Aufträge, Transportzeiten, Qualität eingehender Lieferungen	Tägliche oder saisonale Bedarfschwankungen, Bedarf an technischen Support für neue Produkte, Qualitätsverbesserungen der Lieferanten durch Lernprozesse

Tabelle 1: Quellen und Formen von Variabilität¹

Für die Bestimmung der Anforderungen zur Gestaltung von Systemen ist der Grad ihrer Komplexität ein wichtiges Kriterium. Calinescu et al. zeigen Methoden zur Messung der Komplexität für Fertigungssysteme [vgl. Calinescu et al. (1998), S. 723ff.] und Sivadasan et al. behandeln die Quantifizierung von Komplexität im Supply Chain Kontext [vgl. Sivadasan et al. (2002), S. 80ff.]. Der Grad der Komplexität eines Supply Chain Systems hat einen entscheidenden Einfluss auf die Performance der Leistungserstellungsprozesse. Perona und Miragliotta zeigen diesen Zusammenhang und diskutieren Konzepte zur Begegnung von Komplexität [vgl. Perona/Miragliotta (2004), S. 103ff.]. Als besonders weitverbreitetes Konzept, welches sich mit dem Management von Komplexität befasst, ist Lean Production zu nennen [vgl. Womack et al. (1990), S. 1ff.]. Komplexität erschwert jedoch nicht nur das Management von Systemen, sondern auch deren modellbasierte Analyse. Ein Modell repräsentiert ein vereinfachtes Abbild eines Systems, wobei generell gilt, dass die Komplexität des Systems für die Komplexität des Modells bestimmend ist. Daher stellt sich die Frage, wie komplexe Systeme mit vertretbarem Aufwand modellbasiert analysiert werden können. Generell finden folgende Möglichkeiten Anwendung:

- Analytisches Modell: Eine starke Abstrahierung des realen Systems wird durchgeführt, damit relativ einfache analytische Modelle anwendbar sind. Dynamische Effekte und Stochastik, welche in komplexen Systemen eine gewichtige Rolle spielen, werden dann jedoch nur bedingt berücksichtigt, womit die Aussagekraft des Modells beschränkt ist.
- Vereinfachte Simulation: Dynamische Effekte und Stochastik können bei Simulation, im Vergleich zu analytischen Methoden, tendenziell eine umfassende Berücksichtigung finden. Zur Reduktion des Aufwandes bei der Simulation eines komplexen Systems wird bewusst von diesen Möglichkeiten nur be-

¹ In Anlehnung an Klassen/Menor (2006), im Druck.

grenzt Gebrauch gemacht. Zur vereinfachten Simulation stehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Wahl: Einerseits kann der Detaillierungsgrad des Modells herabgesetzt werden, wie zum Beispiel durch die aggregierte Darstellung einer Gruppe von Betriebsmitteln als ein Workcenter. Andererseits kann der Umfang des Modells zur Vereinfachung reduziert werden. Ein Beispiel hierzu ist, dass nur Teilprozesse in das Modell aufgenommen werden, deren Betriebsmittel einen bekannten Kapazitätsengpass darstellen. Ein vereinfachtes Simulationsmodell entspricht den Forderungen der Praxis nach einer unkomplizierten und raschen Realisierung. Eine Vereinfachung birgt jedoch die Gefahr einer begrenzten Aussagekraft der Ergebnisse. Hwarng et al. simulieren eine relativ komplexe Supply Chain und untersuchen die Auswirkungen einer vereinfachten Modellierung der Nachfrage und Durchlaufzeiten unter verschiedenen Szenarien. „Simulation results show that oversimplification of various parameters under such complex environment often leads to distortion of the outcomes“ [Hwarng et al. (2005), S. 2866]. Daher muss ein Kompromiss zwischen einer Vereinfachung, welche die Komplexität des Systems erfordert, und der Validität der Analyseergebnisse, welche die Problemstellung verlangt, gefunden werden. Ein Modell ist stets ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit. Die Vereinfachung ist nicht per se problematisch, sondern das Finden des adäquaten Maßes an Abstraktion ist kritisch. „Unfortunately there is no method for determining the best complexity level of a given model that still maintains its validity“ [Chwif et al. (2000), S. 452].

Ein alternativer Ansatz zur Analyse komplexer Systeme bedient sich hybrider Modelle, welche die Möglichkeiten von analytischen Modellen und Simulation kombinieren. Folgende beiden Zugänge sind dazu prinzipiell möglich:

- Anpassung der Systemgrenzen: Im ersten Schritt wird hierbei das gesamte System mit analytischen Methoden untersucht. Dies kann etwa durch ein Warteschlangenmodell oder auch einfacher durch eine deterministische Kapazitätsanalyse erfolgen. Die Ergebnisse und weitere Informationen aus dem realen System bilden den Input für eine anschließende Komplexitätsreduktion. In diesem Schritt wird ein Teilsystem des Gesamtsystems determiniert, welches dann einer weiteren Analyse zugeführt wird. Dazu können kritische Teilprozesse, zum Beispiel anhand von Durchlaufzeit- beziehungsweise Kapazitätsindikatoren, identifiziert werden. Abschließend wird das selektierte Teilsystem als Simulationsmodell abgebildet, wobei dynamische und stochastische Aspekte detaillierte Berücksichtigung finden. Anhand der Analyseergebnisse kann dann ein Rückschluss auf die Realität geschlossen werden, wobei die Aussagen auf das Teilsystem beschränkt sind. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 1 dargestellt. Jain et al. wählen einen derartigen Zugang für die Analyse einer Supply Chain in der Halbleiterindustrie [vgl. Jain et al. (1999), S. 888ff.]. Sie bestimmen analytisch Teilprozesse, welche Kapazitätsengpässe

darstellen und wählen diese für eine detaillierte Abbildung im Simulationsmodell. Zu Vergleichszwecken wird die Supply Chain in ihrer vollen Komplexität simuliert. Anhand des Vergleichs der Ergebnisse wird vor möglichen Defiziten gewarnt: „Use of abstracted models for supply chain simulation can potentially lead to inaccurate determination of the needed inventory levels for maintaining desired customer responsiveness“ [Jain et al. (1999), S. 893].

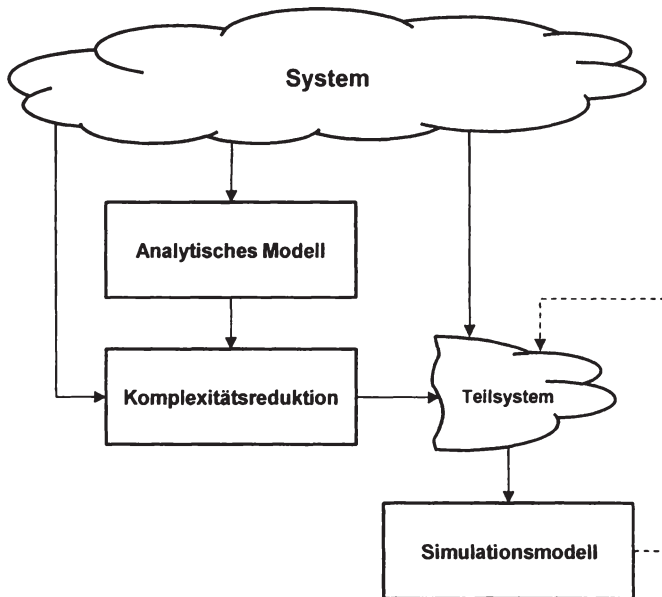


Abbildung 1: Anpassung der Systemgrenzen

- Anpassung der Anzahl der Alternativen: Im Unterschied zur oben beschriebenen Vorgehensweise dient hier der Output eines analytischen Modells nicht zur Anpassung der Systemgrenzen, sondern zur Vorselektion von alternativen Prozessdesigns. Grundidee ist, dass mit relativ geringem Aufwand eine verhältnismäßig große Anzahl an Alternativen geprüft wird, um anschließend aussichtsreiche Alternativen einer detaillierten Analyse mittels Simulation zu unterziehen [vgl. Tempelmeier/Kuhn (1993), S. 62; Simchi-Levi et al. (2000), S. 34; Fishman (2001), S. 24]. Abbildung 2 illustriert diese Vorgehensweise. Brown zeigt eine Umsetzung zur Planung der Fertigungsprozesse für die Herstellung von Leiterplatten und hält fest: „The queuing network model saved

the analysis team time by decreasing the complexity of the general purpose simulation model and by allowing the analysis team to make certain decisions at an early stage“ [Brown (1988), S. 26]. Ein weiteres Beispiel ist eine Arbeit von Granger et al., welche ein Transportproblem mittels kombinierter Anwendung eines offenen Wartschlängennetzwerks und diskreter, ereignisorientierter Simulation untersucht. Sie kommen zu folgendem Schluss: „The work (...) leads us to suspect that a combination of simulation and network approximations should yield substantially better performance than either one of these alone. Roughly speaking, one would use the network approximations to explore the variable space and identify parameter values that promise improvements in system performance, then validate these using simulation“ [Granger et al. (2001), S. 439]. Trotz der Vorzüge dieser Vorgehensweise besteht ein immanentes Problem, welches die Anwendbarkeit beschränkt. Es ist stets die Gefahr gegeben, dass vorteilhafte Alternativen nicht als solche erkannt und verworfen werden, wenn das aggregierte analytische Modell die dynamischen Prozesse nicht hinreichend genau abbildet.

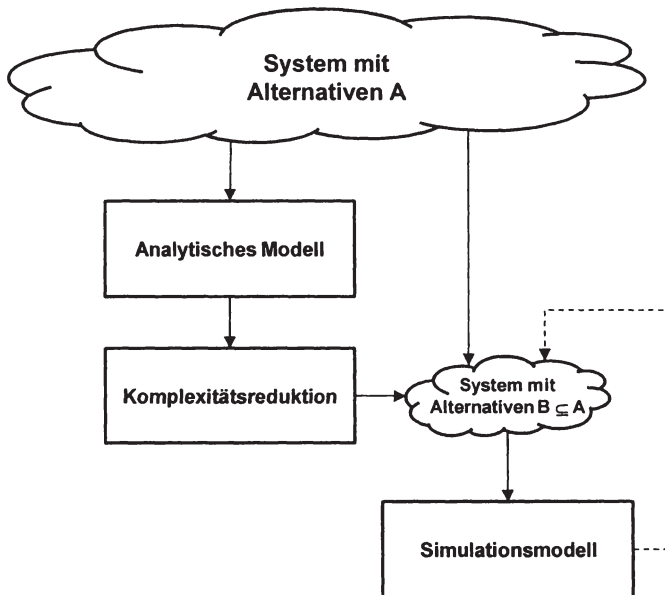


Abbildung 2: Anpassung der Anzahl der Alternativen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass hybride Modelle gute Möglichkeiten zur Analyse komplexer Systeme bieten, jedoch auch Grenzen für deren Einsatz bestehen.

2.1.4 Modell zur Analyse komplexer Supply Chains

Im Folgenden wird ein Vorgehensmodell zur Analyse komplexer Systeme für das Supply Chain Management vorgestellt. Dazu werden die dargestellten Möglichkeiten hybrider Modelle genutzt und bestehende Ansätze weiterentwickelt. Das Modell wird insbesondere folgenden Anforderungen gerecht:

- Es wird die Analyse eines komplexen Systems mit Supply Chain Prozessen, welche durch eine große Anzahl an Elementen und umfangreiche Variabilität gekennzeichnet sind unterstützt.
- Es wird ein Ausgleich zwischen einer detaillierten Berücksichtigung von dynamischen, stochastischen Effekten und einem angemessenen Aufwand für die Durchführung der Analyse erreicht.
- Es wird keine Einschränkung des Systemumfangs durch eine aggregierte Analyse vorgenommen, damit die dynamischen Wechselwirkungen des Gesamtsystems möglichst umfassend berücksichtigt werden.
- Es findet keine Vorauswahl von Designalternativen auf einer aggregierten Ebene statt, damit ein versehentliches Verwerfen aussichtsreicher Alternativen vermieden wird.

Die generellen Zusammenhänge werden nun erläutert und sind in Abbildung 3 dargestellt. (1) Im ersten Schritt werden die Supply Chain Prozesse des realen Systems abstrahiert und es wird ein analytisches Modell erstellt, welches die Prozesse abbildet. (2) Im nächsten Schritt wird die Komplexität reduziert, indem nicht-kritische Prozesssteile identifiziert werden, für welche eine vereinfachte Modellierung zulässig ist. Diese Komplexitätsreduktion erfolgt anhand der Ergebnisse des analytischen Modells und weiterer Inputs aus dem realen System. (3) Anschließend wird ein Simulationsmodell erstellt, wobei das Ergebnis der Komplexitätsreduktion über den Detaillierungsgrad entscheidet. So werden kritische Prozesssteile detailliert anhand des realen Systems modelliert und nicht-kritische Prozesssteile vereinfacht, unter Verwendung des Outputs des analytischen Modells, abgebildet. Das Simulationsmodell dient dann zur Analyse alternativer Prozessdesigns, damit Prozessverbesserungen identifiziert und auf das reale System angewandt werden können.

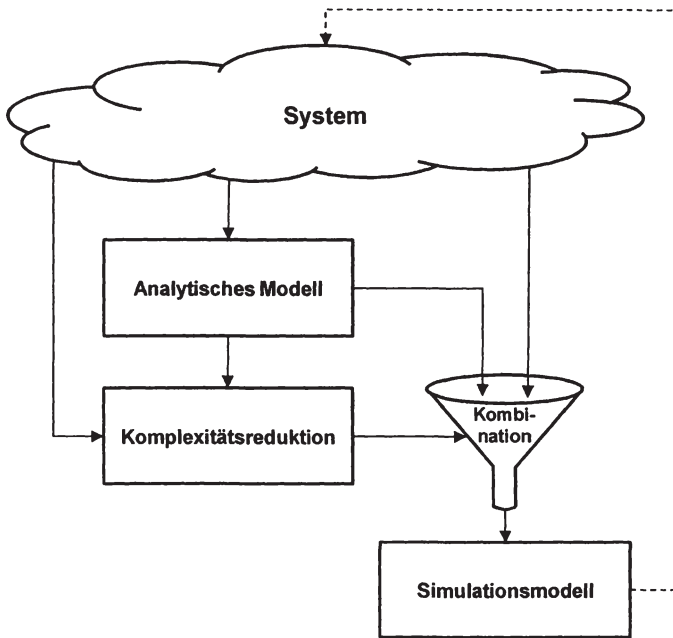


Abbildung 3: Vorgehensmodell zur Analyse komplexer Supply Chains

Das Vorgehensmodell kann in folgender Weise zur Lösung von Problemstellungen des Supply Chain Managements herangezogen werden. (1) Eingangs werden Leistungserstellungsprozesse als Warteschlangennetzwerk abgebildet und gemäß der Warteschlangentheorie analysiert. (2) Im nächsten Schritt werden zur Komplexitätsreduktion anhand der durch das Warteschlangenmodell gewonnenen Leistungsindikatoren Prozessschritte als kritisch oder nicht-kritisch klassifiziert. Mögliche Indikatoren sind Work in Progress-Bestände, Auslastungen und Wartezeiten. Wird Variabilität nicht reduziert, so muss sie durch Puffer in Form von Beständen, Kapazitäten und Zeiten ausgeglichen werden [vgl. Hopp/Sperman (1996), S. 296]. Bestände, Auslastungen und Wartezeiten drücken aus, in welchem Ausmaß dieser Ausgleich stattfindet und sind somit Indikatoren, inwieweit ein Prozessschritt kritisch ist. Für die Klassifizierung eines Prozessschritts können zusätzliche Indikatoren genutzt werden. Ein weiterer Indikator ist beispielsweise die Lage eines Prozessschritts im Netzwerk, da Variabilität am Beginn eines Prozesses generell eine stärkere Auswirkung hat als an dessen Ende. Die Klassifizierung der Prozessschritte kann anhand der Indikatoren mittels einer Clusteranalyse erfolgen. Somit müssen nicht fixe Klassengrenzen festgelegt werden, sondern es

werden die Verteilungen der Werte der Indikatoren bei der Klassifizierung berücksichtigt. (3) Anschließend werden die Prozesse als diskretes, ereignisorientiertes Simulationsmodell abgebildet. Das Ergebnis der Klassifizierung entscheidet darüber, ob ein Prozessschritt detailliert oder vereinfacht modelliert wird. Kritische Prozessschritte werden detailliert abgebildet, das heißt, es werden die Ressourcen zu deren Ausführung realitätsnah nachgebildet. Nicht-kritische Prozessschritte werden ohne Zuordnung von Ressourcen modelliert. In diesem Fall werden die kapazitätsbedingten Wartezeiten des Warteschlangenmodells herangezogen, welche als Konstante in das Simulationsmodell eingehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Vorgehensmodell auf seine Anwendbarkeit anhand eines realen Beispiels geprüft. Im Kapitel 3 wird dazu im Detail auf die Umsetzung der einzelnen Schritte eingegangen.

Indikatoren für die Wahl des beschriebenen Vorgehensmodells sind vor allem der Grad der Komplexität eines Systems und die Dringlichkeit der Optimierung seiner Prozesse. Beide Bedingungen sind zum Beispiel für Mass Customization charakteristisch. Mass Customization wurde als Begriff durch Davis [vgl. Davis (1988), S. 1ff.] geprägt und als Konzept durch Pine [vgl. Pine (1993), S.1 ff.] weiterentwickelt. Mass Customization kann folgendermaßen definiert werden: „The capability to manufacture a relatively high volume of product options for a relatively large market (or collection of niche markets) that demands customization, without tradeoffs in cost, delivery and quality“ [McCarthy (2004), S. 348]. Bei Mass Customization kann eine Anwendung des skizzierten Modells sinnvoll sein, da einerseits die Komplexität der Leistungserstellungsprozesse hoch ist. Diese wird insbesondere durch die Variantenvielfalt der Produkte bedingt. Blecker und Abdelkafi zeigen systematisch weitere Quellen von Komplexität im Mass Customization Umfeld, wie die Unsicherheit bei der Erfüllung der Kundenanforderungen, die Forderung nach einer ökonomischen Produktion und das Ziel einer raschen Leistungserfüllung [vgl. Blecker/Abdelkafi (2006), S. 908ff.]. Andererseits verlangt Mass Customization dringlich nach einer umfangreichen Analyse zur Optimierung der Prozesse, damit personalisierte Produkte zu Kosten erstellt werden können, welche nicht erheblich über jenen bei Massenproduktion liegen. Im Kapitel 3 wird im Rahmen einer Fallstudie das Vorgehensmodell zur Analyse einer realen Supply Chain in der Elektronikindustrie angewandt. Der gewählte Fall bietet gute Voraussetzungen für eine sinnvolle Anwendung des Modells, da der Grad der Komplexität der Supply Chain hoch und die Optimierung der Prozesse eine dringliche Aufgabe ist.

2.2 Bewertung von Supply Chain Designs

Dieses Kapitel widmet sich den Grundlagen zur Bewertung von Supply Chain Designs. Wichtige Erfolgsfaktoren für die Bewertung sind die Wahl geeigneter Kennzahlen und die Berücksichtigung der Supply Chain Strategie, weshalb eingangs diese beiden Aspekte erläutert werden. Im Anschluss werden methodische Möglichkeiten zur multikriteriellen Bewertung aufgezeigt. Abschließend wird ein innovatives Modell zur Bewertung komplexer Systeme für das Supply Chain Management vorgestellt.

2.2.1 Supply Chain Kennzahlen

Als Grundlage zur Bewertung von Supply Chain Designs dienen Kennzahlen, welche folgendermaßen definiert sind. „A metric is a verifiable measure, stated in either quantitative or qualitative terms and defined with respect to a reference point“ [Melnik et al. (2004), S. 210]. Der Referenzpunkt, wie zum Beispiel 100 Prozent Auslastung oder Performance der Vorperiode, erlaubt die Vergleichbarkeit. Supply Chain Management erfordert nicht nur unternehmensbezogene Kennzahlen, sondern auch integrierte Kennzahlen, welche die Performance der gesamten Supply Chain messen. „Integrated metrics allow management to assess the overall competitiveness of the supply chain and to determine which internal improvement efforts produce the greatest impact on overall competitiveness“ [Lambert/Pohlen (2001), S. 7]. Als wichtige Anforderungen an Kennzahlen im Supply Chain Management sind zu nennen [vgl. Lapide (2000), S. 25ff.; Hieber (2002), S. 79ff.; Melnik et al. (2004), S. 211; Cohen/Roussel (2006), S. 204]:

- Unterstützung bei der Kontrolle der Leistung, der Kommunikation der Performance und der Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen.
- Berücksichtigung der Supply Chain Strategie.
- Integration der unternehmensbezogenen und der Supply Chain bezogenen Perspektive.
- Orientierung an den Leistungserstellungsprozessen.
- Integration der finanziellen und der nicht-finanziellen Dimension.

In der Literatur wird eine Vielzahl an Kennzahlen für das Supply Chain Management vorgeschlagen. Gunasekaran und Kobu untersuchen die Literatur nach Arbeiten, welche auf Kennzahlen des Supply Chain Managements fokussieren und identifizieren rund 90 unterschiedliche Kennzahlen [vgl. Gunasekaran/Kobu (2007), S. 2832]. Nach der Bereinigung von Redundanzen definieren sie 26 Key

Performance Indikatoren und klassifizieren diese nach der Phase der Leistungserstellung beziehungsweise der Art der Kennzahl [vgl. Gunasekaran/Kobu (2007), S. 2835]. Tabelle 2 zeigt das Ergebnis des Literaturüberblicks.

Phase	Finanzielle Kennzahlen	Nicht-finanzielle Kennzahlen
Plan	Return on Investment, Selling Price	Labor Efficiency, Perceived Value of Product, Product Development Cycle Time, Bidding Management Cycle Time, Compliance to Regulations, Forecasting Accuracy, Perceived Value of Product, Supply Chain Response Time
Source	Scrap and Obsolescence Cost, Inventory Cost, Selling Price of Goods and Service	Labor Efficiency, Product Development Time, Lead Time for Procurement, Delivery Reliability, Product and Service Variety
Make	Scrap and Obsolescence Cost, Overhead Cost, Inventory Cost, Selling Price of Goods and Services, Value Added	Labor Efficiency, Conformance to Specifications, Capacity Utilization, Lead-time for Manufacturing, Production Flexibility, Process Cycle Time, Accuracy of Scheduling, Product and Service Variety, Value Added
Deliver	Overhead Cost, Value Added, Inventory Cost, Stock-out Cost, Transportation Cost, Warranty Cost	Labor Efficiency, Delivery Reliability, Perceived Value of Product, Value Added, Product and Service Variety, Perceived Quality

Tabelle 2: Kennzahlen in der Supply Chain Management Literatur²

Eine Kennzahl beziehungsweise ein Kennzahlensystem muss nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch praktisch implementierbar sein. Dabei zeigen sich grundsätzliche Unterschiede zwischen den Ansprüchen der Wissenschaft, für welche besonders generalisierbare und theoretisch fundierte Ergebnisse wichtig sind, und der Praxis, für die im Allgemeinen folgende Anforderungen im Vordergrund stehen:

- Hohe Verfügbarkeit der Kennzahlen, damit die Kosten und der Zeitaufwand für die Implementierung gering gehalten werden.

2 In Anlehnung an Gunasekaran/Kobu (2007), S. 2835.

- Großer Verbreitungsgrad der Kennzahlen zur Förderung der Vergleichbarkeit und Kommunizierbarkeit.
- Gute Verständlichkeit der Kennzahlen, damit die Akzeptanz gewährleistet ist.

Kennzahlensysteme für das Supply Chain Management mit ausgeprägter Praxisorientierung finden sich bei spezialisierten Institutionen und Softwareanbietern. Ein Beispiel sind die Messgrößen der Global ECR Scorecard, welche auf Initiative der Institution Efficient Consumer Response Europe entworfen wurde und insbesondere die Verbesserung der Supply Chain zwischen Herstellern und dem Handel zum Ziel hat [vgl. ECR Europe (2007), URL]. Ein weiteres Beispiel stellt die Softwarelösung mySAP Supply Chain Management dar, welche den SAP Advanced Planner and Optimizer integriert und über 300 vorkonfigurierte Leistungskennzahlen für die Planung und Steuerung von Logistikketten umfasst [vgl. SAP (2007), URL]. Einen relativ hohen Verbreitungsgrad hat das Supply Chain Operation Reference Modell (SCOR Modell) des Supply Chain Councils, einer internationalen Organisation mit knapp 1000 Mitgliedsunternehmen [vgl. Supply Chain Council (2007), URL]. Das SCOR Modell ist ein hierarchisch strukturiertes Referenzmodell zur Abbildung der Leistungserstellungsprozesse von Supply Chains. Einer Definition der fünf Prozesstypen Plan, Source, Make, Deliver und Return auf der höchsten Ebene, folgt eine Disaggregation in Prozesskategorien (z. B. Make-to-Order) auf der darunter liegenden Konfigurationsebene. Auf der dritten Ebene, der Gestaltungsebene, wird weiter in Prozesselemente aufgegliedert, wobei die Beziehungen zwischen den Elementen und deren Input und Output definiert sind. Jedes Prozesselement wird durch einen Namen (z. B. Verpacken), eine Standarddefinition, relevante Performanceattribute (z. B. Reaktionsfähigkeit), Kennzahlen zur Messung der Performanceattribute (z. B. Kundenauftragsdurchlaufzeit), Best Practices der Industrie sowie Fähigkeiten zur Leistungssteigerung des Prozesses (z. B. Anwendung von Advanced Planning Systemen) beschrieben. Die unterste Ebene, die Implementierungsebene, dient der weiteren Detaillierung, wobei jedoch keine Referenzobjekte vordefiniert sind.

Das SCOR Modell unterstützt die Erstellung von standardisierten Prozessmodellen, welche inner- und vor allem auch überbetriebliche Vergleiche ermöglichen. Durch die Definition von Kennzahlen liegen bewertbare Prozessmodelle vor, welche zur Unterstützung von strategisch-taktischen Entscheidungen des Supply Chain Managements herangezogen werden können. Die Standardisierung schafft einerseits Transparenz in der Wertschöpfungskette, limitiert jedoch auch das Potenzial des Modells. Leistungserstellungsprozesse sollen den individuellen Bedürfnissen der Kunden beziehungsweise der Strategie der Supply Chain gerecht werden. Das SCOR Modell bietet jedoch nur ein standardisiertes Referenzmodell, welches von der Branche beziehungsweise der verfolgten Strategie unabhängig ist. Auch die vorgeschlagenen Kennzahlen nehmen keinen Bedacht auf branchenübliche Leistungsindikatoren und berücksichtigen nicht, ob eine Supply Chain auf

Reaktionsfähigkeit oder Kostenreduzierung ausgerichtet ist. Außerdem sei festgehalten, dass Produktentwicklungs- und Dienstleistungsprozesse keine Modellinhalte sind.

Kennzahlen in der Literatur	Implementierung im SCOR Modell
Accuracy of Scheduling	Implementiert
Bid Management Cycle Time	Implementiert
Capacity Utilization	Implementiert
Compliance to Regulations	Nicht implementiert
Conformance to Specifications	Partiell implementiert
Delivery Reliability	Implementiert
Forecasting Accuracy	Implementiert
Inventory Cost	Partiell implementiert
Labor Efficiency	Implementiert
Lead Time for Procurement	Implementiert
Lead Time for Manufacturing	Implementiert
Overhead Cost	Implementiert
Perceived Quality	Nicht implementiert
Perceived Value of Product	Nicht implementiert
Process Cycle Time	Implementiert
Product and Service Variety	Nicht implementiert
Product Development Cycle Time	Partiell implementiert
Production Flexibility	Implementiert
Return on Investment	Partiell implementiert
Scrap and Obsolescence Cost	Implementiert
Selling Price of Goods and Service	Nicht implementiert
Stock-out Cost	Nicht implementiert
Supply Chain Response Time	Implementiert
Transportation Cost	Implementiert
Value Added	Partiell implementiert
Warranty Cost	Implementiert

Tabelle 3: Praxisorientierte Implementierung von Kennzahlen der Literatur

Es soll nun die Frage beantwortet werden, inwieweit das praxisorientierte Kennzahlensystem des SCOR Modells mit den theoriegeleiteten Arbeiten der Literatur konform geht. Dazu wurde der Vergleich in Tabelle 3 angestellt, welcher die Key Performance Indikatoren des Literaturüberblicks von Gunasekaran und Kobu [vgl. Gunasekaran/Kobu (2007), S. 2819ff.] den Kennzahlen des SCOR Modells [vgl. Supply Chain Council (2007), URL] gegenüber stellt. Partielle Implementierung bedeutet dabei, dass die Information der entsprechenden Kennzahl teilweise aus den SCOR Modell Kennzahlen gewonnen werden kann. Der Vergleich zeigt, dass das SCOR Modell einen Großteil der in der Literatur diskutierten Kennzahlen umfasst.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das SCOR Modell theoretische Fundiertheit und Praxistauglichkeit weitgehend vereint. In dieser Arbeit wird daher auf das Potenzial des SCOR Modells für die Bewertung von Supply Chain Designs zurückgegriffen.

2.2.2 Supply Chain Strategie

Ein bedeutsamer Einflussfaktor für die Bewertung von Supply Chain Designs ist die verfolgte Strategie der Logistikkette. „A supply-chain strategy determines the nature of procurement of raw materials, transportation of materials to and from the company, manufacture of the product or operation to provide the service, and distribution of the product to the customer, along with any follow-up service and a specification of whether these processes will be performed in-house or outsourced. (...) (T)he supply chain strategy defines not only what processes within the firm should do well but also what the role played by each supply chain entity is“ [Chopra/Meindl (2006), S. 23]. Die Supply Chain Strategie muss in Abstimmung mit den individuellen Strategien der Supply Chain Partner festgelegt werden.

Fisher identifiziert als Grundproblem vieler Logistikketten die mangelnde Berücksichtigung der Art der erstellten Leistungen bei der Formulierung der Supply Chain Strategie [vgl. Fisher (1997), S. 105ff.]. Er unterscheidet zwischen funktionalen Produkten, welche durch eine vorhersagbare Nachfrage gekennzeichnet sind, und innovativen Produkten, mit einer schwer prognostizierbaren Nachfrage, und empfiehlt eine darauf abgestimmte Supply Chain Strategie. Christopher und Towill folgen diesem Ansatz und schlagen eine agile Supply Chain Strategie für Produkte mit unsicherer Nachfrage und eine schlanke Supply Chain Strategie bei einfach prognostizierbarer Nachfrage vor [vgl. Christopher/Towill (2000), S. 206ff.]. Gemäß Naylor et al. ist schlank (lean) und agil (agile) folgendermaßen definiert: „Agility means using market knowledge and a virtual corporation to exploit profitable opportunities in a volatile market place. Leanness means devel-

oping a value stream to eliminate all waste, including time, and to ensure a level schedule“ [Naylor et al. (1999), S. 108]. Christopher und Towill ordnen diesen Supply Chain Strategien sogenannte Market Winners und Market Qualifiers zu. Ein Market Qualifier ist ein Indikator für die Leistung, welche das Überleben am Markt garantiert, während ein Market Winner jene Performance misst, welche zur Überlegenheit am Markt führt. Bei einer agilen Supply Chain Strategie sind die Qualität, die Kosten und die Durchlaufzeit Market Qualifiers und ist der Lieferservicegrad eine Market Winner, während bei einer schlanken Supply Chain Strategie die Qualität, die Durchlaufzeit und der Lieferservicegrad Market Qualifiers sind und die Kosten den Market Qualifier bildet [vgl. Christopher/Towill (2000), S. 206ff.].

	Funktionale Produkte (geringe Nachfrageunsicherheit)	Innovative Produkte (hohe Nachfrageunsicherheit)
Stabiler Prozess (geringe Lieferunsicherheit)	Effiziente Supply Chain: Ziel ist die Erreichung von Kosteneffizienz durch Eliminierung von nicht wertschöpfenden Aktivitäten, Skaleneffekte, Optimierungstechniken und Verbesserungen des Informationsflusses.	Reaktionsfähige Supply Chain: Ziel ist die Begegnung variabler Kundenanforderungen mit einem hohen Grad an Reaktionsfähigkeit und Flexibilität, zum Beispiel durch Mass Customization oder Build-to-Order.
Sich entwickelnder Prozess (hohe Lieferunsicherheit)	Risikoabsichernde Supply Chain: Ziel ist die Absicherung von Risiken in der Supply Chain durch Pooling und Teilen von Beständen und Kapazitäten.	Agile Supply Chain: Ziel ist die Begegnung variabler Kundenanforderungen mit einem hohen Grad an Reaktionsfähigkeit und Flexibilität bei gleichzeitiger Absicherung von Risiken in der Supply Chain durch Pooling und Teilen von Beständen und Kapazitäten.

Tabelle 4: Risikoabhängige Supply Chain Strategien³

Lee betont die Wichtigkeit von Risiken für die Entwicklung von Supply Chain Strategien, insbesondere wenn diese nicht reduziert werden können [vgl. Lee (2002), S. 105ff.]. Er differenziert ebenfalls gemäß dem Nachfragerisiko in funktionale und innovative Produkte. Zusätzlich unterscheidet er zwischen einem sich

3 In Anlehnung an Lee (2002), S. 113f.

entwickelnden Prozess mit einem hohen Lieferrisiko und einem stabilen Prozess mit einem niedrigen Lieferrisiko [vgl. Lee (2002), S. 107]. Anhand dieser Unterscheidungen entwickelt er eine Matrix mit folgenden vier Supply Chain Strategien: effiziente (efficient), reaktionsfähige (responsive), risikoabsichernde (risk-hedging) und agile (agile) Supply Chain Strategie [vgl. Lee (2002), S. 113f.]. Tabelle 4 gibt einen Überblick dieser risikoabhängigen Supply Chain Strategien.

2.2.3 Multikriterielle Bewertung

Für die Bewertung von Supply Chain Designs ist eine Vielzahl an Kriterien relevant, wie zum Beispiel Bestände, Servicegrade, Durchlaufzeiten, Auslastungen und Herstellkosten. Diese Größen sind zumeist voneinander abhängig. Beispiele sind die zwei fundamentalen Zielkonflikte zwischen niedrigen Beständen und einem hohen Servicegrad bei der Leistungserfüllung sowie zwischen kurzen Durchlaufzeiten für die Leistungserstellung und einer hohen Auslastung der Mitarbeiter und Betriebsmittel [vgl. Hopp/Spearman (1996), S. 92 und S. 287f.; Anupindi et al. (1999), S. 134ff. und 170f.]. Klassen und Menor bringen den Zielkonflikt zwischen Auslastung, Variabilität und Beständen als sogenanntes Process Management Triangle zum Ausdruck: „(P)rocess performance can be improved through either more ‘buffer’ capacity (i.e. lower capacity utilization), reduced variability, or more ‘buffer’ inventory“ [Klassen/Menor (2006), im Druck].

Die Optimierung einer einzelnen Größe führt vielfach nicht zu einem optimalen Gesamtergebnis, weshalb zur Lösung von Problemstellungen des Supply Chain Managements generell eine multikriterielle Bewertung zielführend ist. Sind bei der Optimierung von Supply Chain Designs Zielkonflikte zu berücksichtigen, liegt ein Optimierungsproblem mit mehreren Zielfunktionen vor. Es kann versucht werden eine Lösung zu finden, wo sämtliche Zielfunktionen einen optimalen Wert annehmen. Dies ist jedoch zumeist nicht möglich und es muss eine Lösung mittels alternativer Kriterien angestrebt werden. Ein radikaler Weg ist die Zielunterdrückung, das heißt, es findet ausschließlich das wichtigste Ziel Berücksichtigung. Gängige Möglichkeiten zur Berücksichtigung sämtlicher Ziele sind die Anwendung der preemptiven Optimierung (auch als lexiografische Ordnung bezeichnet), des Anspruchsniveaunkonzepts (auch als Zieldominanz bezeichnet), der Zielgewichtung (auch als gewichtete Summe bezeichnet) und von Goal Programming (auch als Zielprogrammierung bezeichnet), deren Grundideen nun erörtert werden [vgl. Laux (2002), S. 95ff.; Rommelfanger/Eickenmeier (2002), S. 138ff.; Domschke/Scholl (2000) S. 53ff.]:

Preemptive Optimierung

Bei der preemptiven Optimierung werden die Zielfunktionen in folgender Weise sequenziell berücksichtigt:

1. Den Zielfunktionen werden Prioritäten zugewiesen.
2. Das Optimum für die Zielfunktion mit der höchsten Priorität wird ermittelt.
3. Der ermittelte Wert wird als Nebenbedingung eingeführt.
4. Die Schritte werden für jede Zielfunktion in der Reihenfolge ihrer Priorität wiederholt.

Dieser Ansatz ist einfach umzusetzen, jedoch auch problembehaftet, da impliziert wird, dass ein auch nur marginaler Vorteil bezüglich der wichtigsten Zielgröße nicht durch die anderen Zielgrößen kompensiert werden kann [vgl. Laux (2002), S. 97].

Anspruchsniveaunkonzept

Das Anspruchsniveaunkonzept verfolgt die Maximierung einer Zielgröße bei gegebenen Anspruchsniveaus der anderen Zielgrößen in folgender Weise:

1. Es wird ein dominantes Hauptziel bestimmt.
2. Für die restlichen Ziele wird je ein Anspruchsniveau festgelegt, welches mindestens beziehungsweise maximal erreicht werden muss.
3. Für die Zielfunktion des dominanten Zieles wird ein Optimum gesucht, wobei die Anspruchsniveaus der restlichen Ziele als Nebenbedingungen berücksichtigt werden.

„Ein Problem besteht dabei in Folgendem: Durch ungeeignete (ungünstige) Schranken für Nebenziele wird unter Umständen der Zielerreichungsgrad des Hauptzieles zu sehr beschnitten, oder die Menge der zulässigen Lösungen ist sogar leer“ [Domschke/Scholl (2000) S. 55].

Zielgewichtung

Bei der Zielgewichtung werden Zielfunktionen zu einer Zielfunktion in folgender Weise zusammengefasst:

1. Für jede Zielfunktion werden Gewichte festgelegt.
2. Es wird eine Zielfunktion aus der Summe der gewichteten Zielfunktionen erzeugt.

3. Für die aggregierte Zielfunktion wird das Optimum ermittelt.

Bei diesem Ansatz muss sichergestellt sein, dass die Ziele gegenseitig substituierbar sind, und außerdem kann die Wahl geeigneter Gewichte in der Praxis problematisch sein [vgl. Laux (2002), S. 101].

Goal Programming

Ein weiterer Ansatz zur Optimierung bei konkurrierenden Zielen ist Goal Programming. Grundgedanke ist dabei, dass für jedes Ziel ein Zielwert (Goal) gegeben ist und eine Minimierung unerwünschter Abweichungen von den Zielwerten angestrebt wird. Grundsätzlich ist Goal Programming eine Erweiterung der linearen Programmierung auf mehrere Ziele. Es kann in zwei wichtige Typen von Goal Programming unterschieden werden. (1) Weighted Goal Programming: „(U)nwanted deviations are assigned weights according to their relative importance to the decision maker and minimized as an archimedian sum“ [Tamiz (1996), S. 199]. (2) Lexicographic Goal Programming: „(D)eviational variables are assigned into a number of priority levels and minimized in a lexicographic sense. A lexicographic minimisation being defined as a sequential minimisation of each priority whilst maintaining the minimal values reached by all higher priority level minimisations“ [Tamiz (1996), S. 199]. In der Grundform, dem gewichteten Goal Programming, werden diese Schritte durchgeführt:

1. Pro Ziel wird als Sollgröße ein Zielwert definiert.
2. Pro Ziel wird je ein Gewicht für negative und positive Abweichungen vom Zielwert festgelegt.
3. Für die Zielfunktion, welche als Summe der gewogenen Abweichungen der Ziele von den Zielwerten definiert wird und ein Minimum annehmen soll, wird das Optimum ermittelt.

Goal Programming ist prinzipiell praxisnah, da die Grundannahmen leicht verständlich sind und vielfach mit der natürlichen Vorgehensweise von Entscheidungsträgern konform gehen. Ein wichtiger Aspekt von Goal Programming ist die Anwendung so genannter Soft Constraints, das heißt von Bedingungen, welche nicht unbedingt, sondern möglichst erreicht werden sollen. Im Gegensatz zu linearer Programmierung wird nicht nach einer optimalen Lösung gesucht, sondern nach einer Lösung, welche die Vorgaben der Entscheidungsträger möglichst gut erfüllt. „If the decision-maker inadvertently sets unreasonable targets or assigns incorrect weights and/or priorities, a GP solution cannot then provide the best available or efficient solution. Therefore, the limitations of GP, if any, are due

mainly to errors of its users, not to the rationale behind GP theories per se“ [Min/Storbeck (1991), S. 311]⁴. Daher ist die adäquate Wahl der Zielwerte und Gewichte von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Anwendung Methode.

Goal Programming wurde ursprünglich von Charnes und Cooper entwickelt [vgl. Charnes/Cooper (1961), S. 1ff.] und dann für unterschiedlichste Problemstellungen modifiziert [vgl. Jones/Tamiz (2002), S. 129ff.]. Für die Lösung von Entscheidungsproblemen des Supply Chain Managements kommt Goal Programming vereinzelt zur Anwendung. Als Schwerpunkt kann dabei die Lieferantwahl [vgl. Wang et al. (2004), S. 1ff.; Kumar et al. (2004), S. 69ff.; Percin (2006), S. 34ff.; Wadhwa/Ravindran (2007), S. 3725ff.] identifiziert werden. Weitere Arbeiten finden sich im Bereich Distributionsplanung [vgl. Rees et al. (1987), S. 117ff.; Hemaïda/Kwak (1994), S. 215ff.] und Supply Chain Planning [vgl. Dhahri/Chabchoub (2007), S. 1800ff.; Chiang et al. (2007), S. 631ff.].

2.2.4 Modell zur Bewertung komplexer Supply Chains

Unter Berücksichtigung der angestellten Überlegungen wird ein Modell zur Bewertung alternativer Supply Chain Designs entwickelt, welches den folgenden Anforderungen gerecht wird:

- „Ein geeignetes Performance Measurement System muss prozessorientiert aufgebaut sein und neben den üblichen Kriterien Kosten, Qualität und Flexibilität auch Supply Chain-Parameter, wie beispielsweise Durchlaufzeit und Servicelevel enthalten und einen Bezug zwischen finanziellen und nicht finanziellen Kennzahlen herstellen“ [Taudes et al. (2003), S. 410]. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, bewertet das Modell multikriteriell anhand finanzieller und nicht finanzieller Kennzahlen.
- Es findet eine Berücksichtigung von Konflikten konkurrierender Ziele statt.
- Ein essenzieller Faktor für die Gestaltung und die Steuerung von Leistungserstellungsprozessen innerhalb und zwischen Unternehmen sind operative Risiken, welche sich in der Streuung der Werte der Prozesskennzahlen widerspiegeln [vgl. Jammernegg et al. (2003) S. 177f.]. Das Modell berücksichtigt daher das Risiko der Prozesse, indem in die Bewertung nicht nur Mittelwerte, sondern auch Verteilungen von Kennzahlen einfließen.

- Die Strategie der Supply Chain wird bei der Bewertung berücksichtigt.
- Die praktische Umsetzbarkeit und Akzeptanz wird durch die Einfachheit des Modells und die Integration des etablierten SCOR Modells gefördert.

Als Grundlage für die Bewertung alternativer Supply Chain Designs wird die multikriterielle Entscheidungstechnik Goal Programming herangezogen, wobei der gewichtete Goal Programming Ansatz adaptiert wird. Es wird nicht nach Werten für Ziele gesucht, sondern nach der besten Alternative aus einem Set an Alternativen, wo die Werte der Ziele für jede Alternative gegeben sind. Daher wird der Goal Programming Ansatz als Entscheidungsregel umformuliert, und die Zielfunktion folgt dann Formel (2.1).

$$\sum_{z=1}^Z \left(g_z \frac{w_z^- \cdot d_{az}^- + w_z^+ \cdot d_{az}^+}{t_z} \right) \rightarrow \text{Min}_a! \quad (2.1)$$

wobei

$$d_{az}^- = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\max(t_z - x_{azi}, 0)]^2}$$

$$d_{az}^+ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\max(x_{azi} - t_z, 0)]^2}$$

$$w_z^- \in \{0,1\}$$

$$w_z^+ \in \{0,1\}$$

Es bedeutet:

x_{azi} Werte ($i = 1, 2, \dots, n$) der Ziele Z_z ($z = 1, 2, \dots, Z$) bei Wahl der Alternative A_a ($a = 1, 2, \dots, A$)

t_z Zielwert

g_z Gewicht des Ziels

w_z^- Gewicht für negative Abweichung

w_z^+ Gewicht für positive Abweichung

Wenn die Werte der Ziele in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, resultieren aus einer direkten Aufsummierung der Abweichungen irreführende Ergebnisse, da Ziele mit einer verhältnismäßig großen Spannweite stärker in das Ergebnis einfließen. Zur Vermeidung von Verzerrungen erfolgt eine Normalisierung, indem jede Abweichung durch eine Normalisierungskonstante dividiert wird. Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Wahl der Normalisierungskonstanten [vgl. Tamiz/Jones (1997), S. 29ff.], wobei eine einfache Form der Normalisierung die Definition einer Konstante pro Ziel in der Höhe des Zielwertes dividiert durch 100 ist. „This method restores meaning to the optimal achievement function value, which now measures the total percentage sum of deviations from goals. It does however, require accurate setting of the target values and is not applicable to models in which any objective has a target value of zero“ [Tamiz et al. (1998), S. 572f.]. Analoges gilt für die Wahl einer Normalisierungskonstante in der Höhe des entsprechenden Zielwertes, was in Formel (2.1) umgesetzt wird.

Die Anwendung des Modells zur Bewertung alternativer Supply Chain Designs erfordert für jedes Ziel (1) den Wert des Zieles pro Alternative, (2) den Zielwert, (3) das Gewicht des Zieles und (4) die Gewichte für Abweichungen. Im Folgenden werden diese Modellgrößen diskutiert, um dann die Integration des Bewertungsmodells mit dem Vorgehensmodell zur Analyse aus Kapitel 2.1.4 zu erörtern.

Werte der Ziele

Die Werte der Ziele sind Ausprägungen von Leistungsindikatoren, welche die alternativen Prozessdesigns beschreiben. Für eine umfassende Bewertung werden finanzielle- und nicht-finanzielle Kennzahlen herangezogen. Im Falle existierender Prozesse können die Werte aus den Kennzahlensystemen der Supply Chain Partner zur Anwendung kommen. Wenn die gewünschten Kennzahlen nicht durch diese Systeme zur Verfügung gestellt werden oder im Fall potenzieller, nicht existierender Supply Chain Designs, müssen die Werte geschätzt, analytisch berechnet oder durch Simulation bestimmt werden. Eine Schätzung der Werte ist bedingt durch die Komplexität der Prozesse meist nicht durchführbar beziehungsweise wegen mangelnder Fundiertheit und Genauigkeit abzulehnen. Die Anwendung von analytischen Methoden und Simulation bietet spezifische Vor- und Nachteile. Im Kapitel 2.1.4 wurde ein hybrides Modell vorgestellt, welches die Stärken beider Methoden nutzt. Ein prinzipieller Vorzug von Simulation ist, dass nicht nur periodenbezogene Mittelwerte, sondern auch die Verteilungen von Leistungsindikatoren ermittelt werden können. Das Modell zur Bewertung kann die Werte einzelner Beobachtungen (z. B. Kundenauftragsdurchlaufzeit einzelner Aufträge) berücksichtigen, womit die Verteilung der Werte, welche durch ein Simulationsmodell ermittelt wird, in die Beurteilung von Alternativen eingeht. Denn die Ver-

teilung der Werte der Ziele ist ein wichtiger Indikator für Prozessrisiken. Das Modell kann beispielsweise durch Heranziehen von Kundenauftragsdurchlaufzeiten einzelner Aufträge, anstatt der mittleren Kundenauftragsdurchlaufzeit aller Aufträge, Prozessrisiken berücksichtigen, welche für das Zustandekommen der Zeiten verantwortlich sind.

Zielwerte

Die Güte eines alternativen Supply Chain Designs wird anhand der Abweichungen der Werte der Ziele von gegebenen Zielwerten bestimmt. Deshalb ist für jedes Ziel ein Zielwert festzulegen, wobei folgender Rahmen unterstützt:

- Stimme des Kunden: Welche Zielwerte werden durch die Kunden gewünscht? Zur Beantwortung ist die Durchführung von Kundenbefragungen zweckmäßig.
- Leistungsfähigkeit der Supply Chain: Welche Zielwerte können durch das Potenzial der Supply Chain erreicht werden? Die Beantwortung dieser Frage basiert weitgehend auf der Einschätzung des Managements, welche etwa durch eine Analyse der dynamischen Entwicklung von Leistungsindikatoren geleitet werden kann.
- Leistungsfähigkeit der Mitbewerber: Welche Werte werden durch die Mitbewerber erreicht? Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit der Mitbewerber sind Benchmarks heranzuziehen.

Wenn die Ziele anhand der Kennzahlen des SCOR Modells definiert werden, können die Möglichkeiten des SCOR Modells für Benchmarks genutzt werden. Anhand der Leistungsfähigkeit der Mitbewerber können Zielwerte dann objektiv bestimmt werden. Dazu stehen branchen- und regionalspezifische Daten zur Verfügung, welche auf den Kennzahlen des SCOR Modells basieren [vgl. APQC (2007), URL; The Performance Measurement Group (2007), URL; iCognitive (2007), URL].

Gewichte der Ziele

Die relative Wichtigkeit eines Zieles im Bezug zu den restlichen Zielen wird durch das Gewicht des Zieles ausgedrückt. Die Strategie zur Erreichung der Ziele einer Supply Chain bildet die Grundlage zur Bestimmung der Gewichte der Ziele. Das Gewicht eines Zieles spiegelt dessen Wichtigkeit für die Erreichung der Ziele der Strategie wider. Die Festlegung der Gewichte der Ziele hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung, weshalb darauf ein besonderes Au-

genmerk gerichtet werden soll. Folgende Vorgehensweise dient dem strukturierten Finden der Gewichte der Ziele:

1. Ausgangspunkt ist die Strategie der Supply Chain. Im Falle eines dezentralen Supply Chain Managements versucht jeder Supply Chain Partner seine eigene Performance zu optimieren und berücksichtigt zusätzlich die Ziele der gesamten Supply Chain bei der Entwicklung der individuellen Strategie. Dabei sind die Anforderungen des eigenen Unternehmens und der restlichen Supply Chain Partner relevant. Die Anforderungen werden besonders durch Risiken der Leistungserstellungsprozesse, wie Lieferrisiken, interne Risiken und Nachfragerisiken, geprägt.
2. Im nächsten Schritt werden Kennzahlen anhand der Wichtigkeit für die gewählte Strategie klassifiziert. Es können zwei Typen von Kennzahlen unterschieden werden: Market Winners und Market Qualifiers [vgl. Christopher/Towill (2000), S. 207]. Weder Market Winners noch Market Qualifiers dürfen für die Erreichung der Ziele der Supply Chain Strategie vernachlässigt werden. Market Winners sind jedoch besonders kritisch für den Erfolg der Strategie, weshalb ihnen bei der Bewertung von Alternativen ein höheres Gewicht zugemessen werden soll. Market Winners sind bei einer agilen Supply Chain Strategie Kennzahlen der Dimension Lieferzuverlässigkeit und bei einer schlanken Supply Chain Strategie Kennzahlen, welche Kosten beschreiben [vgl. Christopher/Towill (2000), S. 207].
3. Abschließend wird jedem Ziel auf Grundlage der Klassifizierung als Winner oder Qualifier ein Gewicht zugewiesen. Der Wert der Gewichte für Winner ist höher als jener für Qualifier. Die konkrete Wahl der Gewichte der Ziele basiert jedoch letztlich auf Werturteilen des Managements der Supply Chain.

Gewichte für Abweichungen

Die Gewichte für die Abweichungen dienen der Festlegung, ob eine negative beziehungsweise positive Abweichung des Wertes eines Zieles vom Zielwert für die Bewertung relevant ist. Bei gegebener Relevanz wird dem Gewicht der Wert eins, anderenfalls der Wert null zugewiesen. So erhält beispielsweise für Ziele der Dimension Kosten das Gewicht für positive Abweichungen den Wert eins und das Gewicht für negative Abweichungen den Wert null. Für das Ziel Liefertreue hingegen beträgt zweckmäßigerweise der Wert des Gewichts für positive Abweichungen null und der Wert des Gewichts für negative Abweichungen eins. Für das Ziel Auslastung können beide Gewichte den Wert eins annehmen, sofern ein Zielwert aus wirtschaftlichen Gründen möglichst nicht unter- und aus und prozesstechnischen Überlegungen möglichst nicht überschritten werden soll.

Modellintegration

Das Bewertungsmodell und das Vorgehensmodell zur Analyse aus Kapitel 2.1.4 lässt sich zu einem Gesamtmodell, wie in Abbildung 4 illustriert, integrieren.

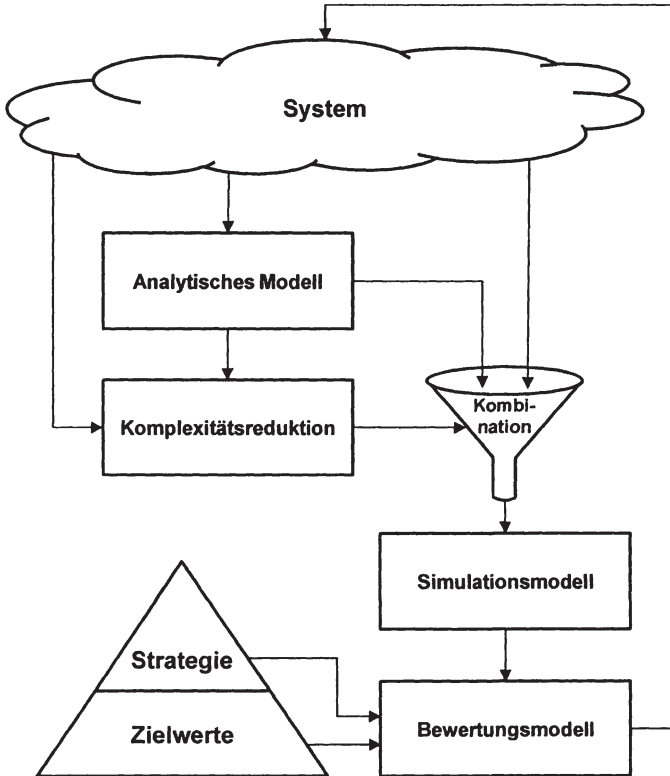


Abbildung 4: Integriertes Analyse- und Bewertungsmodell

Das Modell zur Bewertung von Supply Chain Designs benötigt als Input primär die Werte der Ziele für die betrachteten Alternativen sowie Informationen zur Strategie der Supply Chain und Vorgaben für die Zielwerte. Das im Kapitel 2.1.4 beschriebene Modell zur Analyse ermöglicht für komplexe Systeme, wie sie regelmäßig im Rahmen des Supply Chain Managements anzutreffen sind, die Bestimmung der Werte der Ziele.

Im Kapitel 3 dieser Arbeit wird im Rahmen einer Fallstudie das integrierte Gesamtmodell zur Analyse und Bewertung von Supply Chain Prozessen auf seine Anwendbarkeit getestet.

2.3 Marktbezogene Produktionstypen

Nach der Beziehung der Produktion zum Absatzmarkt lassen sich verschiedene Produktionstypen unterscheiden. Die Wahl des marktbezogenen Produktionstyps bestimmt grundlegend die Performance der Supply Chain und ist ein wichtiger Erfolgsfaktor bei der Verbesserung von Supply Chain Prozessen. Es werden im Folgenden Grundformen marktbezogener Produktionstypen dargestellt, um dann die Sonderform Make-to-Forecast zu erörtern, welche in der Fallstudie, im Kapitel 3 dieser Arbeit, Anwendung findet. Das Konzept Make-to-Forecast wird dabei im unternehmensübergreifenden Kontext behandelt.

2.3.1 Grundformen

Der marktbezogene Produktionstyp wird durch den Kundenauftragsentkoppelungspunkt bestimmt, welcher sich folgendermaßen definiert: „The point at which real demand penetrates upstream in a supply chain may be termed the decoupling point and is the echelon at which market pull meets upstream push“ [Christopher/Towill (2000), S. 209]. Die Festlegung des Kundenauftragsentkoppelungspunkts bestimmt, welche Prozessschritte durch Prognosen und welche durch konkrete Kundenaufträge getrieben werden. An der Grenze zwischen prognose- und auftragsgetriebenen Prozessschritten kann durch Anlegung von Beständen die anonyme Vorfertigung von den Kundenaufträgen entkoppelt werden. Die Festlegung des Entkoppelungspunkts ist eine strategisch-taktische Entscheidung, welche primär vom Zielkonflikt zwischen niedrigen Lagerhaltungskosten und geringen Kosten durch verlorene Kunden bestimmt wird. Eine prognosegetriebene Leistungserstellung bedingt tendenziell umfangreichere Bestände, jedoch auch eine höhere Reaktionsfähigkeit, als eine auftragsgetriebene Leistungserstellung. Durch eine zielgerichtete Wahl der Lage des Entkoppelungspunkts lässt sich die Performance der Leistungserstellungsprozesse entscheidend verbessern, wie etwa Jammernegg und Reiner am Beispiel einer Supply Chain der Telekommunikations- und Automobilbranche zeigen [vgl. Jammernegg/Reiner (2007), S. 185ff.]. Anhand der Positionierung des Entkoppelungspunkts lassen sich im Allgemeinen folgende Prozesstypen unterscheiden [vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 100f.]:

- Make-to-Order bedeutet, dass Produkte gefertigt werden, sobald ein Kundenauftrag vorliegt.
- Bei Make-to-Stock werden Produkte anhand der Prognose zukünftiger Bedarfe gefertigt und auf Lager gelegt. Bei Auftragseingang wird die Nachfrage vom Lager bedient.
- Eine Zwischenform ist Assemble-to-Order, wo der erste Teil einer Prozesskette prognosegetrieben und der zweite Teil auftragsgetrieben ausgeführt wird. Der Entkoppelungspunkt liegt an der Grenze zwischen den beiden Teilen der Prozesskette.

2.3.2 Hybridform Make-to-Forecast

Bei den Produktionstypen Make-to-Order und Make-to-Stock findet keine kombinierte Anwendung von auftrags- und prognosegetriebener Leistungserstellung statt. Die Hybridform Assemble-to-Order umfasst hingegen sowohl auftrags- als auch prognosegetriebene Prozesse. Durch die Wahl des Entkoppelungspunkts kann dem Trade-Off zwischen niedrigen Beständen und einer hohen Liefertreue begegnet werden. So lässt sich bei Assemble-to-Order die Bestandshöhe beziehungsweise der Lieferservicegrad bedarfsgerecht skalieren. Eine weitere Hybridform, mit welcher eine derartige Skalierung ermöglicht wird, ist der Produktionstyp Make-to-Forecast.

Das Konzept Make-to-Forecast geht auf Raturi et al. zurück und basiert auf einer dynamischen Festlegung des Entkoppelungspunktes [vgl. Raturi et al. (1990), S. 230ff.]. Es gelten bei Make-to-Forecast folgende Überlegungen: „A company (...) must (...) anticipate customer specifications as best they can and start building these large units as though they were using MTS, thereby creating a pipeline of semi-finished units. As orders arrive, they are then matched to the existing units somewhere in the production pipeline, so as to minimize the costs of modification (often substantial) for previously installed but incorrect components, as well as the potential costs of orphans and rejected orders. The units are then finished off as per the customer order in the manner of MTO“ [Meredith/Akinc (2007), S. 625]⁵. Es werden demnach Prozessschritte in ihrer Sequenz so lange prognosegetrieben ausgeführt, bis ein entsprechender Kundenauftrag eingeht. Ab diesem Zeitpunkt sind die verbleibenden Prozessschritte der Sequenz auftragsgetrieben. Der Prognosefehler bestimmt, ob eine zusätzliche Menge auftragsbezogen produziert wer-

⁵ MTS: Make-to-Stock; MTO: Make-to-Order

den muss oder eine Teilmenge am Ende im Lager verbleibt und für zukünftige Aufträge zur Verfügung steht.

Abgrenzung zu anderen marktbezogenen Produktionstypen

Sowohl Assemble-to-Order als auch Make-to-Forecast sind Hybridformen von Make-to-Order und Make-to-Stock. Make-to-Forecast unterscheidet sich jedoch grundlegend, da hier der Kundenauftragsentkoppelungspunkt nicht statisch, sondern dynamisch bestimmt wird. Im Fall von Assemble-to-Order wird ein Fertigstellungsgrad des Erzeugnisses definiert, welcher die prognosegetriebene Leistungserstellung beendet. Bei Make-to-Forecast wird hingegen ab dem Zeitpunkt des Eingangs des zuvor prognostizierten Kundenauftrags zur auftragsbezogenen Leistungserstellung gewechselt. In Abbildung 5 wird dieser Unterschied illustriert.

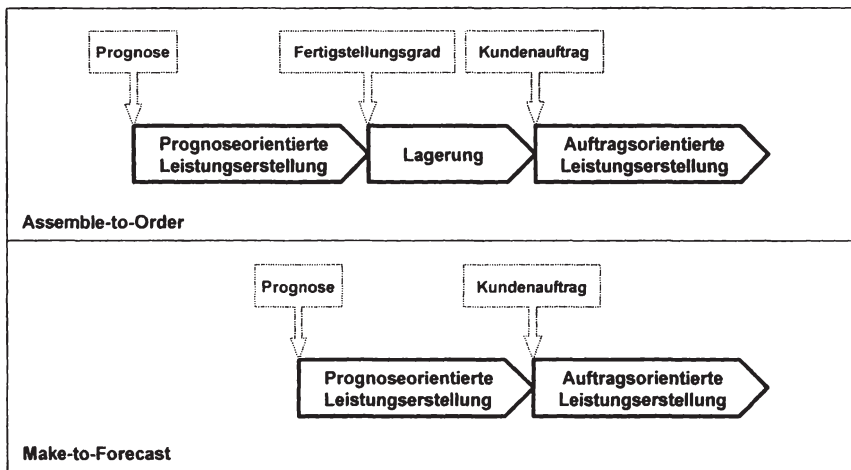


Abbildung 5: Hybride marktbezogene Produktionstypen

Das Konzept Make-to-Forecast differenziert sich insbesondere durch folgende Merkmale von anderen Produktionstypen:

- Es wird tendenziell eine kürzere Kundenauftragsdurchlaufzeit erzielt als bei Make-to-Order.

- Im Gegensatz zu Make-to-Stock und Assemble-to-Order ist das Konzept auch anwendbar, wenn die Lagerungsfähigkeit des Produktes oder die verfügbare Lagerfläche stark beschränkt ist.
- Bei Assemble-to-Order werden standardisierter Halbfertigprodukte auf Lager produziert und nach Eingang eines Kundenauftrags zu verschiedenen Varianten endgefertigt. Wenn die Arbeitspläne der Produkte keine hinlänglichen Gemeinsamkeiten aufweisen, ist dies jedoch nicht möglich. Für die Anwendung von Make-to-Forecast besteht diese Beschränkung nicht.

Integration in der Supply Chain

Eine erfolgreiche Anwendung des Konzepts Make-to-Forecast bedarf akkurater Prognosen der Kundennachfrage. Der Einfluss des Prognoserisikos ist aus Abbildung 6 ersichtlich.

Es ist erkennbar, dass das Verhältnis zwischen prognoseorientierter und auftragsorientierter Leistungserstellung durch die Qualität der Prognose bestimmt wird. Zudem beeinflusst die Prognosequalität den Fertigstellungszeitpunkt des Produktionsauftrags. Wird der Bedarf durch die Prognose überschätzt, so ist der Anteil der prognoseorientierten Leistungserstellung groß. Produktionsaufträge werden in diesem Fall zu früh fertiggestellt und die Bestände steigen. Das Unterschätzen des Bedarfs durch die Prognose erhöht den Anteil der auftragsgetriebenen Produktion und führt zu einer verspäteten Fertigstellung, was sich negativ auf die Kundenzufriedenheit auswirkt. Bei einer akkuraten Prognose wird hingegen das angestrebte Verhältnis zwischen einer prognoseorientierten und auftragsorientierten Leistungserstellung erreicht und der Kundenauftrag termingerecht erfüllt. Wie im unteren Teil der Abbildung 6 dargestellt, kann dies durch unternehmensübergreifende Maßnahmen erreicht werden. Durch den Aufbau und die Nutzung eines unternehmensübergreifenden Informationsflusses zwischen Kunden und Lieferanten kann die erforderliche Prognosequalität für die Umsetzung von Make-to-Forecast sichergestellt werden. Insbesondere ermöglicht die Implementierung des Konzepts Vendor Managed Inventory den notwendigen Informationsaustausch. Dabei wird dem Lieferanten die Verantwortung zum Management der Bestände im Eingangslager seines Kunden übertragen und ein Zugriff auf die Lagerbestands- und Nachfragedaten des Kunden ermöglicht [vgl. Cachon/Terwisch (2006), S. 348ff.].

Darüber hinaus ist der Anteil zwischen prognoseorientierter und auftragsorientierter Leistungserstellung, sowie der Fertigstellungszeitpunkt der Produktionsaufträge durch die Wahl der Länge des Prognosehorizonts skalierbar, welcher bestimmt, wie lange vor dem Eingang des Kundenauftrags mit der prognoseorientierten Leistungserstellung begonnen werden kann. Eine Verlängerung des Prognosehorizonts erlaubt einen früheren Start und damit eine Ausweitung der prognoseorien-

tierten Leistungserstellung. Dabei sind auch Effekte durch eine tendenzielle Zunahme des Prognoserisikos bei einem ausgedehnten Prognosehorizont zu berücksichtigen. Ein höherer Anteil prognoseorientierter Produktion eröffnet zudem Möglichkeiten zum Pooling von Produktionsaufträgen mit gleichen Produkten, um Rüstvorgänge zu reduzieren. Beim Pooling von Produktionsaufträgen muss insbesondere ein Ausgleich zwischen der Verringerung des Rüstaufwands und der Verzögerung von Produktionsaufträgen erfolgen.

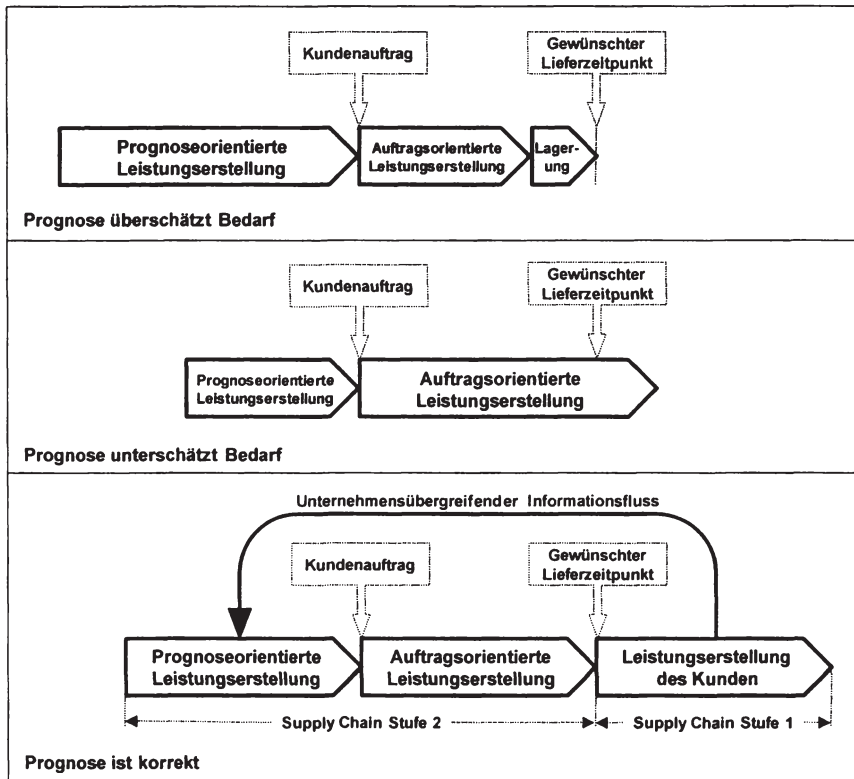


Abbildung 6: Einfluss der Prognosequalität bei Make-to-Forecast

Im Kapitel 3 wird in einer Fallstudie das Potenzial von Make-to-Forecast auf eine reale Supply Chain angewandt. Als wichtige Entscheidungsgrößen sind dabei, unter Berücksichtigung des Prognoserisikos, der Prognosehorizont und der Grad des Poolings von Produktionsaufträgen festzulegen.

3 Fallstudie

Die Fallstudie hat die Verbesserung von Leistungserstellungsprozessen einer realen Supply Chain in der Elektronikindustrie zum Inhalt. Im Rahmen der Fallstudie werden die im Kapitel 2 entwickelten Modelle zur Analyse und Bewertung komplexer Supply Chain Systeme weiter detailliert und es wird deren Anwendbarkeit geprüft. Nach einer Formulierung der Problemstellung wird die Vorgehensweise festgelegt. Diese umfasst folgende Schritte: Erstellung eines Lösungskonzeptes, Erstellung und Anwendung eines analytischen Modells, Reduktion der Komplexität, Erstellung und Anwendung eines Simulationsmodells, Bewertung der Ergebnisse sowie Interpretation der Ergebnisse. Die Ergebnisinterpretation widmet sich, neben der Darstellung fallbezogener Resultate, der Ableitung allgemeingültiger Erkenntnisse aus der Fallstudie.

3.1 Problemformulierung

Im Folgenden werden der Untersuchungsgegenstand und die Problemstellung der Fallstudie erörtert.

3.1.1 Untersuchungsgegenstand

Die Fallstudie beschäftigt sich mit den Geschäftsprozessen einer Supply Chain in der Elektronikindustrie. Im Mittelpunkt stehen dabei die Leistungserstellungsprozesse eines First Tier Lieferanten, welcher Leiterplatten produziert. Gespräche mit Prozessverantwortlichen des First Tier Lieferanten ließen klar werden, dass nachhaltige Verbesserungen der Leistungserstellungsprozesse nur zu erzielen sind, wenn unternehmensinterne und unternehmensübergreifende Aspekte Berücksichtigung finden. Bei den Kunden des First Tier Lieferanten handelt es sich größtenteils um Original Equipment Produzenten, welche Leiterplatten für die Fertigung elektronischer Geräte beziehen. Die Möglichkeiten beim Design der Leistungserstellungsprozesse des First Tier Lieferanten sind in einem hohen Maße von den Anforderungen seiner Kunden bestimmt. Dies ist primär durch das Erfordernis einer agilen Supply Chain begründet. Ausgeprägten Nachfrageschwankungen stehen gehobene Ansprüche der Kunden bezüglich des Lieferservice gegenüber. Im Gegensatz dazu bieten die Beziehungen zu den Lieferanten des First Tier Lieferanten geringes Potenzial für Prozessverbesserungen. Dies begründet sich einerseits durch wenig risikobehaftete Beschaffungsprozesse, welche zudem bereits

weitgehend optimiert sind. Andererseits ist der Wert der Rohmaterialien, im Verhältnis zum Wert des Endproduktes, relativ gering, weshalb kein dringlicher Bedarf für eine Optimierung besteht.

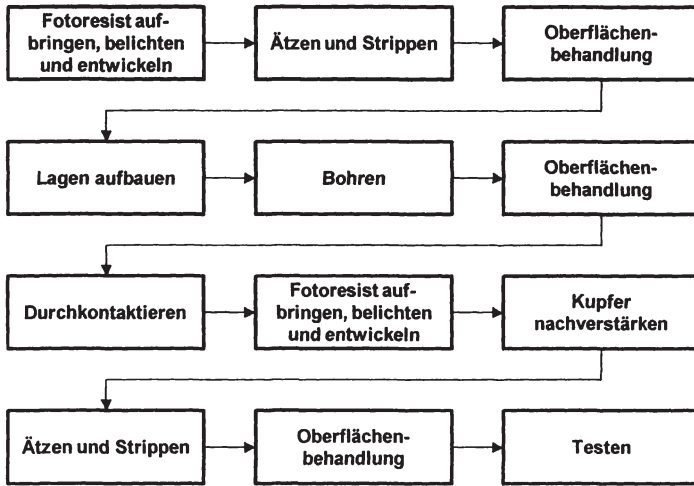


Abbildung 7: Produktionsprozess

Der First Tier Lieferant nimmt die zentrale Stellung in der Fallstudie ein. Es handelt sich bei diesem Unternehmen um einen Hersteller von Leiterplatten. Leiterplatten dienen dem Anordnen und Verbinden von Bauteilen für elektronische Schaltungen, wobei die aufgedruckten Leiterbahnen die Verwendung von Kabeln ersetzen. Die Leiterplatten des betrachteten Unternehmens finden hauptsächlich im Telekommunikationssektor Anwendung. Weitere wichtige Einsatzbereiche sind Automobile sowie industrielle und medizinische Geräte. Die beiden Hauptkunden des First Tier Lieferanten benötigen die Leiterplatten zur Produktion von Mobiltelefonen. Der Produktionsprozess des First-Tier-Lieferanten ist durch eine Vielzahl an Stufen gekennzeichnet, welche teilweise repetitiv ausgeführt werden. Die Fertigung umfasste dabei chemische und mechanische Prozessschritte. Abbildung 7 gibt einen vereinfachten Überblick zu den Schritten der Fertigung, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit die Produktionsstufen aggregiert dargestellt und individuelle Abweichungen einzelner Produkte nicht berücksichtigt werden.

3.1.2 Problemstellung

Generelles Ziel ist die Steigerung der Performance durch ein verbessertes Design der Leistungserstellungsprozesse. Hierbei wird ein dezentraler Ansatz verfolgt. Ein Supply Chain Partner optimiert seine Prozesse, wobei er die Wechselwirkungen zwischen den eigenen Prozessen und den Prozessen seiner Partner in der Supply Chain berücksichtigt. Verursacht das veränderte Design negative Auswirkungen auf anderen Stufen der Supply Chain, wird dieses nur dann umgesetzt, wenn ein Ausgleich mit den betroffenen Supply Chain Partnern erzielt wird. In der gegenständlichen Fallstudie werden die Bestrebungen zur Verbesserung der Prozesse dezentral vom First Tier Lieferanten getrieben. Eine Analyse seiner Situation zeigt, dass einer sehr guten Leistungsfähigkeit auch Potenzial für Verbesserungen gegenübersteht.

Der First Tier Lieferant kann in seiner jüngsten Vergangenheit auf eine steigende Nachfrage verweisen, und Analysten gehen für die nächsten Jahre von einem zweistelligen Umsatzwachstum aus. Dem wurde durch eine erhebliche Expansion der Kapazitäten Rechnung getragen. Auch technologisch versucht das Unternehmen seine Marktstellung weiter zu festigen. So ist es bereits seit Längerem in der Lage, passive Komponenten (z. B. Widerstände) in seine Leiterplatten einzubetten. Dadurch können die Größe und das Gewicht der bestückten Leiterplatten verringert werden. Zudem steht mehr Platz für andere Komponenten auf der Leiterplatte zur Verfügung. Es ist davon auszugehen, dass das Unternehmen in naher Zukunft auch die Integration aktiver Komponenten (z. B. Dioden) für seine Produkte anbieten kann. Mit seinen technologischen Möglichkeiten ist das Unternehmen für die Zukunft sehr gut gerüstet.

Diesen positiven Entwicklungen steht eine Reihe von Herausforderungen gegenüber. In Gesprächen mit Mitarbeitern des First Tier Lieferanten wurden nachfolgende Problempunkte herausgearbeitet. Die Gesprächspartner umfassten Prozessverantwortliche aus den Bereichen Logistik, Einkauf, Fertigung und Controlling.

- Das Unternehmen weist historisch gewachsene Strukturen eines mittelständischen Unternehmens auf. Durch die bereits vollzogene und weiter voranschreitende Expansion ist davon auszugehen, dass das Design der Supply Chain Verbesserungspotenzial birgt.
- Die produzierten Leiterplatten finden zu einem großen Teil in Produkten der Telekommunikationsindustrie Anwendung. Diese Industrie ist generell durch eine hohe Schwankung der Nachfrage gekennzeichnet. Einerseits folgt der Absatz der Original Equipment Produzenten saisonalen Schwankungen, andererseits bestimmen kurzfristige Trends die Nachfrage der Konsumenten nach bestimmten Produkten. Dies bedingt wiederum eine volatile Nachfrage nach Leiterplatten beim First Tier Lieferanten.

- Der rasche technologische Fortschritt in der Telekommunikationsindustrie hat einen kurzen Produktlebenszyklus zur Folge. Im Falle des Mobiltelefons ist der Lebenszyklus einer Leiterplatte in der Regel überdies kürzer, als jener des Endgerätes. Geringfügige technische Verbesserungen, welche dem Endkunden oftmals verborgen bleiben, erfordern Adaptierungen der Leiterplatten. Der technische Aufwand für derartige Anpassungen ist zumeist begrenzt, für die Bestandpolitik sind die sogenannten Revisionsänderungen jedoch sehr bedeutsam. Denn das Risiko von Änderungen der Konstruktion, selbst im geringen Umfang, beschränkt die Möglichkeiten zum Halten von Beständen gefertigter Komponenten oder Produkte.
- Das betrachtete Unternehmen erzeugt ein- und mehrlagige Leiterplatten und konzentriert sich auf die Anwendung der High Density Interconnection und Microvia Technologie. High Density Interconnection bedeutet, dass die Leiterplatten eine sehr hohe Packungsdichte aufweisen, womit eine Miniaturisierung der Schaltungen ermöglicht wird. Dies wird durch eine hohe Anzahl von Verbindungen in Form von Microvias erreicht. Microvias sind Sacklöcher mit einem Durchmesser unter 0,1 mm, welche auf einer der Kupferlagen der mehrlagigen Leiterplatte enden. Diese Microvias werden in der Laserbohrtechnik gefertigt, was eine technische Herausforderung darstellt. Auch eine Vielzahl weitere Produktionsschritte ist hoch spezialisiert und automatisiert. Die technische Komplexität der Anlagen führt zu ungeplanten Stillständen der Anlagen. Bedingt durch das Design der Fertigung als Linienlayout, hat der Ausfall eines Betriebsmittels weitgehende Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Produktionsstufen und somit weitreichende Folgen für die gesamte Fertigung.
- Für das Enterprise Resource Planning ist die Software SAP R/3 im Einsatz, welche zufriedenstellend die Geschäftsprozesse auf der operativen Ebene unterstützt und dabei sämtliche Unternehmensstandorte integriert. Außerdem wird gegenwärtig als Advanced Planning and Scheduling System die Software SAP Advanced Planner and Optimizer implementiert. Bedingt durch die Mächtigkeit des Systems treten einerseits technische Anlaufprobleme auf, weshalb die Generierung von akkuraten Kennzahlen und Prognosen derzeit nur eingeschränkt möglich ist. Andererseits wird durch die Benutzer die mangelnde Transparenz kritisiert. So ist für die Entscheidungsträger das konkrete Zustandekommen von Kennzahlen und Prognosen oftmals nicht nachvollziehbar, weshalb die Akzeptanz und somit die Anwendung der Ergebnisse des Advanced Planning and Scheduling Systems gering ist. Der Problematik mangelnder IT-Unterstützung auf der taktischen Ebene des Supply Chain Managements wird durch zwei Maßnahmen begegnet. Zum Ersten wird die Usability des Advanced Planner and Optimizers vorangetrieben. Zum Zweiten steht seit Kurzem ein Tool zur taktischen Produktions- und Distributionsplanung

zur Verfügung. Es handelt sich dabei um eine Eigenentwicklung, deren relative Einfachheit einen hohen Grad an Transparenz und Akzeptanz schafft.

- Es wird von Prozessverantwortlichen vermutet, dass die Produktionssteuerung Raum zur Optimierung aufweist. Insbesondere ist anzunehmen, dass eine Verbesserung der Regeln für die Einlastung der Fertigungsaufträge zu einer Steigerung der Performance führen kann. Zurzeit werden Kundenaufträge zu einem großen Teil in der Reihenfolge ihres Eintreffens in die Fertigung als Produktionsauftrag eingelastet. Sofern steuernd eingegriffen wird, erfolgt die Sequenzierung anhand der Beurteilung der Situation durch die Fertigungsleitung. Trotz erfahrener Mitarbeiter birgt dies die Gefahr, dass Entscheidungen subjektiv und unter unvollständigen Informationen getroffen werden.
- In der Elektronikbranche, speziell im Segment des Mobilfunks, ist grundsätzlich die Reaktionsfähigkeit einer Supply Chain gefordert. Gespräche mit Führungskräften des First Tier Lieferanten bestätigen, dass dies auch für die Supply Chain ihres Unternehmens zutrifft. Es stellt insbesondere die Erreichung eines hohen Lieferservicegrades ein vorrangiges Ziel dar. Doch gerade relativ lange Kundenauftragsdurchlaufzeiten des First Tier Lieferanten erhöhen die Eintrittswahrscheinlichkeit von Prozessstörungen, wie etwa dem Ausfall einer Produktionsanlage, und führen zur verspäteten Erfüllung von Kundenaufträgen. Generell werden Lieferservicegrade erreicht, welche unter einem gewünschten Niveau liegen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anforderungen an die gegenständliche Supply Chain in einem hohen Ausmaß durch das Vorhandensein von Variabilität determiniert werden. Diese Variabilität hat sowohl externe als auch interne Ursachen. Als externe Ursachen sind eine stark schwankende Nachfrage und kurze Produktlebenszyklen zu nennen. Die internen Ursachen sind primär Produktionsstörungen als Resultat der komplexen Fertigungstechnologie und der engen Kopplung der Fertigungsstufen. Demnach hat die Berücksichtigung der Variabilität beim Supply Chain Design einen hohen Stellenwert. Zudem ist die interne Supply Chain historisch gewachsen, weshalb deren Design grundlegend überdacht werden muss. Dabei sind einerseits etablierte Vorgehensweisen zu deren Steuerung, wie zum Beispiel die Regeln zur Einlastung der Produktionsaufträge in die Fertigung, in Frage zu stellen. Andererseits müssen veränderte Rahmenbedingungen bedacht werden. So bieten weiter entwickelte IT-Systeme neue Möglichkeiten, wie zum Beispiel die Generierung verbesserter Nachfrageprognosen, welche durch ein entsprechendes Design der Supply Chain genutzt werden können. Verbesserungsmaßnahmen müssen jedenfalls auf die spezifische Situation der gegenständlichen Supply Chain bedacht nehmen. Es sind vor allem die Anforderungen in der Telekommunikationsindustrie, welche einen hohen Grad an Agilität von der Supply Chain fordern. Somit ist eine hohe Lieferzuverlässigkeit

für den First Tier Lieferanten ein wichtiger Wettbewerbsfaktor und soll durch Verbesserungsmaßnahmen angestrebt werden.

Die Fallstudie sucht, unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen, nach Möglichkeiten zur Steigerung der Performance der gegenständlichen Supply Chain durch ein verbessertes Design der Leistungserstellungsprozesse.

3.2 Vorgehensweise

Es werden eingangs wichtige Anforderungen zur Lösung der Problemstellung erhoben. Darauf basierend werden Möglichkeiten diskutiert, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Anschließend wird eine konkrete Vorgehensweise festgelegt.

3.2.1 Anforderungen

Die Methodik der Fallstudie ist quantitativ und modellorientiert. Dies ergibt sich aus der Fragestellung, welche durch Modellierung des Systems zum Zwecke der Ermittlung quantitativer Leistungsindikatoren beantwortet werden kann. Jedes soziale System, wie eine Supply Chain, hat auch eine wichtige qualitative Dimension, welche jedoch außerhalb des Forschungsinteresses der vorliegenden Arbeit liegt. Im Rahmen dieser methodischen Ausrichtung muss eine konkrete Vorgehensweise festgelegt werden, welche den Charakteristiken des betrachteten Systems gerecht wird.

Eine besonders berücksichtigungswürdige Eigenheit des Systems ist der hohe Grad an Komplexität, welcher sich durch eine große Zahl an Prozesselementen und umfangreiche Variabilität der Prozesse äußert. Es werden 4642 Kundenaufträge in der Betrachtungsperiode von sechs Monaten durch den First Tier Lieferanten bearbeitet. Das Produktionsprogramm umfasst dabei 407 verschiedene Produkte, welche aus 817 unterschiedlichen Komponenten bestehen. In den Arbeitsplänen der Produkte und Komponenten sind insgesamt 23979 Prozessschritte definiert, welche auf 325 Betriebsmitteln ausgeführt werden. Die Abbildung der Leistungserstellungsprozesse erfordert daher ein Modell, welches eine große Anzahl an Parametern umfasst. Die Prozesse der betrachteten Supply Chain sind ausgeprägt durch Variabilität gekennzeichnet. Für die Performance der Leistungserstellungsprozesse sind insbesondere Nachfragerisiken und operative Risiken bestimmend, welche Variabilität im Leistungserstellungsprozess bewirken. Zur Abbildung von Risiken werden die entsprechenden Größen im Modell mit stochastischen Variablen beschrieben.

Die Komplexität des vorliegenden Systems rechtfertigt als Methode den Einsatz von Simulation. Die Erstellung eines Simulationsmodells ist grundsätzlich für die Analyse komplexer Systeme prädestiniert, jedoch wird die Modellbildung und -anwendung mit steigender Komplexität zunehmend erschwert. Einerseits muss der Aufwand zur Erstellung eines Simulationsmodells im Verhältnis zu dessen Nutzen stehen, andererseits müssen technische Beschränkungen der zur Verfügung stehenden Soft- und Hardware berücksichtigt werden. Deshalb ist die Reduktion der Komplexität ein vordringliches Ziel und eine essenzielle Anforderung für eine geeignete Vorgehensweise zur Lösung der Problemstellung.

3.2.2 Prüfung potenzieller Vorgehensweisen

Im Folgenden werden unterschiedliche Vorgehensweisen zur Reduktion der Komplexität geprüft, welche auf die in Tabelle 5 dargestellten Dimensionen abzielen.

Dimension	Grad der Komplexität
Kundenaufträge	4642 Aufträge in sechs Monaten
Fertigungsprogramm	407 Produkte mit 817 unterschiedlichen Komponenten
Arbeitspläne	23979 unterschiedliche Prozessschritte
Ressourcen	325 Betriebsmittel

Tabelle 5: Komplexitätsumfang

Reduktion der Kundenaufträge

Es ist generell möglich, anhand des Kapazitätsbedarfs in Großaufträge und Kleinaufträge zu differenzieren, um dann nur die erste Gruppe im Modell abzubilden. Diese Vorgehensweise geht davon aus, dass der Kapazitätsbedarf hauptsächlich einer relativ geringen Anzahl an Großaufträgen zugeordnet werden kann, welche primär die Performance des Prozesses bestimmen. In diesem Fall müssen die Kapazitäten der Betriebsmittel um den Kapazitätsbedarf, welcher zur Bearbeitung der Kleinaufträge notwendig ist, verringert werden. Diese Verringerung kann jedoch den dynamischen Verlauf des Kapazitätsbedarfs nicht berücksichtigen. Zu dessen Bestimmung wäre ein stochastisches Modell notwendig, das sämtliche Kundenaufträge umfasst. Die Anpassung muss daher vereinfachend von einer konstanten Belastung der Ressourcen durch Kleinaufträge ausgehen. Diese Ver-

einfachung ist jedoch kritisch, da auch kleine Auftragsvolumina erheblich zu einer Störung des Systems beitragen können. Es ist sogar davon auszugehen, dass die Abwicklung von Kleinaufträgen wegen des relativ hohen Rüstaufwands tendenziell in einem höheren Ausmaß für Variabilitätseffekte verantwortlich ist, als dies Großaufträge sind. Da gerade diese Effekte bei der Analyse von großem Interesse sind, wird in der Fallstudie auf diese Möglichkeit zur Reduktion der Komplexität verzichtet.

Reduktion der Produkte und Komponenten

Eine Reduktion der Vielfalt an Produkten und Komponenten kann durch Aggregation zu Produkten beziehungsweise Komponenten mit repräsentativen Arbeitsplänen erreicht werden [vgl. Piplani/Puah (2004), S. 620]. Diese Vorgehensweise geht davon aus, dass geringfügige Unterscheidungen in den Arbeitsplänen zugunsten der Komplexitätsreduktion vernachlässigt werden können. Eine Veränderung der Sequenz oder der Rüst- und Bearbeitungszeiten der Prozessschritte darf keinen erheblichen Einfluss auf das Prozessverhalten haben. Eine Veränderung der Sequenz der Arbeitsschritte sollte im Grunde abgelehnt werden, da die dynamischen Auswirkungen kaum abschätzbar sind. Bei der Anpassung der Rüst- und Bearbeitungszeiten muss eine Abwägung zwischen der erzielten Komplexitätsreduktion und der Qualität der Ergebnisse angestellt werden. In der Fallstudie finden sich keine Arbeitspläne mit identischen Sequenzen der Prozessschritte, weshalb diese Möglichkeit zur Komplexitätsreduktion nicht angewandt wird.

Reduktion der Prozessschritte

Ist das System als Netzwerk modelliert, so kann die Anzahl der Prozessschritte zum Zweck der Komplexitätsreduktion prinzipiell auf zwei Arten reduziert werden. Einerseits kann ein Prozessschritt gänzlich weggelassen werden, wenn sowohl die Performance des Prozessschritts keine interessierende Größe darstellt als auch der Prozessschritt keinen erheblichen Einfluss auf die Performance anderer Prozessschritte hat. Andererseits können Prozessschritte zu einem Prozessschritt aggregiert werden, wenn für jede Sequenz der Arbeitspläne gilt, dass die Prozessschritte unmittelbar aufeinanderfolgen. Außerdem muss die Ressourcenzuordnung identisch sein, das heißt, die Prozessschritte benötigen die gleichen Ressourcen im gleichen Ausmaß. In der Fallstudie ist eine Reduktion der Komplexität durch Weglassen von Prozessschritten nicht möglich, da keiner der Prozessschritte durch eine marginale Dauer gekennzeichnet ist. Die Sequenzen der Arbeitspläne erlauben auch kein Zusammenfassen von Prozessschritten.

Reduktion der Ressourcen

Die Komplexität des Modells wird wesentlich durch die Anzahl der Ressourcen bestimmt, denn jede Ressource muss durch mehrere deterministische beziehungsweise stochastische Variablen beschrieben werden. Es bestehen generell zwei Möglichkeiten zur Komplexitätsreduktion. So können Ressourcen gegebenenfalls zu einer größeren Einheit aggregiert werden [vgl. Brooks/Tobias (2000), S. 1012ff.]. Eine solche Aggregation, etwa zu einem Workcenter, ist jedenfalls möglich, wenn es sich um eine Gruppe gleichartiger Ressourcen handelt, die für einen Prozessschritt stets alternativ zur Verfügung stehen. Durch die Aggregation wird jedoch auf die Berücksichtigung individueller Verfügbarkeiten und Belegungen einzelner Ressourcen verzichtet. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Komplexität verzichtet auf die Abbildung eines Teils der Ressourcen [vgl. Hung/Leachman (1999), S. 2691ff.; Piplani/Puah (2004), S. 620ff.]. Das Modell umfasst dann Prozessschritte, welchen Ressourcen zugeordnet sind, und Prozessschritte, denen keinen Ressourcen zugeordnet sind. Ressourcen werden generell aus zwei Motiven modelliert, nämlich wenn der Ablauf eines Prozesses durch die Ressourcenausstattung bestimmt wird und wenn ressourcenbezogene Kennzahlen von Interesse sind. Tendenziell steigt die Notwendigkeit zur Modellierung von Ressourcen, desto kritischer die Prozessschritte sind, denen diese Ressourcen zugeordnet werden. Die Problemstellung der Fallstudie erlaubt generell die Beschreibung der zwei genannten Wege zur Komplexitätsreduktion, weshalb diese Möglichkeiten weiter verfolgt werden.

Eine Reduktion der Komplexität der betrachteten Supply Chain kann in folgender Weise durch Aggregation und Eliminierung von Ressourcen erreicht werden:

- Zur Aggregation von Ressourcen werden Gruppen von Betriebsmitteln gebildet, welche zwei Kriterien entsprechen. Einerseits wird geprüft, ob für jeden Prozessschritt gilt, dass jedes Betriebsmittel der zugeordneten Betriebsmittel alternativ zur Verfügung steht. Hierzu müssen die Arbeitsabläufe und Ressourcenzuordnungen der Fertigung analysiert werden. Andererseits wird sichergestellt, dass die Betriebsmittel einer Gruppe ein gefordertes Maß an Homogenität bezüglich der Verfügbarkeit und technischen Leistungsfähigkeit erfüllen. Im Ergebnis können 325 Betriebsmittel zu 65 Workcentern aggregiert werden.
- Zur weiteren Reduktion der Komplexität des Modells wird eine Eliminierung eines Teils der 65 Workcenter angestrebt. Im Rahmen der Fallstudie wird dazu das Modell zur Analyse komplexer Supply Chains angewandt, welches im Kapitel 2.1.4 beschrieben ist. Grundidee ist dabei, dass durch ein verhältnismäßig einfaches analytisches Modell die Grundlagen geschaffen werden, um den Aufwand für die Erstellung des komplexeren Simulationsmodells gering zu halten.

Die Entscheidung zur Anwendung des Modells zur Analyse komplexer Supply Chains aus Kapitel 2.1.4 bestimmt entscheidend die Vorgehensweise der Fallstudie. Zudem ist für die Problemstellung jedenfalls eine multikriterielle Bewertung, welche Zielkonflikte sowie Risiken und die Strategie der Supply Chain berücksichtigt, zweckmäßig. Daher findet das im Kapitel 2.2.4 behandelte Modell zur Bewertung komplexer Supply Chains Anwendung.

3.2.3 Festlegung der Vorgehensweise

Anhand der genannten Überlegungen ist eine konkrete Vorgehensweise festzulegen, welche nun vorgestellt wird und sich in sechs Schritte gliedert.

Schritt 1 - Erstellung eines Lösungskonzepts

Auf Grundlage der Anforderungen der Problemstellung wird ein Lösungskonzept erarbeitet. Im Rahmen des Lösungskonzepts wird die reale Problemstellung in eine abstrakte Form übergeleitet, um die zur Verfügung stehenden Methoden anwenden zu können. Das Lösungskonzept definiert, welche Szenarien betrachtet werden. Anhand der betrachteten Szenarien wird dann festgelegt, welche Modellgrößen zur Beschreibung des Systems notwendig sind und mit welchen Kennzahlen der Modelloutput gemessen wird. Ziel dieses Schritts ist die Schaffung der Grundlagen für die Modellierung des Systems.

Schritt 2 - Erstellung und Anwendung eines analytischen Modells

Das System wird als Netzwerk von Warteschlangen modelliert und analysiert. Dies umfasst die Modellerstellung, die Verifizierung und Validierung des Modells, das Umsetzen eines experimentellen Designs und die Ergebnisanalyse. Ziel ist die Beschreibung der Supply Chain durch Kennzahlen, um zwei Anforderungen gerecht zu werden. Erstens bilden die Kennzahlen einen Input für den nachfolgenden Schritt der Komplexitätsreduktion. Zweitens werden sie für die Abbildung komplexitätsreduzierter Prozessschritte im Simulationsmodell verwendet.

Schritt 3 - Reduktion der Komplexität

Basierend auf den Ergebnissen des Warteschlangenmodells, sowie weiterer Daten, werden kritische Prozessschritte identifiziert. Prozessschritte werden hierzu mittels Clusteranalyse als kritisch und nicht-kritisch klassifiziert. Das Ergebnis der

Klassifizierung erlaubt dann für jeden Prozessschritt eine Entscheidung, ob dieser im Simulationsmodell detailliert oder vereinfacht abgebildet wird.

Schritt 4 - Erstellung und Anwendung eines Simulationsmodells

Die Supply Chain wird als dynamisches, diskretes, ereignisorientiertes Simulationsmodell abgebildet und analysiert. Dies umfasst folgende Teilschritte: Modellerstellung, Verifizierung und Validierung, experimentelles Design sowie Ergebnisanalyse. Die Art der Modellierung der Prozessschritte folgt den Ergebnissen der Clusteranalyse. So werden kritische Prozessschritte detailliert abgebildet, das heißt, es werden Ressourcen zu deren Ausführung zugeordnet. Nicht kritische Prozessschritte werden hingegen vereinfacht, ohne Zuordnung von Ressourcen modelliert. Durch diese Vereinfachung ist das Simulieren von kapazitätsbedingtem Warten nicht möglich. Daher werden für nicht kritische Prozessschritte die Wartezeiten des Warteschlangenmodells herangezogen, welche in das Simulationsmodell als Konstante eingehen. Durch diese Vorgehensweise begegnet man dem Zielkonflikt zwischen der Forderung nach einer hohen Realitätsnähe und einem niedrigen Erstellungsaufwand für das Simulationsmodell. Im Rahmen von Simulationsexperimenten werden für alternative Supply Chain Designs Kennzahlen ermittelt, welche der nachfolgenden Bewertung zugeführt werden.

Schritt 5 - Bewertung der Alternativen

Auf Grundlage des Outputs des Simulationsmodells werden die betrachteten Alternativen zur Gestaltung der Supply Chain bewertet. Es handelt sich dabei um ein multikriterielles Entscheidungsproblem, welches Zielkonflikte berücksichtigt. Anhand der Ergebnisse des Simulationsmodells, der strategischen Zielsetzungen der Entscheidungsträger und definierter Zielwerte werden die Handlungsalternativen bewertet. Dies ist die Basis für die nachfolgende Interpretation der Ergebnisse.

Schritt 6 - Interpretation der Ergebnisse

Das Resultat der Ergebnisbewertung wird interpretiert, um dann konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Darüber hinaus werden fallunabhängige Erkenntnisse abgeleitet, welche im Rahmen der Fallstudie gewonnen wurden.

Zusammenfassend können folgende Eigenheiten der Vorgehensweise herausgestellt werden. Zur Analyse findet eine integrierte Anwendung von analytischen Methoden und Simulation statt, das heißt, die Supply Chain wird sowohl als War-

teschlangennetzwerk modelliert als auch als Simulationsmodell abgebildet. Diese Kombination der Methoden erlaubt eine Beherrschung des hohen Grades an Komplexität der Problemstellung. Die Bewertung der Ergebnisse ist als multikriterielles Problem gestaltet, da erst die Berücksichtigung einer Vielzahl an Kennzahlen die notwendige Aussagekraft garantiert. Neben den Ergebnissen der Simulationsexperimente werden dabei strategische Zielsetzungen sowie Zielwerte der Kennzahlen berücksichtigt.

3.3 Lösungskonzept

Im Folgenden wird ein Lösungskonzept erörtert, welches die zu untersuchenden Szenarien, die Modellgrößen, um die Szenarien abzubilden, und die Kennzahlen zur Bewertung der Szenarien beschreibt.

3.3.1 Szenarien

Ziel ist die Steigerung der Leistungsfähigkeit der gegenständlichen Supply Chain. Hierzu müssen Szenarien definiert werden, welche potenziell zur Verbesserung der Leistungserstellungsprozesse in der Lage sind. Im Fokus stehen die Supply Chain Prozesse des First Tier Lieferanten und die Schnittstellen zu seinen Kunden. Eingangs wird die Ist-Situation dargestellt, um anschließend systematisch Verbesserungsstrategien zu definieren, auf deren Grundlage dann Szenarien abgeleitet werden.

3.3.1.1 Darstellung der Ist-Situation

Es wird nun das gegenwärtige Design der Planungsprozesse des First Tier Lieferanten erörtert, wobei zwischen der strategisch-taktischen Ebene und der operativen Ebene unterschieden wird.

Planungsprozesse der strategisch-taktischen Ebene

Die Planungsaktivitäten des First Tier Lieferanten auf der strategisch-taktischen Ebene haben einen Horizont von 18 Monaten und die Erstellung von Budgets, die Planung der Beschaffung von Rohmaterialien sowie die Planung der Kapazitäten für jeden einzelnen Produktionsstandort zum Ziel. Diese Aktivitäten werden

grundsätzlich einmal pro Jahr ausgeführt und bilden die Grundlage für die Planung auf der operativen Ebene für die nächsten zwölf Monate. Bei der Planung auf der strategisch-taktischen Ebene ist insbesondere das Erfassen des technologischen Wandels von großer Bedeutung. Der wichtigste Input kommt dazu von der Abteilung Sales und Marketing, welche die Einschätzungen sämtlicher Key Account Manager und Account Manager sammelt.

Der First Tier Lieferant beschreitet seit Kurzem einen neuen Weg bei seiner Planung. Vormalig wurden die erwarteten Umsätze von der Abteilung Sales und Marketing auf Basis von Technologiegruppen erfasst. Die Gruppen waren anhand von zwei technischen Kriterien definiert, welche einen wichtigen Einfluss auf die Produktionszeiten haben. Das erste Kriterium betrifft die Oberfläche der Leiterplatte. Beim zweiten Kriterium handelt es sich um den Aufbau der Leiterplatte, wobei nach Art und Anzahl der Schichten der Leiterplatte differenziert wird. Für die Budget-, Beschaffungs- und Kapazitätsplanung wurden anschließend die Technologiegruppen zu einzelnen Produkten disaggregiert. Dies ist notwendig, da die relevanten Planungsinformationen als Stücklisten und Arbeitspläne vorliegen, welche pro Produkt definiert sind. Die Disaggregation erfolgte proportional zum gegenwärtigen Produktmix. Diese Vorgehensweise war nicht nur zeitaufwendig, sondern teilweise war auch die Qualität der Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Denn einerseits werden grundlegende technologische Änderungen nicht adäquat abgebildet und andererseits ergeben sich bei einer Planung auf Produktebene Probleme durch das niedrige Niveau der Aggregation. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, wurde daher der Planungsprozess der strategisch-taktischen Ebene neu konzipiert. Es wurde ein einheitlicher Aggregationsgrad auf sämtlichen Planungsstufen eingeführt, nämlich eine Planung anhand von Produktclustern. Zu diesem Zweck wurden anhand der Kriterien Oberfläche der Leiterplatte, Aufbau der Leiterplatte und Fertigungstechnologie elf Produktcluster mit ähnlichen Eigenschaften gebildet. Für jedes Cluster kann eine fiktive, repräsentative Stückliste und ein fiktiver, repräsentativer Arbeitsplan generiert werden. Somit liegen die erforderlichen Informationen vor, um die Budget-, Beschaffungs- und Kapazitätsplanung vornehmen zu können. Durch die gewählte Vorgehensweise wurde eine Verbesserung der strategisch-taktischen Planung erreicht. Insbesondere konnte die Prognosequalität durch das Wählen eines höheren Aggregationsgrades verbessert werden. Bedingt durch den Effekt des Risiko-Poolings sind aggregierte Forecasts in der Regel genauer, als individuelle Prognosen. Außerdem vermindert die Wahl eines über sämtliche Stufen des Planungsprozesses einheitlichen Aggregationsgrades den Aufwand und fördert die Planungsgenauigkeit.

Darüber hinaus wird der Planungsprozess durch maßgeschneiderte IT-Tools unterstützt und die Kommunikation zwischen den am Planungsprozess Beteiligten standardisiert und vereinfacht. Auf der überbetrieblichen Ebene werden Anstrengungen zur Verbesserung der Performance der gesamten Supply Chain unter-

nommen. Als Ergebnis sind Vendor Managed Inventories für Original Equipment Produzenten mit einem anteilmäßig großen Umsatzvolumen installiert. Der First Tier Lieferant übernimmt dabei die Verantwortung für die Bestände im Eingangslager seines Kunden und erhält Zugriff auf Lagerbestands- und Nachfragedaten des Original Equipment Produzenten.

Planungsprozesse der operativen Ebene

Für jeden Produktionsstandort stehen Daten bezüglich freier Kapazitäten und der möglichen Produktpalette zur Verfügung. Diese Daten werden regelmäßig elektronisch gesammelt und zentral verwaltet. Anhand dieser Daten werden die Allokationsentscheidungen zwischen den Produktionsstandorten des First Tier Lieferanten getroffen. Mit der überwiegenden Mehrzahl der Kunden werden Rahmenverträge geschlossen, wobei das konkrete Produkt, die Menge und ein Zeitrahmen für die Abnahme vereinbart werden. Innerhalb dieses Rahmens erfolgen dann kurzfristig Abrufe. Die Original Equipment Produzenten übermitteln wöchentlich ihre voraussichtlichen Bedarfe über eine elektronische Plattform an den First Tier Lieferanten. Dies ist die Grundlage für die kurzfristige Beschaffungs- und Kapazitätsplanung.

Erfolgt eine konkrete Bestellung durch den Kunden, so wird ein Liefertermin vereinbart und der Auftrag im Auftragsbuch eingereiht. Zurzeit werden sämtliche Produkte auftragsgetrieben produziert, das heißt die Produktion erfolgt ausschließlich aufgrund der eingegangenen Kundenaufträge. Die Abarbeitung der Aufträge gehorcht dann zum überwiegenden Teil dem Prinzip First In-First Out. Für die Fertigung stehen 325 Betriebsmittel zur Verfügung, welche zu Workcentern gruppiert sind. Die Durchlaufzeit eines Produktionsauftrags ist zu einem erheblichen Ausmaß durch kapazitätsbedingte Wartezeiten bestimmt. Die Auslastungssituation der einzelnen Workcenter ist sehr unterschiedlich, das heißt, eine kleine Teilgruppe bildet den Kapazitätsengpass der Fertigung.

Ansatzpunkte für Verbesserungen

Für die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen kann Folgendes festgehalten werden:

- Der Planungsprozess der strategisch-taktischen Ebene war in jüngster Vergangenheit Gegenstand umfangreicher Optimierungsbestrebungen. Beim Design der Prozesse fanden auch überbetriebliche Aspekte Berücksichtigung. So wurde das Konzept des Vendor Managed Inventory für die Schlüsselkunden implementiert. Generell wurden die Grundlagen für Verbesserungen der Prozesse auf der operativen Ebene geschaffen.

- Der Planungsprozess der operativen Ebene erhielt weniger Aufmerksamkeit. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die auf der strategisch-taktischen Ebene geschaffenen Möglichkeiten teils operativ nicht genutzt werden. So fließen Informationen, welche im Rahmen des Vendor Managed Inventory zur Verfügung stehen, unzureichend in die operative Planung ein.
- Die verfügbaren Kapazitäten der einzelnen Workcenter sind nicht optimal mit den Kapazitätsanforderungen der Produktionsaufträge abgeglichen.

3.3.1.2 Definition von Verbesserungsstrategien

Dieses Kapitel widmet sich der Definition von Strategien zur Verbesserung der Leistungserstellungsprozesse. Zur strukturierten Vorgehensweise wird eine SWOT-Analyse angewandt, wobei die klassische SWOT-Analyse für die gegenwärtige Anwendung adaptiert wurde.

	Stärken: Strategisch-taktischer Planungsprozess	Schwächen: Technologiebedingte interne Variabilität
Chancen: Wachstum durch Kundenzufriedenheit	<p>Ziel: Stärken nutzen, um Chancen zu realisieren.</p> <p>Strategie: Geschaffenes Potenzial der taktischen Ebene operativ zur Steigerung der Lieferzuverlässigkeit nutzen ⇒ Prognosequalität verbessern.</p> <p>Umsetzung: Realisierbar durch Nutzung von VMI-Daten.</p>	<p>Ziel: Schwächen abbauen, um Chancen zu realisieren.</p> <p>Strategie: Technologiebedingte Variabilität verringern ⇒ Zuverlässigkeit der Anlagen erhöhen.</p> <p>Umsetzung: Bei gegebener Technologie mittelfristig nicht realisierbar.</p>
Risiken: Marktbedingte externe Variabilität	<p>Ziel: Stärken nutzen, um Risiken zu begegnen.</p> <p>Strategie: Geschaffenes Potenzial der taktischen Ebene operativ zur Reduktion der Auswirkungen von Nachfrageschwankungen nutzen ⇒ Prognosequalität verbessern.</p> <p>Umsetzung: Realisierbar durch Nutzung von VMI-Daten.</p>	<p>Ziel: Schwächen gegen Risiken schützen.</p> <p>Strategie: Auswirkungen der Gesamtvariabilität verringern ⇒ Sicherheitskapazitäten und -zeiten erweitern.</p> <p>Umsetzung: Erhöhung der Sicherheitskapazitäten durch Erweiterungsinvestitionen und Aufbau von Sicherheitszeiten durch Verschiebung des Kundenauftragsentkopplungspunktes realisierbar.</p>

Tabelle 6: SWOT-Analyse

Es werden nun folgende Schritte durchgeführt:

1. Identifizierung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken
2. Herleitung von Verbesserungsstrategien
3. Bewertung der Verbesserungsstrategien

Tabelle 6 gibt einen Überblick zu den Ergebnissen dieser Schritte, welche nun detailliert dargestellt werden.

Identifizierung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken

Das Identifizieren von durch die Supply Chain beeinflussbaren Stärken und Schwächen sowie außerhalb des Einflussbereiches stehenden Chancen und Risiken, welche das Handlungsfeld für Prozessverbesserungen betreffen, steht zu Beginn der SWOT-Analyse.

Als Stärken können primär der technologische Vorsprung, die hohe Akzeptanz am Markt, bedingt durch die Qualität der Produkte, sowie das Design des strategisch-taktischen Planungsprozesses, identifiziert werden. Die ersten beiden Faktoren sind außerhalb des Rahmens der Fallstudie, da sie primär technische Aspekte von Fertigungsverfahren betreffen. Der strategisch-taktische Planungsprozess steht hingegen im Mittelpunkt der Fallstudie, wobei die Bestrebungen zu dessen Verbesserung bereits erörtert wurden.

Als größte Schwäche wird die technologiebedingte interne Variabilität erkannt. Wegen der Komplexität der Fertigungsverfahren ist die Produktion von Maschinenausfällen betroffen. Das Design der Fertigung als Linienlayout führt dazu, dass der lokale Ausfall eines Betriebsmittels globale Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Produktionsstufen hat.

Während die genannten Stärken und Schwächen durch die Entscheidungsträger der Supply Chain direkt beeinflussbar sind, liegen Chancen und Risiken nicht in deren Einflussbereich. Eine elementare Chance sind zufriedene Kunden und ein damit verbundenes Wachstum der Supply Chain, welches sich durch eine Steigerung des Marktanteils oder des Umsatzes ausdrückt.

Eine Analyse der Risiken zeigt, dass marktbedingte externe Variabilität von essenzieller Bedeutung ist. Die gegenständliche Supply Chain operiert in der Telekommunikationsindustrie. Einerseits ist diese Industrie, bedingt durch saisonale Nachfrageschwankungen und kurzfristige Trends, generell einer hohen Schwankung der Nachfrage ausgesetzt. Andererseits herrscht in dieser Branche ein rascher technologischer Fortschritt, was bedeutet, dass relativ kurze Produktlebenszyklen die stabile Nachfrage nach einem bestimmten Produkt verhindern.

Herleitung von Verbesserungsstrategien

Es gilt nun geeignete Verbesserungsstrategien zu finden, um den identifizierten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Supply Chain gerecht werden. Es stehen hierbei die vier Kombination der internen Dimensionen Stärken und Schwächen sowie der externen Dimensionen Chancen und Risiken im Vordergrund.

Eine zweckdienliche Strategie, welche die Dimension Stärken und die Dimension Chancen integriert, muss darauf abzielen, dass Stärken genutzt werden können, um Chancen zu realisieren. Es gilt, das durch den strategisch-taktischen Planungsprozess geschaffene Potenzial zu nutzen, um Kundenzufriedenheit und somit Wachstum zu erreichen. Da die Supply Chain in der Elektronikbranche im Segment des Mobilfunks operiert, kann davon ausgegangen werden, dass eine agile Supply Chain generell adäquat ist. Infolgedessen kann die Zufriedenheit der Kunden wesentlich durch Erreichung einer hohen Lieferzuverlässigkeit sichergestellt werden. Die Ist-Situation des First Tier Lieferanten ist jedoch teilweise durch relativ niedrige Servicegrade gekennzeichnet. Die gesuchte Strategie muss demnach das geschaffene Potenzial der taktischen Ebene operativ zur Steigerung des Servicelevels nutzen. Dies ist im vorliegenden Fall prinzipiell durch eine Verbesserung der Prognosequalität möglich.

Für eine adäquate Strategie, welche die Dimension Schwächen und die Dimension Chancen verbindet, gilt, dass Schwächen abgebaut werden, um Chancen zu realisieren. Dazu muss die technologiebedingte interne Variabilität verringert werden, um über eine Steigerung der Lieferzuverlässigkeit die Kundenzufriedenheit zu stimulieren und Wachstum zu erlangen. Die Strategie zielt demnach auf eine Steigerung der Zuverlässigkeit der Anlagen ab.

Als nächste Kombination werden die Dimensionen Stärken und Risiken betrachtet, wobei hier Stärken genutzt werden müssen, um Risiken zu begegnen. Als grundlegendes Risiko wurde marktbedingte, externe Variabilität erkannt. Das geschaffene Potenzial der strategisch-taktischen Ebene muss daher operativ zur Reduktion negativer Auswirkungen von Nachfrageschwankungen genutzt werden, wozu insbesondere eine Steigerung der Prognosequalität anzustreben ist.

Zuletzt wird die Kombination der Dimension Schwächen und Risiken behandelt, wo es generell gilt, Schwächen gegen Risiken zu schützen. Eine wirksame Strategie muss die Auswirkungen der Gesamtvariabilität, welche aus internen und externen Ursachen resultiert, verringern. Hierzu stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung, nämlich einerseits der Aufbau von Sicherheitskapazitäten und andererseits das Planen von Sicherheitszeiten, was mit zusätzlichen Beständen einhergeht.

Bewertung der Verbesserungsstrategien

Es wurden vier mögliche Strategien hergeleitet, welche jetzt bezüglich Umsetzbarkeit bewertet werden.

Die Stärken-Chancen-Strategie und die Stärken-Risiken-Strategie zielen auf eine Verbesserung der kurzfristigen Prognosen des First Tier Lieferanten bezüglich der durch die Original Equipment Produzenten nachgefragten Mengen ab. Hierzu ist einerseits das Design der internen Prozesse des First Tier Lieferanten zur Erstellung der Prognosen und andererseits die Integration seiner Partner stromabwärts in der Supply Chain von Relevanz. Beides verspricht Potenzial zur Verbesserung der Prognosequalität. Es wurde die strategisch-taktische Entscheidung zur Umsetzung des Konzepts Vendor Managed Inventory getroffen und dieses mit den umsatzstärksten Kunden des First Tier Lieferanten implementiert. Getrieben wurde dieses Vorhaben weniger vom Gedanken der Schaffung einer Win-win-Situation, sondern vielmehr nutzen die Original Equipment Produzenten ihre relativ starke Position zur Reduktion des administrativen Aufwands für das Beschaffungswesen. Im Ergebnis stehen dem First Tier Lieferanten jedoch Lagerbestands- und Nachfragedaten des Original Equipment Produzenten zeitnah zur Verfügung. Es wird regelmäßig und automatisiert das Bestandsniveau beim Original Equipment Produzenten ermittelt, um den Zeitpunkt und die Menge für eine Lieferung zu bestimmen. Eine sinnvolle Verwendung der Nachfragedaten erfolgt aber prinzipiell nicht. Es ist davon auszugehen, dass durch eine Nutzung der Möglichkeiten der bestehenden Vendor Managed Inventories die Qualität kurzfristiger Prognosen gesteigert werden kann, womit die Stärken-Chancen-Strategie und die Stärken-Risiken-Strategie realisierbar sind.

Die Schwächen-Chancen-Strategie zielt auf eine Reduktion der internen Variabilität durch eine Steigerung der Zuverlässigkeit der Anlagen ab. Die Modernisierung von Anlagen ist keine Option, da zurzeit keine alternativen Fertigungstechnologien zur Verfügung stehen, welche die Verfügbarkeit erhöhen würden. Auch wird von den Prozessverantwortlichen kaum Potenzial zur Erhöhung der Verfügbarkeit durch eine Intensivierung der Wartung gesehen. Aus diesen Gründen ist die skizzierte Schwächen-Chancen-Strategie in der Praxis mittelfristig nicht umsetzbar.

Den Auswirkungen interner und externer Variabilität soll im Rahmen der Schwächen-Risiken-Strategie einerseits mittels Sicherheitskapazitäten und andererseits mittels Sicherheitszeiten begegnet werden. Zur Anpassung der Kapazitäten müssen Erweiterungsinvestitionen im Bereich jener Workcenter getätigt werden, welche einen Kapazitätsengpass darstellen. Dies ist technisch und wirtschaftlich prinzipiell realisierbar. Der Aufbau von Sicherheitszeiten bedeutet eine Festlegung des Starts von kritischen Prozessschritten, sodass der zeitliche Puffer zwischen den tatsächlich realisierten Fertigstellungszeitpunkten und den geforderten, spätesten Fertigstellungszeitpunkten ausgeweitet wird. Bei der betrachteten Fertigung

werden beim Eingang eines Kundenauftrags die entsprechenden Fertigungsaufträge für das Produkt und die benötigten Komponenten generiert und in die Fertigung eingelastet, sobald die erforderlichen Ressourcen zur Verfügung stehen. Durch ein vorgezogenes Erstellen von Fertigungsaufträgen könnten diese früher eingelastet und Sicherheitszeiten aufgebaut werden. Dies bedarf einer neuen Festlegung des Kundenauftragsentkoppelungspunkts, denn die Generierung von Fertigungsaufträgen erfolgt dann nicht mehr nach Eingang eines Kundenauftrags, sondern bereits zuvor, anhand von Prognosen. Die Realisierung dieser elementaren Änderung des Designs der Supply Chain ist kurzfristig nicht realisierbar, jedoch mittelfristig gut denkbar.

Als Grundlage zur strukturierten Ableitung von Szenarien sind Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken identifiziert sowie Strategien hergeleitet und bewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

3.3.1.3 Ableitung von Szenarien

Im Rahmen der Definition von Strategien zur Verbesserung der Leistungserstellungsprozesse sind folgende aussichtsreiche Handlungsmöglichkeiten identifiziert:

- Erweiterung der Kapazitäten
- Verbesserung kurzfristiger Nachfrageprognosen durch Nutzung des unternehmensübergreifenden Informationsflusses
- Verschieben des Kundenauftragsentkoppelungspunkts

Ausgehend von diesen Handlungsmöglichkeiten beziehungsweise von deren Kombination können Szenarien abgeleitet werden, welche potenziell zur Verbesserung der Leistungserstellungsprozesse der Supply Chain in der Lage sind.

Szenario Ausgangssituation

Das Szenario Ausgangssituation dient einerseits der Beurteilung alternativer Prozessdesigns der Supply Chain, indem Leistungsindikatoren alternativer Szenarien mit jenen der Ausgangssituation verglichen werden. Andererseits erfolgt die Validierung des Modells durch ausgesuchte Kennzahlen der Ausgangssituation, wozu Werte des Modells den entsprechenden Werten der Realität gegenübergestellt werden. Die Szenarien unterscheiden sich grundsätzlich durch den Produktionstyp und die Ressourcenausstattung. Die Produktion des First Tier Lieferanten erfolgt in der Ausgangssituation für sämtliche Produkte auftragsgetrieben. Das heißt die Fertigung basiert auf konkreten Kundenaufträgen, wobei die überwiegende Mehr-

zahl Abrufe von Rahmenverträgen sind. Die Ressourcenausstattung umfasst 325 Betriebsmittel mit einer Gesamtkapazität von rund 45000 Stunden Bearbeitungszeit pro Woche.

Szenario Investition

Eine identifizierte Handlungsmöglichkeit ist die Erweiterung der Kapazitäten. Dies verspricht eine Reduktion kapazitätsbedingter Wartezeiten und somit niedrigere Work in Progress-Bestände und höheren Lieferservicegrade. Durch die Kalkulation höherer Maschinenstundensätze werden jedoch die Fertigungskosten steigen. Die Ergänzung der Ressourcenausstattung um zusätzliche Betriebsmittel betrifft den Kapazitätsengpass der Fertigung. Im Rahmen dieses Szenarios wird die Auswirkung zusätzlicher Betriebsmittel des Workcenters mit der höchsten Auslastung auf die Performance der Leistungserstellungsprozesse untersucht.

Szenario Reorganisation

Weitere identifizierte Handlungsmöglichkeiten sind die Verbesserung kurzfristiger Nachfrageprognosen durch Nutzung der Daten der Vendor Managed Inventories und das Verschieben des Kundenauftragsentkoppelungspunkts. Diese beiden Handlungsmöglichkeiten stehen in enger Beziehung zueinander. Einerseits bedarf das Verschieben des Kundenauftragsentkoppelungspunkts zugunsten prognoseorientierter Prozessschritte einer adäquaten Qualität der Forecasts. Andererseits ist die Qualität der Prognosen, bei fixen Kapazitäten und gegebener Rohstoffbeschaffung, nur beim Vorliegen prognoseorientierter Prozessschritte bedeutsam.

Im Kapitel 2.3 werden unterschiedliche marktbezogene Produktionstypen erörtert. Demgemäß steht dem First Tier Lieferanten als Alternative zur gegenwärtigen Make-to-Order Produktion prinzipiell die Organisation der Produktion gemäß Make-to-Stock, Assemble-to-Order oder Make-to-Forecast offen. Die durchschnittliche Durchlaufzeit eines Kundenauftrags ist im Vergleich zur durchschnittlichen Zeitspanne zwischen zwei technischen Anpassungen eines bestimmten Produktes sehr lange. Diese Adaptierungen betreffen meist nur geringe konstruktive Details. Dennoch wären auf Lager produzierte Produkte nach einer erfolgten Änderung unbrauchbar. Dieses Risiko lässt eine Make-to-Stock Produktion generell nicht zu. Eine Grundidee von Assemble-to-Order ist, dass standardisierte Halbfertigprodukte auf Lager produziert und nach Eingang eines Kundenauftrags individuell in verschiedene Varianten endgefertigt werden. Die Produkte des First Tier Lieferanten unterscheiden sich jedoch bereits ab den ersten Produktionsschritten erheblich, weshalb der Aufbau eines Lagers mit Halbfertigprodukten nicht sinnvoll ist. Darüber hinaus sind Zwischenlager im größeren Umfang nicht

realisierbar, da die Möglichkeiten zum Aufbau von Lagerbeständen durch das Fabriklayout beschränkt sind. Aus diesen Überlegungen folgt, dass Assemble-to-Order zum Zwecke der Mass Customization für die Produktion des First Tier Lieferanten ebenfalls nicht anwendbar ist. Bei Make-to-Forecast ist das zeitliche Vorverlagern des Einlastens von Produktionsaufträgen skalierbar, das heißt, es lässt sich das Verhältnis von Bestandshöhe und Grad der Reaktionsfähigkeit der Supply Chain zielgerichtet gestalten. Make-to-Forecast erlaubt es auf Limitierungen der Lagerflächen und auf die begrenzte Lagerfähigkeit, bedingt durch häufige Konstruktionsänderungen der Leiterplatten, einzugehen. Somit ist Make-to-Forecast für die Problemstellung der Fallstudie ein aussichtsreiches Konzept.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Umsetzung von Make-to-Forecast ist die Verfügbarkeit kurzfristiger Nachfrageprognosen mit entsprechend hoher Qualität. Dies lässt sich, wie im Kapitel 2.3.2 erläutert, durch die Gestaltung des unternehmensübergreifenden Informationsflusses zwischen dem Original Equipment Produzenten und dem First Tier Lieferanten erreichen. Die Voraussetzungen wurden bereits beim Design der Supply Chain Prozesse geschaffen. So wurden für die umsatzmäßig wichtigsten Produkte Vendor Managed Inventories eingerichtet. Zurzeit wird das Potenzial verfügbarer Informationen durch den First Tier Lieferanten kaum realisiert. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine Auswertung der Lagerbestands- und Nachfrage Daten, welche durch die Implementierung des Konzepts Vendor Managed Inventory zur Verfügung stehen, dem First Tier Lieferanten die Erstellung sehr akkurater, kurzfristiger Prognosen erlaubt. Die Nutzung des unternehmensübergreifenden Informationsflusses ist die Grundlage für eine Reorganisation von einer auftragsgetriebenen zu einer teilweise prognosegetriebenen Produktion.

Es werden folgende Effekte durch das beschriebene Szenario erwartet. Durch die verlängerte Vorlaufzeit der Leistungserstellung wird der Anteil fristgerecht erfüllter Aufträge zunehmen. Eine Ausweitung der Vorlaufzeit geht jedoch auch mit dem Nachteil höherer Bestände einher. Dieser negative Effekt kann allerdings bis zu einem gewissen Grad durch eine Reduktion des Rüstaufwands kompensiert werden. Die Vorlaufzeit erlaubt mehr Spielraum für die Implementierung einer Regel für die dynamische Einlastung von Produktionsaufträgen. Ziel ist dabei das Pooling von Produktionsaufträgen mit gleichen Produkten zur Verminderung der Rüstvorgänge. Das Ausmaß der einzelnen Effekte im komplexen Gesamtsystem ist Inhalt einer detaillierten Analyse.

Konkret soll im Rahmen des Szenarios Reorganisation für jene Produkte, für die Vendor Managed Inventories bestehen, das Konzept Make-to-Forecast implementiert werden. Dies betrifft die 18 mengenmäßig bedeutsamsten Produkte, deren Anteil an der gesamten Produktionsmenge rund 50 Prozent beträgt. Für die restlichen 389 Produkte gilt weiterhin eine rein auftragsgetriebene Produktion.

Neben dem Szenario Ausgangssituation wurden in diesem Kapitel die Szenarien Investition und Reorganisation definiert, welche in Tabelle 7 gegenübergestellt werden.

Szenario	Produktionstyp	Kapazitäten
Ausgangssituation	Auftragsgetriebene Produktion	Keine Erweiterung
Investition	Auftragsgetriebene Produktion	Erweiterung
Reorganisation	Auftragsgetriebene und prognosegetriebene Produktion	Keine Erweiterung

Tabelle 7: Szenarien

3.3.2 Modellgrößen

Das Modell der betrachteten Supply Chain fokussiert auf die Beschaffungs-, Produktions- und Lieferprozesse des First Tier Lieferanten sowie die Beschaffungsprozesse der Original Equipment Produzenten. Die erforderlichen Modellgrößen gliedern sich folgendermaßen:

- Materialien, Komponenten und Produkte: Das sind Objekte, welche im Leistungserstellungsprozess eine Wertsteigerung erfahren.
- Prognosen, Kundenaufträge und Fertigungsaufträge: Das sind Größen, welche den Leistungserstellungsprozess treiben.
- Betriebsmittel: Das sind Objekte, welche den Leistungserstellungsprozess ausführen.

Zur Beschreibung dieser Größen und ihrer Zusammenhänge sind folgende Daten erforderlich:

- Prognosedaten über zukünftige Kundenaufträge.
- Auftragsdaten über eingegangene Kundenaufträge.
- Stücklisten, welche die Materialien und Komponenten zur Herstellung eines Produktes auflisten.
- Arbeitspläne, welche die Abfolge und die Zeiten für die Leistungserstellung spezifizieren.
- Kapazitätsdaten über die zur Verfügung stehenden Ressourcen.
- Zuverlässigkeitsdaten, welche Ausfälle der Ressourcen beschreiben.

- Kostendaten für das Material und die Leistungserstellung.

Zur Modellierung sind weitere Informationen zur Steuerung des Systems erforderlich, welche teilweise vom Szenario abhängig sind. Eine detaillierte Betrachtung der Daten und Informationen findet im Rahmen der Modellerstellung statt. Die Güte der Daten bestimmt entscheidend die Qualität des Modelloutputs. Daher ist im Rahmen der Fallstudie der Aufwand zur Erhebung der Daten entsprechend umfangreich. Die Daten können teilweise aus den Planungssystemen des First Tier Lieferanten gewonnen werden, müssen jedoch anwendungsgerecht aufbereitet werden. Zusätzlich dienen zur Datenerhebung Gespräche mit Prozessverantwortlichen sowie Beobachtungen des Fertigungsbetriebs.

Zur Berücksichtigung von Nachfragerisiken und operativen Risiken beinhaltet das Modell der Supply Chain stochastische Variablen. Als Zufallsvariablen werden folgende Größen modelliert:

- Prognosefehler: Abweichung zwischen prognostizierter und tatsächlich eingetretener Nachfragemenge.
- Nachfrage: Nachfragemengen für ein bestimmtes Produkt im Zeitablauf. Die Modellierung erfolgt im analytischen Modell als Zufallsvariable. Im Simulationsmodell nimmt die Variable die Werte historischer Daten an.
- Zuverlässigkeit der Ressourcen: Ungeplante Stillstandszeiten von Betriebsmitteln.
- Prozesszeiten: Dauer der Rüst- und Bearbeitungszeiten.

Ein Modell ist generell ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit. Speziell werden folgende Annahmen zur Simplifizierung getroffen:

- Der Detaillierungsgrad der Beschaffungsprozesse ist niedriger als jener der Produktions- und Lieferprozesse. Dies ist dadurch begründet, dass die Beschaffungspolitik fix gegeben ist und die betrachteten Verbesserungsmaßnahmen primär die Produktions- und Lieferprozesse betreffen.
- Administrative Prozesse, wie beispielsweise die Rechnungslegung, werden nicht berücksichtigt, da diese Prozesse durch die erwogenen Verbesserungsmaßnahmen unberührt bleiben.
- Eine Abbildung der Mitarbeiter als Ressourcen im Modell ist nicht zweckmäßig und unterbleibt daher. Es handelt sich einerseits weitgehend um hoch automatisierte Fertigungsprozesse und andererseits stellen die Humanressourcen in der Regel keinen Kapazitätsengpass dar.
- Es wird vereinfacht angenommen, dass die Versorgung mit Rohmaterial zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist.

- Es gilt, dass die Größe der Puffer zwischen den Fertigungsstufen unbegrenzt ist.
- Im Fertigungsprozess fällt Ausschuss an, welcher implizit berücksichtigt wird. Die Bearbeitungszeiten sind derart angepasst, dass dem durch Ausschuss erhöhten Kapazitätsbedarf entsprochen wird. Bei der Anpassung der Zeiten wird die jeweilige Fertigungsstufe des Prozessschritts berücksichtigt.

3.3.3 Kennzahlen

Es werden nun Kennzahlen zur Analyse und Bewertung der Leistungserstellungsprozesse der Supply Chain festgelegt. Bei der Beurteilung alternativer Prozessdesigns sind Zielkonflikte zu berücksichtigen. Beispielsweise sind beim Vergleich von Szenarien mit prognose- und auftragsgetriebener Leistungserstellung Trade-Offs zwischen niedrigen Beständen und einer hohen Lieferzuverlässigkeit relevant. Deshalb erfolgt die Bewertung der Szenarien multikriteriell, das heißt anhand mehrerer Kennzahlen.

Ziel ist die Bestimmung des Szenarios mit der besten Performance. Für die Fallstudie wird Performance als wirtschaftlicher Erfolg der Supply Chain definiert, das heißt ökonomische Aspekte außerhalb ihres unmittelbaren Wirkungsbereiches (z. B. Arbeitsmarkt) und nicht-ökonomische Aspekte (z. B. Lebensqualität der Mitarbeiter) bleiben unberücksichtigt. Der wirtschaftliche Erfolg drückt sich prinzipiell in Form finanzieller Kennzahlen aus, eine Bewertung der Szenarien ausschließlich anhand finanzieller Kennzahlen ist jedoch problematisch. Maßnahmen des Supply Chain Managements haben regelmäßig eine direkte Wirkung auf nicht-finanzielle Größen der Dimensionen Bestände, Zeiten und Kapazitäten. Durch die Änderung der Bestände, Zeiten und Kapazitäten ist eine indirekte Wirkung auf finanzielle Größen gegeben. Die präzise finanzielle Bewertung dieser indirekten Auswirkungen eines bestimmten Supply Chain Designs scheitert, wenn in der Praxis die exakten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nicht bekannt sind. Vielfach kann lediglich eine Aussage getroffen werden, ob zwischen einer nicht-finanziellen und einer finanziellen Größe ein positiver, neutraler oder negativer Zusammenhang besteht. Beispielsweise kann in der Fallstudie davon ausgegangen werden, dass zwischen der Höhe des Lieferservicegrades und dem wirtschaftlichen Erfolg der Supply Chain ein positiver Zusammenhang besteht. Die Quantifizierung dieses Zusammenhangs ist jedoch nicht möglich, da über die Kundenpräferenzen keine ausreichenden Informationen zur Verfügung stehen. Wenn zwischen einer finanziell nicht messbaren Größe und dem wirtschaftlichen Erfolg von einem positiven oder negativen Zusammenhang in signifikanter Stärke auszugehen ist, aber die Funktion des Zusammenhangs nicht ermittelt werden kann, ist eine Aufnahme der entsprechenden nicht-finanziellen Größe als zusätzliches Kri-

terium bei der Bewertung des Supply Chain Designs zweckmäßig. Daher erfolgt die Bewertung der Performance der Supply Chain in der Fallstudie anhand finanzieller und nicht-finanzieller Kennzahlen.

Bei der Wahl eines geeigneten Sets an Kennzahlen ist zu berücksichtigen, dass einerseits Effekte veränderter Supply Chain Designs, welche für den wirtschaftlichen Erfolg der Supply Chain Relevanz besitzen, in ihrer Gesamtheit erfasst werden und andererseits ausschließlich diese Effekte gemessen und Redundanzen vermieden werden. Insbesondere ist bei der Definition der Kennzahlen darauf zu achten, auf welchen Stufen der Supply Chain mit Effekten zu rechnen ist. In den Szenarien der Fallstudie sind Änderungen definiert, welche schwerpunktmäßig auf der Supply Chain Stufe des First Tier Lieferanten implementiert werden. Es ist hier mit Auswirkungen des geänderten Designs auf die Dimensionen Kosten, Zeiten, Bestände und Kapazitäten zu rechnen. Auf der Stufe der Original Equipment Produzenten ist zu erwarten, dass sich diese Änderungen primär in Form der Zuverlässigkeit der Belieferung äußern. Diese bestimmt wiederum die Dimensionen Kosten, Zeiten, Bestände und Kapazitäten bei den Original Equipment Produzenten. Die Lieferzuverlässigkeit bildet diese Dimensionen aggregiert ab, weshalb sich die Fallstudie aus Gründen der Komplexitätsreduktion auf die Erfassung der Lieferzuverlässigkeit beschränkt. Da die Second Tier Lieferanten vom geänderten Supply Chain Design der Szenarien unberührt bleiben, müssen auf dieser Stufe der Supply Chain keine Kennzahlen definiert werden.

Zusammenfassend sind bei der Wahl der Kennzahlen folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Die Beurteilung erfolgt anhand eines Sets an Kennzahlen.
- Die Kennzahlen umfassen finanzielle und nicht-finanzielle Kennzahlen.
- Auf der Stufe des First Tier Lieferanten beschreiben die Kennzahlen die Dimensionen Kosten, Zeiten, Bestände sowie Kapazitäten und auf der Stufe des Original Equipment Produzenten die Zuverlässigkeit der Belieferung.

Ausgehend von diesen Anforderungen werden nun fünf Kennzahlen festgelegt. Es wird hierzu das Potenzial des SCOR Modells, wie im Kapitel 2.2.1 beschrieben, genutzt und auf dessen Top Level-Kennzahlen zurückgegriffen.

Liefertreue

- Definition: „Delivery Performance measures the percentage of orders delivered on time and in full to customer request date and/or to customer commit date“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Für die Fallstudie ist das vereinbarte Lieferdatum relevant.

- Die Liefertreue ist ein Indikator für die Lieferzuverlässigkeit der Supply Chain, welche folgendermaßen definiert ist: „The performance of the supply chain in delivering: the correct product, to the correct place, at the correct time, in the correct condition and packaging, in the correct quantity, with the correct documentation, to the correct customer“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Neben der Liefertreue stehen im SCOR Modell auf Level 1 zwei alternative Kennzahlen zur Verfügung. Die Lieferfähigkeit (Fill Rate) misst den Anteil der Kundenaufträge, welche innerhalb von 24 Stunden erfüllt werden. Diese Kennzahl ist für eine kundenauftragsspezifische Fertigung mit langen Durchlaufzeiten nicht tauglich. Die Kennzahl fehlerlose Auftragsbefüllung (Perfect Order Fulfillment) erweitert die Liefertreue um die Problematik mangelhafter Lieferdokumente. Dieser Aspekt ist jedoch im Hinblick auf den Aggregationsgrad der Fallstudie nicht relevant.
- Die Liefertreue berechnet sich nach Formel (3.1).

$$SL = \frac{\widehat{CO}}{CO} \quad (3.1)$$

Es bedeutet:

SL Liefertreue

\widehat{CO} Anzahl vollständig und rechtzeitig erfüllter Kundenaufträge

CO Gesamtanzahl der Kundenaufträge

Kundenauftragsdurchlaufzeit

- Definition: „Order Fulfillment Lead Time measures the number of days from order receipt in customer service to the delivery receipt of at the customer’s dock“ [Supply Chain Council (2007), URL].
- Die Kundenauftragsdurchlaufzeit ist ein Indikator für die Reaktionsfähigkeit der Supply Chain, welche folgendermaßen definiert ist: „The velocity at which a supply chain provides products to the customer“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Im SCOR Modell stehen auf Level 1 für die Reaktionsfähigkeit keine alternativen Kennzahlen zur Verfügung.
- Die Kundenauftragsdurchlaufzeit berechnet sich nach Formel (3.2).

$$TCO = t_{out} - t_{in} \quad (3.2)$$

Es bedeutet:

TCO Kundenauftragsdurchlaufzeit

t_{out} Zeitpunkt der Erfüllung des Kundenauftrags

t_{in} Zeitpunkt des Eingangs des Kundenauftrags

Auslastung

- Definition: „A measure of how intensively a resource is being used to produce a good or service. Some factors that should be considered are internal manufacturing capacity, constraining processes, direct labor availability and key components/materials availability“ [Supply Chain Council (2007), URL].
- Die Auslastung ist ein Indikator für die Flexibilität der Supply Chain, welche folgendermaßen definiert ist: „The agility of a supply chain in responding to marketplace changes to gain or maintain competitive advantage“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Im SCOR Modell stehen auf Level 1 für die Flexibilität zwei alternativen Kennzahlen zur Verfügung. Die Supply Chain Reaktionszeit misst die Tage, welche die Supply Chain benötigt, um auf eine signifikante, ungeplante Nachfrageschwankung ohne Zusatzkosten zu reagieren. Die unscharfe Definition der Kennzahl lässt eine operative Umsetzung in der Fallstudie nicht zu. Die Produktionsflexibilität ist präziser definiert, nämlich als Anzahl der Tage, welche die Herstellprozesse benötigen, um auf eine ungeplante Nachfrageschwankung in der Höhe von 20 Prozent ohne Zusatzkosten zu reagieren. Diese Kennzahl ist zur Befragung von Prozessverantwortlichen über deren Einschätzung zur Flexibilität dienlich. Im dynamischen Modell wäre die Berechnung der fiktiven Wirkung einer fiktiven Ursache zu jedem diskreten Zeitpunkt zu aufwendig, weshalb als aussagekräftiger Ersatzindikator die Auslastung herangezogen wird.
- Die Auslastung berechnet sich nach Formel (3.3).

$$\rho = \frac{\hat{R}}{R} \quad (3.3)$$

Es bedeutet:

ρ Auslastung

\hat{R} Durchschnittlich belegte Kapazität

R Durchschnittlich planmäßig verfügbare Kapazität

Herstellkosten einer Periode

- Im SCOR Modell ist auf Level 1 folgende Kennzahl definiert: „Cost of Goods measures the direct cost of material and labor to produce a product or service“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Diese Definition des SCOR Modells widerspricht der gängigen Definition von Herstellkosten, da sie Gemeinkosten vernachlässigt. Mit „Cost of Goods“ ist demnach eine von „Cost of Goods Sold“ (Herstellkosten) differenzierte Kennzahl definiert. Im Sinne einer inner- und überbetrieblichen Kennzahlenkonsistenz werden in der Fallstudie die klassischen Herstellkosten als Kennzahl herangezogen. Somit werden die Einzelkosten um die Gemeinkosten erweitert.
- Die Herstellkosten einer Periode sind ein Teil der Supply Chain Kosten, also jener Kosten, welche bei der Leistungserstellung der Supply Chain anfallen. Im SCOR Modell stehen auf Level 1 zur Beschreibung der Supply Chain Kosten weiters die Supply Chain Management Kosten, die Wertschöpfungsproduktivität (Value Added Productivity) und die Kosten der Rückwärtslogistik (Warranty / Returns Processing Cost) zur Wahl. Die Supply Chain Management Kosten umfassen Einzel- und Gemeinkosten im Rahmen der Planung und Steuerung der Beschaffung, Fertigung und Distribution. Die Wertschöpfungsproduktivität setzt die Differenz zwischen Erlösen und Materialeinzelkosten in Verhältnis zur Anzahl der Beschäftigten. Diese beiden Kennzahlen vernachlässigen jedoch die für die Fallstudie wichtigen Fertigungskosten. Auch die Kosten der Rückwärtslogistik sind für die Fallstudie nicht relevant, da Prozesse, welche im Fall von Fehllieferungen, Instandsetzungen oder Entsorgungen durchzuführen sind, in den betrachteten Szenarien keine wichtige Rolle spielen.
- Die Herstellkosten einer Periode berechnen sich nach Formel (3.4).

$$C = CM + Q \cdot cq + (TS + TP) \cdot ct \quad (3.4)$$

Es bedeutet:

C Herstellkosten einer Periode

CM Materialkosten

Q Produktionsmenge

cq Mengenabhängiger Kostensatz

TS Rüstzeit

TP Bearbeitungszeit

ct Zeitabhängiger Kostensatz

Bestandsreichweite

- Definition: „Inventory Days of Supply measures the number of days that cash is tied up as inventory“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Die Bestandsreichweite beschreibt demnach die Durchlaufzeit von der Einlagerung bis zur Auslagerung. Im Rahmen der Fallstudie werden hierbei auch Bestände in der Fertigung berücksichtigt, weshalb die Bezeichnung Bestandsreichweite statt Lagerreichweite gewählt wird.
- Die Bestandsreichweite ist ein Indikator für die Effektivität des Vermögensmanagements einer Supply Chain, welche sich folgendermaßen definiert: „The effectiveness of an organization in managing assets to support demand satisfaction. This includes the management of all assets: fixed and working capital“ [Supply Chain Council (2007), URL]. Neben der Bestandsreichweite sieht das SCOR Modell hier die Kapitalbindungsdauer und den Kapitalumschlag als Kennzahlen vor. Die Kapitalbindungsdauer errechnet sich, indem man zur Durchlaufzeit der Leistungserstellung die Durchlaufzeit der Lieferforderungen addiert und davon die Durchlaufzeit der Lieferverbindlichkeiten subtrahiert. Da sich die Szenarien der Fallstudie nicht anhand der Durchlaufzeiten der Lieferforderungen und -verbindlichkeiten unterscheiden, ist eine Beschränkung auf die Bestandsreichweite möglich. Das Szenario Investition lässt Effekte bezüglich des Kapitalumschlags erwarten. Zumal finanzielle Auswirkungen der Erweiterung der Kapazitäten bereits durch die Kennzahl Herstellkosten einer Periode hinlänglich berücksichtigt werden, beschränkt sich die Fallstudie auf die Bestandsreichweite als Indikator für die Effektivität des Vermögensmanagements.

- Die Bestandsreichweite berechnet sich nach Formel (3.5).

$$IDS = \frac{I_{in} + I_{wip} + I_{out}}{C} \quad (3.5)$$

Es bedeutet:

IDS Bestandsreichweite

I_{in} Durchschnittlicher Bestand Eingangslager

I_{wip} Durchschnittlicher Bestand Fertigung und Halbfertigteilelager

I_{out} Durchschnittlicher Bestand Ausgangslager

C Herstellkosten einer Periode

Im Ergebnis werden mittels der genannten Kennzahlen die Dimensionen Zuverlässigkeit, Zeiten, Kapazitäten, Kosten und Bestände erfasst. Dies ist die Basis zur umfassenden Beurteilung der Szenarien.

3.4 Analytisches Modell

Als Ergebnis des Lösungskonzeptes sind Szenarien, Modellgrößen und Kennzahlen definiert. Somit liegen die Grundlagen für die Modellierung des betrachteten Systems vor. Gemäß der dargestellten Vorgehensweise wird die Supply Chain zuerst in einem analytischen Modell als Netzwerk von Warteschlangen abgebildet und analysiert. Im Folgenden wird die Modellerstellung, die Verifizierung und Validierung des Modells, das experimentelle Design und die Ergebnisanalyse erörtert.

3.4.1 Modellerstellung

Ziel der Erstellung des analytischen Modells ist die Schaffung der Grundlagen für die Komplexitätsreduktion. Der angestrebte Output des Modells umfasst einerseits Kennzahlen zur Beurteilung, ob ein Prozessschritt kritisch ist. Andererseits werden durchschnittliche Wartezeiten errechnet, um nicht-kritische Prozessschritte im Simulationsmodell abzubilden.

Rapid Modeling

Das analytische Modell wird unter Anwendung von Rapid Modeling erstellt. Rapid Modeling bezeichnet sowohl einen Managementansatz als auch ein Softwarekonzept [vgl. Suri (1989a), S. 80ff; Suri (1989b), S. 66ff.]: Der Managementansatz basiert auf der Annahme, dass Entscheidungen anhand fundierter, quantitativer Grundlagen gefällt werden sollen. Zu diesem Zweck werden alternative Prozesslayouts analysiert, wobei Durchlaufzeiten, Bestände, Kapazitätsauslastungen und Produktionsmengen als Key Performance-Indikatoren definiert sind. Die Analyse findet hierbei in einer aggregierten Form statt, weshalb Rapid Modeling als Werkzeug der taktischen Managementebene zu charakterisieren ist. Um das Management effizient unterstützen zu können, müssen die Analysen schnell und mit begrenztem Aufwand durchführbar sein. Als Softwarekonzept versucht Rapid Modeling, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Es ist zwischen einfachen, aber inhaltlich oftmals nicht ausreichenden Spreadsheet-Berechnungen und mächtigen, jedoch in der Erstellung und Anwendung aufwendigen Simulationsmodellen positioniert. Rapid Modeling basiert auf der Warteschlangentheorie, das heißt, die komplexen Zusammenhänge der Leistungserstellung werden als Netzwerk von Warteschlangen modelliert und analysiert.

Rapid Modeling eignet sich insbesondere aus folgenden Gründen für die Problemstellung der Fallstudie:

- Das System der betrachteten Supply Chain lässt sich als Warteschlangennetzwerk abbilden.
- Die Modellierung des Gesamtsystems ist mit begrenztem Aufwand durchführbar.
- Die benötigten Inputdaten stehen zur Verfügung und die berechneten Outputdaten entsprechen den Anforderungen der Fallstudie.

Eine Grundidee von Rapid Modeling ist, dass der Entscheidungsträger nicht mit der komplexen Theorie konfrontiert wird, sondern Softwareunterstützung erfährt, welche bei der Modellierung und Modellanwendung den Anwender weitgehend entlastet. Eine derartige Unterstützung bietet die Rapid Modeling-Software MPX (Version 4.3 Industrial) der Firma Network Dynamics. Sie stellt folgende Möglichkeiten zur Analyse dynamischer Systeme zu Verfügung [vgl. MPX (2003), S. 3-1ff.; Network Dynamics (2007), URL]:

- Modellierung einer Vielzahl an Produkten mit unterschiedlichen Stücklisten, Arbeitsplänen und Losgrößen.
- Modellierung der Rüst- und Bearbeitungszeiten pro Stück, pro Fertigungslos und pro Transportlos.

- Modellierung von Ausschuss sowie von Prozessschleifen zur Nacharbeit.
- Modellierung von Kapazitätsbeschränkungen der Humanressourcen und Betriebsmittel unter Berücksichtigung der dynamischen Abhängigkeit zwischen der Maschine und deren Bediener.
- Modellierung von ungeplanten Maschinenausfällen.
- Modellierung von Variabilität der Rüst- und Bearbeitungszeiten, global oder detailliert für jede Humanressource und jedes Betriebsmittel.
- Modellierung der Variabilität der Zwischenankunftszeiten der Produktionsaufträge, global oder detailliert für jedes Produkt.
- Analyse der fundamentalen Outputgrößen Auslastung, Bestand und Durchlaufzeit.
- Vergleich von What-if-Szenarien mit einer numerischen und grafischen Anzeige der Ergebnisse.
- Analyse der Ergebnisse detailliert nach Teil, Baugruppe und Produkt beziehungsweise nach Ressource und Workcenter.
- Finden optimaler Bearbeitungs- und Transportlosgrößen bei gegebenen Produktionsmengen mit dem Ziel minimaler Bestände.
- Datenimport und -export durch Nutzung einer Microsoft Access Datenbank.

Die Software MPX bietet jene Funktionalitäten, welche zur Erstellung des analytischen Modells der Fallstudie gefordert sind.

Inputdaten

Es wird nun der notwendige Input für das Modell diskutiert, welcher globale Daten, sowie Produkt-, Kapazitäts- und Fertigungsdaten umfasst. Für das Modell sind folgende globalen Daten relevant:

- **Periodenlänge:** Die Zeitspanne, welche zur Produktion der im Produktionsprogramm definierten Mengen an Produkten zur Verfügung steht.
- **Variabilitätsfaktor der Rüstzeiten:** Das Verhältnis zwischen Standardabweichung und Mittelwert der Rüstzeiten. Im Modell gilt ein globaler Variabilitätsfaktor der Rüstzeiten.
- **Variabilitätsfaktor der Bearbeitungszeiten:** Das Verhältnis zwischen Standardabweichung und Mittelwert der Bearbeitungszeiten. Im Modell gilt ein globaler Variabilitätsfaktor der Rüstzeiten.

Für jedes Produkt beziehungsweise jede Komponente werden folgende Daten im Modell definiert:

- **Bezeichnung:** Dient zur Identifikation des Produktes beziehungsweise der Komponente.
- **Bedarfmenge:** Primärbedarf eines Produktes in der betrachteten Periode.
- **Variabilitätsfaktor der Nachfrage:** Verhältnis zwischen Standardabweichung und Mittelwert der Zwischenankunftszeiten von Kundenaufträgen für ein bestimmtes Produkt.
- **Arbeitsplanzuordnung:** Zuordnung zwischen Produkt beziehungsweise Komponente und Arbeitsplan in Form einer 1:1-Beziehung.

Für jedes Produkt beziehungsweise jede Komponente werden zudem folgende Stücklistendaten im Modell definiert:

- **Komponentenzuordnung:** Zuordnung zwischen Produkt und Komponente beziehungsweise Komponente und Komponente in Form einer m:n-Beziehung.
- **Mengen der Zuordnung:** Anzahl der einem Produkt beziehungsweise einer Komponente zugeordneten Komponenten.

Zur Beschreibung der Kapazitäten sind für jedes Workcenter folgende Ressourcendaten im Modell definiert:

- **Bezeichnung:** Dient zur Identifikation des Workcenters.
- **Anzahl paralleler Ressourcen:** Anzahl gleichartiger Betriebsmittel, welche ein Workcenter bilden und Fertigungsaufträge parallel bearbeiten können.
- **Verfügbarkeit:** Anteil der Periodenlänge in dem das Workcenter planmäßig zur Verfügung steht.
- **Mean Time to Failure:** Mittlere Zeitspanne, in der ein Workcenter ohne unplanmäßigen Ausfall zur Verfügung steht.
- **Mean Time to Repair:** Mittlere Zeitspanne zur Wiederherstellung der Verfügbarkeit eines Workcenters nach einem unplanmäßigen Ausfall.

Die Losgrößen zur Leistungserstellung werden im Modell folgendermaßen definiert:

- **Fertigungslosgröße:** Anzahl gleichartiger Produkte beziehungsweise Komponenten, welche ohne Unterbrechung durch andere Produkte beziehungsweise Komponenten von einer Ressource sukzessive bearbeitet werden. Die Fertigungslosgröße entspricht im betrachteten Fall der durchschnittlichen Kundenauftragsgröße.

- **Transportlosgröße:** Anzahl gleichartiger Produkte beziehungsweise Komponenten, welche gemeinsam zur nächsten Produktionsstufe transportiert werden. Die Transportlosgröße entspricht im betrachteten Fall der Fertigungslosgröße.

Die Leistungserstellung wird in den Arbeitsplänen beschrieben, wobei pro Arbeitsschritt folgende Daten im Modell definiert sind:

- **Sequenz:** Die Reihenfolge, in der die Arbeitsschritte abgearbeitet werden, wird durch Festlegung der vorhergehenden und der nachfolgenden Arbeitsschritte bestimmt.
- **Rüstzeit:** Zeit für das Vorbereiten eines Workcenters für die Bearbeitung gleichartiger Produkte beziehungsweise Komponenten.
- **Bearbeitungszeit:** Zeit für das Ausführen eines Arbeitsschrittes zur Wertsteigerung.
- **Workcenter-Zuordnung:** Zuordnung zwischen Arbeitsschritt und Workcenter in Form einer n:1-Beziehung.

Da der Automatisierungsgrad der betrachteten Supply Chain sehr hoch ist, ist zu erwarten, dass die Ergebnisse der betrachteten Szenarien nicht wesentlich durch Effekte von Humanressourcen bestimmt werden. Aus diesem Grund wird auf die Modellierung von Humanressourcen verzichtet. Weiters unterbleibt eine explizite Berücksichtigung von qualitätsbedingtem Ausschuss im Modell. Die Problematik des Ausschusses stellt prinzipiell einen Ansatzpunkt für Prozessverbesserungen dar. Derartige Verbesserungen würden sich jedoch auf einen niedrigeren Detaillierungsgrad als jenen der Fallstudie beziehen. Daher wird Ausschuss durch Zuschläge zu den Bearbeitungszeiten und durch die Modellierung der Variabilität der Bearbeitungszeiten implizit berücksichtigt.

Anhand der beschriebenen Anforderungen werden die Realdaten der Supply Chain erhoben, in das erforderliche Format konvertiert und in die Datenbank der Software MPX importiert.

Modellstruktur

Das System wird mit der Software MPX als Warteschlangennetz mit folgenden Eigenschaften modelliert [vgl. MPX (2003), S. 6-7]: Es handelt sich um ein offenes Warteschlangennetz, da die Anzahl der Aufträge im Modell variabel sein kann. Im Netzwerk werden multiple Klassen an Aufträgen bearbeitet. Die Knoten im Netzwerk sind als GI/G/m Warteschlange definiert, das heißt sowohl die Zwischenankunftszeiten als auch die Bearbeitungszeiten sind allgemein verteilt und es sind m parallele Ressourcen vorhanden. Die Puffer der Warteschlangen sind nicht

begrenzt. Das Modell wird durch Dekomposition der Knoten gelöst, wobei die Beziehungen zwischen den Knoten, die Verteilung des Outputs und Ausfälle von Ressourcen berücksichtigt werden. Das Modell bildet anhand der Inputdaten einen Betrachtungszeitraum von 183 Tagen ab.

Outputdaten

Es werden ressourcen- und produktbezogene Kennzahlen im Modell errechnet. Diese Kennzahlen dienen als Input für die Komplexitätsreduktion und das Simulationsmodell und finden zur Modellvalidierung Anwendung.

Für jedes Workcenter wird folgender ressourcenbezogener Output ermittelt:

- **Auslastung:** Outputrate eines Workcenters im Verhältnis zu seiner theoretischen Kapazität.

Für jeden Prozessschritt wird folgender produktbezogener Output ermittelt:

- **Durchschnittliche Durchlaufzeit:** Durchschnittliche Zeit eines Fertigungsauftrags für kapazitätsbedingtes Warten, Rüsten und Bearbeiten.
- **Durchschnittliche Wartezeit:** Durchschnittliche Zeit eines Fertigungsauftrags für kapazitätsbedingtes Warten.

3.4.2 Verifizierung und Validierung

Zur Sicherstellung der gewünschten Funktionalität des Modells muss dieses verifiziert werden. Es wird geprüft, ob sämtliche Elemente, wie geplant, modelliert sind, sowie das Modell frei von syntaktischen Fehlern und durch die Software berechenbar ist. Durch die Verifizierung kann garantiert werden, dass das Modell „richtig erstellt“ wurde.

Im Rahmen der Validierung des Modells wird geprüft, ob dieses ein hinlänglich repräsentatives Abbild der Wirklichkeit darstellt. Die Validierung erfolgt anhand eines Vergleiches der Fertigungsauftragsdurchlaufzeit der Realität mit jener des Modells. Gemessen am Mittelwert der durchschnittlichen Durchlaufzeiten aller Produkte weichen die Werte des Modells um weniger als fünf Prozent von den Realwerten ab. Das analytische Modell bildet die Wirklichkeit auf einem hohen Aggregationsgrad ab, weshalb der erreichte Wert jedenfalls akzeptabel ist. Im Ergebnis ist hinlänglich garantiert, dass das „richtige Modell“ erstellt wurde.

3.4.3 Experimentelles Design

Ziel des analytischen Modells ist die Schaffung der Grundlagen zur Komplexitätsreduktion, damit nicht-kritische Ressourcen identifiziert und in Folge vereinfacht modelliert werden können. Es wird davon ausgegangen, dass die nicht-kritischen Ressourcen der Ausgangssituation auch in den anderen Szenarien diese Eigenschaft besitzen. Unter dieser Annahme beschränkt sich die Anwendung des Modells auf die Analyse der Ist-Situation. Prinzipiell ist eine Erweiterung des experimentellen Designs im Rahmen weiterführender Analysen, zum Beispiel zur Untersuchung eines geänderten Nachfrageverhaltens, möglich. Für die Komplexitätsreduktion sind Wartezeiten, als Ergebnis im System inhärenter Variabilität, ein besonders wichtiger Output des analytischen Modells. Im Idealfall würden diese Wartezeiten in der Realität beobachtet und der Komplexitätsreduktion als Input zugeführt werden. Wegen des großen Umfangs des Systems ist diese Vorgehensweise praktisch nicht umsetzbar. So werden in der Betrachtungsperiode von sechs Monaten an 325 Betriebsmitteln 4642 Kundenaufträge produziert. Da kein empirisches Datenmaterial über Wartezeiten zur Verfügung steht, ist die analytische Ermittlung notwendig. Das Gleiche gilt für die übrigen definierten Kennzahlen. Das experimentelle Design umfasst daher die Ermittlung der Auslastung, der durchschnittlichen Wartezeit und der durchschnittlichen Durchlaufzeit für das Szenario Ausgangssituation.

3.4.4 Ergebnisanalyse

Als Ergebnis des analytischen Modells liegen für jedes Workcenter Werte für die Auslastung und für jeden Produktionsauftrag und Prozessschritt die durchschnittlichen Durchlaufzeiten und Wartezeiten vor. Der erforderliche Input für die Komplexitätsreduktion im Kapitel 3.5 ist, neben der Auslastung, die Durchlaufzeiteffizienz. Diese setzt die wertschöpfende Zeit in Verhältnis zur gesamten Durchlaufzeit und ist damit ein Indikator für den Anteil der Wartezeit eines Prozesses. Die Durchlaufzeiteffizienz errechnet sich generell gemäß Formel (3.6).

$$LTE = \frac{TPO - TW}{TPO} \quad (3.6)$$

Es bedeutet:

LTEDurchlaufzeiteffizienz eines Fertigungsauftrags

TPODurchlaufzeit eines Fertigungsauftrags

TWWartezeit eines Fertigungsauftrags

Die Durchlaufzeiteffizienz bezogen auf ein Workcenter wird in der Fallstudie gemäß Formel (3.7) berechnet.

$$LTE_k = \frac{\frac{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} (TPO_{po,op} \cdot QPO_{po,op})}{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} (QPO_{po,op})} - \frac{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} (TW_{po,op} \cdot QPO_{po,op})}{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} (QPO_{po,op})}}{\frac{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} (TPO_{po,op} \cdot QPO_{po,op})}{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} (QPO_{po,op})}} \quad (3.7)$$

Es bedeutet:

LTE_kDurchlaufzeiteffizienz des Workcenters k

POAnzahl der Fertigungsaufträge des Workcenters k

OPAnzahl der Prozessschritte des Workcenters k

TPODurchlaufzeit des Fertigungsauftrags

QPOAuftragsgröße des Fertigungsauftrags

TWWartezeit des Fertigungsauftrags

Eine statistische Analyse der Kennzahlen Auslastung und Durchlaufzeiteffizienz zeigt in Tabelle 8, dass die Werte pro Workcenter erheblich streuen. Aus diesem Grund besteht Potenzial für die Komplexitätsreduktion, da von einer Differenzierbarkeit zwischen für die Prozessperformance kritischen und nicht-kritischen Workcentern auszugehen ist.

Kennzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Spannweite
Auslastung	0,34	0,28	0,98
Durchlaufzeiteffizienz	0,49	0,31	0,85

Tabelle 8: Ergebnis des analytischen Modells

3.5 Komplexitätsreduktion

Der hohe Komplexitätsgrad der betrachteten Supply Chain erfordert Maßnahmen, damit eine Analyse praktisch umsetzbar ist. Es werden Grundlagen für die Komplexitätsreduktion diskutiert und wird anschließend die konkrete Durchführung beschrieben.

3.5.1 Grundlagen der Komplexitätsreduktion

Im Rahmen der Komplexitätsreduktion werden Maßnahmen durchgeführt, damit Restriktionen bezüglich des Aufwandes zur Modellerstellung und der verfügbaren IT-Ressourcen Rechnung getragen wird. Für das Simulationsmodell gilt dabei die Prämisse, dass die Realitätsnähe so hoch wie nötig und der Aufwand so gering wie möglich ist. Prinzipiell erfahren für die Prozessperformance kritische Prozessschritte eine realitätsnähere und somit aufwendigere Modellierung als weniger kritische Prozessschritte. Daraus folgen für die Fallstudie diese drei Fragestellungen, welche nun beantwortet werden:

- Wie können Prozessschritte, welche für die Prozessperformance wenig kritisch sind, zur Reduktion der Komplexität vereinfacht modelliert werden?
- Mit welchen Indikatoren kann beurteilt werden, welche Prozessschritte für die Performance des Prozesses wenig kritisch sind?
- Wie kann anhand der Indikatoren beurteilt werden, ob ein Prozessschritt für die Performance des Prozesses wenig kritisch ist?

Vereinfachung der Modellierung

Ein System besteht aus Elementen, welche untereinander in Wechselwirkung stehen. Im Simulationsmodell können diese Elemente mittels Variablen oder Konstanten modelliert werden. Zur Komplexitätsreduktion kann einerseits auf die Modellierung von Elementen verzichtet werden und andererseits eine Modellierung von Elementen mittels Konstanten statt Variablen vorgenommen werden. Eine Modellierung mittels Konstanten ist weniger aufwendig und rechenintensiv als der Einsatz von Variablen, da eine dynamische Berechnung weder definiert noch durchgeführt werden muss. Eine Möglichkeit zur Vereinfachung eines Modells mittels Weglassen von Elementen und Substitution von Variablen durch Konstanten ist die nicht-kapazitierte Abbildung von Prozessschritten. Ein Verzicht auf die Abbildung von Ressourcen, die einem Prozessschritt ausführen, re-

duziert den Modellierungs- und Rechenaufwand bezüglich der Variablen, die dynamisch den Zustand der Ressourcen und kapazitätsbedingten Warteschlangen beschreiben. Diese Vorgehensweise ist jedoch nur zulässig, wenn Prozessschritte für die Performance des Prozesses wenig kritisch sind.

Auswahl der Indikatoren

Im Folgenden werden Indikatoren zur Feststellung, ob ein Prozessschritt für die Performance des Prozesses kritisch oder wenig kritisch ist, erörtert. In der Fallstudie folgt diese Beurteilung drei Kriterien: Wichtigkeit eines Prozessschritts für die Zielerreichung, Problempotenzial eines Prozessschritts und Abhängigkeiten zwischen Prozessschritten.

- Ein übergeordnetes Ziel der Supply Chain ist die effektive und effiziente Wertschöpfung. Die Erreichung dieses Ziels wird entscheidend durch die Performance des Gesamtprozesses bezüglich der Dimensionen Qualität, Zeit und Kosten bestimmt. Es ist daher zu beurteilen, in welchem Ausmaß ein Prozessschritt die Gesamtperformance der Supply Chain bezüglich dieser drei Dimensionen mitbestimmt. In der Fallstudie nimmt die Dimension Qualität keine wichtige Rolle ein, sondern es wird auf die Dimensionen Zeit und Kosten fokussiert. Als Indikator für den Beitrag zur Gesamtperformance in der Dimension Zeit wird der Anteil der Wertschöpfungszeit eines Prozessschritts, gemessen an der Wertschöpfungszeit des Gesamtprozesses, herangezogen. Das Ausmaß des Beitrages zur Gesamtperformance in der Dimension Kosten wird mit dem Indikator Anteil der Herstellkosten eines Prozessschritts beschrieben.
- Je niedriger das Problempotenzial eines Prozessschritts ist, desto weniger kritisch ist dieser für die Performance des Gesamtprozesses. Das Problempotenzial eines Prozessschritts wird insbesondere dadurch bestimmt, inwieweit Variabilität, welche auf diesen einwirkt, zur Verursachung negativer Auswirkungen imstande ist. Sofern Variabilität nicht verhindert werden kann, äußert sich diese in Form höherer Bestände oder längerer Zeiten. Bei gegebener Outputrate können gemäß dem Gesetz von Little Bestände durch Zeiten ausgeglichen werden, weshalb nur für eine der beiden Dimensionen ein Indikator festgelegt wird. Als Indikator wird die Durchlaufzeiteffizienz gewählt, welche variabilitätsbedingte Wartezeiten widerspiegelt. Eine niedrige Durchlaufzeiteffizienz ist ein Indikator für ein hohes Problempotenzial. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Variabilität mit einer Erweiterung der Kapazitäten zu begegnen. Als Indikator für das Vermögen zum Ausgleich von Variabilität durch Kapazitäten dient die Kennzahl Auslastung. Bei einer gestiegenen Auslastung stehen relativ weniger freie Kapazitäten zur Verfügung, was ein hohes Problempotenzial repräsentiert.

- Wie kritisch ein Prozessschritt für die Performance des Gesamtprozesses ist, wird unter anderem durch die Beziehungen zwischen diesem Prozessschritt und anderen Prozessschritten bestimmt. Variabilität reduziert die Performance eines Prozesses, da sie höhere Bestände, längere Zeiten oder zusätzliche Kapazitäten bedingt. Dabei gilt, dass Variabilität am Beginn eines Prozesses eine stärkere Auswirkung hat, als an dessen Ende. Die Anzahl der einem Prozessschritt folgenden Prozessschritte ist somit ein Einflussfaktor, wie kritisch dieser für die Gesamtperformance ist. Aus diesem Grund wird in der Fallstudie als Indikator die Position eines Prozessschritts im Netzwerk definiert. In der Supply Chain der Fallstudie werden Produkte produziert, welche aus mehreren Komponenten bestehen. Das asynchrone Ankommen von Komponenten bei Montageprozessen kann eine bedeutsame Ursache für Verzögerungen sein. Deshalb wird die Wahrscheinlichkeit für das Ausführen eines Montagevorgangs als weiterer Indikator definiert.

Im Ergebnis werden in der Fallstudie folgende Indikatoren zur Beurteilung, ob ein Prozessschritt für die Performance des Prozesses kritisch oder wenig kritisch ist, definiert: Anteil der Wertschöpfungszeit, Anteil der Herstellkosten, Durchlaufzeiteffizienz, Auslastung, Position im Netzwerk und Wahrscheinlichkeit für Montage.

Beurteilung der Prozessschritte

Es wird jetzt die Frage behandelt, wie mittels der gewählten Indikatoren beurteilt werden kann, ob ein bestimmter Prozessschritt für die Performance des Prozesses wenig kritisch ist. Dazu werden folgende Möglichkeiten geprüft, um anhand der Ausprägungen der einzelnen Indikatoren eine Gesamtaussage über einen Prozessschritt zu treffen:

- Eine Möglichkeit besteht in der Aggregation der Indikatoren zu einem Gesamtindikator. Diese Vorgehensweise kann mit einer Nutzwertanalyse verglichen werden, wobei jedoch nicht ein Gesamtnutzen, sondern ein Gesamtindikator bestimmt wird, welcher beschreibt, wie kritisch ein Prozessschritt ist. Zur Aggregation muss erstens für jeden Indikator eine Funktion definiert werden, welche den Zusammenhang zwischen dem Parameterwert und dem Grad, inwieweit ein Prozessschritt kritisch ist, beschreibt. Zweitens müssen für jeden Indikator anhand der relativen Bedeutung für den Gesamtindikator Gewichte bestimmt werden, was bei der praktischen Umsetzung mit Subjektivität verbunden ist. Außerdem besteht bei der Nutzwertanalyse die Forderung der Nutzenunabhängigkeit, das heißt, die Erfüllung eines Kriteriums darf nicht von der Erfüllung eines anderen abhängig sein. Analog dazu gilt hier, dass die In-

dikatoren voneinander unabhängig sein müssen. Dies ist jedoch nicht gegeben, weshalb der Ansatz verworfen wird.

- Ein alternativer Zugang ist die Anwendung von KO-Kriterien. Die Prozessschritte werden anhand der Ausprägungen mehrerer Indikatoren beurteilt. Ist mindestens einer der Indikatoren kritisch, wird der Prozessschritt ebenfalls als kritisch eingestuft. Durch dieses Vorgehen kann das Risiko unzulässiger Modellvereinfachungen reduziert werden. Speziell im Hinblick auf die genannte Problematik bei der Aggregation zu einem Gesamtindikator werden in der Fallstudie KO-Kriterien herangezogen.

3.5.2 Durchführung der Komplexitätsreduktion

Anhand der erörterten Grundlagen wird eine Reduktion der Komplexität mittels folgender Schritte erreicht:

1. Berechnung der Indikatoren, welche den Grad der Komplexität beschreiben.
2. Klassifizierung der Workcenter anhand der Indikatoren.
3. Bestimmung der kritischen Workcenter gemäß der Klassifizierung.

Berechnung der Indikatoren

In der Fallstudie wird eine Komplexitätsreduktion erreicht, indem die einen Prozessschritt ausführenden Ressourcen zum Teil nicht modelliert werden. In der betrachteten Fertigung ist jeder Prozessschritt eindeutig einem Workcenter zugeordnet. Die Berechnung der Indikatorwerte erfolgt zweckmäßig nicht je Prozessschritt, sondern aggregiert pro Workcenter. Die Werte für die Auslastung und Durchlaufzeiteffizienz werden aus dem Ergebnis des analytischen Modells übernommen. Die Indikatoren für den Anteil der Wertschöpfungszeit, den Anteil der Herstellkosten, die Position im Netzwerk und die Wahrscheinlichkeit für Montage werden nun erörtert.

Die Kennzahl Anteil der Wertschöpfungszeit eines Workcenters wird gemäß Formel (3.8) berechnet.

$$PVAT_k = \frac{TS_k + TP_k}{\sum_{WC=1}^{WC} (TS_{WC} + TP_{WC})} \quad (3.8)$$

Es bedeutet:

$PVAT_k$..Anteil der Wertschöpfungszeit des Workcenters k

TS_k Rüstzeit der bearbeiteten Produktionsaufträge

TP_k Bearbeitungszeit der bearbeiteten Produktionsaufträge

WC Anzahl der Workcenter

Die Kennzahl Anteil der Herstellkosten eines Workcenters folgt Formel (3.9).

$$PC_k = \frac{C_k}{\sum_{WC=1}^{WC} C_{WC}} \quad (3.9)$$

Es bedeutet:

PC_k Anteil der Herstellkosten des Workcenters k

C_k Herstellkosten der bearbeiteten Produktionsaufträge

WC Anzahl der Workcenter

Die relative Position eines Workcenters im Netzwerk wird durch den durchschnittlichen Fertigstellungsgrad der Aufträge, welche durch das Workcenter bearbeitet werden, erfasst. Die Kennzahl durchschnittlicher Fertigstellungsgrad der Fertigungsaufträge eines Workcenters wird nach Formel (3.10) berechnet.

$$POP_k = \frac{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} \left(\frac{SQ_{po,op}}{SQ_{po,op}} \cdot QPO_{po,op} \right)}{\sum_{po=1}^{PO} \sum_{op=1}^{OP} QPO_{po,op}} \quad (3.10)$$

Es bedeutet:

POP_k Durchschnittlicher Fertigstellungsgrad der Fertigungsaufträge des Workcenters k

PO Anzahl der Fertigungsaufträge des Workcenters k

OP Anzahl der Prozessschritte, welche dem Workcenter k zugeordnet sind

sq Position des Prozessschritts in der Sequenz laut Arbeitsplan

SQ Gesamtanzahl der Prozessschritte der Sequenz laut Arbeitsplan

QPO Mengenmäßige Auftragsgröße des Fertigungsauftrags

Die Kennzahl Montagewahrscheinlichkeit eines Workcenters wird gemäß Formel (3.11) bestimmt.

$$PA_k(N_{comp}) = \begin{cases} 0: N_{comp} = 1 \\ 1: N_{comp} \geq 2 \end{cases} \quad (3.11)$$

Es bedeutet:

$PA_k(N_{comp})$Montagewahrscheinlichkeit des Workcenters k

N_{comp} Anzahl der benötigten Bauteile

Klassifizierung der Workcenter

Es findet pro Indikator eine Zuordnung der Workcenter anhand des Indikatorwertes zu Klassen statt, welche repräsentieren, inwieweit ein Workcenter kritisch ist. Die Definition der Klassengrenzen erfolgt nicht unabhängig von der Verteilung der Indikatorwerte, etwa durch Festlegung von Klassen mit jeweils gleicher Spannweite. Vielmehr findet dabei die Verteilung der Werte der Indikatoren Berücksichtigung. Über die Verteilung der Indikatorwerte kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, das heißt, es kann zum Beispiel nicht generell von einer Gleichverteilung ausgegangen werden. Eine Methode zur Klassifizierung der Workcenter unter Berücksichtigung der fallspezifischen Verteilung der Werte ist die Clusteranalyse. Bei der Clusteranalyse wird eine Menge von Elementen anhand einer oder mehrerer definierter Variablen in Gruppen eingeteilt, sodass die Elemente innerhalb der Gruppen möglichst ähnlich und die Gruppen zueinander möglichst verschieden sind.

In der Fallstudie erfolgt eine Durchführung einer Clusteranalyse mit dem Statistikprogramm SPSS (Version 11). Es wird pro Indikator die Prozedur Two-Step-Clusteranalyse angewandt, wobei ein euklidisches Distanzmaß und eine feste Anzahl von fünf Clustern definiert sind. Als Ergebnis der Clusteranalyse ist für jedes Workcenter bekannt, zu welcher der Klassen A, B, C, D und E dieses bezüglich des Indikators Anteil der Wertschöpfungszeit, Anteil der Herstellkosten, Durch-

laufzeiteffizienz, Auslastung, Position im Netzwerk und Wahrscheinlichkeit für Montage zugehörig ist. Die Klassen repräsentierten in aufsteigender alphabetischer Reihenfolge zunehmend kritischere Workcenter.

Bestimmung der kritischen Workcenter

Zur Unterscheidung zwischen kritischen und nicht-kritischen Workcentern werden KO-Kriterien angewandt. Für jedes Workcenter wird geprüft, ob mindestens einer der Indikatoren einer als kritisch definierten Klasse angehört. In diesem Fall ist das Workcenter kritisch und für eine vereinfachte Modellierung zum Zweck der Komplexitätsreduktion nicht geeignet. Je nach Definition der Menge der kritischen Klassen wird ein unterschiedlich hoher Grad an Komplexitätsreduktion erreicht. Es ist eine Frage des Ausgleiches zwischen Aufwand und Ergebnisgüte, inwieweit das Simulationsmodell vereinfacht wird. Im Rahmen der Fallstudie werden verschiedene Grade der Komplexitätsreduktion im Simulationsmodell umgesetzt, damit Auswirkungen auf die Modellgüte dargestellt werden können.

Kriterium zur Komplexitätsreduktion	Nicht-kritische Workcenter	Komplexitätsreduktion
Jeder Indikator \notin {B, C, D, E}	0	0 %
Jeder Indikator \notin {C, D, E}	6	9 %
Jeder Indikator \notin {D, E}	19	29 %
Jeder Indikator \notin {E}	38	58 %

Tabelle 9: Ergebnis der Komplexitätsreduktion

Tabelle 9 zeigt das Ergebnis der Komplexitätsreduktion, wobei der Grad der Komplexitätsreduktion als Anteil nicht-kritischer Workcenter an der Gesamtzahl der Workcenter ausgedrückt wird. Werden die Klassen B, C, D und E als kritisch definiert, so trifft für kein Workcenter die Bedingung zu, dass kein Indikator einer kritischen Klasse angehört. Werden hingegen nur die Klassen C, D und E als kritisch definiert, so können sechs Workcentern identifiziert werden, für die kein Indikator diesen Klassen angehört. Das heißt sechs von 65 Workcentern sind nicht-kritisch, was einer Komplexitätsreduktion von neun Prozent entspricht. Eine weitere Einschränkung der kritischen Klassen steigert die Komplexitätsreduktion auf 29 beziehungsweise 58 Prozent.

3.6 Simulationsmodell

Den Kern zur Analyse der Leistungserstellungsprozesse der Supply Chain bildet ein Simulationsmodell. Im Folgenden wird die Erstellung sowie die Verifizierung und Validierung des Simulationsmodells behandelt. Anschließend werden das experimentelle Design und die Ergebnisanalyse der Simulation erörtert.

3.6.1 Modellerstellung

In der Fallstudie wird ein Simulationsmodell zur Untersuchung alternativer Prozessdesigns der Supply Chain erstellt, welches diskret, ereignisorientiert, dynamisch und stochastisch ist. Die Implementierung erfolgt mit der Software ARENA (Version 7.1 Professional) der Firma Rockwell Automation, einem Simulationstool, welches auf der Simulationssprache SIMAN basiert und unter Microsoft Windows betrieben wird. Eine Verwaltung der notwendigen Input- und Outputdaten erfolgt mit Microsoft Excel, wobei ein Datenaustausch während der Simulation zwischen Excel und ARENA realisiert wird.

Die Simulationssoftware ARENA lässt sich folgendermaßen charakterisieren [vgl. ARENA (1995), S. 1ff.; Rockwell Automation (2007), URL]: ARENA folgt einer prozessorientierten Sichtweise und eignet sich insbesondere zur Analyse von betrieblichen und überbetrieblichen Geschäftsprozessen. In ARENA erstellte Modelle können stochastisch Variablen enthalten, wozu eine Sammlung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung steht. Die Software unterstützt die Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine statistische Analyse der Inputdaten. Ein Simulationsmodell wird über ein grafisches Interface durch Anordnung von Modulen und Eingabe von Daten und Logik erstellt, wobei zur Wahrung der Übersichtlichkeit ein hierarchischer Modellaufbau möglich ist. Vordefinierte Module stehen in unterschiedlichen Abstrahierungsgraden zur Verfügung und reichen von einzelnen SIMAN-Befehlen bis zu umfassenden Modellkonstrukten. Eine Stärke von ARENA liegt darin, dass sich der Benutzer auf die Modellerstellung mittels einer grafischen Oberfläche konzentrieren kann und die Software den entsprechenden SIMAN-Code automatisch generiert. Weiters ist das Computerprogramm zu einer animierten Darstellung von Simulationen in der Lage, was zur Verständnisförderung und Fehlersuche dienlich ist. Vor dem Start eines Simulationslaufes wird eine automatische Modellverifikation durchgeführt. Neben Funktionalitäten zur Modellerstellung und Simulation stehen Möglichkeiten zur statistischen Auswertung der Outputdaten zur Verfügung.

ARENA wird für die Umsetzung der Fallstudie gewählt, da das Programm eine prozessorientierte Sichtweise unterstützt und eine gute Bedienbarkeit bietet. Im

Rahmen der Fallstudie ist die Software stark gefordert, da bewusst auch ein Modell simuliert wird, welches keine Vereinfachung durch den Schritt Komplexitätsreduktion erfährt. Durch Gegenüberstellung des nicht vereinfachten und vereinfachten Modells wird die Wirksamkeit des Schrittes Komplexitätsreduktion analysiert. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Software ARENA den Anforderungen der Fallstudie sehr gut gerecht wird.

Im Folgenden werden die Inputdaten, der Aufbau und die Outputdaten des Modells beschrieben.

3.6.1.1 Inputdaten

Inputdaten des Simulationsmodells sind Daten, welche vor dem Simulationslauf festgelegt werden. Sie können folgendermaßen unterschieden werden:

- Daten zur Steuerung des Simulationsmodells: Globale Modelldaten.
- Stammdaten des Prozesses: Stücklistendaten, Arbeitsplandaten, Ressourcendaten, Kostendaten und Fertigungsdaten.
- Bewegungsdaten des Prozesses: Kundenauftragsdaten.

Es werden nun die einzelnen Inputdaten des Simulationsmodells erörtert. Dabei werden auch die jeweiligen Konstrukte angegeben, mit welchen die Daten in ARENA implementiert werden.

Globale Modelldaten

- Ende der Warm-up-Periode: Es wird eine Warm-up-Periode zu Beginn des Simulationslaufes definiert, um den Einfluss des Ausgangszustandes des Modells, welcher nicht der Realität entspricht, zu eliminieren. Die Aufzeichnung der Outputdaten beginnt erst nach dem Ende der Warm-up-Periode. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- Replikationsanzahl: Anzahl wiederholter Simulationsläufe eines Szenarios. (ARENA-Konstrukt: Replication-Parameter)
- Replikationslänge: Simulierter Zeitraum des Systems. (ARENA-Konstrukt: Replication-Parameter)

Stücklistendaten

- **Stücklistenstruktur:** Zuordnung von Komponenten zu Produkten, wobei jeweils die Mengen angegeben sind. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)

Arbeitsplandaten

- **Sequenz:** Zuordnung von Arbeitsschritten zu Arbeitsplänen in Form einer n:1-Beziehung und Definition der Reihenfolge, in der die Arbeitsschritte abgearbeitet werden. (ARENA-Konstrukt: Sequence)
- **Workcenter-Zuordnung:** Zuordnung von Workcentern zu Arbeitsschritten in Form einer 1:n-Beziehung. (ARENA-Konstrukt: Sequence)
- **Rüstzeit:** Zeit für das Vorbereiten eines Workcenters für die Bearbeitung gleichartiger Produkte beziehungsweise Komponenten. (ARENA-Konstrukt: Sequence)
- **Bearbeitungszeit:** Zeit für das Ausführen eines Arbeitsschrittes zur Wertsteigerung. (ARENA-Konstrukt: Sequence)
- **Konstante Wartezeit:** Konstante Zeit für kapazitätsbedingtes Warten für vereinfacht modellierte Prozessschritte. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)

Ressourcendaten

- **Anzahl paralleler Ressourcen:** Anzahl gleichartiger Betriebsmittel, welche ein Workcenter bilden und Fertigungsaufträge parallel bearbeiten können. (ARENA-Konstrukt: Schedule)
- **Theoretische Verfügbarkeit:** Zeitbereiche, in denen das Workcenter planmäßig zur Verfügung steht. (ARENA-Konstrukt: Schedule)
- **Mean Time to Failure:** Mittlere Dauer, in der ein Workcenter ohne unplanmäßigen Ausfall zur Verfügung steht. (ARENA-Konstrukt: Failure)
- **Mean Time to Repair:** Mittlere Dauer zur Wiederherstellung der Verfügbarkeit eines Workcenters nach einem unplanmäßigen Ausfall. (ARENA-Konstrukt: Failure)

Kostendaten

- **Materialkosten:** Produktbezogene Kosten für Rohmaterial. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)
- **Zeitabhängiger Kostensatz:** Beschreibt die Kostenkomponente eines Workcenters, welche durch die Nutzungszeit bestimmt wird. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)
- **Mengenabhängiger Kostensatz:** Beschreibt die Kostenkomponente eines Workcenters, welche durch die bearbeitete Menge an Produkten oder Komponenten bestimmt wird. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)

Fertigungsdaten

- **Belegungsfaktor:** Ein Workcenter ist ein Pool gleichartiger Betriebsmittel. Der Belegungsfaktor gibt für jedes Workcenter an, wie viele Betriebsmittel maximal durch einen Auftrag simultan belegbar sind. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)
- **Rüstwaahrscheinlichkeitsfaktor:** Dient der vereinfachten Modellierung der Rüstnotwendigkeit. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- **Abweichungsfaktor der Rüstzeit:** Dient zur Bestimmung variabler Rüstzeiten. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- **Prognosen-Pooling-Faktor:** Dient zur Bestimmung des Einlastungszeitpunkts prognosegetriebener Aufträge in die Fertigung. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- **Vorlaufzeit:** Dient zur Bestimmung des Einlastungszeitpunkts prognosegetriebener Aufträge in die Fertigung. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- **Make-to-Stock-Fähigkeit:** Klassifiziert die Produkte nach dem Kriterium, ob prognosegetriebene Produktion möglich ist. (ARENA-Konstrukt: Multi-dimensional Variable)
- **Bestellzeitpunktfehlerfaktor:** Dient zur Berechnung des Prognosefehlers des Bestellzeitpunkts. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- **Lieferzeitpunktfehlerfaktor:** Dient zur Berechnung des Prognosefehlers des gewünschten Lieferzeitpunkts. (ARENA-Konstrukt: Variable)
- **Mengenfehlerfaktor:** Dient zur Berechnung des Prognosefehlers der Bestellmenge. (ARENA-Konstrukt: Variable)

Kundenauftragsdaten

- **Bestellzeitpunkt:** Zeitpunkt des Einganges eines Kundenauftrags. (ARENA-Konstrukt: Attribute)
- **Produkt:** Bestelltes Produkt eines Kundenauftrags. (ARENA-Konstrukt: Attribute)
- **Bestellmenge:** Anzahl bestellter Panels eines Kundenauftrags. Ein Panel umfasst rund 40 Leiterplatten, wobei eine Leiterplatte in eine Einheit des erzeugten Endprodukts des jeweiligen Original Equipment Produzenten eingeht. (ARENA-Konstrukt: Attribute)
- **Vereinbarter Lieferzeitpunkt:** Zeitpunkt, zu dem die Lieferung des Produkts dem Kunden zugesagt ist. (ARENA-Konstrukt: Attribute)

3.6.1.2 Modellaufbau

In Abbildung 8 ist stark vereinfacht die Struktur des Simulationsmodells dargestellt.

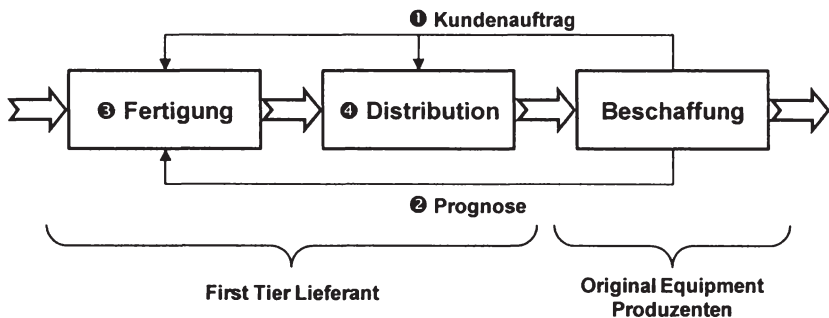


Abbildung 8: Struktur des Simulationsmodells

Der betrachtete Materialfluss findet stromabwärts in der Supply Chain über die Schritte Fertigung und Distribution des First Tier Lieferanten sowie den Schritt Beschaffung der Original Equipment Produzenten statt. Der Informationsfluss stromaufwärts in der Supply Chain ist eine Wirkung der Beschaffungsprozesse der Original Equipment Produzenten und umfasst Kundenaufträge sowie Prognosen über das zukünftige Nachfrageverhalten. Die Kundenaufträge beeinflussen bei

auftragsgetriebener Produktion die Prozesse der Fertigung und Distribution und bei prognosegetriebener Produktion die Prozesse der Distribution sowie, abhängig vom Lagerstand des Endproduktes, gegebenenfalls jene der Fertigung. Bei prognosegetriebener Produktion werden die Prozesse der Fertigung darüber hinaus durch die Prognosen bestimmt.

Die zu analysierenden Szenarien erfordern ein Modell, welches eine Variation der Kapazitäten und des Entkopplungspunkts erlaubt. Die Anpassung der Kapazitäten erfolgt in der Modellkomponente Fertigung. Die Gestaltung des Entkopplungspunkts betrifft die Modellkomponenten Kundenauftrag, Prognose, Fertigung und Distribution. Im Folgenden werden die genannten vier Modellkomponenten des Simulationsmodells erörtert, wobei sich die Beschreibungen auf die grundlegenden Zusammenhänge beschränken. Danach wird speziell auf die Modellierung von Risiken eingegangen.

Kundenauftrag

- Anhand der Daten, welche die Nachfrage der Original Equipment Produzenten beschreiben, werden in ARENA Entitäten generiert, welche Kundenaufträge repräsentieren. Die Kundenaufträge enthalten Informationen zum Bestellzeitpunkt, zum bestellten Produkt, zur Bestellmenge und zum gewünschten Lieferzeitpunkt.
- Zum Zeitpunkt der Bestellung wird der Kundenauftragsbestand erhöht. Anschließend wird geprüft, ob eine Fertigung des Produkts erforderlich ist. Sofern der Kundenauftragsbestand die Summe aus mengenmäßigem Lagerstand und Produktionsauftragsbestand übersteigt, ist eine Produktion notwendig und es werden die Informationen des Kundenauftrags an die Fertigung weitergeleitet.
- Zum gewünschten Lieferzeitpunkt werden die Informationen des Kundenauftrags an die Distribution weitergeleitet.

Prognose

- Es wird geprüft, ob ein Produkt für prognosegetriebene Produktion freigegeben ist. Im zutreffenden Fall werden Prognosen über die zukünftige Nachfrage erstellt. Dazu werden Entitäten generiert, welche Prognosen repräsentieren. Eine Prognose enthält Informationen zum bestellten Produkt, zur Bestellmenge und zum gewünschten Lieferzeitpunkt. Die Erstellung der Prognosen im Simulationsmodell erfolgt anhand der Daten der tatsächlichen Nachfrage der Original Equipment Produzenten. Da eine Prognose mit Risiko behaftet ist,

werden die Daten bezüglich der Bestellmenge und des gewünschten Lieferzeitpunkts, wie weiter unten beschrieben, angepasst. Der Zeitpunkt der Erstellung einer Prognose wird durch den Prognosehorizont bestimmt. Der Prognosehorizont ist die Zeitspanne zwischen der Erstellung einer Prognose und dem prognostizierten Bestellzeitpunkt. Da der prognostizierte Zeitpunkt der Bestellung risikoabhängig ist, wird der Erstellungszeitpunkt einer Prognose, wie weiter unten beschrieben, stochastisch modelliert.

- Die Prognosen werden gesammelt und nach Produkten gruppiert. Ziel ist es, dass möglichst große Losgrößen eines Produktes gefertigt werden können, um den Rüstaufwand zu reduzieren. Dazu werden die prognostizierten Aufträge gleicher Produkte so lange verzögert, bis eine als Prognosen-Pooling-Faktor vorab festgelegte Anzahl prognostizierter Aufträge gleicher Produkte erreicht wird. Dann werden die Prognosen an die Fertigung weitergeleitet.

Fertigung

- Ein Fertigungsauftrag beinhaltet Informationen zum Produkt, zur Produktionsmenge und zur Priorität. Bei auftragsgetriebenen Fertigungsaufträgen wird das zu produzierende Produkt durch den Kundenauftrag spezifiziert. Die Produktionsmenge errechnet sich aus dem Kundenauftragsbestand abzüglich des mengenmäßigen Lagerstands sowie abzüglich des Produktionsauftragsbestands für das entsprechende Produkt. Die ordinal skalierte Priorität eines Fertigungsauftrags entspricht dem negativen gewünschten Lieferzeitpunkt des Kundenauftrags. Bei prognosegetriebenen Fertigungsaufträgen definiert die Prognose das zu produzierende Produkt. Die Produktionsmenge ist gleich der prognostizierten Bestellmenge, und die Priorität entspricht dem negativen prognostizierten gewünschten Lieferzeitpunkt. Im Simulationsmodell werden Fertigungsaufträge der Produkte durch Konvertierung von Entitäten, welche Kundenaufträge beziehungsweise Prognosen repräsentieren, erstellt. Die Generierung von Fertigungsaufträgen bedingt eine Erhöhung des Produktionsauftragsbestands.
- Anhand der Stückliste des Produktes wird geprüft, ob eine Fertigung von Komponenten notwendig ist. Im zutreffenden Fall wird, je erforderlicher Komponente, ein Fertigungsauftrag mit der entsprechenden Bedarfsmenge dem Simulationsmodell als neue Entität zugeführt. Die Priorität dieser Aufträge entspricht jener des Produktes, für welche die Komponenten benötigt werden.
- Anschließend werden die Fertigungsaufträge eingelastet, das heißt, sie werden anhand des Arbeitsplanes des entsprechenden Produkts beziehungsweise der entsprechenden Komponente an das den ersten Arbeitsschritt ausführende

Workcenter geleitet. Es sind dabei folgende zwei Fälle zu unterscheiden: (1) Fertigungsaufträge für Produkte, welche keine Komponenten umfassen, werden direkt zum Fertigen weiter geleitet. Bei Produkten, welche Komponenten umfassen, trifft dies ebenfalls für die Fertigungsaufträge der Komponenten zu. Das Weiterleiten zum Fertigen bedingt jeweils eine Erhöhung des Work in Progress-Bestands des jeweiligen Produkts (beziehungsweise der jeweiligen Komponente), des Work in Progress-Bestands des jeweiligen Auftrags sowie der gesamten Herstellkosten um die entsprechenden Materialkosten. (2) Für Fertigungsaufträge der Produkte, welche Komponenten umfassen, ist folgender Ablauf definiert. Die Fertigungsaufträge der Produkte werden erst weitergeleitet, wenn sämtliche Komponenten in der erforderlichen Menge vorrätig sind. Die Prüfung, ob die Komponenten lagernd sind, wird bei Eingang des Fertigungsauftrags des Produkts durchgeführt. Eine erneute Prüfung wird durch eine Erhöhung des Lagerbestands der Komponenten ausgelöst. Warten mehrere Fertigungsaufträge für Produkte auf Komponenten, so findet eine Reihung anhand der Priorität des Fertigungsauftrags statt. Die Priorität eines prognosegetriebenen Fertigungsauftrags wird aktualisiert, indem geprüft wird, ob ein prognostizierter Kundenauftrag bereits real eingegangen ist und somit der real gewünschte Lieferzeitpunkt bekannt ist. In diesem Fall wird die Priorität des Fertigungsauftrags durch den negativen real gewünschten Lieferzeitpunkt ersetzt. Wenn der Lagerstand aller für ein Produkt erforderlichen Komponenten ausreichend ist, wird der Fertigungsauftrag des Produkts zum Fertigen geleitet und der mengenmäßige Lagerstand der Komponenten entsprechend reduziert. Außerdem werden der Work in Progress-Bestand des jeweiligen Produkts, der Work in Progress-Bestand des jeweiligen Auftrags, sowie die gesamten Herstellkosten um die entsprechenden Materialkosten erhöht. Zudem bedingt das Weiterleiten zum Fertigen eine Erhöhung des Work in Progress-Bestands des jeweiligen Produkts und des Work in Progress-Bestands des jeweiligen Auftrags um den Wert der zugeordneten Komponenten.

- Das Produktionssystem ist als Netzwerk von Workcentern gestaltet, zwischen denen ein flexibler Fluss von Fertigungsaufträgen statt findet. Es sind somit auch Schleifen zur planmäßigen Wiederholung von Arbeitsschritten möglich. In ARENA wird die Modellierung unter anderem mit den Konstrukten Station, Route und Sequence umgesetzt. Je nach gewählter Realitätsnähe ist zwischen folgenden zwei Fällen zu unterscheiden: (1) Im ersten Fall werden Workcenter ohne Komplexitätsreduktion als einer Aktivität zugewiesene Ressource modelliert. Die Verfügbarkeit der Ressourcen wird durch planmäßige und unplanmäßige Ereignisse bestimmt. Die planmäßige Verfügbarkeit ist als Schichtplan pro Workcenter in Form des ARENA-Konstrukts Schedule berücksichtigt. Das Risiko des unplanmäßigen Ausfalles von Workcentern wird mit dem ARENA-Konstrukt Failure modelliert. Die Ressource kann, entsprechend der zugewie-

senen Anzahl an Betriebsmitteln des Workcenters, mehrere Mengeneinheiten der Produkte oder der Komponenten gleichzeitig bearbeiten. Fertigungsaufträge, welche im Workcenter einlangen, warten auf freie Kapazitäten in einer gemeinsamen Warteschlange, wobei der Puffer für eingehende Aufträge unbegrenzt ist. Die Fertigungsaufträge werden dann anhand ihrer zugewiesenen Prioritäten abgearbeitet. Für jedes Workcenter ist die Anzahl der maximal durch einen Auftrag belegbaren Betriebsmittel festgelegt, womit auch eine parallele Bearbeitung mehrerer Aufträge möglich ist. Neben Zeiten für kapazitätsbedingtes Warten, sind Rüst- und Bearbeitungszeiten zu berücksichtigen. Für die Determinierung der Rüstzeiten ist einerseits die Rüstnotwendigkeit relevant, welche durch die Variabilität der ankommenden Produkte und Komponenten bestimmt wird. Andererseits ist die Dauer des Rüstens vom entsprechenden Arbeitsschritt des Produkts beziehungsweise der Komponente sowie von risikobedingten Schwankungen abhängig. Die Modellierung der Rüstzeiten wird weiter unten detaillierter beschrieben. Die Bearbeitungszeiten sind für jeden Arbeitsschritt des Produkts beziehungsweise der Komponente festgelegt, wobei risikobedingte Schwankungen wegen des hohen Automatisierungsgrades der Fertigung vernachlässigbar sind. (2) Der zweite Fall betrifft komplexitätsreduzierte Workcenter, wo Aktivitäten ohne Ressourcenzuweisung modelliert werden. Die Durchlaufzeit setzt sich hier aus einer konstanten Wartezeit sowie der Rüst- und Bearbeitungszeit zusammen. Für die Rüst- und Bearbeitungszeiten gilt das Gleiche, wie für Workcenter ohne Komplexitätsreduktion. In jedem Fall werden nach Abschluss der Bearbeitung im Workcenter der Work in Progress-Bestand des jeweiligen Produkts (beziehungsweise der jeweiligen Komponente), der Work in Progress-Bestand des jeweiligen Auftrags sowie die gesamten Herstellkosten um die bei der Bearbeitung im Workcenter entstandenen zeit- und mengenabhängigen Fertigungskosten erhöht. Weiters wird zur Aktualisierung der Priorität eines prognosebasierenden Fertigungsauftrags geprüft, ob ein prognostizierter Kundenauftrag real eingegangen ist und somit der real gewünschte Lieferzeitpunkt bekannt ist, um die Priorität des Fertigungsauftrags durch den negativen real gewünschten Lieferzeitpunkt zu ersetzen. Abschließend wird der Fertigungsauftrag des Produkts oder der Komponente gemäß der Sequenz des entsprechenden Arbeitsplans an das nächste Workcenter weitergeleitet.

- Nachdem der letzte Arbeitsschritt laut Arbeitsplan ausgeführt ist, werden die Herstellkosten eines Produktes (beziehungsweise einer Komponente), welche zur Berechnung der Work in Progress-Bestände erforderlich sind, gemäß Formel (3.12) aktualisiert.

$$C_t^p = \frac{C_{t-1}^p \cdot Q_t^p + I_t^{po}}{Q_t^p + Q^{po}} \quad (3.12)$$

Es bedeutet:

C_t^p Herstellkosten einer Einheit des Produkts (oder der Komponente) p
zum Zeitpunkt t

Q_t^p Mengenmäßiger Lagerstand des Produkts (oder der Komponente) p
zum Zeitpunkt t

I_t^{po} Wertmäßiger Work in Progress-Bestand des Produktionsauftrags po
zum Zeitpunkt t

Q^{po} Produktionsmenge des Produktionsauftrags po

- Nun wird der Fertigungsauftrag ausgelastet. Der Work in Progress-Bestand des jeweiligen Produkts (beziehungsweise der jeweiligen Komponente) wird um den Work in Progress-Bestand des jeweiligen Auftrags verringert. Außerdem wird der mengenmäßige Lagerstand des Produkts beziehungsweise der Komponente entsprechend erhöht. Im Fall von Fertigungsaufträgen für Produkte wird darüber hinaus der Produktionsauftragsbestand verringert.

Distribution

- Bei Eingang eines Kundenauftrags wird geprüft, ob der mengenmäßige Lagerstand des Endprodukts zur Erfüllung des Kundenauftrags ausreichend ist. Ist dieser zu niedrig, findet eine erneute Prüfung jeweils bei einer positiven Änderung des Lagerstands statt. Warten mehrere Kundenaufträge auf ihre Erfüllung, so findet eine Reihung anhand der gewünschten Lieferzeit statt, das heißt, der Kundenauftrag mit der frühesten gewünschten Lieferzeit genießt die höchste Priorität.
- Bei einem ausreichenden mengenmäßigen Lagerstand wird der Kundenauftrag durch die Lieferung an den Original Equipment Produzenten abgeschlossen und der mengenmäßige Lagerstand sowie der Kundenauftragsbestand entsprechend verringert. Abschließend wird die Durchlaufzeit des Kundenauftrags protokolliert und festgehalten, ob der Kundenauftrag rechtzeitig erfüllt wurde.

Modellierung von Risiken

Im Folgenden wird die Modellierung von Risiken bezüglich der Nachfrage, der Zeiten des Prozesses und der Ressourcenverfügbarkeit näher beleuchtet.

Die Simulation der Nachfrage erfolgt anhand historischer Werte der Realität. Die Prognosen der Nachfrage sind mit Risiko behaftet und werden stochastisch modelliert. Die Prognose für ein bestimmtes Produkt kann vom realen Kundenauftrag bezüglich der Bestellmenge und dem gewünschten Lieferzeitpunkt abweichen. Da es sich beim Szenario Reorganisation um ein potenzielles, real nicht existierendes Prozessdesign handelt, müssen Annahmen zur Modellierung der Prognosefehler getroffen werden. „The triangular distribution is commonly used in situations in which the exact form of the distribution is not known, but estimates (or guesses) for the minimum, maximum and the most likely values are available“ [Kelton et al. (2002), S. 596]. Daher wird im Rahmen der Fallstudie insbesondere von der Dreiecksverteilung zur Beschreibung von Risiken Gebrauch gemacht.

Da keine detaillierten Informationen über die Prognosemenge zur Verfügung stehen, wird diese vereinfacht als dreiecksverteilt abgebildet, wobei der wahrscheinlichste Wert der tatsächlichen Bestellmenge entspricht. Für die minimal beziehungsweise maximal mögliche Abweichung von der tatsächlichen Bestellmenge wird ein größtmöglicher Prognosefehler bestimmt. Dieser steht in einer linearen Beziehung zum Prognosehorizont. Negative Prognosemengen sind ausgeschlossen. In der Regel wird ein Vielfaches fixer Bestelleinheiten geordert, weshalb die Prognosemenge entsprechend angepasst wird. Die Berechnung der Prognosemenge folgt somit Formel (3.13).

$$QF = BQCO \cdot \text{round} \left(\frac{X}{BQCO} \right) \quad (3.13)$$

wobei

$$X \sim \text{TRIANGULAR}(\text{minimum}, \text{mode}, \text{maximum})$$

mit

$$\text{minimum} = \max(QCO - QCO \cdot eqco \cdot ft, 0)$$

$$\text{mode} = QCO$$

$$\text{maximum} = QCO + QCO \cdot eqco \cdot ft$$

Es bedeutet:

QF Prognosemenge

$BQCO$ Bestelllosgröße

$round(x)$ Runden auf die nächstliegende ganze Zahl

QCO Bestellmenge des Kundenauftrags

$eqco$ Fehlerfaktor bezüglich der Bestellmenge

ft Prognosehorizont

Der prognostizierte gewünschte Lieferzeitpunkt wird vereinfacht anhand einer Dreiecksverteilung modelliert, wobei der wahrscheinlichste Wert dem tatsächlichen, gewünschten Lieferzeitpunkt entspricht. Die minimal beziehungsweise maximal mögliche Abweichung vom tatsächlichen Lieferzeitpunkt wird durch den größtmöglichen Prognosefehler bestimmt, welcher in einer linearen Beziehung zum Prognosehorizont steht. Zudem kann ein prognostizierter Lieferzeitpunkt nicht vor dem Zeitpunkt der Prognoseerstellung liegen. Der prognostizierte gewünschte Lieferzeitpunkt errechnet sich folglich gemäß Formel (3.14).

$$t_{rf} = X \tag{3.14}$$

wobei

$$X \sim \text{TRIANGULAR}(\text{minimum}, \text{mode}, \text{maximum})$$

mit

$$\text{minimum} = \max(t_r - et_r \cdot ft, t_f)$$

$$\text{mode} = t_r$$

$$\text{maximum} = t_r + et_r \cdot ft$$

Es bedeutet:

t_{rf} Prognostizierter gewünschter Lieferzeitpunkt

t_r Gewünschter Lieferzeitpunkt

et_r Fehlerfaktor bezüglich des gewünschten Lieferzeitpunkts

ftPrognosehorizont

t_f Zeitpunkt der Prognoseerstellung

Darüber hinaus ist der Erstellungszeitpunkt einer Prognose zu bestimmen, welcher als Differenz von prognostiziertem Bestellzeitpunkt und Prognosehorizont ermittelt wird. Der prognostizierte Bestellzeitpunkt wird vereinfacht als dreiecksverteilt angenommen. Der wahrscheinlichste Wert entspricht dem tatsächlichen Bestellzeitpunkt, und die minimale beziehungsweise maximale Abweichung vom tatsächlichen Bestellzeitpunkt wird durch den größtmöglichen Prognosefehler determiniert. Der Prognosefehler steht dabei in einer linearen Beziehung zum Prognosehorizont. Der Erstellungszeitpunkt einer Prognose liegt stets vor dem entsprechenden Bestellzeitpunkt. Die Berechnung erfolgt gemäß Formel (3.15).

$$t_f = \min(X - ft, t_{co}) \quad (3.15)$$

wobei

$$X \sim \text{TRIANGULAR}(\text{minimum}, \text{mode}, \text{maximum})$$

mit

$$\text{minimum} = t_{co} - et_{co} \cdot ft$$

$$\text{mode} = t_{co}$$

$$\text{maximum} = t_{co} + et_{co} \cdot ft$$

Es bedeutet:

t_f Erstellungszeitpunkt der Prognose

ftPrognosehorizont

t_{co}Bestellzeitpunkt

et_{co}Fehlerfaktor bezüglich des Bestellzeitpunkts

Die Zeiten für Rüsten und Bearbeiten variieren in Abhängigkeit vom auszuführenden Arbeitsschritt. Darüber hinaus sind die Rüstzeiten eines Arbeitsschritts nicht konstant, sondern schwanken bei jeder Ausführung. Die Bearbeitungszeiten werden hingegen deterministisch modelliert, da Variabilität wegen des hohen Automatisierungsgrads vernachlässigbar ist. Die Mittelwerte der Rüstzeiten sind pro

Arbeitsschritt bekannt, über die Verteilung der Rüstdauer eines bestimmten Arbeitsschritts liegen jedoch keine detaillierten Informationen vor. Eine Erhebung der Verteilungen für rund 24000 Prozessschritte ist jedoch nicht praktikabel, weshalb die Rüstzeiten vereinfacht anhand einer Dreiecksverteilung mit folgenden Parametern beschrieben werden. Der wahrscheinlichste Wert ist die mittlere Rüstzeit des entsprechenden Arbeitsschritts. Der minimal beziehungsweise maximal mögliche Wert weicht anteilmäßig von der mittleren Rüstzeit negativ beziehungsweise positiv ab. Ein Abweichungsfaktor wird durch Prozessverantwortliche einheitlich für die gesamte Fertigung geschätzt. Die effektive Rüstzeit ist das Produkt aus der beschriebenen Rüstzeit und der Rüstnotwendigkeit, wobei die Rüstnotwendigkeit den Wert eins oder null annehmen kann. Die Rüstnotwendigkeit wird in der Realität durch die Reihenfolge der Fertigungsaufträge bestimmt. Bei unmittelbarem Aufeinanderfolgen von zwei Fertigungsaufträgen mit identischen Arbeitsschritten in einem Workcenter ist für den zweiten Fertigungsauftrag Rüsten nicht erforderlich. Auf eine detaillierte Modellierung der Rüstnotwendigkeit wird zugunsten der Modellvereinfachung verzichtet. Die Rüstnotwendigkeit wird daher stochastisch modelliert und folgt vereinfacht einer diskreten Verteilung, welche mit einer Rüstwahrscheinlichkeit den Wert eins und ansonsten den Wert null annimmt. Es wird für jeden Fertigungsauftrag bei dessen Einlastung in die Produktion bestimmt, ob sich das zu produzierende Produkt (beziehungsweise die zu produzierende Komponente) vom Produkt (beziehungsweise von der Komponente) des unmittelbar zuvor eingelaseten Fertigungsauftrags unterscheidet. Im zutreffenden Fall ist die Rüstwahrscheinlichkeit des Fertigungsauftrags bei sämtlichen Arbeitsschritten gleich dem Rüstwahrscheinlichkeitsfaktor, der global für die Fertigung festgelegt ist. Ansonsten ist die Rüstwahrscheinlichkeit gleich eins minus Rüstwahrscheinlichkeitsfaktor. Im Ergebnis gilt Formel (3.16) für die Berechnung der effektiven Rüstzeit.

$$TR = X \cdot Y \quad (3.16)$$

wobei

$$X \sim \text{TRIANGULAR}(\textit{minimum}, \textit{mode}, \textit{maximum})$$

mit

$$\textit{minimum} = \max(TS - TS \cdot v_{ts}, 0)$$

$$\textit{mode} = TS$$

$$\textit{maximum} = TS + TS \cdot v_{ts}$$

und

$$Y \sim p(x) = \begin{cases} PS & \text{für } x = 1 \\ 1 - PS & \text{für } x = 0 \end{cases}$$

Es bedeutet:

TReffektive Rüstzeit

TSMittlere Rüstzeit

v_{ts} Abweichungsfaktor der Rüstzeit

PSRüstwahrscheinlichkeit

Risiken spielen überdies für die Ressourcenverfügbarkeit eine wichtige Rolle. Neben der planmäßigen Verfügbarkeit der Workcenter werden im Modell unplanmäßige Ausfälle berücksichtigt, welche die Performance des Prozesses maßgebend beeinflussen. Für jedes Workcenter wird einerseits eine exponentialverteilte Mean Time to Failure, mit der mittleren Zeit zwischen zwei Ausfällen als Parameterwert, definiert. Andererseits wird die Zeitspanne zur Behebung der Ursache eines Ausfalles als dreiecksverteilte Mean Time to Repair, mit minimaler, wahrscheinlichster und maximaler Dauer als Parameterwerte, approximiert.

3.6.1.3 Outputdaten

Im Simulationsmodell ist eine Schnittstelle zwischen ARENA und Microsoft Excel zum Export der Outputdaten implementiert. Hierzu finden die ARENA-Konstrukte File und Read-Write Anwendung. Die Kennzahlen werden teils während der Simulation berechnet und laufend exportiert und teils mittels des ARENA-Konstrukts Statistic definiert und am Ende der Simulationsläufe berechnet und exportiert. Die Werte repräsentieren entweder einen nach der Zeit gewichteten Durchschnitt oder den Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt. Der Output des Simulationsmodells umfasst fünf Kennzahlen mit folgenden Charakteristiken:

- Liefertreue: Wert pro Replikation, Berechnung am Ende des Simulationslaufs.
- Kundenauftragsdurchlaufzeit: Werte pro Replikation für jeden Kundenauftrag, Berechnung bei Abschluss eines Kundenauftrags.
- Auslastung: Werte pro Replikation für jedes Workcenter, Berechnung als nach der Zeit gewichteter Durchschnittswert.

- Herstellkosten einer Periode: Wert pro Replikation, Berechnung am Ende des Simulationslaufs.
- Bestandsreichweite: Wert pro Replikation, Berechnung als nach der Zeit gewichteter Durchschnittswert.

3.6.2 Verifizierung und Validierung

Ziel der Verifizierung ist die Sicherstellung, dass das Simulationsmodell die gewünschten Funktionalitäten besitzt. Dazu muss das Modell einerseits sämtliche Elemente, wie geplant, enthalten und andererseits ohne Fehlermeldung lauffähig sein. Eine Verifizierung wird unter anderem durch Teilung des gesamten Modells in Submodelle erreicht. Die Submodelle können mittels Animation und Analyse von Output Files unter verschiedenen Bedingungen isoliert untersucht und gegebenenfalls verbessert werden. Die funktionierenden Submodelle werden dann zum Gesamtmodell vereint und dieses nochmals überprüft.

Im Schritt Validierung wird geprüft, ob das Simulationsmodell ein hinlänglich genaues Abbild der Ursache-Wirkungs-Beziehungen des realen Systems ist. Als Validierungsgröße wird die mittlere Kundenauftragsdurchlaufzeit herangezogen. Die der Validierung zugrunde liegenden Simulationsergebnisse basieren auf dem im Kapitel 3.6.3 dargestellten experimentellen Design. Die Validierung dient in der Fallstudie nicht nur zur Prüfung der Güte des Datenmaterials und der Modellierung, sondern auch zur Darstellung der Auswirkung der Komplexitätsreduktion. Zu diesem Zweck wird ein Vergleich der realen Kundenauftragsdurchlaufzeit mit den Ergebnissen der simulierten Ausgangssituation für unterschiedliche Grade an Komplexitätsreduktion, welche im Kapitel 3.5.2 erörtert werden, durchgeführt. Es wird dabei die absolute Abweichung des Werts des Modells vom Wert der Realität in Verhältnis zum realen Wert gesetzt. Tabelle 10 zeigt die derart ermittelten relativen Abweichungen der durchschnittlichen Kundenauftragsdurchlaufzeit sämtlicher Produkte.

Komplexitätsreduktion	Relative Abweichung
0 %	0,6 %
9 %	1,0 %
29 %	2,9 %
58 %	31,3 %

Tabelle 10: Abweichung der Kundenauftragsdurchlaufzeit

Findet keine Komplexitätsreduktion statt, so beträgt die relative Abweichung weniger als ein Prozent. Wird eine Komplexitätsreduktion durchgeführt, nimmt mit dem Grad der Reduktion die relative Abweichung zu. Bei einer Komplexitätsreduktion in der Höhe von neun beziehungsweise 29 Prozent ist die relative Abweichung moderat und übersteigt drei Prozent nicht. Eine 58-prozentige Reduktion bedingt jedoch eine inakzeptable relative Abweichung von über 31 Prozent, weshalb dieses Ausmaß an Komplexitätsreduktion als nicht geeignet verworfen wird.

Darüber hinaus wird mit weiterführenden, statistischen Methoden geprüft, inwieweit die Modelle von der Realität abweichen, wozu die Durchlaufzeiten der einzelnen Kundenaufträge der Betrachtungsperiode analysiert werden. Die Stichproben umfassen für die Ausgangssituation einerseits die Werte der Realität und andererseits die Mittelwerte aller Replikationen des Modells für die Komplexitätsreduktionsgrade null, neun und 29 Prozent. Es werden statistische Tests auf Gleichheit der den Stichproben zugrunde liegenden Erwartungswerte durchgeführt. Zur Wahl des geeigneten Tests muss vorab geprüft werden, ob die Stichproben aus Verteilungen gleicher oder unterschiedlicher Varianzen stammen. Hierzu wird ein Zweistichproben-F-Test angewandt, wobei Folgendes gilt [vgl. Chung (2004), S. 8-10]:

- H_0 : Die beiden Stichproben stammen aus Verteilungen mit gleichen Varianzen.
- H_a : Die beiden Stichproben stammen aus Verteilungen mit unterschiedlichen Varianzen.
- Es wird ein Signifikanzniveau von 0,05 gewählt.
- Der kritische Wert wird für das halbe Signifikanzniveau ermittelt, wobei die Freiheitsgrade der beiden Stichproben dem jeweiligen Stichprobenumfang minus eins entsprechen.
- Die Prüfgröße wird gemäß Formel (3.17) berechnet.

$$F = \frac{s_M^2}{s_m^2} \tag{3.17}$$

Es bedeutet:

F Prüfgröße

s_M^2 Varianz der Stichprobe mit der größeren Varianz

s_m^2 Varianz der Stichprobe mit der kleineren Varianz

- Die Nullhypothese wird verworfen, falls die Prüfgröße größer als der kritische Wert ist.

Das Ergebnis des Vergleichs ist in Tabelle 11 zusammengefasst.

Komplexitätsreduktion	F-Test	
	Prüfgröße	Kritischer Wert
0 %	1,48	1,08
9 %	1,47	
29 %	1,46	

Tabelle 11: Ergebnis des Zweistichproben-F-Tests

In allen Fällen unterscheiden sich die Varianzen, weshalb zum Test auf Gleichheit der den Stichproben zugrunde liegenden Erwartungswerte der Kundenauftragsdurchlaufzeiten ein Zweistichproben-t-Test, unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen, durchgeführt wird, wobei Folgendes gilt [vgl. Chung (2004), S. 8-11f.]:

- H_0 : Die beiden Stichproben stammen aus Verteilungen mit gleichen Mittelwerten.
- H_a : Die beiden Stichproben stammen aus Verteilungen mit unterschiedlichen Mittelwerten.
- Es wird ein Signifikanzniveau von 0,05 beziehungsweise 0,01 gewählt.
- Der kritische Wert wird für das halbe Signifikanzniveau ermittelt, wobei die Freiheitsgrade dem Stichprobenumfang beider Stichproben minus zwei entsprechen.
- Die Prüfgröße wird anhand der Formel (3.18) berechnet.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (3.18)$$

Es bedeutet:

t Prüfgröße

\bar{x}_1 Mittelwert der ersten Alternative

\bar{x}_2 Mittelwert der zweiten Alternative

s_1^2 Varianz der ersten Alternative

s_2^2 Varianz der zweiten Alternative

n_1 Stichprobenumfang der ersten Alternative

n_2 Stichprobenumfang der zweiten Alternative

- Die Nullhypothese wird verworfen, falls der Absolutbetrag der Prüfgröße größer als der kritische Wert ist.

Das Ergebnis des Vergleichs des realen Systems mit den Modellen unterschiedlicher Komplexität ist in Tabelle 12 dargestellt:

Komplexitätsreduktion	t-Test		
	Prüfgröße	Kritischer Wert ($\alpha=0,05$)	Kritischer Wert ($\alpha=0,01$)
0 %	0,51	1,96	2,58
9 %	0,83		
29 %	2,45		

Tabelle 12: Ergebnis des Zweistichproben-t-Tests

Bei einem gewählten Signifikanzniveau von fünf Prozent ist bei einer Komplexitätsreduktion von null und neun Prozent das Modell hinlänglich valide. Wird ein Signifikanzniveau von einem Prozent angestrebt, ist die Validität auch bei einer Komplexitätsreduktion von 29 Prozent gewährleistet. Für die weitere Durchführung der Fallstudie wird der Grad der Komplexitätsreduktion mit neun Prozent gewählt.

Im Ergebnis wird davon ausgegangen, dass das Modell „richtig modelliert“, sowie das „richtige Modell“ modelliert ist und damit die Grundlage zur Durchführung von Simulationsexperimenten gegeben ist.

3.6.3 Experimentelles Design

Es wird nun das experimentelle Design festgelegt, welches insbesondere die Unterschiede zwischen den zu simulierenden Alternativen beschreibt. Außerdem werden die Länge der Warm-up-Periode und die Anzahl der Replikationen erörtert.

Zu simulierende Alternativen

Im Kapitel 3.3.1.3 werden die Szenarien Ausgangssituation, Investition und Reorganisation zur Analyse von Verbesserungsmöglichkeiten der Leistungserstellungsprozesse der Supply Chain bestimmt. Zur Studie des Prozessverhaltens werden zwei weitere Szenarien definiert. Das Szenario Sensitivitätsanalyse I dient zur Darstellung der Auswirkungen einer Verkürzung des Prognosehorizonts. Zusätzlich erlaubt das Szenario Sensitivitätsanalyse II die Analyse des Systems unter Vernachlässigung des Prognoserisikos. Die fünf Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich folgender Faktoren:

- Kapazitätserweiterung: Im Szenario Investition werden die Kapazitäten des Workcenters, welches in der Ausgangssituation die höchste Auslastung aufweist, verstärkt.
- Anteil prognosegetriebener Produktion: Es wird entweder eine rein auftragsgetriebene Produktion oder eine Kombination aus auftrags- und prognosegetriebener Produktion betrachtet. Im zweiten Fall umfasst die prognosegetriebene Produktion vom Typ Make-to-Forecast 18 Produkte, deren Produktionsmenge rund 50 Prozent der Produktionsmenge aller Produkte beträgt. Diese Produkte werden nur im Fall prognosebedingter Fehlmengen auftragsbezogen produziert. Für die restlichen 389 Produkte kann wegen der sporadischen Nachfrage eine Prognosebildung mit zufriedenstellender Qualität nicht garantiert werden, weshalb für diese Produkte weiterhin eine auftragsgetriebene Produktion durchgeführt wird.
- Prognosehorizont: Es wird im Fall prognosegetriebener Produktion ein Prognosehorizont von 14 Tagen definiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Auswertung der Daten der Vendor Managed Inventories dem First Tier Lieferanten die Erstellung akkurater Prognosen für dieses Horizontsniveau erlaubt.
- Prognosen-Pooling-Faktor: Prognosen für gleiche Produkte werden gesammelt und gemeinsam zur Fertigung weitergeleitet, sobald die Anzahl der prognostizierten Aufträge eines Produkts den Wert des Prognosen-Pooling-Faktors erreicht. Der Prognosen-Pooling-Faktor ist eine Entscheidungsgröße, welche zur Steuerung der Supply Chain frei festgelegt werden kann. Für die Analyse wer-

den ein minimaler Wert von vier, ein maximaler Wert von 20 und ein Intervall von vier gewählt.

- Berücksichtigung des Prognoserisikos: Das Risiko eines Prognosefehlers wird im Simulationsmodell durch Fehlerfaktoren bezüglich der Bestellmenge, des gewünschten Lieferzeitpunkts und des Bestellzeitpunkts determiniert. Im Rahmen des Szenarios Sensitivitätsanalyse II wird das Risiko des Prognosefehlers hingegen vernachlässigt.

Alternative	Szenario	Kapazitäts- erweiterung	Anteil prognosegetriebener Produktion	Prognosehorizont	Prognosen-Pooling- Faktor	Berücksichtigung des Prognoserisikos
1	Ausgangssituation	nein	0 %	-	-	-
2	Investition	ja	0 %	-	-	-
3	Reorganisation	nein	50 %	14 Tage	4	ja
4	Reorganisation	nein	50 %	14 Tage	8	ja
5	Reorganisation	nein	50 %	14 Tage	12	ja
6	Reorganisation	nein	50 %	14 Tage	16	ja
7	Reorganisation	nein	50 %	14 Tage	20	ja
8	Sensitivitätsanalyse I	nein	50 %	7 Tage	4	ja
9	Sensitivitätsanalyse I	nein	50 %	7 Tage	8	ja
10	Sensitivitätsanalyse I	nein	50 %	7 Tage	12	ja
11	Sensitivitätsanalyse I	nein	50 %	7 Tage	16	ja
12	Sensitivitätsanalyse I	nein	50 %	7 Tage	20	ja
13	Sensitivitätsanalyse II	nein	50 %	7 Tage	4	nein
14	Sensitivitätsanalyse II	nein	50 %	7 Tage	8	nein
15	Sensitivitätsanalyse II	nein	50 %	7 Tage	12	nein
16	Sensitivitätsanalyse II	nein	50 %	7 Tage	16	nein
17	Sensitivitätsanalyse II	nein	50 %	7 Tage	20	nein

Tabelle 13: Alternativen des experimentellen Designs

Im Ergebnis ist die Simulation von 17 Alternativen notwendig, welche in Tabelle 13 zusammengefasst sind.

Warm-up-Periode

Das betrachtete System ist nicht-terminierend, das heißt, es ist kein bestimmter Ausgangszustand definiert und der Prozess wird nicht durch ein bestimmendes Ereignis beendet. Zur Analyse eines derartigen Systems muss sich das Modell in einem stationären Zustand befinden, welcher unabhängig von den Startbedingungen der Simulation ist. Das Erreichen des stationären Zustands kann durch das Modellieren von Startbedingungen, wie zum Beispiel durch das Festlegen initialer Lagerstände, beschleunigt werden. Außerdem ist die Wahl einer hinlänglich langen Simulationsdauer möglich, sodass die nicht-stationäre Phase einen vernachlässigbaren Anteil einnimmt. Beide Zugänge werden in der Fallstudie wegen der Komplexität des Modells verworfen. Zur Sicherstellung der Analyse des stationären Zustands des Simulationsmodells wird eine Warm-up-Periode festgelegt, innerhalb derer keine Messung der Outputgrößen vorgenommen wird. Zur Bestimmung der Länge der Warm-up-Periode erfolgt eine visuelle Analyse eines Plots, welcher eine Kontrollgröße im Zeitablauf darstellt. Hierzu wird die dynamische Entwicklung der Anzahl der halbfertigen und fertigen Produkte beziehungsweise Komponenten im Simulationsmodell betrachtet. Abbildung 9 repräsentiert das Szenario Ausgangssituation, wobei kurzfristige Schwankungen durch eine gleitende Durchschnittsbildung geglättet sind. Die Plots der restlichen Szenarien zeigen ein vergleichbares Bild.

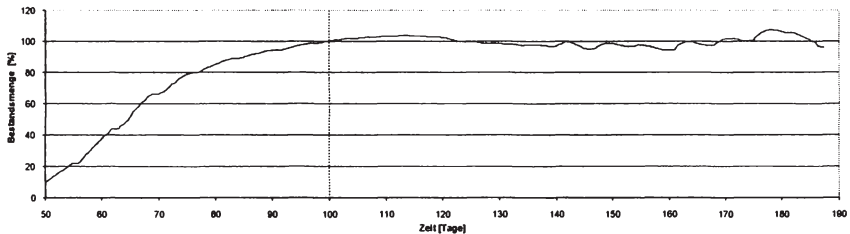


Abbildung 9: Bestandsentwicklung

Im Ergebnis beträgt die Warm-up-Periode 100 Tage bei einer Simulationslänge von 187,5 Tagen. Prinzipiell können multiple Replikationsläufe durch einen langen Simulationslauf zum Zweck der Eliminierung der Warm-up-Perioden zwischen den Replikationen ersetzt werden. Hierauf wird im Sinne einer Reduktion

des Aufwandes bei der Ergebnisanalyse verzichtet, da die Rechenzeit für die Simulation der Warm-up-Perioden ein vertretbares Ausmaß annimmt. Die Simulation einer Alternative benötigt mit ARENA auf einem Personal Computer (Prozessor Intel Pentium IV mit 1,8 GHz, Arbeitsspeicher 512 MB, Betriebssystem Microsoft Windows 2000) rund fünf Stunden.

Anzahl der Replikationen

Zur Bestimmung der Anzahl der Replikationen wird als Kontrollgröße die mittlere Kundenauftragsdurchlaufzeit pro Replikation herangezogen. Es wird die halbe Länge des Konfidenzintervalls gemäß Formel (3.19) berechnet [vgl. Chung (2004), S. 10-3]:

$$HL = \frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot s}{\sqrt{n}} \tag{3.19}$$

Es bedeutet:

HLHalbe Länge des Konfidenzintervalls

t Wert der t-Verteilung für n-1 Freiheitsgrade und 1-α/2

sStandardabweichung der Werte der Replikationen

nAnzahl der Replikationen

Als hinlängliche Genauigkeit wird ein halbes, 95-prozentiges Konfidenzintervall kleiner zwei Stunden definiert. Die Werte werden für jede Alternative ermittelt.

Replikationen	Halbes 95%-Konfidenzintervall (Maximum der Alternativen)
10	5,9 h
25	3,2 h
50	2,3 h
75	2,0 h
100	1,8 h

Tabelle 14: Bestimmung der Anzahl der Replikationen

Aus Tabelle 14 ist ersichtlich, dass die gewünschte Genauigkeit für jede der Alternativen bei einer Anzahl von 100 Replikationen garantiert ist.

3.6.4 Ergebnisanalyse

Eingangs wird die Frage beantwortet, ob sich die Alternativen 2 bis 7 von der Ausgangssituation signifikant unterscheiden oder Unterschiede lediglich auf zufälligen Schwankungen beruhen. Anschließend findet ein Vergleich der Alternativen anhand der Kennzahlen Kundenauftragsdurchlaufzeit, Liefertreue, Auslastung, Herstellkosten einer Periode und Bestandsreichweite statt. Außerdem wird der Einfluss des Prognosehorizonts und des Prognoserisikos auf die Performance der Supply Chain Prozesse untersucht.

3.6.4.1 Signifikanz des Unterschieds der Alternativen

Es wird nun geprüft, ob sich die Alternativen 2, 3, 4, 5, 6 und 7 von der Ausgangssituation signifikant unterscheiden. Als Prüfgröße wird die mittlere Kundenauftragsdurchlaufzeit pro Replikation herangezogen. Zum Vergleich von zwei Alternativen wird das Konfidenzintervall für die Differenz der mittleren Kundenauftragsdurchlaufzeit der Alternativen gebildet, wobei ein signifikanter Unterschied zwischen den Alternativen besteht, wenn das Konfidenzintervall den Wert null nicht enthält. In der Fallstudie wird ein modifiziertes Zweistichproben-Konfidenzintervall angewandt, das so genannte Welch-Konfidenzintervall, das gemäß Formel (3.20) berechnet wird [vgl. Law/Kelton (2000), S. 559].

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \pm t_{df, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (3.20)$$

wobei

$$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 / (n_1 - 1) + \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2 / (n_2 - 1)}$$

Es bedeutet:

\bar{x}_1 Mittelwert der Replikationen der ersten Alternative

\bar{x}_2 Mittelwert der Replikationen der zweiten Alternative

t t-Wert für df Freiheitsgrade und $1 - \alpha/2$

df Freiheitsgrade

s_1^2 Varianz der Stichprobe der ersten Alternative

s_2^2 Varianz der Stichprobe der zweiten Alternative

n_1 Stichprobenumfang der ersten Alternative

n_2 Stichprobenumfang der zweiten Alternative

Es wird für jeden Vergleich von zwei Alternativen ein Konfidenzintervall mit einem individuellen Konfidenzniveau berechnet. Bei einem definierten globalen Konfidenzniveau, sodass sämtliche Konfidenzintervalle den Wert des Parameters enthalten, müssen die individuellen Konfidenzniveaus entsprechend angepasst werden. Gemäß Bonferroni-Ungleichung sind bei einem globalen Konfidenzniveau von mindestens $1 - \alpha$ bei c Alternativenvergleichen die individuellen Konfidenzniveaus mit $1 - \alpha / c$ festzulegen [vgl. Law/Kelton (2000), S. 562]. Es wird in der Fallstudie ein globales Konfidenzniveau von $1 - 0,05$ gewählt, womit bei sechs Alternativenvergleichen die individuellen Konfidenzniveaus $1 - 0,05 / 6$ betragen.

Alternativen	Welch-Konfidenzintervall
1, 2	(-32,55, -26,78)
1, 3	(-23,95, -17,68)
1, 4	(-41,09, -35,46)
1, 5	(-40,77, -35,19)
1, 6	(-41,8, -36,16)
1, 7	(-36,88, -30,89)

Tabelle 15: Differenz der Kundenauftragsdurchlaufzeit

Tabelle 15 zeigt das Ergebnis des Vergleichs der Alternative 1 mit den Alternativen 2 bis 7. In keinem der Fälle beinhaltet das Konfidenzintervall den Wert null, weshalb sich die verglichenen Alternativen signifikant voneinander unterscheiden, das heißt, es stehen sechs faktische Alternativen zur Ausgangssituation zur Verfügung.

3.6.4.2 Alternativenvergleich anhand der Kennzahlen

Im Folgenden findet ein Vergleich der Alternativen 1, 2, 3, 4, 5, 6 und 7 anhand der Kennzahlen Kundenauftragsdurchlaufzeit, Liefertreue, Auslastung, Herstellkosten einer Periode und Bestandsreichweite statt. Bei den Vergleichen wird der Wert jeder Alternative in Relation zum Wert der Ausgangssituation gesetzt und das Ergebnis in Prozent dargestellt.

Kundenauftragsdurchlaufzeit

In Abbildung 10 werden die Alternativen anhand der durchschnittlichen Kundenauftragsdurchlaufzeit verglichen.

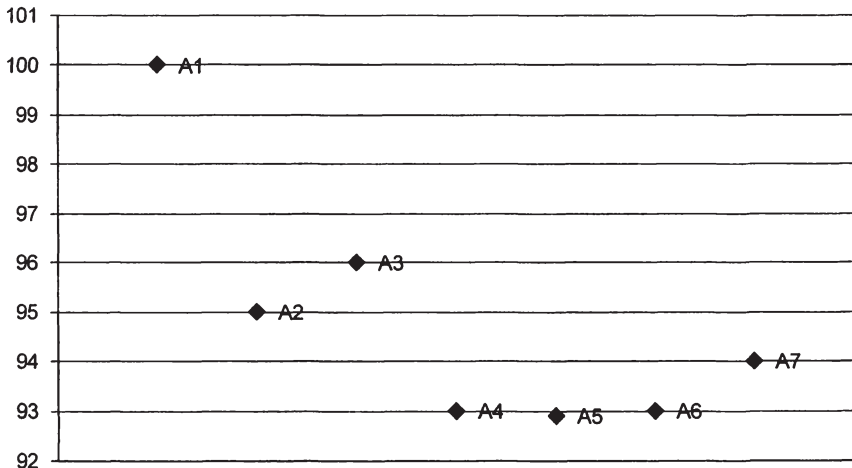


Abbildung 10: Vergleich der Kundenauftragsdurchlaufzeit

Die Performance der Alternativen 2 bis 7 ist hierbei höher als jene der Ausgangssituation. Dies wird im Szenario Investition durch eine Reduktion der kapazitätsbedingten Wartezeiten und im Szenario Reorganisation durch eine Verschiebung des Kundenauftragsentkoppelungspunkts erreicht. Beim Szenario Reorganisation verkürzt sich die Kundenauftragsdurchlaufzeit mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor, um dann wieder zu steigen. Dies ist unter anderem auf folgende Effekte zurückzuführen, welche simultan wirken:

- Ein größerer Prognosen-Pooling-Faktor führt zur Reduktion der Rüstzeiten und somit zur Verkürzung der Durchlaufzeiten der Fertigungsaufträge und in Folge zur beschleunigten Erfüllung der Kundenaufträge.
- Mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor verlängert sich die durchschnittliche Zeit zwischen der Erstellung einer Prognose und der Einlastung eines auf dieser Prognose basierenden Fertigungsauftrags. Die damit verbundene Verkürzung der Zeitspanne zwischen der Einlastung eines Fertigungsauftrags und dem Eingang eines entsprechenden Kundenauftrags reduziert die Wirksamkeit prognosegetriebener Produktion zur Verkürzung der Kundenauftragsdurchlaufzeiten.
- Ein größerer Prognosen-Pooling-Faktor bedingt einen niedrigeren Anteil prognoseorientiert gefertigter Aufträge, da die Wahrscheinlichkeit steigt, dass noch vor dem Erreichen der festgelegten Anzahl prognostizierter Aufträge der Kundenauftrag eingeht und auftragsorientiert gefertigt wird. Eine Verkürzung der Kundenauftragsdurchlaufzeit durch prognoseorientierte Fertigung wird dann im geringeren Ausmaß erreicht.
- Mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor werden Fertigungsaufträge tendenziell später prognoseorientiert oder sogar auftragsorientiert gefertigt. Da das Prognoserisiko mit der zeitlichen Nähe zum Eingang des Kundenauftrags abnimmt, werden die Ressourcen effizienter genutzt und die negativen Auswirkungen auf die Kundenauftragsdurchlaufzeit reduziert.

Liefertreue

In Abbildung 11 werden die Werte der Liefertreue der einzelnen Alternativen gegenübergestellt. Die Alternativen 2 bis 7 erzielen eine deutlich bessere Liefertreue als die Ausgangssituation. Die Steigerung der Liefertreue wird beim Szenario Investition durch eine Kapazitätserweiterung und beim Szenario Reorganisation durch den Aufbau von Beständen erreicht. Beim Szenario Reorganisation wächst die Liefertreue mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor bis zu ihrem Maximum und fällt dann wieder ab. Hierfür sind Effekte relevant, die bereits bei der Kundenauftragsdurchlaufzeit erläutert wurden.

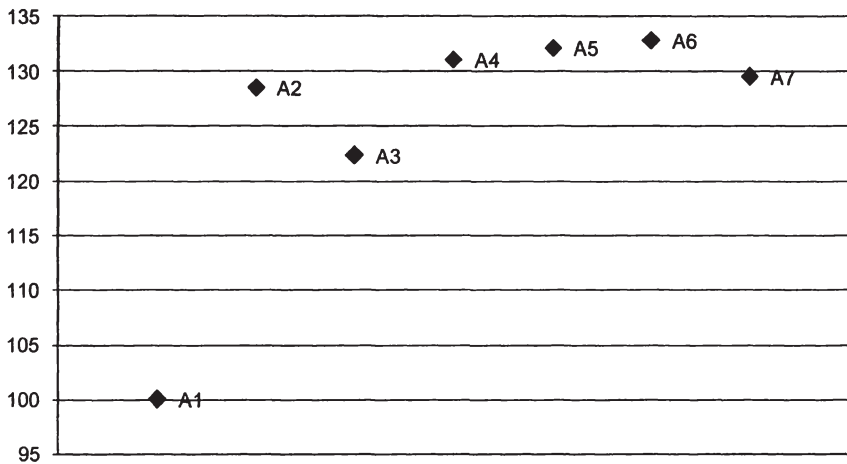


Abbildung 11: Vergleich der Liefertreue

Auslastung

Abbildung 12 stellt einen Vergleich der durchschnittlichen Auslastung aller Workcenter für die einzelnen Alternativen an. Die Auslastung im Szenario Investition ist durch die Erweiterung der Kapazitäten niedriger als in der Ausgangssituation. Die Auswirkung ist begrenzt, da die Kapazitätserweiterung, gemessen an der Gesamtkapazität, gering ist. Die Kapazitätserweiterung betrifft jedoch den Engpass und ist deshalb hinsichtlich einer Performancesteigerung in Bezug auf die Liefertreue oder die Kundenauftragsdurchlaufzeit effektiv. Das Pooling von Prognosen gleicher Produkte erreicht beim Szenario Reorganisation eine Reduktion des Rüstaufwands und erzielt somit eine geringere Auslastung der Workcenter. Die Auswirkungen einer Variation des Prognosen-Pooling-Faktors können wiederum auf das Zusammenspiel der bereits beschriebenen Effekte zurückgeführt werden. Insbesondere sinkt mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor die Anzahl der prognoseorientierten Fertigungsaufträge und damit die Rüstzeitersparnis, womit die Auslastung steigt.

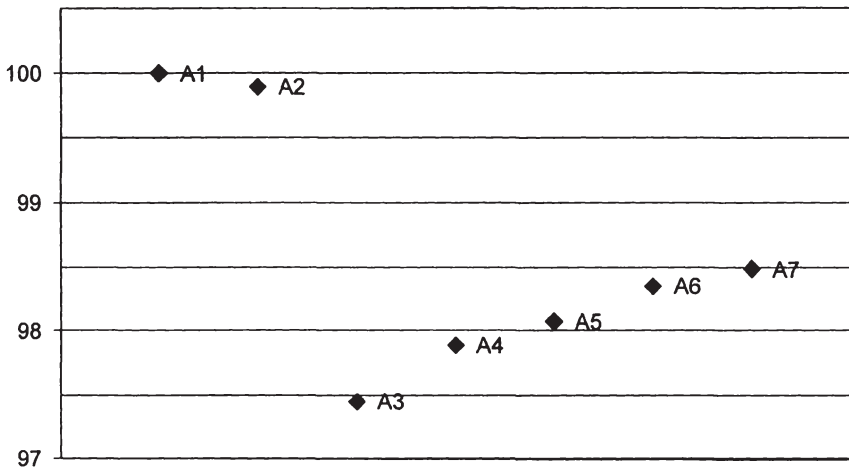


Abbildung 12: Vergleich der Auslastung

Herstellkosten einer Periode

Die periodenbezogenen Herstellkosten der Alternativen werden in Abbildung 13 gegenübergestellt. Bedingt durch den Investitionsaufwand übersteigen die Herstellkosten der Alternative 2 jene der Alternative 1. Die Herstellkosten des Szenarios Reorganisation sind hingegen geringer als in der Ausgangssituation. Ein wichtiger Faktor ist dabei die Rüstdauer, welche durch die bereits beschriebenen Effekte bestimmt wird. Insbesondere hat ein steigender Prognosen-Pooling-Faktor einen sinkenden Anteil prognoseorientierter Fertigung und somit tendenziell längere Rüstzeiten zur Folge. Einen geringeren Einfluss auf die Herstellkosten hat die Veränderung der Produktionsmenge durch eine Variation des Prognosen-Pooling-Faktors. Dabei vermindert sich mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor das Prognoserisiko und damit die Menge an Produkten und Komponenten, welche aufgrund falscher Prognosen produziert werden.

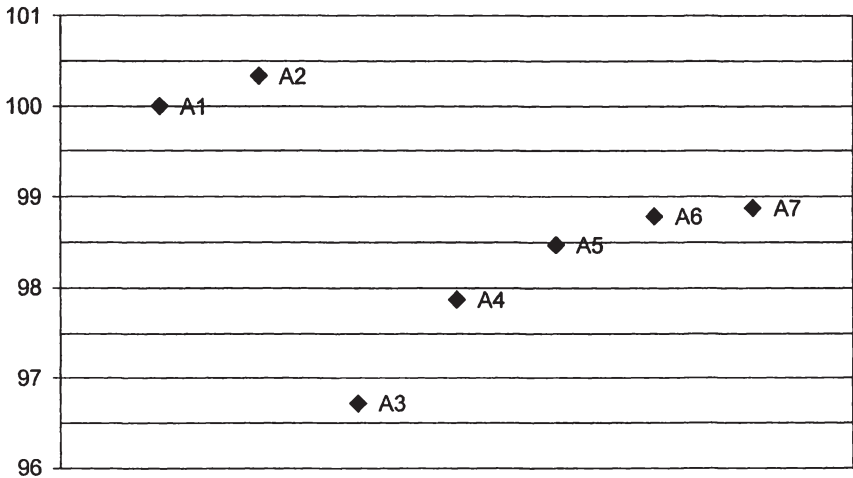


Abbildung 13: Vergleich der Herstellkosten einer Periode

Bestandsreichweite

Abbildung 14 stellt die Bestandsreichweite der einzelnen Alternativen gegenüber. Die Bestandsreichweite der Alternative 2 ist geringer als jene der Alternative 1. Die Erweiterung der Kapazitäten im Rahmen des Szenarios Investition senkt die Durchlaufzeiten der Produktionsaufträge und damit die Bestandsreichweite. Bei den Alternativen 3 bis 7 wird eine höhere Bestandsreichweite als bei Alternative 1 erzielt. Die Verschiebung des Entkoppelungspunkts bei der prognoseorientierten Fertigung führt zum Aufbau von Beständen. Mit zunehmendem Prognosen-Pooling-Faktor fällt der Anteil prognoseorientierter Fertigung und die Bestände nehmen ab. Weitere Einflussfaktoren auf die Bestandsreichweite beim Szenario Reorganisation sind die Rüstzeiten und die Produktionsmenge, welche durch den Prognosen-Pooling-Faktor, wie bereits beschrieben, mitbestimmt werden.

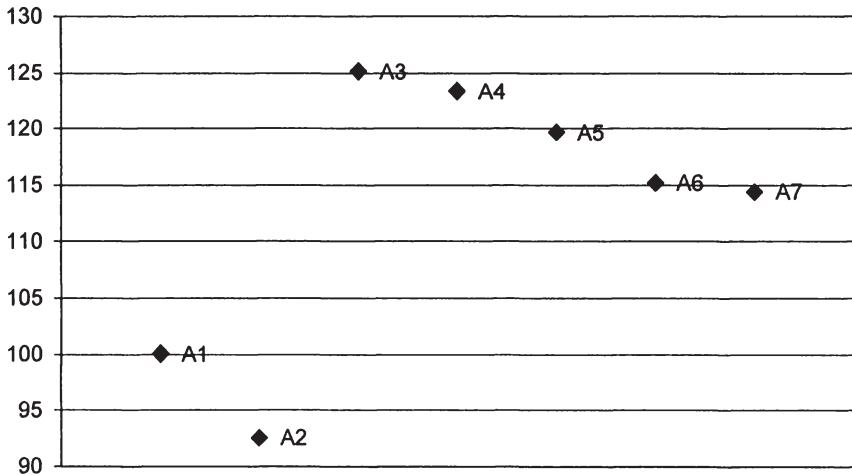


Abbildung 14: Vergleich der Bestandsreichweite

3.6.4.3 Einfluss des Prognosehorizonts

Es wird nun eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Einflusses des Prognosehorizonts auf die Performance behandelt. Abbildung 15 stellt dazu die Liefertreue des Szenarios Reorganisation jener des Szenarios Sensitivitätsanalyse I gegenüber.

Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Länge des Prognosehorizonts, wobei der Prognosehorizont bei der Sensitivitätsanalyse I halbiert ist. Es ist ersichtlich, dass ein kürzerer Prognosehorizont bei sämtlichen Ausprägungen des Prognosen-Pooling-Faktors eine niedrigere Liefertreue zur Folge hat. Es sind folgende gegenläufigen Effekte zu berücksichtigen:

- Bei einem kürzeren Prognosehorizont verringert sich die Vorlaufzeit zwischen der Erstellung einer Prognose und dem Eingang eines entsprechenden Kundenauftrags. Somit wirken die mit prognoseorientierter Fertigung verbundenen positiven Effekte bezüglich der Liefertreue weniger stark.
- Zudem reduziert ein kürzerer Prognosehorizont den Anteil prognoseorientierter Fertigung und die damit verbundenen Wirkungen auf die Liefertreue, da die Wahrscheinlichkeit der Bildung eines Loses an Prognosen gleicher Produkte im Umfang des Prognosen-Pooling-Faktor sinkt.

- Ein verkürzter Prognosehorizont bedingt einen geringeren Prognosefehler und damit generell eine verbesserte Liefertreue.

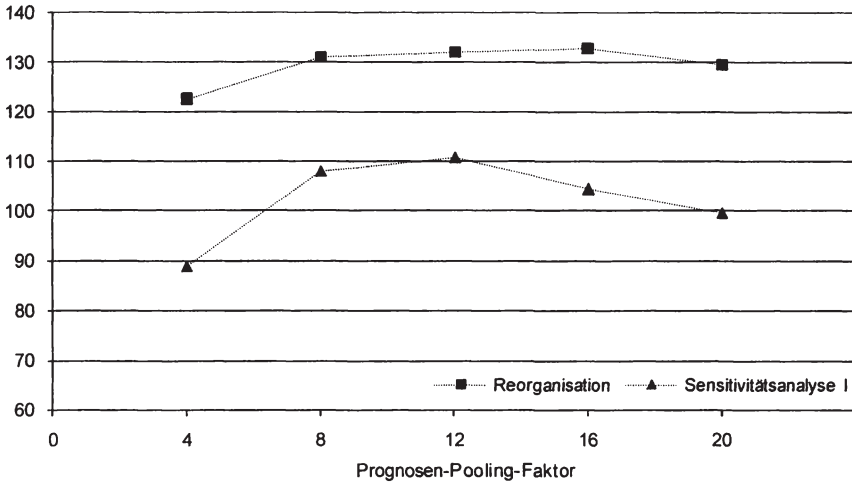


Abbildung 15: Einfluss des Prognosehorizonts auf die Liefertreue

3.6.4.4 Einfluss des Prognoserisikos

Risiken haben einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Supply Chain Prozesse. Daher wird jetzt die Auswirkung von Risiko auf die Performance der Leistungserstellungsprozesse analysiert.

Das Szenario Sensitivitätsanalyse II unterscheidet sich vom Szenario Sensitivitätsanalyse I durch die Vernachlässigung des Prognoserisikos. Die fiktive Annahme von Risikofreiheit führt zu einer entscheidenden Verbesserung der Liefertreue, was die Wichtigkeit der Berücksichtigung von Risiken bei der Modellerstellung unterstreicht. Aus Abbildung 16 ist ersichtlich, dass sich die Liefertreue der beiden Szenarien besonders stark bei niedrigen Werten des Prognosen-Pooling-Faktors unterscheidet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit steigendem Prognosen-Pooling-Faktor der Einlastungszeitpunkt eines prognoseorientierten Fertigungsauftrags näher zum Zeitpunkt des Eingehens des tatsächlichen Kundenauf-

trags rückt. Die Auswirkungen des Prognoserisikos sind dann vermindert, womit der Unterschied zum risikofreien Szenario geringer ist.

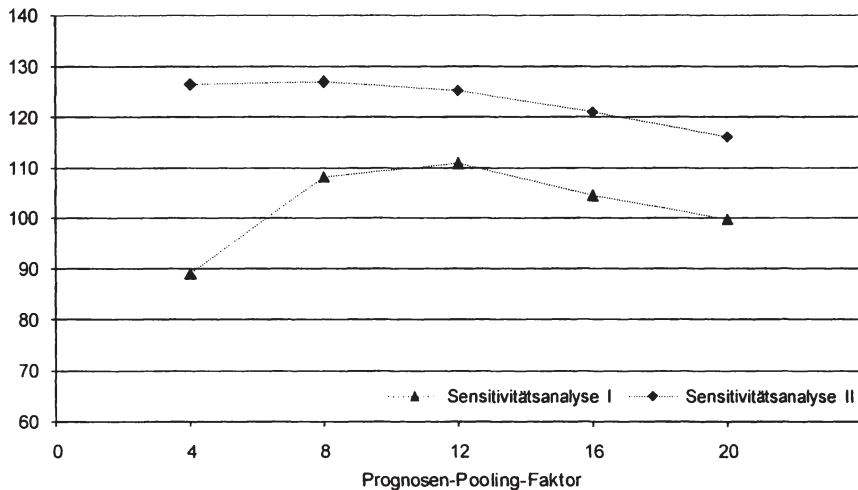


Abbildung 16: Einfluss des Prognoserisikos auf die Liefertreue

3.7 Bewertung

Im Rahmen der Bewertung wird jene Alternative ermittelt, bei deren Umsetzung die beste Leistungsfähigkeit der Supply Chain erzielt wird. Die gewonnenen Kennzahlen ermöglichen dazu eine umfassende Beschreibung der Performance unterschiedlicher Alternativen. Die Berücksichtigung mehrerer Kennzahlen bei der Bewertung bildet ein multikriterielles Entscheidungsproblem. Zur Lösung wird das im Kapitel 2.2.4 dargestellte Modell umgesetzt, welches eine hohe Performance als geringe Abweichung von festgelegten Zielen definiert. Das Entscheidungsproblem wird durch Formel (2.1) beschrieben. Demgemäß müssen die Zielwerte bestimmt und die Gewichte der Ziele sowie der Abweichungen festgelegt werden, um dann die Abweichungen zu berechnen. Die entsprechenden Schritte werden im Folgenden erörtert.

Zielwerte

Die Bestimmung der Zielwerte basiert in der Fallstudie auf Benchmark-Daten, allgemeingültigen Richtwerten sowie dem mutmaßlichen Potenzial der Supply Chain. Die Definition der Kennzahlen in Konformität mit dem SCOR Modell garantiert die Verfügbarkeit von Benchmark-Daten. Für die Festlegung der Zielwerte der einzelnen Kennzahlen gilt Folgendes:

- **Liefertreue:** Als Zielwert wird der Benchmark-Wert für die Kennzahl Delivery Performance (by committed date) des SCOR Modells herangezogen. Der Wert wurde für die Branchengruppe, welche die Elektronikindustrie beinhaltet, durch das Unternehmen Performance Measurement Group im Jahr 2004 erhoben [vgl. Supply Chain Council (2007), URL].
- **Kundenauftragsdurchlaufzeit:** Es findet der Benchmark-Wert der Kennzahl Order Fulfillment Lead Time des SCOR Modells als Zielwert Anwendung. Auch dieser Wert wurde für die Branchengruppe, welche die Elektronikindustrie beinhaltet, durch das Unternehmen Performance Measurement Group im Jahr 2004 erhoben [vgl. Supply Chain Council (2007), URL].
- **Auslastung:** Der Zielwert wird anhand eines praxisorientierten Richtwerts des First-Tier-Lieferanten für eine angemessene Auslastung bestimmt. Demnach stellt eine Auslastung in der Höhe von etwa 70 Prozent einen guten Ausgleich zwischen der Vermeidung kapazitätsbedingter Wartezeiten und einem effizienten Ressourceneinsatz dar.
- **Herstellkosten einer Periode:** Der Zielwert folgt der Annahme, dass Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Herstellkosten in der Supply Chain besteht und realisiert werden soll. Demgemäß werden Herstellkosten einer Periode angestrebt, welche zehn Prozent unter jenen der Ausgangssituation liegen.
- **Bestandsreichweite:** Es wird von einem Kostensenkungspotenzial durch eine Reduktion der Bestände ausgegangen, wobei die um einen Tag reduzierte gegenwärtige Bestandsreichweite als Zielwert definiert wird.

Gewichte der Ziele

Die Gewichte der Ziele spiegeln die Strategie der Supply Chain wider. Eine Befragung von Führungskräften der Supply Chain aus den Unternehmensbereichen Supply Chain Entwicklung, Logistik und Controlling dient zur Erhebung der verfolgten Strategie. Es wird nach der Wichtigkeit der Performanceattribute Liefertreue, Reaktionsfähigkeit, Flexibilität, Kosten und Effektivität des Vermögensmanagements anhand einer sechsteiligen Skala gefragt. Auf Grundlage der Befragung wird für jedes Performanceattribut die relative Wichtigkeit pro Unter-

nehmensbereich berechnet und der Durchschnitt sämtlicher Unternehmensbereiche ermittelt, wie Tabelle 16 zeigt.

Performanceattribut (Kennzahl)	Rang			Durchschnittliche relative Wichtigkeit
	Supply Chain Entwicklung	Logistik	Controlling	
Lieferzuverlässigkeit (Liefertreue)	6	6	6	0,234
Reaktionsfähigkeit (Kundenauftragsdurchlaufzeit)	6	5	4	0,195
Flexibilität (Auslastung)	6	4	4	0,181
Kosten (Herstellkosten einer Periode)	4	5	6	0,196
Effektivität des Vermögensmanagements (Bestandsreichweite)	5	4	6	0,194

Tabelle 16: Gewichte der Ziele bei moderat agiler Strategie

Jedem Performanceattribut ist die entsprechende Kennzahl, welche ein Ziel repräsentiert, zugeordnet. Die Gewichte der Ziele entsprechen den erhobenen durchschnittlichen relativen Wichtigkeiten. Die Strategie betont die Wichtigkeit der Lieferzuverlässigkeit und zeigt sonst ein ausgeglichenes Bild. Daher wird diese Strategie in Folge als moderat agil bezeichnet.

Als Kontrast werden die relativen Wichtigkeiten der Performanceattribute für eine typisch schlanke und eine ausgeprägt agile Supply Chain Strategie in Tabelle 17 dargestellt. Dies erfüllt den Zweck, dass eine Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse unter der Annahme verschiedener Strategien möglich ist.

Performanceattribut (Kennzahl)	Schlank		Agil	
	Rang	Relative Wichtigkeit	Rang	Relative Wichtigkeit
Lieferzuverlässigkeit (Liefertreue)	2	0,111	6	0,273
Reaktionsfähigkeit (Kundenauftragsdurchlaufzeit)	2	0,111	6	0,273
Flexibilität (Auslastung)	2	0,111	6	0,273
Kosten (Herstellkosten einer Periode)	6	0,333	2	0,091
Effektivität des Vermögensmanagements (Bestandsreichweite)	6	0,333	2	0,091

Tabelle 17: Gewichte der Ziele bei schlanker und agiler Strategie

Gewichte der Abweichungen

Tabelle 18 zeigt die festgelegten Gewichte für negative und positive Abweichungen.

Kennzahl	Gewicht für negative Abweichung	Gewicht für positive Abweichung
Liefertreue	1	0
Kundenauftragsdurchlaufzeit	0	1
Auslastung	1	1
Herstellkosten einer Periode	0	1
Bestandsreichweite	0	1

Tabelle 18: Gewichte der Abweichungen

Demgemäß werden eine Maximierung der Liefertreue sowie eine Minimierung der Kundenauftragsdurchlaufzeit, der Herstellkosten einer Periode und der Bestandsreichweite angestrebt. Für die Auslastung sind Unterschreitungen des Zielwertes aus wirtschaftlichen Gründen und Überschreitungen aus prozesstechni-

schen Gründen unerwünscht, weshalb beiden Gewichten der Wert eins zugeordnet wird.

Abweichungen

Die Abweichungen werden nach Formel (2.1) für jede Alternative berechnet. In Tabelle 19 ist das Ergebnis der Bewertung für unterschiedliche Strategien zusammengefasst.

Alternative	Schlank	Moderat agil	Agil
1	0,1588	0,2042	0,2484
2	0,1118	0,1383	0,1797
3	0,2161	0,2065	0,2199
4	0,2084	0,1942	0,2058
5	0,1974	0,1875	0,2024
6	0,1822	0,1785	0,1979
7	0,1805	0,1786	0,1990

Tabelle 19: Ergebnis der Bewertung

Es ist ersichtlich, dass Alternative 2, das heißt, eine Erweiterung der Kapazitäten, zur geringsten Abweichung von den angestrebten Zielwerten führt. Sofern eine Erweiterung der Kapazitäten nicht möglich ist, ist die Wahl der optimalen Alternative von der verfolgten Strategie abhängig. Bei einer schlanken Strategie bewirkt die Ausgangssituation, also Alternative 1, die geringste Abweichung, während bei einer moderat agilen beziehungsweise agilen Strategie die Durchführung einer Reorganisation gemäß Alternative 6 zur kleinsten Abweichung führt.

3.8 Ergebnisinterpretation

Abschließend werden einerseits fallbezogene Ergebnisse erörtert, welche die betrachtete Supply Chain betreffen, und andererseits allgemeine Erkenntnisse diskutiert, welche von der Fallstudie abgeleitet werden können.

3.8.1 Fallbezogene Ergebnisse

Anhand der Bewertungsergebnisse werden Handlungsempfehlungen gegeben, welche in Tabelle 20 zusammengefasst sind. Dabei wird berücksichtigt, welche Strategie die Supply Chain verfolgt und ob eine Kapazitätserweiterung durchführbar ist. Wie beschrieben, ist für die gegenständliche Logistikkette von einer moderat agilen Strategie auszugehen. Sofern eine Kapazitätserweiterung umsetzbar ist, wird das Szenario Investition empfohlen. Anderenfalls soll das Szenario Reorganisation und die damit verbundene Verschiebung des Kundenauftragsentkopplungspunkts Anwendung finden. Dabei ist für den Prognosen-Pooling-Faktor ein Wert von 16 zweckmäßig. Für eine schlanke beziehungsweise agile Supply Chain Strategie werden die Handlungsempfehlungen entsprechend angepasst.

Strategie	Kapazitätserweiterung	Handlungsempfehlung
Schlank	Durchführbar	Investition durchführen
Moderat agil	Durchführbar	Investition durchführen
Agil	Durchführbar	Investition durchführen
Schlank	Nicht durchführbar	Ausgangssituation beibehalten
Moderat agil	Nicht durchführbar	Reorganisation umsetzen
Agil	Nicht durchführbar	Reorganisation umsetzen

Tabelle 20: Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Fallstudie und die damit verbundenen Handlungsempfehlungen stehen mit drei wichtigen Charakteristiken der betrachteten Supply Chain im Einklang, nämlich Agilität, Variabilität und Komplexität.

Agilität der Supply Chain

Die Anforderungen einer Supply Chain werden erheblich durch das Geschäftsumfeld bestimmt. Die betrachtete Supply Chain operiert in der Telekommunikationsindustrie, wo Agilität generell eine wichtige Rolle spielt. Dies bedeutet, dass bei einer Verbesserung der Supply Chain Prozesse die Dimension Zeit im Vordergrund steht. Die Dimension Kosten muss Berücksichtigung finden, jedoch mit einer entsprechend geringeren Priorität. Bei der gegenständlichen Supply Chain ist insbesondere die Erreichung einer hohen Lieferzuverlässigkeit ein vorrangiges Ziel. Hierzu werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen:

- Die Lieferzuverlässigkeit kann durch eine Erweiterung der Kapazitäten verbessert werden, indem kapazitätsbedingte Wartezeiten reduziert werden. Die Investition in Ressourcen erhöht jedoch auch die Herstellkosten.
- Alternativ kann durch eine Reorganisation des Prozessdesigns die Lieferzuverlässigkeit gesteigert werden. Es wird die Lage des Kundenauftragsentkopplungspunkts neu definiert, um einen Teil der Fertigung prognosegetrieben durchzuführen. Infolge einer Zunahme der Bestände bewirkt diese Maßnahme eine Kostensteigerung. Die mit der Reorganisation des Prozessdesigns einhergehenden negativen Effekte können jedoch zu einem Teil kompensiert werden. Die prognoseorientierte Leistungserstellung bietet Möglichkeiten für eine optimierte Einlastung von Produktionsaufträgen. Die Zeit zwischen der Erstellung einer Prognose und dem Eingehen eines entsprechenden Kundenauftrags kann zum Pooling von Produktionsaufträgen mit gleichen Produkten genutzt werden, was zu einer Verminderung der Rüstnotwendigkeit führt. Es ist festzuhalten, dass die in der Fallstudie dargestellte Reorganisation des Prozessdesigns durch unternehmensübergreifende Maßnahmen ermöglicht wird. Eine prognosegetriebene Fertigung bedarf akkurater Forecasts, welche durch den Informationsaustausch zwischen den Original Equipment Produzenten und dem First Tier Lieferanten realisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass die geforderte Prognosequalität durch Nutzung vorhandener Daten im Rahmen der Vendor Managed Inventories und im Zusammenspiel mit der erfolgten Anpassung der IT-Systeme erreicht wird.

Variabilität in der Supply Chain

Die Leistungsfähigkeit der betrachteten Supply Chain wird durch Variabilitätseffekte entscheidend bestimmt. Variabilität wird im vorliegenden Fall durch externe und interne Ursachen bewirkt. Als externe Ursachen sind primär das schwankende Nachfrageverhalten und die kurzen Produktlebenszyklen zu nennen. Interne Ursachen sind hauptsächlich Produktionsstörungen als Resultat der komplexen Fertigungstechnologie und der engen Kopplung der Fertigungsstufen. Da Variabilität einen entscheidenden Einfluss auf die Performance des Leistungserstellungsprozesses hat, findet diese bei der Analyse und Bewertung gebührend Berücksichtigung. Einerseits sind das analytische Modell und das Simulationsmodell stochastisch. Andererseits fließen nicht nur Periodendurchschnitte, sondern auch die Verteilungen von Kennzahlen in die Bewertung der Handlungsalternativen ein.

Komplexität der Supply Chain

Ein bedeutsamer Aspekt der Fallstudie ist die Komplexität des betrachteten Systems. Der hohe Komplexitätsgrad wird besonders durch die Anzahl der Kundenaufträge, den Umfang des Fertigungsprogramms, die Anzahl der Arbeitspläne und die Ressourcenausstattung geprägt. Es wird eine Vorgehensweise zur Komplexitätsreduktion gewählt, welche auf der Kombination eines analytischen Modells mit einem Simulationsmodell beruht. Komplexität wird nicht nur durch die Anzahl der Elemente des Systems, sondern darüber hinaus durch interne und externe Risiken des Leistungserstellungsprozesses bestimmt. Bei der Analyse und Bewertung komplexer Systeme müssen vielfältige Wirkungszusammenhänge berücksichtigt werden. Es sind insbesondere Zielkonflikte, wie das Erreichen kurzer Kundenauftragsdurchlaufzeiten trotz geringer Bestände, von entscheidender Relevanz. Aus diesem Grund wird die Bewertung der Analyseergebnisse als multikriterielles Entscheidungsproblem gestaltet.

3.8.2 Allgemeine Erkenntnisse

Basierend auf den Erfahrungen der Fallstudie können allgemeine Erkenntnisse für die Lösung von Problemstellungen mit vergleichbarer Struktur abgeleitet werden. Es kann festgestellt werden, dass die angewandte Vorgehensweise zur Analyse und Bewertung alternativer Supply Chain Designs folgende Anforderungen erfüllt:

- Im Supply Chain Management sind häufig Systeme mit hoher Komplexität Gegenstand von Verbesserungen. Die angewandte Vorgehensweise ist in der Lage, durch eine Reduktion des Komplexitätsgrads, den Aufwand zur Prozessanalyse zu verringern. Es wird gezeigt, wie durch eine Kombination analytischer Methoden und Computersimulation eine zulässige Modellvereinfachung erreicht werden kann.
- Im Supply Chain Management erfordern Zielkonflikte regelmäßig eine multikriterielle Entscheidungsfindung. Die angewandte Vorgehensweise beurteilt alternative Supply Chain Designs anhand mehrerer Kennzahlen. Eine wichtige Grundlage ist dabei die Berücksichtigung der Strategie der Supply Chain. Außerdem finden die Kennzahlen des SCOR Modells Anwendung, was die Verfügbarkeit notwendiger Benchmark-Daten fördert.
- Es wird, neben der Forderung der theoretischen Korrektheit, auch jener der praktischen Anwendbarkeit entsprochen, da die Analyse und Bewertung in einem realen Umfeld mit einem vertretbaren Aufwand umsetzbar ist. Die Verwendung der im etablierten SCOR Modell definierten Kennzahlen begünstigt

die die Akzeptanz der Vorgehensweise und die Integration mit bestehenden Managementaktivitäten.

Des Weiteren findet in der Fallstudie das Konzept Make-to-Forecast Anwendung. Es wird anhand einer Supply Chain im Telekommunikationssektor gezeigt, wie bei einer großen Variantenvielfalt und einer schwankenden Nachfrage dem Erfordernis einer hohen Lieferzuverlässigkeit Rechnung getragen werden kann. Insbesondere ist wegen regelmäßiger Konstruktionsadaptierungen eine Lagerhaltung der Produkte nur sehr eingeschränkt möglich. Mit der Hybridform Make-to-Forecast kann ein guter Ausgleich zwischen geringen Beständen und einer hohen Lieferzuverlässigkeit erreicht werden. Grundlage für eine Umsetzung sind Bestrebungen des Supply Chain Managements, welche die erforderliche Prognosequalität sicherstellen.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Frage beantwortet, wie der komplexe Leistungserstellungsprozess einer Supply Chain effektiv und effizient verbessert werden kann. Eingangs werden theoretische Grundlagen zur Analyse und Bewertung von Supply Chain Designs behandelt. Dazu wird der gegenwärtige Forschungsstand erörtert und ein Vorgehensmodell zur Analyse sowie ein Modell zur Bewertung abgeleitet. Die Modelle werden dann integriert und im Rahmen einer Fallstudie zur Lösung einer realen Problemstellung angewandt.

Modell zur Analyse komplexer Supply Chains

Es wird ein Modell zur Analyse komplexer Supply Chains vorgestellt, wo die Leistungserstellungsprozesse durch eine große Anzahl an Elementen mit einem hohen Maß an Interaktion und durch umfangreiche Variabilität gekennzeichnet sind. Ziel ist dabei ein Ausgleich zwischen einer detaillierten, stochastischen Berücksichtigung von dynamischen Effekten und einem angemessenen Aufwand für die Durchführung der Analyse. Dazu werden die spezifischen Stärken von analytischen Methoden und Simulation kombiniert. Das Modell folgt bei der Prozessanalyse diesen Schritten:

1. Abstrahierung des realen Systems und Abbildung als analytisches Modell, insbesondere als Warteschlangenmodell.
2. Reduzierung der Komplexität durch Identifikation kritischer und nicht-kritischer Prozessteile anhand der Ergebnisse des analytischen Modells und weiterer Inputs aus dem realen System.
3. Erstellung und Anwendung eines Simulationsmodells zur Analyse alternativer Prozessdesigns, wobei als kritisch identifizierte Prozessteile detailliert, anhand des realen Systems, und als nicht-kritisch identifizierte Prozessteile vereinfacht, unter Verwendung des Outputs des analytischen Modells, abgebildet werden.

Modell zur Bewertung komplexer Supply Chains

Des Weiteren wird ein Modell zur multikriteriellen Bewertung des Leistungserstellungsprozesses komplexer Supply Chains beschrieben, welches Konflikte konkurrierender Ziele sowie die Strategie der Supply Chain berücksichtigt. Außerdem fließen Risiken der Prozesse in die Bewertung ein, da nicht nur Mittelwerte von Kennzahlen, sondern auch die Verteilungen der Werte herangezogen wer-

den. Die praktische Umsetzbarkeit und Akzeptanz wird durch die Einfachheit des Modells und die Integration des etablierten SCOR Modells gefördert. Die Prozessbewertung umfasst folgende Schritte:

1. Bestimmung von Zielwerten pro Ziel anhand der Stimme des Kunden, der Leistungsfähigkeit der Supply Chain oder der Leistungsfähigkeit der Mitbewerber.
2. Gewichtung der Ziele gemäß der verfolgten Strategie der Supply Chain.
3. Festlegung der Gewichte der Abweichungen, je nachdem ob eine negative beziehungsweise positive Abweichung des Werts eines Zieles vom Zielwert für die Bewertung relevant ist.
4. Berechnung der gewichteten Abweichungen der erreichten Werte der Ziele von den angestrebten Zielwerten und Auswahl der Alternativen anhand der Ergebnisse.

Fallstudie: Supply Chain in der Elektronikindustrie

In einer Fallstudie wird integrierte Anwendung der Modelle zur Analyse und Bewertung alternativer Prozessdesigns demonstriert. Es handelt sich dabei um eine reale Supply Chain in der Elektronikindustrie, welche durch einen hohen Grad an Komplexität gekennzeichnet ist. Bedingt durch das agile Umfeld der Logistikkette kommt der Lieferzuverlässigkeit ein besonderer Stellenwert zu. Zur Erreichung einer adäquaten Lieferzuverlässigkeit wird nicht nur eine Erweiterung der Kapazitäten erwogen, sondern werden auch Möglichkeiten einer Reorganisation der Prozesse geprüft. Es wird gezeigt, dass eine Anpassung des Kundenauftragsentkopplungspunkts unter bestimmten Umständen eine vorteilhafte Alternative zur Erweiterung der Kapazitäten darstellt. Konkret wird das Konzept Make-to-Forecast implementiert, welches auf einer dynamischen Festlegung des Kundenauftragsentkopplungspunkts basiert. Eine wichtige Voraussetzung für Make-to-Forecast ist die Verfügbarkeit kurzfristiger Nachfrageprognosen mit entsprechend hoher Qualität. Im betrachteten Fall ist dies durch die Nutzung des unternehmensübergreifenden Informationsflusses möglich, indem Daten im Rahmen von Vendor Managed Inventories zur Planung herangezogen werden.

Wesentliche Erkenntnisse

Als Ergebnis der Arbeit werden folgende Erkenntnisse für die effektive und effiziente Verbesserung von Supply Chain Prozessen gewonnen:

- Da im Supply Chain Management häufig Systeme mit hoher Komplexität im Mittelpunkt von Verbesserungsmaßnahmen stehen, wird gezeigt, wie durch eine Kombination von analytischen Methoden und Computersimulation Modellvereinfachungen erzielt werden können.
- Die Analyse von alternativen Prozessdesigns ist für eine gezielte Verbesserung einer Supply Chain nicht ausreichend. Auf der Grundlage der Analyseergebnisse muss anschließend eine multikriterielle Bewertung erfolgen, welche Zielkonflikte berücksichtigt. Zudem ist die Strategie der Supply Chain ein wichtiger Einflussfaktor für die Beurteilung von Alternativen.
- Entscheidungen des Supply Chain Managements sollen theoriegeleitet sein und auf fundierten Analyse- und Bewertungsergebnissen basieren. Für eine praktische Anwendbarkeit theoretischer Modelle muss jedoch auf Zeit- und Ressourcenrestriktionen Rücksicht genommen werden, denen der Entscheidungsträger in der Praxis ausgesetzt ist. Neben der systematischen Reduktion von Komplexität kann die Integration etablierter Instrumente, wie des SCOR Modells, die Implementierung in einem realen Umfeld erleichtern.
- Das Konzept Make-to-Forecast, welches auf einer dynamischen Festlegung des Kundenauftragsentkoppelungspunkts basiert, erlaubt eine bedarfsgerechte Skalierung der Bestandshöhe beziehungsweise der Lieferzuverlässigkeit. Eine wichtige Voraussetzung zur Anwendung von Make-to-Forecast sind kurzfristige Nachfrageprognosen mit entsprechend hoher Qualität, was insbesondere durch eine Gestaltung des unternehmensübergreifenden Informationsflusses erreicht werden kann.

Im Rahmen der Forschungsarbeit konnte festgestellt werden, dass eine systematische Vorgehensweise, welche analytische Methoden und Simulation bei der Prozessanalyse kombiniert und die Strategie der Supply Chain sowie Zielkonflikte bei der Prozessbewertung berücksichtigt, eine effektive und effiziente Verbesserung komplexer Supply Chain Prozesse ermöglicht. Die eingangs aufgestellte Hypothese kann somit bestätigt werden. Für eine zusätzliche empirische Absicherung der Ergebnisse und eine Entwicklung der Modelle kann eine weitere Prüfung anhand unterschiedlicher Problemstellungen verschiedenartiger Supply Chains zweckmäßig sein.

5 Quellenverzeichnis

Anupindi, R., Chopra, S., Deshmukh, S. D., van Mieghem, J. A., Zemel, E. (1999), *Managing Business Process Flows*, Prentice Hall, Upper Saddle River.

APQC (2007), <http://www.apqc.org>, 01.07.2007.

ARENA (1995), *Arena User's Guide*, Rockwell Automation, Warrendale.

Bertrand, J. W. M., Fransoo, J. C. (2002), Modelling and simulation: Operations management research methodologies using quantitative modeling, in: *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 22, No. 2, S. 241 - 264.

Blecker, T., Abdelkafi, N. (2006), Complexity and variety in mass customization systems: analysis and recommendations, in: *Management Decision*, Vol. 44, No. 7, S. 908 - 929.

Brooks, R. J., Tobias, A. M. (2000), Simplification in the simulation of manufacturing systems, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 5, S. 1009 - 1027.

Brown, E. (1988), IBM Combines Rapid Modeling Technique and Simulation to Design PCB Factory-of-the-Future, in: *Industrial Engineering*, Vol. 20, No. 6, S. 23 - 26 und S. 90.

Byrne, M. D., Bakir, M. A. (1999), Production planning using a hybrid simulation-analytical approach, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, S. 305 - 311.

Cachon, G., Terwisch, C. (2006), *Matching Supply with Demand: An Introduction to Operations Management*, Irwin McGraw-Hill, New York.

Calinescu, A., Efstathiou, J., Schirm, J., Bermejo, J. (1998), Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, No. 7, S. 723 - 733.

Charnes, A., Cooper, W. W. (1961), *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, John Wiley and Sons, New York.

Chiang, D., Guo, R., Chen, A., Cheng, M., Chen, C. (2007), Optimal supply chain configurations in semiconductor manufacturing, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 45, No. 3, S. 631 - 651.

Chopra, S., Meindl, P. (2006), *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*, 3. Aufl., Prentice Hall, Upper Saddle River.

Christopher, M., Towill, D. R. (2000), Supply Chain Migration from Lean and Functional to Agile and Customized, in: *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 5, No. 4, S. 206 - 213.

Chung, C. A. (2004), *Simulation Modeling Handbook: a practical approach*, CRC Press, Boca Raton u.a.

Chwif, L., Barretto, M. R. P., Paul, R. J. (2000), On simulation model complexity, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2000*, Vol. 1, S. 449 - 455.

Cohen, S., Roussel, J. (2006), *Strategisches Supply Chain Management*, Springer, Berlin u.a.

Corsten, H., Gössinger, R. (2001), *Einführung in das Supply Chain Management*, Oldenbourg, München u.a.

Davis, S. (1988): *Vorgriff auf die Zukunft (Originaltitel: Future Perfect)*, Haufe, Freiburg im Breisgau.

Dhahri, I., Chabchoub, H. (2007), Nonlinear goal programming models quantifying the bullwhip effect in supply chain based on ARIMA parameters, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No. 3, S. 1800 - 1810.

Domschke, W., Scholl, A. (2000), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*, Springer, Berlin u.a.

ECR Europe (2007), <http://www.ecrnet.org>, 01.07.2007.

Evans, J. R., Olson, D. L. (2001), *Introduction to Simulation and Risk Analysis*, 2. Aufl., Prentice Hall, Upper Saddle River.

Fetter, F. B., Thompson, O. J. (1969), A decision model for the design and operation of a progressive patient care hospital, in: *Medical Care*, Vol. 7, No. 6, S. 450 - 462.

Fisher, M. (1997), What is the Right Supply Chain for your Product?, in: Harvard Business Review, Vol. 75, No. 2, S. 105 - 116.

Fishman, G. S. (2001), Discrete-Event Simulation, Modeling, Programming, and Analysis, Springer, Berlin u.a.

Gnoni, M. G., Iavagnilio, R., Mossa, G., Mummolo, G., Di Leva, A. (2003), Production planning of a multi-site manufacturing system by hybrid modelling: A case study from the automotive industry, in: International Journal of Production Economics, Vol. 85, No. 2, S. 251 - 262.

Granger, J., Krishnamurthy, A., Robinson, S. M. (2001), Stochastic modeling of airlift operations, in: Proceedings of the Winter Simulation Conference 2001, Vol. 1, S. 432 - 440.

Gunasekaran, A., Kobu, B. (2007), Performance measures and metrics in logistics and supply chain management: a review of recent literature (1995 - 2004) for research and applications, in: International Journal of Production Research, Vol. 45, No. 12, S. 2819 - 2840.

Hemaida, R. S., Kwak, N. K. (1994), A Linear Goal Programming Model for Trans-shipment Problems with Flexible Supply and Demand Constraints, in: The Journal of the Operational Research Society, Vol. 45, No. 2, S. 215 - 224.

Hieber, R. F. (2002) Supply Chain Management, A Collaborative Performance Measurement Approach, vdf Hochschulverlag, Zürich.

Hopp, W. J., Spearman, M. L. (1996), Factory Physics, Irwin McGraw-Hill, New York.

Hsieh, S. (2002), Hybrid analytic and simulation models for assembly line design and production planning, in: Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 10, S. 87 - 108.

Hung, Y. F., Leachman, R. C. (1999), Reduced simulation models of wafer fabrication facilities, in: International Journal of Production Research, Vol. 37, No. 12, S. 2685 - 2701.

Hwang, H. B., Chong, C. S. P., Xie, N., Burgess, T. F. (2005), Modelling a complex supply chain: understanding the effect of simplified assumptions, in: International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 13, S. 2829 - 2872.

iCognitive (2007), <http://www.icognitive.com>, 01.07.2007.

Jain, S., Lim, C. C., Gan, B. P., Low, Y. H. (1999), Criticality of Detailed Modeling in Semiconductor Supply Chain Simulation, in: Proceedings of the Winter Simulation Conference 1999, Vol. 1, S. 888 - 896.

Jammerneegg, W., Piller, F., Schodl, R. (2003), Integriertes Supply Chain Design - Konzept, IT-Unterstützung, Umsetzung, in: Geyer-Schulz, A., Taudes, A. (Hrsg.), Informationswirtschaft: Ein Sektor mit Zukunft, Köllen Verlag, Bonn, S. 175 - 190.

Jammerneegg, W., Reiner, G. (2001), Ableitung und Bewertung von Handlungsalternativen in einem Unternehmen der Elektroindustrie, in: Jammerneegg, W., Kischka, P. (Hrsg.), Kundenorientierte Prozessverbesserungen, Konzepte und Fallstudien, Springer, Berlin u.a., S. 237 - 247.

Jammerneegg, W., Reiner, G. (2007), Performance improvement of supply chain processes by coordinated inventory and capacity management, International Journal of Production Economics, Vol. 108, No. 1, S. 183 - 190.

Jones, D., Tamiz, M. (2002) Goal programming in the period 1990 - 2000, in: M. Ehrgott (Hrsg.), Multiple Criteria Optimization: State of the art annotated bibliographic surveys, Kluwer, Boston, S. 129 - 170.

Kajüter, P. (2003), Instrumente zum Risikomanagement in der Supply Chain, in: Stölzle, W., Otto, A. (Hrsg.), Supply Chain Controlling in Theorie und Praxis, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 107 - 135.

Kelton, D. W., Sadowski, R. P., Sadowski, D. A. (2002), Simulation with Arena, 2. Aufl., McGraw-Hill, Boston u.a.

Kim, B., Kim, S. (2001), Extended model for a hybrid production planning approach, in: International Journal of Production Economics, Vol. 73, No. 2, S. 165 - 173.

Klassen, R. D., Menor, L. J. (2006), The process management triangle: An empirical investigation of process trade-offs, in: Journal of Operations Management, im Druck.

Ko, H. J., Ko, C. S., Kim, T. (2006), A hybrid optimization/simulation approach for a distribution network design of 3PLS, in: Computer & Industrial Engineering, Vol. 50, No. 4, S. 440 - 449.

Kumar, M., Vrat, P., Shankar, R. (2004), A fuzzy goal programming approach for vendor selection problem in a supply chain, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 46, No.1, S. 69 - 85.

Lambert, D. M., Pohlen, T. L. (2001), *Supply Chain Metrics*, in: *International Journal of Logistics Management*, Vol. 12, No. 1, S. 1 - 19.

Lapide, L. (2000), True Measures of Supply Chain Performance, in: *Supply Chain Management Review*, Vol. 4, No. 3, S. 25 - 28.

Laux, H. (2002), *Entscheidungstheorie*, 5. Aufl., Springer, Berlin u.a.

Law, A. M., Kelton, W. D. (2000): *Simulation Modeling and Analysis*, 3. Aufl., McGraw-Hill, New York u.a.

Lee, H. (2002), Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties, in: *California Management Review*, Vol. 44, No. 3, S. 105 - 119.

Lee, Y. H., Kim, S. H. (2002), Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints, in: *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1, S. 169 - 190.

McCarthy, I. P. (2004), The what, why and how of mass customization, in: *Production Planning & Control*, Vol. 15, No. 4, S. 347 - 351.

Melnyk, S., Stewart, D., Swink, M. (2004), Metrics and performance measurement in operations management: dealing with the metrics maze, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 22, No. 3, S. 209 - 217.

Meredith, J., Akinc, U. (2007), Characterizing and structuring a new make-to-forecast production strategy, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 25, No. 3, S. 623 - 642.

Merkuryev, Y., Petuhova, J., Grabis, J. (2003), Analysis of dynamic properties of an inventory system with service-sensitive demand using simulation, in: *Proceedings of the 15th European Simulation Symposium - Simulation in Industry*, S. 509 - 514.

Min, H., Storbeck, J. (1991), On the Origin and Persistence of Misconceptions in Goal Programming, in: *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 42, No. 4., S. 301 - 312.

MPX (2003), MPX WIN 4.3 - For use with Windows, User Manual, Network Dynamics Inc., Framingham.

Naylor, J. B., Naim, M. M., Berry, D. (1999), Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 62, No. 1, S. 107 - 118.

Network Dynamics (2007), <http://www.networkdyn.com>, 01.07.2007.

Nolan, R. L., Sovereign, M. G. (1972), A Recursive Optimization and Simulation Approach to Analysis with an Application to Transportation, in: *Management Science*, Vol. 18, No. 12, S. 676 - 690.

Percin, S. (2006), An application of the integrated AHP-PGP model in supplier selection, in: *Measuring Business Excellence*, Vol. 10, No. 4, S. 34 - 49.

Perona, M., Miragliotta, G. (2004), Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 90, No. 1, S. 103 - 115.

Pine, B. J. (1993), *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*, Harvard Business School Press, Boston.

Piplani, R., Puah, S. A. (2004), Simplification Strategies for Simulation Models of Semiconductor Facilities, in: *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 15, No. 7, S. 618 - 625.

Rabelo, L. C., Helal, M., Jones, A., Min, J., Son, Y., Deshmukh, A. (2003), New manufacturing modeling methodology: a hybrid approach to manufacturing enterprise simulation, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2003*, S. 1125-1133.

Raturi, A. S., Meredith, J. R., McCutcheon, D. M., Camm, J. D. (1990), Coping with the build-to-forecast environment, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 9, No. 2, S. 230 - 249.

Rees, L. P., Clayton, E. R., Taylor, B. W. (1987), A Linear Goal Programming Model of a Multi-Period, Multi-Commodity Network Flow Problem, in: *Journal of Business Logistics*, Vol. 8, No. 1, S. 117 - 138.

Reiner, G. (2005), Customer-oriented improvement and evaluation of supply chain processes supported by simulation models, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 96, No. 3, S. 381 - 395.

Rockwell Automation (2007), <http://www.arenasimulation.com>, 01.07.2007.

Rommelfanger, H., Eickenmeier, S. (2002), *Entscheidungstheorie*, Springer, Berlin u.a.

SAP (2007),
<http://www.sap.com/germany/solutions/business-suite/scm/index.epx>, 01.07.2007.

Sargent, R. G. (1994), A historical view of hybrid simulation/analytic models, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference 1994*, S. 383 - 386.

Shanthikumar, J.G., Sargent R.G. (1983), A Unifying View of Hybrid Simulation/Analytic Models and Modeling, in: *Operations Research*, Vol. 31, No. 6, S. 1030-1052.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (2000), *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*, Irwin McGraw-Hill, New York.

Sivadasan, S., Efstathiou, J., Frizelle, G., Shirazi, R., Calinescu, A. (2002), An information-theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems, in: *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, No. 1, S. 80 - 102.

Supply Chain Council (2007), <http://www.supply-chain.org>, 01.07.2007.

Suri, R. (1989a), Rapid Modeling: How It Assists Manufacturing Competitiveness, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference 1989*, S. 80 - 83.

Suri, R. (1989b), Lead Time Reduction Through Rapid Modeling, in: *Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 7, S. 66 - 68.

Tamiz, M. (1996), An Overview of Current Solution Methods and Modelling Practices in Goal Programming, in: Tamiz, M. (Hrsg.), *Multi-Objective Programming and Goal Programming, Theories and Applications*, Springer, Berlin u.a., S. 198 - 211.

Tamiz, M., Jones, D. (1997), An Example of Good Modelling Practice in Goal Programming: Means for Overcoming Incommensurability, in: Caballero, R., Ruiz, F., Steuer, R. (Hrsg.), *Advances in Multiple Objective and Goal Programming*, Springer, Berlin u.a., S. 29 - 37.

Tamiz, M., Jones, D., Romero, C. (1998), Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 111, No. 3, S. 569 - 581.

Taudes, A., Reiner, G., Schodl, R. (2003), Kundenorientiertes Performance Measurement-System für Supply Chains, in: Bensberg, F., Brocke, J., Schultz, M. (Hrsg.), *Trendberichte zum Controlling*, Physica Verlag, Heidelberg, S. 393 - 411.

Tempelmeier, H., Kuhn, H. (1993), *Flexible Fertigungssysteme, Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb*, Springer, Berlin u.a.

The Performance Measurement Group (2007),
<http://www.pmgbenchmarking.com>, 01.07.2007.

Thorn, J. (2001), *Taktisches Supply Chain Planning*, Peter Lang Verlag, Frankfurt u.a.

van Dijk, N. M., van der Sluis, E. (2006), Check-in computation and optimization by simulation and IP in combination, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, No. 3, S. 1152 - 1168.

Venkateswaran, J., Son, Y., Jones, A. (2004), Hierarchical production planning using a hybrid system dynamic-discrete event simulation architecture, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2004*, S. 1094 - 1102.

Verma, A. K. (2006), Improving agility of supply chains using base stock model and computer based simulations, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 36, No. 6, S. 445 - 454.

Wadhwa, V., Ravindran, A. R. (2007), Vendor selection in outsourcing, in: *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 12, S. 3725 - 3737.

Wang, G., Huang, S. H., Dismukes, J. P. (2004), Product-driven supply chain selection using integrated multi-criteria decision-making methodology, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 91, No. 1, S. 1 - 15.

Werners, B. (2006), *Grundlagen des Operations Research*, Springer, Berlin u.a.

Womack, J., Jones, D., Roos, D. (1990), *The Machine that Changed the World*, Rawson, New York.

Forschungsergebnisse der Wirtschaftsuniversität Wien

Herausgeber: Wirtschaftsuniversität Wien –
vertreten durch a.o. Univ. Prof. Dr. Barbara Sporn

- Band 1 Stefan Felder: Frequenzallokation in der Telekommunikation. Ökonomische Analyse der Vergabe von Frequenzen unter besonderer Berücksichtigung der UMTS-Auktionen. 2004.
- Band 2 Thomas Haller: Marketing im liberalisierten Strommarkt. Kommunikation und Produktplanung im Privatkundenmarkt. 2005.
- Band 3 Alexander Stremitzer: Agency Theory: Methodology, Analysis. A Structured Approach to Writing Contracts. 2005.
- Band 4 Günther Sedlacek: Analyse der Studiendauer und des Studienabbruch-Risikos. Unter Verwendung der statistischen Methoden der Ereignisanalyse. 2004.
- Band 5 Monika Knassmüller: Unternehmensleitbilder im Vergleich. Sinn- und Bedeutungsrahmen deutschsprachiger Unternehmensleitbilder – Versuch einer empirischen (Re-)Konstruktion. 2005.
- Band 6 Matthias Fink: Erfolgsfaktor Selbstverpflichtung bei vertrauensbasierten Kooperationen. Mit einem empirischen Befund. 2005.
- Band 7 Michael Gerhard Kraft: Ökonomie zwischen Wissenschaft und Ethik. Eine dogmenhistorische Untersuchung von Léon M.E. Walras bis Milton Friedman. 2005.
- Band 8 Ingrid Zechmeister: Mental Health Care Financing in the Process of Change. Challenges and Approaches for Austria. 2005.
- Band 9 Sarah Meisenberger: Strukturierte Organisationen und Wissen. 2005.
- Band 10 Anne-Katrin Neyer: Multinational teams in the European Commission and the European Parliament. 2005.
- Band 11 Birgit Trukeschitz: Im Dienst Sozialer Dienste. Ökonomische Analyse der Beschäftigung in sozialen Dienstleistungseinrichtungen des Nonprofit Sektors. 2006
- Band 12 Marcus Kölling: Interkulturelles Wissensmanagement. Deutschland Ost und West. 2006.
- Band 13 Ulrich Berger: The Economics of Two-way Interconnection. 2006.
- Band 14 Susanne Guth: Interoperability of DRM Systems. Exchanging and Processing XML-based Rights Expressions. 2006.
- Band 15 Bernhard Klement: Ökonomische Kriterien und Anreizmechanismen für eine effiziente Förderung von industrieller Forschung und Innovation. Mit einer empirischen Quantifizierung der Hebeleffekte von F&E-Förderinstrumenten in Österreich. 2006.
- Band 16 Markus Imgrund: Wege aus der Insolvenz. Eine Analyse der Fortführung und Sanierung insolventer Klein- und Mittelbetriebe unter besonderer Berücksichtigung des Konfigurationsansatzes. 2007.
- Band 17 Nicolas Knotzer: Product Recommendations in E-Commerce Retailing Applications. 2008.
- Band 18 Astrid Dickinger: Perceived Quality of Mobile Services. A Segment-Specific Analysis. 2007.
- Band 19 Nadine Wiedermann-Ondrej: Hybride Finanzierungsinstrumente in der nationalen und internationalen Besteuerung der USA. 2008.
- Band 20 Helmut Sorger: Entscheidungsorientiertes Risikomanagement in der Industrieunternehmung. 2008.
- Band 21 Martin Rietsch: Messung und Analyse des ökonomischen Wechselkursrisikos aus Unternehmenssicht: Ein stochastischer Simulationsansatz. 2008.

- Band 22 Hans Christian Mantler: Makroökonomische Effizienz des Finanzsektors. Herleitung eines theoretischen Modells und Schätzung der Wachstumsimplikationen für die Marktwirtschaften und Transformationsökonomien Europas. 2008.
- Band 23 Youri Tacoun: La théorie de la valeur de Christian von Ehrenfels. 2008.
- Band 24 Monika Koller: Longitudinale Betrachtung der Kognitiven Dissonanz. Eine Tagebuchstudie zur Reiseentscheidung. 2008.
- Band 25 Marcus Scheiblecker: The Austrian Business Cycle in the European Context. 2008.
- Band 26 Aida Numic: Multinational Teams in European and American Companies. 2008.
- Band 27 Ulrike Bauernfeind: User Satisfaction with Personalised Internet Applications. 2008.
- Band 28 Reinhold Schodl: Systematische Analyse und Bewertung komplexer Supply Chain Prozesse bei dynamischer Festlegung des Auftragsentkopplungspunkts. 2008.

www.peterlang.de