



Dissertation

Ein integrierter Planungsansatz zur Ermittlung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie unter Unsicherheiten

Christoph Weskamp, M.Sc.

Schriftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum politicarum (Dr. rer. pol.)
im Fach Wirtschaftsinformatik

eingereicht an der
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
der Universität Paderborn

Paderborn, Juni 2017

Gutachter:

Prof. Dr. Leena Suhl (Erstgutachter)

Prof. Dr. Achim Koberstein (Zweitgutachter)

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis meiner Forschung, welche ich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Decision Support & Operations Research Lab der Universität Paderborn durchgeführt habe. Rückblickend eine Zeit, in der zwar einige Herausforderungen zu bewältigen waren, in der sich aber auch die ausgezeichnete Möglichkeit bot an spannenden Forschungsprojekten mitzuarbeiten sowie wichtige berufliche und persönliche Erfahrungen zu sammeln. Mein herzlicher Dank gilt allen, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Betreuerin Prof. Dr. Leena Suhl dafür bedanken, dass sie mir die Chance gegeben hat, diese Arbeit in einer durch sie geschaffenen ausgezeichneten Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl anzufertigen. Durch ihre hervorragende fachliche und persönliche Unterstützung und Beratung während der Arbeit hat sie sehr zur Erreichung meiner Ziele beigetragen. Darüber hinaus möchte ich Prof. Dr. Achim Koberstein für die Heranführung an wissenschaftliche Fragestellungen in der Zeit meines Aufenthalts an der Universität in Hamburg und für die Übernahme des Zweitgutachtens ganz herzlich danken. Mein Dank gilt weiterhin Prof. Dr. Dennis Kundisch und Prof. Dr. Stefan Betz für das Mitwirken in der Promotionskommission.

Ein großes Dankeschön für viele Anregungen und die tolle Zusammenarbeit am Lehrstuhl geht an alle aktuellen und ehemaligen Kollegen des DS&OR Labs. Insbesondere möchte ich Stefan Guericke, Daniela Guericke und Marius Merschformann für wertvolle Diskussionen über alle Phasen der Promotion danken. Mein Dank gilt auch allen, die mich in Hamburg unterstützt haben, besonders Prof. Dr. Stefan Voß und Dr. Frank Schwartz für konstruktive Diskussionen zum Thema Postponement.

Außerdem möchte ich dem gesamten Team des Forschungsprojektes Smart EM herzlich meinen Dank aussprechen. Besonders danke ich Thomas John für viele Diskussionen, aus denen hilfreiche Denkanstöße hervorgegangen sind, meinen Mitstreitern Alexander Teetz und Mirko Rose für die tolle Kooperation sowie Dr. Stefan Sauer für die Projektleitung und Organisation.

Auch danke ich allen Studierenden, die mich im Rahmen von Abschluss-, Seminar- und Projektarbeiten durch inspirierende Fragen bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein tiefer Dank gilt meinen Eltern für ihre bedingungslose Unterstützung sowie meiner Schwester. Ohne eure liebevollen Ermutigungen und Motivation wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Besonders danke ich auch meiner Freundin Katharina für ihre Geduld und ihren liebevollen Rückhalt während dieser Arbeit.

Christoph Weskamp
Paderborn, den 21.06.2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsziele	2
1.2	Struktur der Arbeit	4
2	Problemaspekte bei der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie	7
2.1	Übersicht des Planungsproblems	7
2.1.1	Grundlagen des Betrachtungsgegenstandes	8
2.1.2	Überblick und Abgrenzung der betrachteten Planungsebenen .	9
2.2	Integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie	12
2.3	Gestaltung eines Produktportfolios	17
2.3.1	Innovative Produktvarianten und deren Eigenschaften	17
2.3.2	Marktteilnehmer und deren Interaktion	18
2.3.3	Unsicherheiten bei der Gestaltung eines Produktportfolios . .	23
2.4	Gestaltung einer Supply Chain-Strategie	24
2.4.1	Produktions- und Logistikaktivitäten innerhalb einer Supply Chain	25
2.4.2	Unsicherheiten bei der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie	26
2.4.3	Arten von Supply Chain-Strategien	28
2.5	Zusammenfassung und Ableitung von Anforderungen	35
3	Zugrundeliegende Modelle und Lösungsverfahren	37
3.1	Ausgewählte Modelle und Lösungsverfahren der mathematischen Optimierung	37
3.1.1	Mathematische Optimierungsmodelle	37
3.1.2	Lösungsverfahren	40
3.2	Ausgewählte Simulationstechniken	41

4	Stand der Forschung	43
4.1	Integrierte Planungsansätze zur Gestaltung eines Produktportfolios und einer Supply Chain	43
4.2	Ansätze zur Prognose der Marktdurchdringung eines Produktportfolios	47
4.3	Ansätze zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien	52
4.3.1	Ansätze aus der Postponement-Literatur	52
4.3.2	Ansätze des Supply Chain Netzwerk Designs unter Unsicherheiten	60
4.4	Fazit der Literaturrecherche und Ableitung des Forschungsbedarfs . .	67
4.5	Forschungsziele der Arbeit	69
5	Ermittlung der Marktdurchdringung für ein Produktportfolio	73
5.1	Metamodell zur Abbildung der Problemstruktur für eine Marktsimulation	73
5.1.1	Übersicht über das Metamodell	74
5.1.2	Abbildung von zeitlichen Dimensionen	76
5.1.3	Abbildung von Unsicherheiten	77
5.1.4	Abbildung von Marktmodellen	78
5.1.5	Abbildung von Kunden	80
5.1.6	Abbildung von Interaktionen von Marktteilnehmern	81
5.2	Verhalten der Marktsimulation	85
5.2.1	Klassifizierung der Simulationsart	85
5.2.2	Ablauf der Marktsimulation	86
5.3	Analyse der Marktsimulation anhand einer Fallstudie	91
5.3.1	Fallstudie und Untersuchungsaufbau	91
5.3.2	Einfluss von Unsicherheiten	97
5.3.3	Mehrwert von zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen	102
5.3.4	Auswirkungen einer Modifikation eines Produktportfolios . . .	105
5.4	Zusammenfassung	108
6	Planung einer Supply Chain-Strategie	111
6.1	Freiheitsgrade bei der Gestaltung von Postponement-Strategien . . .	111
6.2	Stochastisches Optimierungsmodell	114
6.3	Lösen des stochastischen Optimierungsmodells	122
6.3.1	Lösungsverfahren	123
6.3.2	Laufzeitanalyse und Qualität der Lösungsverfahren	124
6.4	Ökonomische Analyse des stochastischen Optimierungsmodells	128
6.4.1	Fallstudie und Untersuchungsaufbau	128
6.4.2	Einfluss von variierenden Nachfrageunsicherheiten und Nachfragekorrelationen	131

6.4.3	Einfluss einer variierenden Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers	139
6.5	Zusammenfassung	143
7	Integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie	145
7.1	Architekturspezifikation	146
7.2	Schnittstellenspezifikation	149
7.2.1	Schnittstelle zur sequentiellen Planung	149
7.2.2	Rückkopplung zwischen den Planungsebenen	151
7.3	Ökonomische Analyse des Instrumentariums	161
7.3.1	Fallstudien und Untersuchungsaufbau	161
7.3.2	Mehrwert der integrierten Planung und Einfluss der Risikobereitschaft am Beispiel einer Fallstudie der Elektromobilität	166
7.3.3	Mehrwert der integrierten Planung und Einfluss von Konzepten des Postponements am Beispiel einer Fallstudie aus der Textilindustrie	170
7.4	Zusammenfassung	172
8	Schlussbetrachtung	175
8.1	Zusammenfassung	175
8.2	Kritische Würdigung und Ableitung des zukünftigen Forschungsbedarfs	178
	Literaturverzeichnis	183
	Abbildungsverzeichnis	203
	Tabellenverzeichnis	207
	Liste der Algorithmen	209

1 Einleitung

In vielen Industriezweigen, wie beispielsweise der Automobil-, Chemie-, Maschinen- und Pharmaindustrie, ist in den vergangenen Jahren der Trend einer wachsenden Produktvielfalt verzeichnet worden (Roland Berger, 2012). Dieser Effekt geht dabei mit immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen einher, sodass Kunden in immer kürzer werdenden Abständen neuartige Produkte in verschiedenen Varianten angeboten werden. Aktuelle Prognosen bezüglich der zukünftigen Entwicklung dieser Eigenschaften gehen von einer kontinuierlichen Fortsetzung dieses Trends bis zum Jahr 2030 aus (Roland Berger, 2016). Die Ursachen der steigenden Produktvielfalt und kürzer werdenden Produktlebenszyklen finden sich dabei in den individuellen Anforderungen von Kunden in mannigfaltigen Märkten. Für Unternehmen resultiert daraus die Herausforderung diesen Kunden, entsprechend ihrer Wünsche und Anforderungen, ein Produktportfolio, d.h. ein Spektrum an Produkten (Meffert et al., 2015, S. 364), anzubieten.

Um den Kunden ein solches Angebot bereitstellen zu können, müssen auf Unternehmensseite wertschöpfende Aktivitäten durchgeführt werden. Im Zuge der Globalisierung ist dabei der internationale Handel signifikant gestiegen (WTO, 2016), sodass Unternehmen in vielen Domänen aus Kostengründen innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken (engl. supply chains) agieren. Die Zunahme der Produktvielfalt, kürzer werdende Produktlebenszyklen, eine steigende Anzahl an Kunden, Nachfrageschwankungen, ein deutlich größerer Lieferantenkreis sowie die Notwendigkeit der Betrachtung von zunehmend mehr Produktions- und Distributionsstandorten stellen dabei aus Sicht einer Supply Chain Komplexitätstreiber dar (PRTM, 2010). Diese Komplexitätstreiber erschweren insgesamt den Planungsprozess, wodurch auch das Risiko zunimmt, unökonomische Entscheidungen in Bezug auf die Gestaltung einer Supply Chain-Strategie zu treffen (Malik et al., 2011). Unter Verwendung geeigneter Planungsverfahren bietet andererseits eine Neustrukturierung bestehender Supply Chain-Aktivitäten, beispielsweise in Form der Einführung von neuen Produktionsstrategien, Möglichkeiten zur Bewältigung dieser Komplexitätstreiber (Harrison, 2001). In diesem Zuge sehen Unternehmen die Steigerung der Supply Chain-Flexibilität und die Reduzierung von Supply Chain-Risiken als wichtige Ziele an (Handfield et al., 2013). Ansatzpunkte zur Erreichung dieser Unternehmensziele stellen dabei u.a. durchgängige Planungsansätze und ein flexibles Fertigungs- und Montagennetz dar (DVZ, 2011). Um gegebene Nachfrageunsicherheiten und eine hohe Pro-

duktvielfalt zu adressieren, werden auch sogenannte Postponement-Strategien¹ als Konzept zur kosten-effektiven Gestaltung sowie zur Reduzierung des Risikos einer Supply Chain vorgeschlagen (Pagh und Cooper, 1998).

Bei kombinierter Betrachtung der Angebots- und Wertschöpfungsseite ergibt sich die Frage, bis zu welchem Grad an Komplexität ein Angebot in Form eines Produktportfolios noch von einer Supply Chain effizient hergestellt werden kann. Dabei gilt es, mögliche Zielkonflikte zwischen der Gestaltung eines Produktportfolios und der Gestaltung einer Supply Chain zu betrachten. So soll einerseits mit dem Angebot ein möglichst großer Marktanteil realisiert werden, was typischerweise mit einem umfangreichen Produktportfolio einhergeht und die Komplexität ansteigen lässt. Diese Komplexität ist andererseits von einer Supply Chain zu bewältigen, wobei die angebotenen Produkte mit ihren Eigenschaften die notwendigen wertschöpfenden Aktivitäten vorgeben. Aufgrund der in vielen Domänen kompetitiven Wettbewerbssituation, ist dabei ein kosteneffizientes Vorgehen von besonderer Bedeutung (Handfield et al., 2013). Aus Sicht einer ganzheitlichen Betrachtung ist daher zu prüfen, welche Kombination aus Produktportfolio und Supply Chain-Strategie zu gewinnmaximalen Planungslösungen führt.

Durch diese komplexen Anforderungen ergibt sich für einen Entscheidungsträger ein vielschichtiges Planungsproblem. Ansätze des Operations Research (OR), d.h. quantitative Modelle und Methoden der Entscheidungsunterstützung, können dabei verwendet werden, um Planungslösungen zu identifizieren (Suhl und Mellouli, 2013, S. 1). Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung bei der integrierten Planung eines Produktportfolios und der Supply Chain-Strategie entwickelt. Im folgenden Abschnitt sind die Forschungsziele dieser Arbeit zusammengefasst. Anschließend wird ein Überblick über den strukturellen Aufbau dieser Arbeit gegeben.

1.1 Forschungsziele

In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Planung eines Produktportfolios oder einer Supply Chain-Strategie. Diese Ansätze lassen sich dabei anhand der adressierten Planungsebene, d.h. der strategischen, taktischen und operativen Planung, einordnen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die strategische Planungsebene betrachtet. Hierbei besteht Forschungsbedarf in der Berücksichtigung von Wechselwirkungen

¹Postponement-Strategien stellen Konzepte zur Gestaltung von Produktions- und Logistikaktivitäten dar, indem eine Aufschub- oder Spekulationsstrategie angewendet wird (Pagh und Cooper, 1998). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriffe Supply Chain-Strategie synonym für Postponement- und Spekulations-Strategie verwendet.

zwischen der Produktportfolioplanung und Planung der Supply Chain-Strategie, so dass Auswirkungen von Entscheidungen ganzheitlich betrachtet werden können.

Daher ist die Konzeption und Entwicklung eines domänenübergreifenden Instrumentariums zur Entscheidungsunterstützung bei der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie das Ziel dieser Arbeit. Dieses gliedert sich in die folgenden Teilziele:

1. Entwicklung einer domänenunabhängigen Marktsimulation für die Produktportfolioplanung
2. Entwicklung eines Optimierungsmodells und Adaption geeigneter Lösungsverfahren zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien
3. Kopplung der Simulations- und Optimierungskomponenten zu einem Instrumentarium zur integrierten Planung

Das erste Teilziel adressiert die Evaluation eines Produktportfolios und stellt sicher, dass Auswirkungen von Änderungen am Produktportfolio auf die Marktdurchdringung ermittelt werden können. Dazu muss das komplexe Marktumfeld formalisiert und in einem geeigneten Simulationsmodell abgebildet werden. Durch eine Realisierung dieses Ziels wird der erste Teil des Zielkonflikts zwischen Planung eines Produktportfolios und Supply Chain-Strategie, d.h. die Auswirkungen von Änderungen des Produktportfolios auf die Marktdurchdringung, im Modell abgebildet.

Das nächste Teilziel umfasst die Entwicklung eines Optimierungsmodells, welches zur Entscheidungsunterstützung bei der Identifizierung von effizienten Supply Chain-Strategien dient. Dabei soll der innovative² Charakter der im Rahmen der Produktportfolioplanung betrachteten Produkte berücksichtigt werden, weshalb Unsicherheiten sowie das daraus resultierende Risiko für die Supply Chain wichtige Faktoren darstellen. Dieses Modell bildet den zweiten Teil des Zielkonfliktes zwischen Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie, d.h. die Auswirkungen von Änderungen der Supply Chain-Strategie auf die anfallenden Kosten, ab. Darüber hinaus sollen geeignete Lösungsverfahren adaptiert werden und Unterschiede zwischen den Verfahren in einem Laufzeit- und Qualitätsvergleich gegenüber gestellt werden. Das dritte Ziel umfasst die Integration der Simulation und Optimierung zu einem ganzheitlichen Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung bei der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie. Dazu müssen entsprechende Schnittstellen zwischen den Planungsebenen geschaffen und ein Steuerungsmechanismus zur Koordination des Ablaufs umgesetzt werden.

²Innovative Produkte kennzeichnen sich oftmals durch eine schwer zu prognostizierende Nachfrage, kurze Produktlebenszyklen sowie einer hohen Anzahl an angebotenen Produktvarianten (vgl. (Fisher, 1997))

Um den Mehrwert der entwickelten Methodiken zu demonstrieren, sollen die jeweiligen Methoden anhand von Fallstudien evaluiert werden. Dabei soll im Rahmen von Sensitivitätsanalysen der Einfluss von Parameteränderungen auf die Planungs-lösungen gezeigt werden.

1.2 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in acht Kapitel und ist wie folgt strukturiert. Kapitel 2 liefert zunächst einen Überblick über das betrachtete Planungsproblem. So erfolgt auf Basis des Stands der Forschung die Einführung in den Problemgegenstand der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie. Daraus abgeleitet werden die relevanten Anforderungen an die Planung formuliert. Dabei sind die Prognose der Marktdurchdringung für ein Produktportfolio, die Gestaltung der Supply Chain-Strategie und mögliche Wechselwirkungen zwischen der Planung eines Produktportfolios und der Planung einer Supply Chain-Strategie zu berücksichtigen.

Kapitel 3 liefert eine Übersicht über die in dieser Arbeit zugrundeliegenden Methoden des Operations Research. So werden die Grundlagen zur mathematischen Optimierung und Simulation vorgestellt.

Eine Analyse des aktuellen Stands der Forschung zu Ansätzen der Produktportfolioplanung, der Planung einer Supply Chain-Strategie sowie zur integrierten Planung erfolgt in Kapitel 4. Anhand der in Kapitel 2 abgeleiteten Anforderungen werden die in einer Literaturrecherche identifizierten Arbeiten evaluiert und der Forschungsbedarf herausgestellt. Darauf aufbauend werden schließlich die Forschungsziele dieser Arbeit in Abschnitt 4.5 detailliert erläutert.

Die Kapitel 5 bis 7 beinhalten eine Beschreibung des Vorgehens zur Erreichung der Forschungsziele. So erfolgt für die Planung eines Produktportfolios in Kapitel 5 die Konzeption eines Simulationsansatzes zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung eines Produktportfolios. Der ökonomische Mehrwert der Methodik wird anschließend in einer Sensitivitätsanalyse demonstriert. Kapitel 6 stellt entwickelte Ansätze der mathematischen Optimierung zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung einer Supply Chain-Strategie vor. Dazu wird ein mathematisches Modell präsentiert. Weiterhin werden exakte und approximative Lösungstechniken adaptiert und in einer Analyse zur Laufzeit- und Lösungsqualität miteinander verglichen. Auch hier wird der Mehrwert dieser Methodik anhand einer Fallstudie dargestellt. Schließlich werden in Kapitel 7 die Simulations- und Optimierungskomponenten zu einem ganzheitlichen Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie integriert. Um die domä-

nenübergreifende Anwendbarkeit zu zeigen, werden die oben genannten Fallstudien aufgegriffen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung, einer kritischen Würdigung der Ergebnisse im Hinblick auf die Erreichung der Forschungsziele sowie der Ableitung des zukünftigen Forschungsbedarfs.

2 Problemaspekte bei der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

Zwischen der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie bestehen Interdependenzen (Krishnan und Ulrich, 2001). So zielt die Produktportfolioplanung aus Marketingsicht auf die Maximierung von Marktanteilen ab und definiert die in einer Supply Chain benötigten Produktions- und Logistikaktivitäten. Aus Sicht des Operations Management³ soll eine möglichst kosteneffiziente Supply Chain-Strategie zur Durchführung dieser Aktivitäten identifiziert werden, wobei die Kosten vom definierten Produktportfolio abhängen. Dieses resultiert in einen Zielkonflikt zwischen den Planungsebenen, welcher durch ein sequentielles Lösungsverfahren nicht aufgelöst werden kann und somit ein integriertes Verfahren voraussetzt.

Die Entwicklung eines solchen integrierten Verfahrens zur effizienten Produktportfolioplanung sowie zur Identifizierung tragfähiger Supply Chain-Strategien erfordert ein umfassendes Verständnis über die Planungssituation. Daher erfolgt in diesem Kapitel zunächst die Definition des Problemgegenstands. In Abschnitt 2.1 wird ein Überblick des Planungsproblems gegeben. Anschließend ist die Problematik der integrierten Planung des Produktportfolios und der Supply Chain-Strategie in Abschnitt 2.2 spezifiziert. Die Planungsaufgaben der beiden Planungsebenen werden in Abschnitt 2.3 und Abschnitt 2.4 vorgestellt. Die im Planungsproblem zu identifizierenden Handlungsentscheidungen werden dabei auf Basis eines langfristigen Planungshorizontes getroffen, was zum Entscheidungszeitpunkt Unsicherheiten bedingt und in einem Risiko für die Supply Chain führt. Die damit implizierten Herausforderungen werden in den beiden Teilproblemen erläutert. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und Ableitung der Anforderungen an ein zu entwickelndes integriertes Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung in Abschnitt 2.5.

2.1 Übersicht des Planungsproblems

Zunächst erfolgt in Abschnitt 2.1.1 ein Überblick über die Grundlagen des Betrachtungsgegenstands dieser Arbeit. Anschließend werden die Planungsaufgaben im Umfeld der Produktportfolioplanung und der Gestaltung einer Supply Chain anhand der zeitlichen Planungsabfolge in Abschnitt 2.1.2 eingeordnet.

³Das Operations Management umfasst alle Aufgaben zum Management von Produktions- und Dienstleistungsprozessen (Thonemann und Brandeau, 2000, S. 26).

2.1.1 Grundlagen des Betrachtungsgegenstandes

Eine Wertschöpfungskette repräsentiert ein Netzwerk an Organisationen, welche an wertschöpfenden Aktivitäten zur Erzeugung von Sachgütern oder Dienstleistungen für eine Zielgruppe beteiligt sind (Christopher, 2005, S. 17). Der Untersuchungsgegenstand liegt in dieser Arbeit innerhalb der Supply Chain auf der Betrachtung von materiellen Wirtschaftsgütern, welche in der Literatur auch synonym als Erzeugnis und Endprodukt bezeichnet werden (Zimmermann, 1996, S. 1340). Endprodukte weisen dabei ein Bündel an Eigenschaften bzw. Charakteristiken auf, welche dem Nachfrager bzw. Kunden einen Nutzen stiften (Meffert et al., 2015, S. 362). Werden innerhalb einer Supply Chain mehrere Produktvarianten⁴ angeboten, so können diese innerhalb eines Produktportfolios als ein an den Kunden gerichtetes Angebot aufgefasst werden (Meffert et al., 2015, S. 364). Die Größe eines Produktportfolios kann sich einerseits auf den Kaufentscheidungsprozess der Kunden auswirken und andererseits die Profitabilität einer Supply Chain beeinflussen (vgl. bspw. (Randall und Ulrich, 2001) und (ElMaraghy et al., 2013)). Liegt ein kompetitives Marktumfeld vor, so gilt es bei der Produktportfolioplanung neben dem Angebot der betrachteten Supply Chain auch die aktuelle Wettbewerbssituation und damit mögliche konkurrierende Produkte zu berücksichtigen. Weiterhin können verschiedene Formen von Kooperationen eingegangen werden, um das Angebot durch zusätzliche Produkt- und Dienstleistungsangebote zu ergänzen (Meffert et al., 2015, S. 59-60).

Um den Kunden ein solches Produktportfolio anbieten zu können, müssen innerhalb des Netzwerks wertschöpfende Aktivitäten durchgeführt werden, an denen unterschiedliche Organisationen beteiligt sein können. In typischen Supply Chains umfassen solche Organisationen u.a. Zulieferer, Hersteller sowie Logistik-Provider, welche gemäß ihrer Position und Aufgabe im Wertschöpfungsprozess sogenannten Wertschöpfungsstufen zugeordnet sind. Um den Wertschöpfungsprozess zwischen den Organisationen zu koordinieren, können diese sowohl vertikal, also mit verschiedenen vor- und nachgelagerten Organisationen, als auch horizontal, d.h. mit Organisationen auf der gleichen Wertschöpfungsstufe, verknüpft sein (Cordón et al., 2013, S. 11). Eine solche Verknüpfung zwischen zwei Organisationen kann dabei durch Material-, Finanz- und Informationsflüsse realisiert sein (Stadtler und Kilger, 2008, S. 9). In Abbildung 2.1 ist ein beispielhaftes Wertschöpfungsnetzwerk abgebildet. Zulieferer stellen die Versorgung der Produktionsstandorte (Hersteller) mit Rohmaterialien und Zwischenprodukten sicher. Innerhalb der Produktionsstandorte werden verschiedene Produktionsprozesse durchgeführt, um aus den Rohmaterialien und Zwischenprodukten die im Produktportfolio angebotenen Endprodukte zu erzeugen. Je nach

⁴ „Unterschiedliche Produktvarianten sind Elemente einer Produktart, in der die Merkmale der zugehörigen Produkte Ähnlichkeiten in Bezug auf ihre Ausprägungen besitzen, aber sich die einzelnen Varianten in geringem Maße voneinander unterscheiden“ (Buchholz, 2012, S. 23-24).

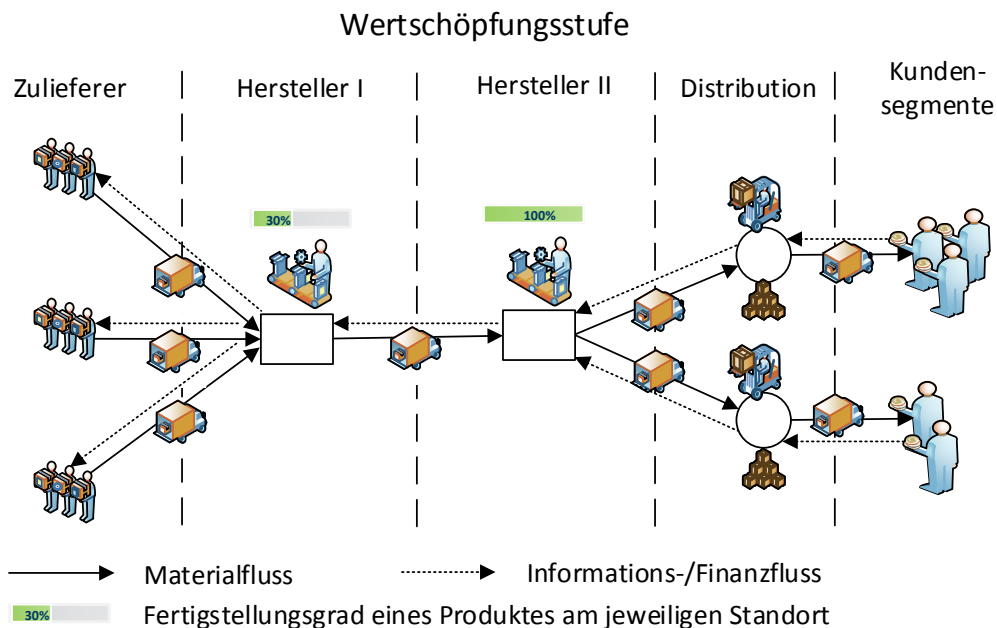


Abbildung 2.1: Übersicht eines beispielhaften Wertschöpfungsnetzes (in Anlehnung an Stadtler und Kilger (2008))

Komplexität des gesamten Produktionsprozesses kann sich dieser über verschiedene Standorte erstrecken (sowohl vertikal als auch horizontal). Logistik-Provider übernehmen Transportaktivitäten zwischen verschiedenen Standorten. Dabei müssen die Beschaffungs-, Produktions- sowie Distributionslogistik betrachtet werden (Stadtler und Kilger, 2008). Weiterhin dienen Lagerstandorte als Puffer, um Produktions- oder Nachfrageschwankungen auszugleichen. Endkunden mit homogenen Eigenschaften werden in dieser Netzwerkdarstellung zu einem Kundensegment zusammengefasst.

2.1.2 Überblick und Abgrenzung der betrachteten Planungsebenen

Um ein solches Wertschöpfungsnetzwerk aus unternehmerischer Sicht erfolgreich zu gestalten, gilt es dazugehörige Planungsprobleme zu lösen. So müssen einerseits Fragestellungen zum Produktangebot und andererseits Fragestellungen bezüglich der Planung von Produktions- und Logistikaktivitäten beantwortet werden (Kumar und Chatterjee, 2013). Während dabei das Produktangebot das Markt- und Umsatzpotential vorgibt, ergeben sich aus den durchzuführenden Aktivitäten die anfallenden Kosten.

Dabei sind die zu lösenden Planungsprobleme auf verschiedenen Entscheidungsebenen angeordnet. Anhand der Dimensionen der betrachteten Länge des Planungszeitraums sowie des betrachteten Detaillierungsgrades der Planung, wird zwischen

2 Problemaspekte bei der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

strategischen, taktischen und operativen Planungsproblemen differenziert (Gupta und Maranas, 2003). In strategischen Planungsproblemen wird ein langfristiger Planungshorizont von drei bis zehn Jahren betrachtet und das Ziel verfolgt, möglichst erfolgreiche Rahmenbedingungen für ein Unternehmen zu schaffen. Die im Rahmen der strategischen Planung getroffenen Entscheidungen bilden dann die Grundlage für die taktische Planungsebene, welche einen mittelfristigen Planungszeitraum von einem bis zwei Jahren betrachtet. Ziel der taktischen Planung ist die Konkretisierung der Entscheidungen, so dass die strategischen Ziele schrittweise erreicht werden. Der taktischen Planungsebene schließt sich zuletzt die operative Planungsebene an. Operative Planungsprobleme umfassen einen Planungszeitraum von maximal einem Jahr, wobei häufig Fragestellungen auf täglicher oder wöchentlicher Auflösung beantwortet werden. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die Planungsebenen der Produktportfolioplanung und der Gestaltung von Supply Chains gegeben. Anschließend wird der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit eingeordnet.

Abbildung 2.2 stellt die Planungsebenen zur Gestaltung eines Produktangebotes und einer Supply Chain dar. Die Produktportfolioplanung wird im Rahmen der Produkt- und Portfoliopolitikplanung durchgeführt und behandelt die Fragestellung, welche Produkte von einem Unternehmen angeboten werden sollen (Krishnan und Ulrich, 2001). Meffert et al. (2015) gliedern das Planungsproblem in die Portfolio- und die Produktgestaltung, wobei sich die Portfoliogestaltung wiederum in die strategische und in die operative Portfolioplanung unterteilt. In der strategischen Portfolioplanung werden Entscheidungen über die grundsätzlichen Ausrichtung und Struk-

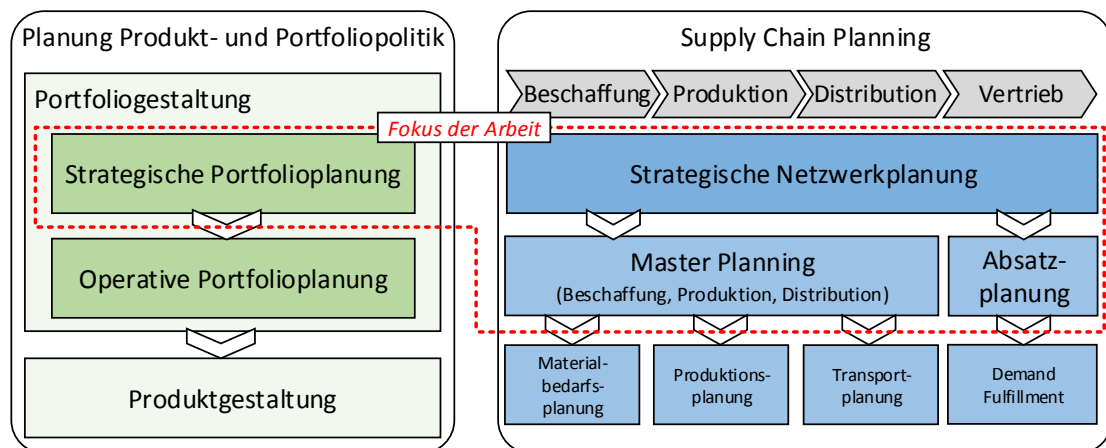


Abbildung 2.2: Übersicht der betrachteten Planungsebenen⁵

⁵Die Ebenen der Produktportfolioplanung werden in Anlehnung an Meffert et al. (2015) und das Supply Chain Planning in Anlehnung an Stadtler (2005) skizziert.

turierung des Portfolios getroffen und somit die angebotenen Produktlinien⁶ mit den darin enthaltenen Produktvarianten festgelegt. So können neue Produktlinien zum Portfolio hinzugefügt (*Innovation*), bestehenden Produktlinien verändert (*Differenzierung*) und Produktlinien vom Markt genommen (*Elimination*) werden. Ziel der strategischen Portfolioplanung ist der Ausbau der Marktposition (Anderson und Joglekar, 2005), weshalb die Ermittlung der Marktdurchdringung je Produktvariante zu den Aufgaben zählt. Ausgehend von diesen Ergebnissen verfeinert die operative Portfolioplanung die Gestaltung der einzelnen Varianten in einer Produktlinie. Anschließend übernimmt die Produktgestaltung die Umsetzung der Entscheidungen der strategischen und operativen Portfolioplanung (Meffert et al., 2015, S. 363 ff.).

Um Kunden ein solches Produktportfolio anbieten zu können, müssen Produktions- und Logistikaktivitäten durchgeführt werden. Ziel ist es, diese Aktivitäten im Rahmen der Produktions- und Logistikplanung möglichst effizient zu gestalten. So zielt die Produktionsplanung auf die Schaffung und Erhaltung einer wettbewerbsfähigen Produktion ab (Dangelmaier, 2009, S. 9), während die Logistikplanung die effiziente Gestaltung des Flusses und der Lagerung von Gütern übernimmt (Schönsleben, 2011, S. 7 ff.). Die unternehmensübergreifende Planung der Funktionsbereiche Beschaffung, Produktion, Distribution und Vertrieb für mehrere miteinander verbundene Unternehmen wird dabei als Supply Chain Planning bezeichnet (Stadtler, 2005). Die strategische Ebene beinhaltet dabei Fragestellungen bezüglich der Netzwerkplanung, welche die Festlegung des Designs und der Strategie der Supply Chain umfassen. Auf der taktischen Ebene wird das sogenannte Master Planning durchgeführt, welches auf Basis der Ergebnisse der strategischen Planung, für einen mittelfristigen Planungshorizont, die effiziente Erfüllung der Nachfrage anstrebt (Stadtler, 2005). Dazu wird eine simultane Planung der Beschaffung, Produktion sowie Distribution durchgeführt. Weiterhin findet dort die Absatzplanung für den mittelfristigen Planungszeitraum statt. Innerhalb des operativen Planungshorizontes finden die Feinplanung der Produktion, die Materialbedarfsplanung sowie die operative Transportplanung statt (Stadtler, 2005). Die Feinplanung der Produktion wird für jeden Standort der Supply Chain durchgeführt. Dabei werden Arbeitsschichten, Maschinenbelegungen und Rüstzeiten von Maschinen geplant (Allahverdi et al., 2008). Im Anschluss wird die Materialbedarfsplanung durchgeführt, welche die Ermittlung des Teilebedarfs übernimmt und auf die Vermeidung von Engpässen abzielt (Graves et al., 1998). Weitere operative Planungsprobleme des Supply Chain Plannings umfassen die Distributions- und Transportplanung (Rizk et al., 2008) sowie das Demand-Fulfilment, welches den Prozess vom Auftragseingang bis zur Auftragsauslieferung betrachtet und auf eine Verbesserung des Bestellprozesses abzielt (Stadtler, 2005).

⁶Eine Produktlinie fasst ähnliche Produkte, bspw. aufgrund eines bestehenden Produktionszusammenhanges, zu einer Gruppe bzw. Klasse zusammen (Meffert et al., 2015, S.364).

Der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit liegt auf der strategischen Produktportfolioplanung und der Identifizierung von Supply Chain-Strategien im Rahmen der strategischen Netzwerkplanung sowie der taktischen Beschaffungs-, Produktions- sowie Distributionsplanung (d.h. Master Planning). Als Entscheidungsträger wird dabei die Managementebene einer ganzheitlichen Supply Chain adressiert. Dabei sollen die Fragestellungen nach der Angebotsvielfalt (d.h. welche Produktvarianten mit welchen Eigenschaften sollen im Produktportfolio angeboten werden) und der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie (d.h. welche Strategie soll beim Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten angewendet werden) integriert beantwortet werden. Die Wichtigkeit einer integrierten Betrachtung begründet sich durch den bestehenden Zielkonflikt zwischen den beiden Planungsebenen. Daher ist es das Ziel, ein integriertes Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung zu entwickeln, welches mögliche Wechselwirkungen der beiden Planungsebenen abbildet. Dabei stehen neuartige (d.h. innovative) Produkte im Rahmen der Produktentstehung und die Frage der Differenzierung der Produktvarianten im Vordergrund, da für diese Art von Produkten die Ermittlung der Nachfrage eine besondere Herausforderung darstellt (Lee, 2002) und mit zusätzlichen Anforderungen an die beiden Planungsebenen verbunden ist. Eine detaillierte Problembeschreibung erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

2.2 Integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

In diesem Abschnitt wird das strategische Planungsproblem der integrierten Gestaltung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie vorgestellt. Dieses schließt die grundlegenden Aspekte des Planungsproblems ein. Anschließend wird das integrierte Problem zur tiefergehenden Analyse in zwei Teilproblemen dekomponiert und in den Abschnitt 2.3 und Abschnitt 2.4 beschrieben.

Zunächst sind in der strategischen Produktportfolioplanung Entscheidungen bezüglich der Tiefe und Breite des Produktportfolios zu treffen. Dies bedeutet, dass neben der Festlegung der angebotenen Produktlinien (Breite) auch die Anzahl an grundlegenden Produktvarianten (Tiefe) zu bestimmen ist (Meffert et al., 2015, S. 364 ff.). Dabei gilt es die am Markt anzubietenden Produktvarianten mit ihren entsprechenden Produktcharakteristiken und deren Ausprägungen aus einer Menge möglicher Produktvarianten auszuwählen (Krishnan und Ulrich, 2001). Es wird das Ziel verfolgt, die Nachfrage auf den Märkten gemäß individueller Kundenanforderungen zu erfüllen, insgesamt den Marktanteil zu steigern und den potentiellen Unternehmensumsatz zu maximieren (Simpson, 2004).

In Abbildung 2.3 ist die Planungsaufgabe der Produktportfolioplanung schematisch dargestellt. Dazu sind zwei beispielhafte Produktportfolios mit den jeweils angebote-

nen Produktvarianten abgebildet. Die Produktvarianten werden dabei auf Basis von zwei Produktcharakteristiken A und B mit jeweils sechs Ausprägungen klassifiziert, sodass insgesamt theoretisch 36 verschiedene Produktvarianten angeboten werden können. Die Produktvarianten lassen sich dabei gemäß Ausprägungen der Charakteristiken in vier Produktlinien zusammenfassen.

Innerhalb der beispielhaften Produktportfolios sind die einzelnen Produktvarianten gemäß ihrer prognostizierten Nachfrage eingefärbt (hellere Farbtöne repräsentieren eine geringere Nachfrage). Aus Marketingsicht ist es die Aufgabe der Planung diejenigen Produktvarianten zu identifizieren, die eine möglichst große Nachfrage versprechen und unter Berücksichtigung der Erlösstrukturen zu umsatzmaximalen Plänen führen (Krishnan und Ulrich, 2001). Das damit verbundene Entscheidungsproblem wird anhand der beiden Produktportfolios veranschaulicht. Im Vergleich zum ersten Produktportfolio wird im Zweiten zunächst eine Produktvariante aus dem Produktportfolio entfernt, welches Nachfrageänderungen impliziert. So kann die Nachfrage der entfernten Produktvariante auf andere Produktvarianten innerhalb des Produktportfolios entfallen (Fall a) oder die Marktanteile verloren gehen, indem die Nachfrage

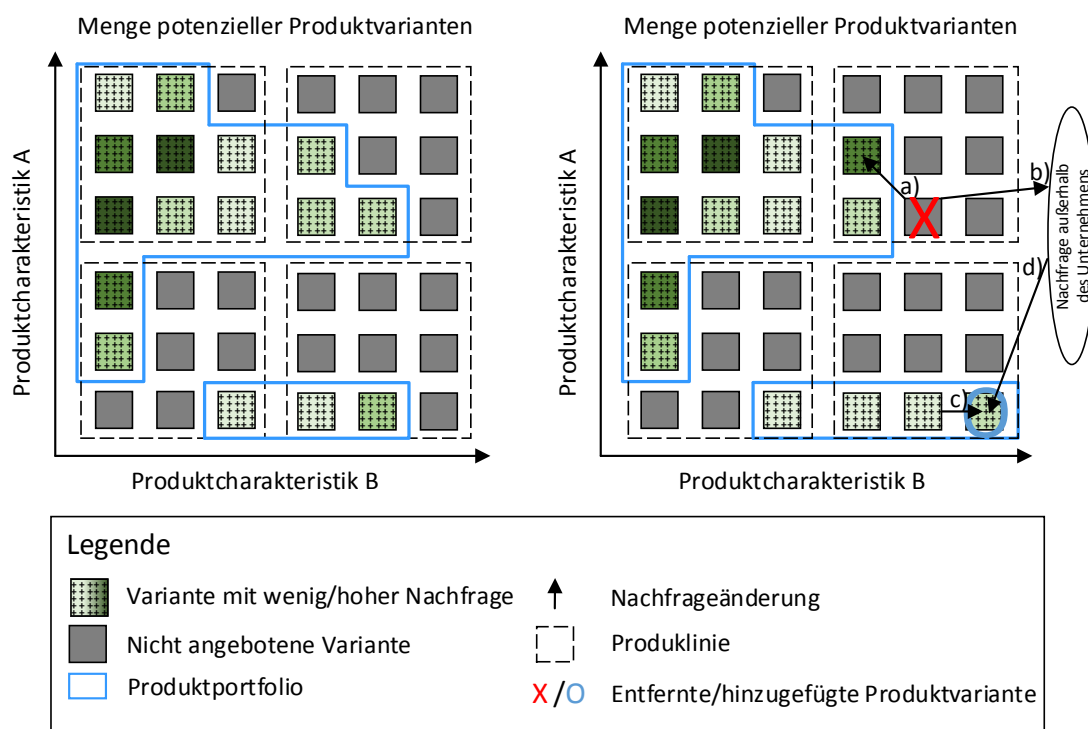


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung zur Gestaltung eines Produktportfolios⁷

⁷Strukturelle Repräsentation der Varianten in Anlehnung an Buchholz (2012).

beispielsweise auf alternative Produktvarianten eines Wettbewerbers entfällt (Fall b). Weiterhin kann eine zusätzliche Produktvariante in das Produktportfolio hinzugefügt werden. Auch damit können dann Nachfrageänderungen verbunden sein. So kann von anderen Produktvarianten des Produktportfolios sich Nachfrage auf die hinzugefügte Produktvariante richten (Fall c) oder Nachfrage von außerhalb des Unternehmens auf die zusätzliche Produktvariante entfallen (Fall d). Aus diesen Nachfrageänderungen resultiert jeweils ein neues Umsatzpotential für das Unternehmen.

Eine Fokussierung auf die Umsatzmaximierung reicht dabei jedoch nicht aus um die ökonomische Tragfähigkeit sicherzustellen. Vielmehr muss der Zielkonflikt zwischen umsatzmaximalem Angebot und kostenminimaler Herstellung und Distribution der angebotenen Produktvarianten aufgelöst werden (vgl. (Kumar und Chatterjee, 2013) und (Yang et al., 2015)).

Da Unternehmen heute oftmals auf internationalen Märkten agieren und sich aus Wettbewerbs- und Kostengründen vermehrt im Rahmen einer Supply Chain mit anderen Unternehmen zusammenschließen, müssen bei der Kostenbetrachtung Entscheidungen für die gesamte Supply Chain berücksichtigt werden. Änderungen am Produktportfolio können dabei signifikanten Einfluss auf die Beschaffung und Produktion einer Supply Chain haben (Kumar und Chatterjee, 2013) sowie sich auf die Logistik auswirken (ElMaraghy und Mahmoudi, 2009) und bei ungenügender Planung starke Kostenanstiege in diesen Bereichen implizieren. Dabei können sich je nach Produktportfolio unterschiedliche Supply Chain-Strategien eignen, um das Angebot effizient bereitzustellen.

Abbildung 2.4 stellt die Planungsaufgabe zur Identifizierung einer Supply Chain-Strategie in Abhängigkeit eines gegebenen Produktportfolios schematisch dar. Das festgelegte Produktportfolio fungiert dabei als Input für die Planung der Supply Chain-Strategie. In der Abbildung sind zwei beispielhafte Produktportfolios dargestellt, die jeweils zu einer optimalen Supply Chain-Strategie führen (Supply Chain-Strategie I bzw. Supply Chain-Strategie II). Die Unterschiede hinsichtlich der Güte der Strategien können u.a. darauf zurückgeführt werden, dass bei einer Änderung des Produktportfolios Verbundeffekte bei der Produktion nicht mehr erzielt werden, so dass aus Kostengründen eine Neugestaltung der Produktionsaktivitäten sinnvoll sein kann. Neben der Neugestaltung von Produktionsaktivitäten können sich darüber hinaus auch Änderungen bei der Gestaltung von Logistikaktivitäten als lohnenswert erweisen. So wird im betrachteten Beispiel statt einer dezentralen Distributionsstruktur eine zentrale Versorgung umgesetzt, wodurch Kosteneinsparungen für die Bevorratung von Produktvarianten an mehreren Standorten erzielt werden können.

Zur Unterstützung dieser Planungsaufgaben werden in der Praxis häufig sequentielle Planungsansätze eingesetzt (Krishnan und Ulrich, 2001). Dies bedeutet, dass zunächst die Konfiguration des Produktportfolios vorgenommen wird und erst an-

2.2 Integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

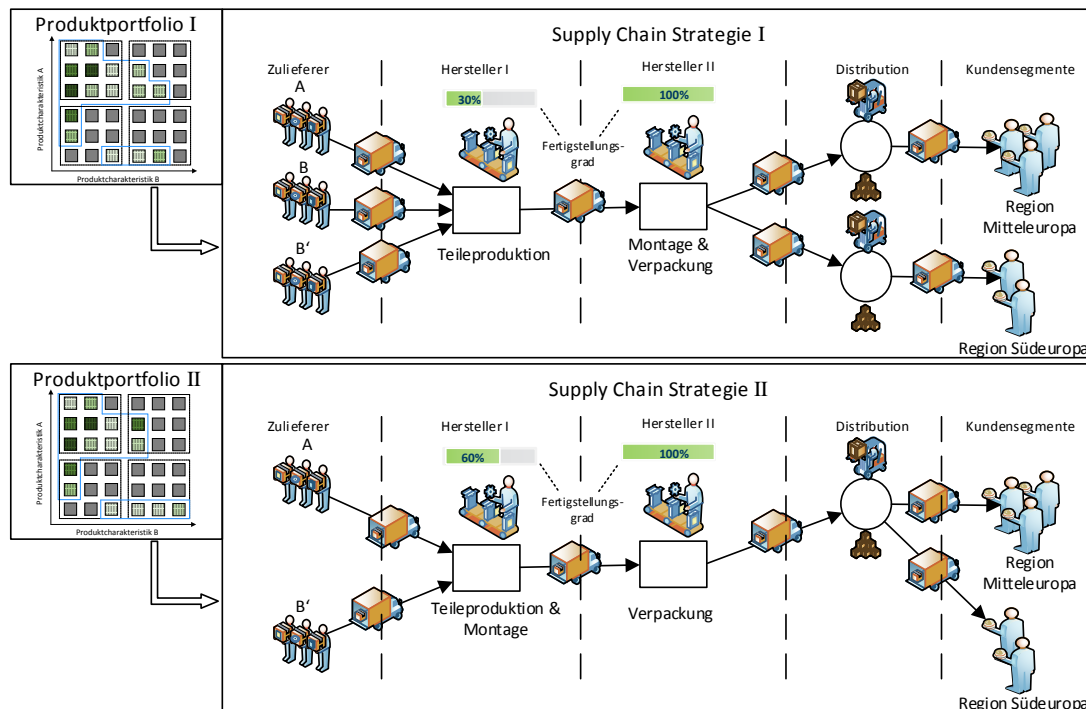


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung zur Konfiguration einer Supply Chain-Strategie in Abhängigkeit eines Produktportfolios

schließlich Supply Chain-Strategien festgelegt werden. Ein solches Vorgehen liefert zwar für das definierte Produktportfolio eine effiziente Supply Chain-Strategie, betrachtet jedoch nicht, ob ggf. ein anderes Produktportfolio noch effizienter hergestellt werden könnte und insgesamt zu einem größeren Gewinn führt. Im Gegensatz zum sequentiellen Planungsansatz zielt die integrierte Planung auf die Nutzung von potentiellen Synergien ab, indem die Konfiguration des Produktportfolios und die Supply Chain-Strategie aufeinander abgestimmt werden (Kumar und Chatterjee, 2013). Dadurch lässt sich die durch Änderungen am Produktportfolio verbundene Marktdynamik berücksichtigen.

In Abbildung 2.5 sind die Wechselwirkungen der beiden Planungsebenen schematisch dargestellt. Handlungsoptionen zur Beeinflussung des Unternehmensergebnisses bestehen dabei zum einen bei der Modifizierung der angebotenen Produktcharakteristiken und deren Ausprägungen im Bereich der Gestaltung des Produktportfolios, sowie zum anderen bei der Anpassung der Produktions- und Logistikaktivitäten im Bereich der Gestaltung der Supply Chain-Strategie. Je mehr Produktcharakteristiken und deren Ausprägungen angeboten werden, desto größer wird das Produktportfolio. Damit einhergehend werden mit jeder zusätzlichen Produktvariante tendenziell zusätzliche Kunden erreicht, wobei der Grenznutzen mit jeder weiteren Produktva-

2 Problemaspekte bei der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

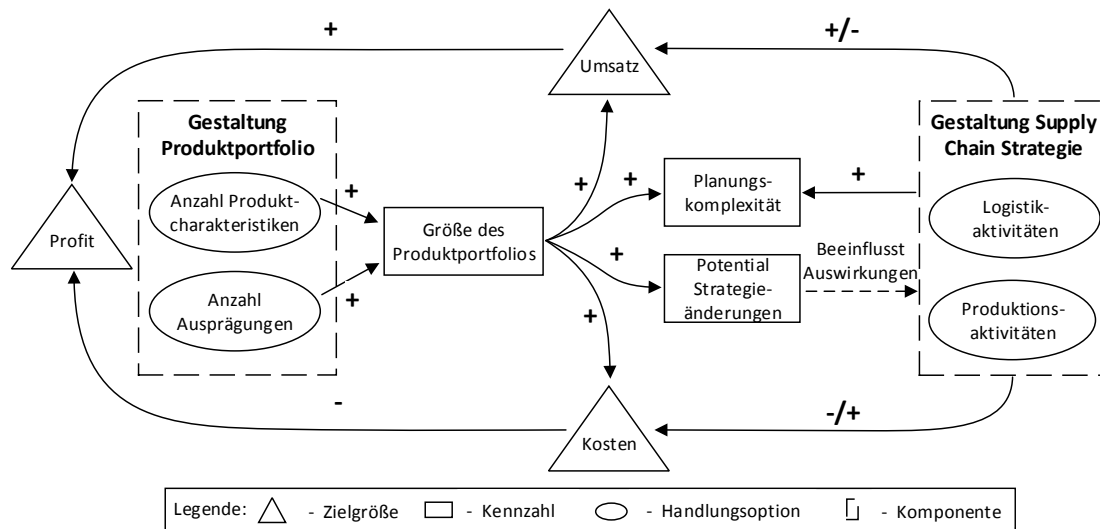


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

riante im Allgemeinen abnimmt. Dadurch kann einerseits das Umsatzpotential und damit tendenziell auch der Umsatz erhöht werden, andererseits steigt jedoch auch der Aufwand bei der Herstellung und Distribution der Produkte, wodurch schließlich die Grenzkosten mit jeder zusätzlichen Variante ebenfalls steigen (Schuh, 2005, S. 20 ff.). Weiterhin erhöhen sich durch ein großes Produktportfolio die in den Planungsmodellen zu berücksichtigende Anzahl an Elemente und damit auch die Planungskomplexität (Schuh, 2005, S. 11 ff.). Diese Planungskomplexität wird zusätzlich durch die integrierte Berücksichtigung der Gestaltung der Supply Chain-Strategie erhöht. Je nach Gestaltung der Supply Chain-Strategie werden der Umsatz über die abgesetzten Produktvarianten sowie die Kosten für das Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten beeinflusst. Ziel ist es dabei, die Produktions- und Logistikaktivitäten derart zu gestalten, sodass einerseits das Umsatzpotential genutzt wird und andererseits die jeweiligen Aktivitäten möglichst kosteneffizient durchgeführt werden können.

Zusammenfassend besteht das Planungsproblem darin, die Leistungsfähigkeit einer Supply Chain (bspw. durch Reduzierung von Kosten, einer Verbesserung des Servicegrads oder durch Schaffung einer höheren Flexibilität) zu verbessern. Dazu soll die Gestaltung des Produktportfolios integriert mit der Gestaltung der Supply Chain-Strategie betrachtet werden. In den folgenden beiden Abschnitten wird der Problemgegenstand der Produktportfolioplanung (siehe Abschnitt 2.3) sowie der Gestaltung der Supply Chain-Strategie (siehe Abschnitt 2.4) näher spezifiziert.

2.3 Gestaltung eines Produktportfolios

Ziel der Produkt- und Portfoliopolitik ist es, das innerhalb der Supply Chain offerierte Produktportfolio derart zu gestalten, dass Umsatz, Absatz oder Marktanteile maximiert werden (vgl. bspw. (Krishnan und Ulrich, 2001) und (Jiao et al., 2007)). Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Art und Struktur der in dieser Arbeit betrachteten Produktvarianten spezifiziert. Da der Erfolg eines angebotenen Produktportfolios auch maßgeblich vom vorliegenden Marktumfeld abhängt (Meffert et al., 2015, S. 43 ff.), werden anschließend in Abschnitt 2.3.2 die Marktteilnehmer und deren Beziehungen untereinander erläutert.

2.3.1 Innovative Produktvarianten und deren Eigenschaften

Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit liegt im Produktportfolio der betrachteten Supply Chain auf sogenannte Güter des Such- und Vergleichskaufs (engl. Shopping consumer goods), die im Gegensatz zu Produkten des alltäglichen Bedarfs seltener gekauft werden. Während des Kaufentscheidungsprozesses vergleichen Kunden bei dieser Produktart das Angebot sorgfältig und zielen darauf ab, die beste Alternative aus dem kompletten Angebot auszuwählen. Zu dieser Art von Produkten zählen bspw. Markenkleidung, Automobile und Möbel (Bruhn und Hadwich, 2006, S. 19), wobei der Fokus hier auf Produkten mit einem gewissen Maß an Innovation, d.h. Neuartigkeit liegt, da diese Art von Produkten komplexe Herausforderungen an den Planungsprozess stellen (Fisher, 1997). Dabei lassen sich nach Fisher (1997) innovative Produkte wie folgt klassifizieren. Im Vergleich zu funktionalen Produkten, d.h. Produkte mit einem geringen Neuartigkeitsgrad, welche häufig auf die Befriedigung von alltäglichen Kundenbedürfnissen abzielen, versuchen innovative Produkte den Kunden zusätzliche Nutzenwerte zu stiften. Weiterhin weisen innovative Produkte im Vergleich zu funktionalen Produkten üblicherweise einen kürzeren Produktlebenszyklus auf und es werden oftmals deutlich mehr Produktvarianten innerhalb eines Produktportfolios angeboten. Außerdem liegen für innovative Produkte häufig keine bzw. wenig konkrete historische Daten bezüglich des Absatzes vor, sodass Absatzprognosen nur durch erheblichen Aufwand ermittelt werden können und damit die Planung zusätzlich erschweren.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Produktvarianten werden in einem mehrstufigen Produktionsprozess hergestellt und können aus verschiedenen Komponenten, Baugruppen und Einzelteilen bestehen⁸. Die Produktarchitektur beschreibt dabei ein Schema wie und aus welchen Komponenten ein Produkt zusammengesetzt ist (Ulrich, 1995). Besteht ein Produkt aus mehreren Modulen wird der Be-

⁸Zusammenfassend werden Komponenten, Baugruppen und Einzelteile oftmals auch als Module bezeichnet (Yang und Jiao, 2014).

griff modulare Produktarchitektur verwendet bzw. dem der Modularität gleichgesetzt (Schuh, 2005, S. 129). In diesem Zusammenhang wird oftmals auch der Begriff der Modularisierung verwendet. Nach Schuh (2005, S. 130) wird darunter „die geeignete Gliederung eines Produktes verstanden, indem die Abhängigkeiten zwischen den [Modulen] verringert [werden]“ (Schuh, 2005, S. 130). Dabei wird zwischen der generischen, quantitativen, individuellen und freien Modularisierung differenziert (vgl. bspw. (Piller, 1998, S. 181 ff.) und (Gausmann, 2008, S. 91 ff.)). In Abhängigkeit der Modularisierungsart definiert sich der Kundennutzen auf unterschiedlicher Weise. So ist beispielsweise der Kundennutzen bei der generischen Modularisierung über unterschiedliche Leistungsmerkmale der einzelnen Module definiert, während bei der quantitativen Modularisierung zusätzlich die Anzahl der Module den Nutzen beeinflusst. Die in dieser Arbeit betrachteten Produktvarianten basieren auf einer dieser Modularisierungsart. Die Produktvarianten setzen sich dabei aus standardisierten und individuellen Komponenten zusammen.

Zur Repräsentation der Produktstruktur für Produktvarianten eignet sich ein sogenannter Variantenbaum⁹. In Abbildung 2.6 ist ein beispielhafter Variantenbaum abgebildet. Dabei setzt sich ein Produkt aus den Charakteristiken C_1, C_2 und C_3 zusammen, welche je nach Charakteristika zwischen ein und drei Ausprägungen annehmen können. Aus den Gestaltungsmöglichkeiten der einzelnen Charakteristika ergeben sich schließlich die finalen Produktvarianten.

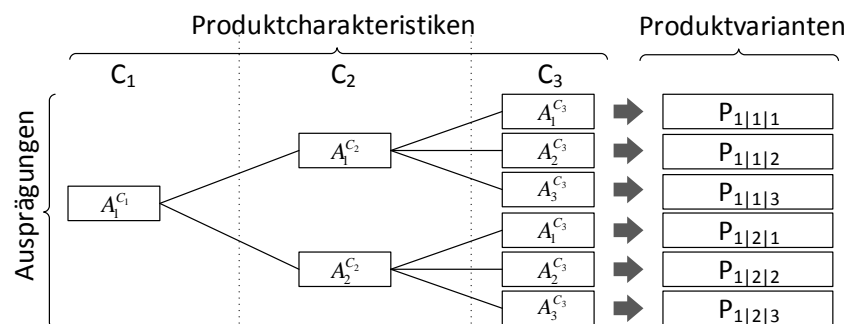


Abbildung 2.6: Darstellung eines Variantenbaums in Anlehnung an Buchholz (2012)

2.3.2 Marktteilnehmer und deren Interaktion

Wie im vorangegangenen Abschnitt definiert, ist es das Ziel der Produktportfolioplanung, das Produktangebot auf Basis der Kundenbedürfnisse derart zu gestalten, dass Marktanteile oder der Absatz des Unternehmens maximiert werden (Jiao et al., 2007). Diese Kennzahlen hängen dabei entscheidend vom Kaufentscheidungsverhalten der

⁹Für vertiefende Informationen zu Variantenbäumen siehe Buchholz (2012, S. 29 ff.)

Kunden ab, weshalb der Kunde eine zentrale Rolle einnimmt. Da dieser bei seiner Kaufentscheidung vom vorliegenden Marktumfeld beeinflusst werden kann, muss zusätzlich das Marktumfeld bei der Planung eines Produktportfolios berücksichtigt werden (Meffert et al., 2015, S. 45-48). Dazu zählen nach ElMaraghy et al. (2013) neben dem Angebot des betrachteten Unternehmens auch die aktuelle Wettbewerbssituation, sowie vielfach auch die öffentliche Hand, die durch gesetzliche Regelungen das Marktgeschehen, beispielsweise durch Subventionen in Form von Kaufpreisprämien an die Kunden, regulieren kann. Weiterhin können verschiedene Formen von Kooperationen eingegangen werden, um das eigene Produktangebot, durch weitere Produkte und/oder Dienstleistungen von kooperierenden Unternehmen, zu ergänzen (Meffert et al., 2015, S. 59-60). Im Rahmen dieser Arbeit wird ein von mehreren Akteuren angebotenes Leistungsbündel als Marktmodell bezeichnet.

In Abbildung 2.7 sind die Marktteilnehmer sowie deren Interaktionen innerhalb des Marktumfelds schematisch dargestellt. Kunden aus unterschiedlichen Kundensegmenten durchlaufen dabei einen intensiven Such-, Vergleichs- und Auswahlprozess. Dabei entscheiden sie sich für ein am Markt offeriertes Marktmodell. Ein Marktmodell beinhaltet dabei mehrere komplementäre Produkte und/oder Dienstleistungen und steht im Wettbewerb zu anderen Marktmodellen.

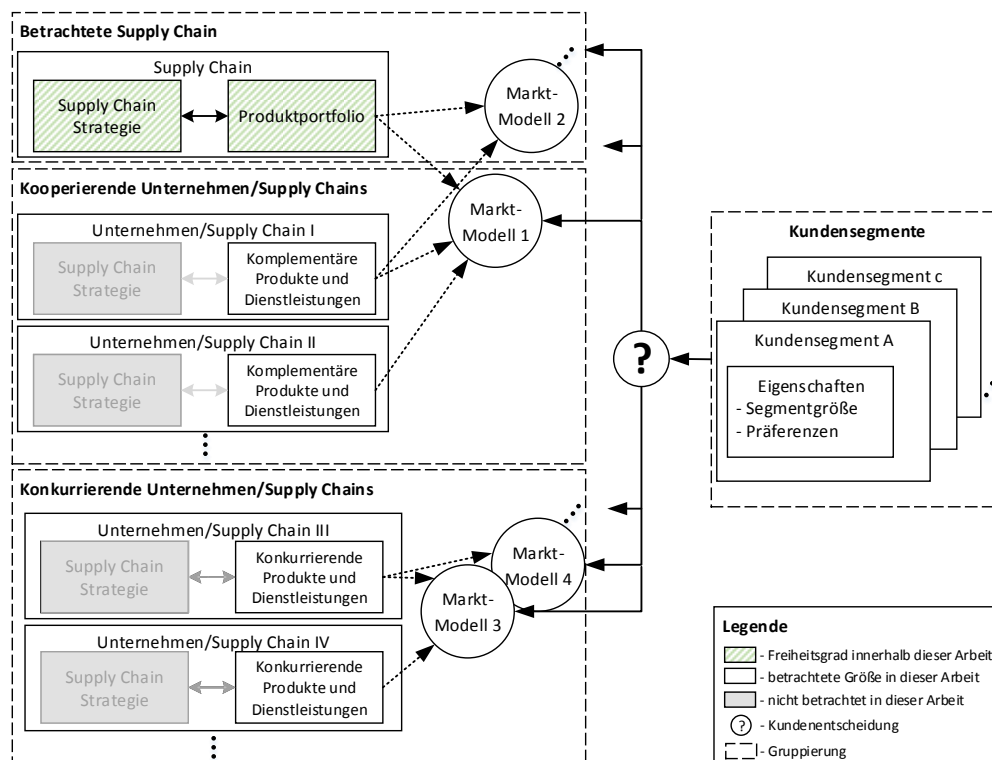


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung eines Marktumfelds

Kunden und deren Entscheidungsverhalten

Ein Kunde ist der Empfänger eines von einem Unternehmen bereitgestellten Produktes und/oder einer Dienstleistung (ISO 9000, 2005). Mit dem Erwerb eines Produktes und/oder Dienstleistung realisiert sich das im Angebot an den Kunden gerichtete Nutzenversprechen (engl. value proposition). In diesem ist das Wertversprechen bzw. der Gesamtnutzen definiert, welchen der Kunde durch das Produkt und/oder die Dienstleistung erhält (vgl. Kotler et al. (2007, S. 43) und Treacy und Wiersema (1997, S. XII)). Um aus unternehmerischer Sicht die Güte eines angebotenen Produktportfolios zu ermitteln, werden Kennzahlen wie der Marktanteil oder der Absatz herangezogen (Jiao et al., 2007). Zur Bestimmung dieser Kennzahlen ist eine Betrachtung des Kundenentscheidungsprozesses erforderlich. Dies bedeutet, es müssen die Fragen beantwortet werden, welcher Kunde, welches Produkt, in welcher Menge, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Wiederholrate, wo bzw. bei wem, warum und wie erwirbt (Meffert et al., 2015, S. 96 ff.).

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen zunächst der Kunde und dessen Verhalten analysiert werden. Unterschiedliche Kunden reagieren dabei individuell auf dasselbe Angebot (Meffert et al., 2015, S. 174). In der Literatur werden ähnliche Kunden, d.h. Kunden, die in ihrem Entscheidungsverhalten homogen reagieren, zu Kundensegmenten zusammengefasst (siehe beispielsweise (Freter, 2008)). Die Anzahl der in einem Kundensegment gruppierten Kunden stellt dabei die Segmentgröße dar. Die Unterschiede im Kundenentscheidungsverhalten lassen sich anhand psychologischer, ökonomischer sowie soziologischer Merkmale erklären (Tomczak et al., 2014, S. 18). Konkrete Ausprägungen dieser Merkmale können beispielsweise das Umweltbewusstsein, das verfügbare Einkommen und die Mehrpreisbereitschaft für Innovationen sein, welche sich ggf. im Zeitverlauf ändern.

Weiterhin werden Kundenentscheidungen von dem am Markt verfügbaren Angebot beeinflusst. Dieses Angebot umfasst zunächst das Produktportfolio der in dieser Arbeit betrachteten Supply Chain, welches im Folgenden im Bezug auf den Kundenentscheidungsprozess näher spezifiziert wird.

Produktportfolio der betrachteten Supply Chain

Das Produktportfolio der betrachteten Supply Chain stellt im Rahmen dieser Arbeit eine beeinflussbare Planungsgröße dar, unterliegt somit den Entscheidungsmöglichkeiten des adressierten Entscheidungsträgers und ist möglichst effizient zu gestalten. Das Produktportfolio beinhaltet dabei die von der Supply Chain angebotenen Produktvarianten, welche gemäß ihrer Eigenschaften in qualitative und quantitative Produktcharakteristiken und ihre entsprechenden Ausprägungen operationalisiert werden können (Jiao und Zhang, 2005). Eine solche Attribut-basierte Darstellung wird in der Literatur häufig verwendet, um das Kundenverhalten in Abhängigkeit

der angebotenen Produkte abzubilden (Ramdas, 2003) und so die Interdependenz zwischen Kunden und Angebot im Modell darzustellen.

Werden Änderungen am Produktportfolio vorgenommen bzw. einzelne Produkteigenschaften modifiziert, so wirkt sich dieses auf die Wahrnehmung der Kunden sowie den Kundenentscheidungsprozess aus, da dem Kunden dann weniger oder zusätzliche bzw. in ihren Eigenschaften veränderte Produkte zur Wahl stehen. Dadurch kann sich aus Kundensicht das Produkt mit dem größten Gesamtnutzen ändern und so zu einer anderen Kaufentscheidung führen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich Eigenschaften von angebotenen Produkten über den Produktlebenszyklus ändern können. So kann sich beispielsweise der Anschaffungspreis eines Produktes ändern (Klepper, 1996). Weiterhin können sich Produkteigenschaften auch über die Nutzungszeit des Kunden verändern, wie beispielsweise qualitative Eigenschaften aufgrund von Abnutzung (Kawlath, 1969, S. 107-108).

Um ein solches Produktportfolio anbieten zu können, müssen innerhalb der Supply Chain Produktions- und Logistikaktivitäten durchgeführt werden. Während dabei die Angebotsseite (also das Produktportfolio) vom Kunden wahrgenommen wird und somit das Entscheidungsverhalten beeinflusst, stellt die Supply Chain-Strategie keine Grundlage für den Entscheidungsprozess der Kunden dar.

Komplementäre Angebote von kooperierenden Unternehmen

Kooperationen werden als Maßnahme gesehen, um sich gegenüber Konkurrenten Wettbewerbsvorteile, wie Kostenvorteile durch eine effizientere Koordination von Prozessen zu verschaffen (Soosay et al., 2008). In der Literatur werden dabei drei grundlegende Strukturen unterschieden: Vertikale, horizontale und laterale Kooperationen (Simatupang und Sridharan, 2002). Vertikale Kooperationen zielen auf eine effizientere Koordination von vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen ab. Eine vertikale Kooperation liegt beispielsweise vor, wenn die Schnittstelle zwischen Zulieferer und Hersteller optimiert wird, um den Kunden ein gemeinsames Endprodukt anzubieten. Horizontale Kooperationen bezeichnen die Zusammenarbeit mehrerer (unverbundener) Unternehmen auf der gleichen Wertschöpfungsebene indem Ressourcen oder Informationen geteilt werden. Schließlich stellen laterale Kooperationen eine Mischform aus vertikalen und horizontalen Kooperationen dar (Simatupang und Sridharan, 2002).

Im Rahmen dieser Arbeit werden kooperierende Unternehmen bzw. Supply Chains betrachtet, welche das Produktportfolio der betrachteten Supply Chain durch zusätzliche Leistungen erweitern. Dabei entsteht im Zuge einer solchen Kooperation eine gewisse Abhängigkeit zwischen dem Angebot der betrachteten Supply Chain und dem komplementären Angebot des kooperierenden Akteurs. Ein komplementäres Angebot stellt eine Kombination von verschiedenen Produkten und/oder Dienstleistungen

dar und wird als (hybrides) Leistungsbündel bezeichnet (Backhaus et al., 2010, S. 4 ff.). Ein Leistungsbündel ist auf die Bedürfnisse der Kunden ausgerichtet und zielt auf die Nutzung von Synergieeffekten ab, sodass der Mehrwert eines Leistungsbündels für den Kunden, gegenüber zweier separater Angebote, größer ist. Teilweise sind komplementäre Angebote sogar zwingend erforderlich, da ansonsten ein Produkt nicht am Markt platziert werden kann. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein Produkt in einem anderen verbaut wird. Komplementäre Angebote können von kooperierenden Unternehmen oder Supply Chains formuliert werden. Auch die öffentliche Hand kann mit ihren Maßnahmen zur Steuerung des Marktes zu einem komplementären Angebot beisteuern. So zielen Maßnahmen, wie beispielsweise ökonomische Kaufpreisanreize darauf ab, das Kundenverhalten zu beeinflussen. Auch für das Anbieten von komplementären Produkten und/oder Dienstleistungen sind Prozesse von Unternehmen bzw. Supply Chains oder von der öffentlichen Hand durchzuführen. Die Gestaltung obliegt jedoch dem jeweiligen Akteur und kann somit nicht oder nur indirekt beeinflusst werden. Die Gestaltung von Supply Chain-Strategien, welche für das Anbieten von komplementären Angeboten notwendig sind, ist daher nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Konkurrierende Angebote von Wettbewerbern

Um die Nachfrage der angebotenen Produktvarianten realitätsnah zu bestimmen, muss der Gesamtmarkt mit allen Wettbewerbern und ihren konkurrierenden Angeboten berücksichtigt werden (Tomczak et al., 2014, S. 44 ff.). Ein Wettbewerber oder Konkurrent bietet Kunden, im Vergleich zum betrachteten Unternehmen, gleiche oder ähnliche Leistungen an (Meffert et al., 2015, S. 46), weshalb Kunden in ihrem Entscheidungsverhalten beeinflusst werden können. Daher muss das Angebot der Wettbewerber in den Kaufentscheidungsprozessen einbezogen werden und die Frage beantwortet werden, welcher Anteil der gesamten Marktnachfrage auf die Produktvarianten des betrachteten Unternehmens entfällt. Ein Ignorieren der Wettbewerbssituation würde zu einer Überschätzung der Nachfrage führen.

Das Angebot der Wettbewerber kann sich aus Produkten und/oder Dienstleistungen, also einem Leistungsbündel zusammensetzen. Verschiedene Akteure können zum Angebot beitragen, weshalb es ein konkurrierendes Marktmodell darstellt.

Auch für das Anbieten der konkurrierenden Produkte und/oder Dienstleistungen sind Prozesse von Unternehmen bzw. Supply Chains erforderlich. Die Gestaltung obliegt jedoch wie bei den kooperierenden Angeboten dem jeweiligen Unternehmen bzw. der Supply Chain und ist daher nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die öffentliche Hand kann mit ihren Maßnahmen zur Steuerung des Marktes auch ein konkurrierendes Angebot darstellen. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ausschließlich Konkurrenzprodukte aufgrund ihrer neuartigen Technologie subventioniert werden.

2.3.3 Unsicherheiten bei der Gestaltung eines Produktportfolios

Entscheidungen zur Gestaltung eines Produktportfolios müssen typischerweise unter Unsicherheiten getroffen werden, da dem Entscheidungsträger zum Planungszeitpunkt nicht alle Informationen für die Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen (Koufteros et al., 2005). Knight (1921, S. 25 ff.) differenziert anhand der Kriterien *Kenntnis über die möglichen Umweltzustände* und *Kenntnis über die Eintrittswahrscheinlichkeit* zwischen verschiedenen Arten von Unsicherheiten. So setzen Entscheidungen unter Risiko voraus, dass dem Planer alle Informationen über mögliche Umweltzustände sowie deren jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten zur Verfügung stehen. Ökonomisch betrachtet kennzeichnet ein Risiko dabei das durch eine Entscheidung mögliche Eintreten eines wirtschaftlichen Schadens oder das Ausbleiben eines erwarteten wirtschaftlichen Vorteils (Mag, 1981, S. 480). Sofern nur mögliche Umweltzustände abgeschätzt werden können, erfolgt die Entscheidungsfindung unter Ungewissheit. Planungssituationen in denen weder mögliche Umweltzustände noch deren Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden können, werden unter vollkommener Unsicherheit betrachtet (Knight, 1921, S. 25 ff.). Je nach vorliegendem Typ von Unsicherheit eignen sich verschiedene Planungsansätze. Während unter Risiko und Ungewissheit häufig analytische Planungsverfahren angewendet werden, eignen sich unter vollkommener Unsicherheit eher experimentelle Ansätze (Alvarez und Barney, 2007).

Im Bereich des Operations Research wird der Begriff Unsicherheit häufig synonym mit dem oben definierten Begriff des Risikos verwendet. Sowohl der Umweltzustand als auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten werden häufig anhand historischer Daten oder auf Basis von Prognosen ermittelt. Mögliche Ausprägungen von unsicheren Einflussfaktoren repräsentieren dabei ein hypothetisches Zukunftsbild, welches als Szenario bezeichnet wird (Godet und Roubelat, 1996). Werden mehrere Zufallsvariablen betrachtet, so enthält ein Szenario von jeder Zufallsgröße eine mögliche Ausprägung, d.h. innerhalb eines Szenarios ist der Wert der Zufallsvariablen deterministisch vorgegeben. Die Ausprägungen der Zufallsvariablen sind innerhalb eines Szenarios kohärent zueinander. Zur Planung werden verschiedene Szenarien ins Kalkül gezogen, damit ein umfassendes Bild über mögliche zukünftige Entwicklungen entsteht. Die durch die Unsicherheiten resultierenden Auswirkungen auf die Zielgrößen werden dabei als Risiken bezeichnet¹⁰, wobei das für das Unternehmen resultierende Risiko dabei als Funktion des Grads der Unsicherheit ausgedrückt werden kann.

Im betrachteten Planungsproblem der Gestaltung des Produktportfolios lassen sich verschiedene Unsicherheiten identifizieren. Die Unsicherheiten können dabei aus dem

¹⁰In der Literatur wird oftmals auch zwischen positiven Konsequenzen (Chancen) und negativen Konsequenzen (Risiken) differenziert (Mag, 1981, S. 491).

aktuellen Markt-, Technologie- und Prozessumfeld stammen (Anderson und Joglekar, 2005). So können innerhalb des Marktumfelds insbesondere das Kundenverhalten und deren Präferenzen oftmals nur abgeschätzt werden und unterliegen daher Unsicherheiten (Jaworski und Kohli, 1993). Darüber hinaus zählt auch die zukünftige Wettbewerbssituation zu einem wesentlichen unsicheren Faktor, da beispielsweise zukünftige Strategien von Konkurrenten nur prognostiziert werden können. Zusammenfassend lassen sich die beschriebenen Unsicherheiten folgenden Bereichen des Planungsproblems zuordnen:

- **Produktportfolio der betrachteten Supply Chain:** Im Rahmen des durch die Supply Chain angebotenen Produktportfolios können (einige) Eigenschaften der Produktvarianten Unsicherheiten unterliegen. Dazu zählen Informationen, die aufgrund des aktuellen Stands der Planung noch nicht festgelegt worden sind oder die aufgrund fehlender Erfahrungswerte nur abgeschätzt werden können. Dazu zählen beispielsweise der zukünftige Absatzpreis und die erwartete Nutzungszeit einer Produktvariante durch die Kunden.
- **Komplementäres und konkurrierendes Angebot:** Hierzu zählen unsichere Einflussfaktoren, die von außerhalb der betrachteten Supply Chain auf den Kundenentscheidungsprozess wirken. Dies umfasst die Marktmodelle von kooperierenden Unternehmen, die Wettbewerbssituation sowie die politischen Rahmenbedingungen. So kann beispielsweise die zukünftige Wettbewerbssituation nur abgeschätzt werden.
- **Kundeneigenschaften und Präferenzen:** Kundeneigenschaften und deren Präferenzen werden üblicherweise durch Marktanalysen ermittelt. Die Ergebnisse solcher Analysen stellen dabei immer nur einen Ausschnitt der Realität dar und sind somit als eine weitere unsichere Größe zu betrachten. So kann beispielsweise die Mehrpreisbereitschaft eines Kunden für ein Marktmodell unsicher sein.

Diese unsicheren Einflussfaktoren wirken direkt auf die Nachfrage der einzelnen Produktvarianten. Da die Nachfrage auch maßgeblich das Umsatzpotential definiert und so unter Berücksichtigung der Kostenstrukturen auch indirekt Aufschluss über die Profitabilität der Supply Chain gibt, fließen diese unsicheren Einflussfaktoren auch indirekt als unsichere Größe in die Planung der Supply Chain-Strategie ein.

2.4 Gestaltung einer Supply Chain-Strategie

Um Kunden ein Produktportfolio anzubieten, sind Produktions- und Logistikaktivitäten nötig, die im Rahmen einer Supply Chain durchgeführt werden können (Jiao et al., 2007). Die strategische Planung einer Supply Chain-Strategie zielt darauf ab, die Kosten für diese Aktivitäten möglichst gering zu halten, um bei ganzheitlicher

Betrachtung mit dem Angebot das Unternehmensergebnis zu maximieren. In diesem Abschnitt wird der Problemgegenstand der Gestaltung der Supply Chain-Strategie erläutert. Dazu werden zunächst die Elemente des Planungsgegenstandes definiert (siehe Abschnitt 2.4.1). Insbesondere aufgrund der betrachteten innovativen Produkte bestehen auch bei der Gestaltung von Supply Chain-Strategien Unsicherheiten, wobei der Entscheidungsträger in Abhängigkeit seiner Risikobereitschaft den Unsicherheiten entgegensteuern kann. In Abschnitt 2.4.2 werden daher die Unsicherheiten und der Problemaspekt der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers definiert. Anschließend werden die Planungsaufgaben der Gestaltung von Supply Chain-Strategien in Abschnitt 2.4.3 erläutert.

2.4.1 Produktions- und Logistikaktivitäten innerhalb einer Supply Chain

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Supply Chain besteht, in Anlehnung an Schwartz und Voß (2007), aus verschiedenen Standorten, welche je nach Wertschöpfungstiefe bestimmten Wertschöpfungsstufen zugeordnet sind. Im Rahmen dieser Arbeit repräsentieren dabei Standorte, welche nicht auf der letzten Wertschöpfungsstufe liegen, Produktions- und/oder Lagerstandorte, in denen verschiedene Produktionsaktivitäten und/oder Lageraktivitäten durchgeführt werden können. Standorte der letzten Wertschöpfungsstufe repräsentieren Kundensegmente mit entsprechender Nachfrage nach Produktvarianten. Weiterhin können die einzelnen Standorte durch Transportverbindungen (gerichtete Kanten) miteinander verbunden sein, sodass zwischen diesen Standorten Transportaktivitäten durchgeführt werden können.

Produkte durchlaufen im Verlauf der Herstellung verschiedene Fertigstellungsgrade. Abbildung 2.8 stellt diesen Verlauf schematisch dar. Ausgehend von Rohmaterialien, welche sofern verfügbar, von Lieferanten bezogen werden können, werden diese in Produktionsstandorten mittels Produktionsaktivitäten (d.h. hier L_1 und L_2) zu Zwischenprodukten und schließlich zu Endprodukten verarbeitet. Dabei wird je nach Produktspezifikation eine Abfolge von Produktionsprozessen durchlaufen, wobei sich die Fertigung über mehrere Standorte erstrecken kann. Daraus ergibt sich, dass sowohl Rohmaterialien, Zwischenprodukte und Endprodukte transportiert als auch gelagert werden können.

Beim Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten gilt es in den einzelnen Standorten bzw. auf den Transportverbindungen die zur Verfügung stehenden Kapazitäten pro Zeiteinheit zu berücksichtigen. So weist beispielsweise eine Produktionsaktivität eine Produktionsgrenze auf, welche aufgrund von beschränkten Ressourcen, wie die Anzahl zur Verfügung stehender Maschinen oder Arbeiter je Standort vorgegeben ist. Jede produzierte Einheit eines Produktes benötigt dabei eine gewisse Zeitspanne und verbraucht somit eine gewisse Kapazität. Weiterhin lassen sich Logistikaktivitäten in Transport- und Lageraktivitäten unterteilen. Bei Transportakti-

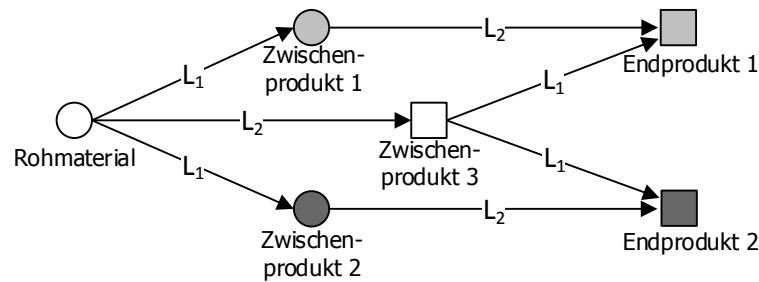


Abbildung 2.8: Beispielhafte Darstellung verschiedener Fertigstellungsgraden von Produktvarianten

vitäten gibt die zur Verfügung stehende Anzahl an Transportmitteln die maximale Transportkapazität je Transportverbindung vor. Ebenso müssen im Fall von Lageraktivitäten die maximalen Lagerkapazitäten der einzelnen Standorte berücksichtigt werden. Üblicherweise findet ein Transport und eine Lagerung von Materialien, Zwischen- und Endprodukten in sogenannten Ladungsträgern (bspw. eine Palette) statt. Jede transportierte bzw. gelagerte Einheit nimmt dabei ein gewisses Volumen ein und verbraucht somit eine gewisse Kapazität.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein langfristiger Planungshorizont betrachtet. Üblicherweise wird der Planungshorizont dazu in eine diskrete Anzahl an Perioden unterteilt. Jede Periode repräsentiert dann einen zeitlichen Abschnitt. Aktivitäten können in verschiedenen Perioden ausgeführt werden und benötigen je nach Dauer der Aktivität mehrere Perioden bis zur Fertigstellung. Aufgrund des langfristigen Planungshorizontes können einige Einflussfaktoren zum Zeitpunkt der Planung nur abgeschätzt werden (bspw. die Marktnachfrage) und stellen somit zum Planungszeitpunkt Unsicherheiten dar. Ein Ignorieren dieser unsicheren Einflussfaktoren kann zu schlechten oder im schlimmsten Fall sogar unzulässigen Planungslösungen führen (Ruszczyński und Shapiro, 2003). Eine detaillierte Beschreibung möglicher unsicherer Einflussfaktoren und deren Wirkung auf die Supply Chain erfolgt im folgenden Abschnitt.

2.4.2 Unsicherheiten bei der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie

Unsichere Einflussfaktoren beeinflussen die Profitabilität einer Supply Chain. Daher ist es das Ziel, adäquate Planungsverfahren einzusetzen, welche diese Unsicherheiten berücksichtigen. Die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers kann die Entscheidungen dabei beeinflussen. Daher werden im Folgenden zunächst die Unsicherheiten definiert, mit denen eine Supply Chain konfrontiert ist. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen diesen Unsicherheiten und der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers definiert.

Unsichere Einflussfaktoren

In Abschnitt 2.3.3 wurde herausgestellt, dass zahlreiche Einflussfaktoren die Nachfrage der einzelnen Produktvarianten beeinflussen können. Dazu zählen Eigenschaften des betrachteten Produktportfolios, den komplementären und konkurrierenden Angeboten sowie den Kundeneigenschaften und deren Präferenzen. Die ermittelten Nachfrageprognosen fließen wiederum als direkter Input in die Planung einer effizienten Supply Chain-Strategie ein. Da die Nachfrage von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird ist diese häufig eine wesentliche Unsicherheit im Planungsprozess. Ursachen für Nachfrageschwankungen finden sich dabei in immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen (Christopher, 2000) und stetig wachsender Größe eines Produktportfolios (Pagh und Cooper, 1998) wieder. Ein Ignorieren dieser Unsicherheit kann zu hohen Lagerbeständen oder Fehlmengen bzw. zu einem schlechten Servicegrad führen (Pagh und Cooper, 1998), und somit die Beschaffungs-, Produktions- sowie Distributionskosten beeinträchtigen. Weiterhin können Unsicherheiten über den Produktlebenszyklus unterschiedlich stark ausgeprägt sein. So liegen häufig saisonale Nachfrageschwankungen vor (Minner und Kiesmüller, 2012).

Darüber hinaus existieren einige unsichere Einflussfaktoren, welche sowohl im Rahmen des Produktportfolios als auch im Hinblick auf die Supply Chain-Strategie direkt auf die Zielgrößen Marktdurchdringung und Gewinn wirken. Dazu zählt beispielsweise der Absatzpreis einer Produktvariante oder eines Marktmodells, da dieser einerseits bei der Ermittlung der Marktdurchdringung den Kaufentscheidungsprozess der Kunden maßgeblich beeinflusst und andererseits im Rahmen der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie auf das Unternehmensergebnis wirkt.

Schließlich existieren unsichere Einflussfaktoren, die ausschließlich Einfluss auf die Gestaltung der Supply Chain-Strategie haben. Dazu zählen unsichere Einflussfaktoren auf der Kostenseite der Supply Chain. So können bspw. Produktionskosten Unsicherheiten unterliegen (Santoso et al., 2005), die besonders im innovativen Umfeld oftmals schwer für den gesamten Planungshorizont prognostiziert werden können.

Risikobereitschaft

In Abhängigkeit der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers kann unterschiedlich auf die bestehenden Unsicherheiten reagiert werden. Nach Scholl (2001, S. 51) stehen dabei die sogenannte Höhen- und Sicherheitspräferenz im Konflikt zueinander. Während die Höhenpräferenz eine Bewertung der Handlungsalternativen hinsichtlich der Höhe des Nutzens (bspw. Gewinn vor Steuern (EBIT)) beschreibt, spiegelt die Sicherheitspräferenz den Nutzen von Handlungsalternativen hinsichtlich der Unsicherheit der erzielten Ergebnisse (bspw. Streuung) wider. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei der Zielkonflikt zwischen Profitabilität und Risiko betrachtet. Risikoaffine Entscheidungsträger zielen darauf ab die Handlungsalternativen nach deren

günstigsten Ergebnissen (d.h. hier nach höchstem EBIT) auszuwählen. Dabei wird die Chance auf einen großen EBIT höher eingeschätzt, als das Risiko eines schlechten Ergebnisses. Im Gegensatz dazu versuchen risikoaverse Entscheidungsträger das Risiko einzuschränken, indem das Risiko unerwünschter Ergebnisse höher als die Chance vorteilhafter Ergebnisse eingeschätzt wird (Scholl, 2001, S. 51). Derartige Lösungen werden auch als robust bezeichnet (Scholl, 2001, S. 93 ff.).

Um das Risiko in den Planungsprozess einzubeziehen, ist zunächst eine Kennzahl zur Repräsentation des Risikos notwendig. In der Literatur existieren dazu verschiedene Risikomaße, die sich in ihren Eigenschaften unterscheiden. Einige Risikomaße zielen darauf ab, das Risiko über die gesamte Verteilung zu minimieren. Dazu zählen beispielsweise die Varianz und die Standardabweichung. Diese Streuungsmaße erfassen sowohl negative als auch positive Abweichungen vom Erwartungswert, wobei positive Abweichungen (d.h. Chancen) eigentlich wünschenswert sind (Brandtner, 2012, S. 32).

Weiterhin existieren Risikomaße, welche nur einen Teil der Verteilung abdecken. Häufig werden dabei negative Abweichungen vom Erwartungswert vermieden, um so beispielsweise die Kosten in ungünstigen Szenarien zu minimieren. Der Value-at-Risk (VaR) und eine Weiterentwicklung der Conditional-Value-at-Risk (CVaR) sind Downside-Risikomaße, welche nur einen Teil der Verteilung betrachten. Der α -VaR definiert unter Beachtung einer definierten Wahrscheinlichkeit α , den Gewinn oder den Verlust, der mit der Wahrscheinlichkeit α nicht unterschritten bzw. überschritten wird. Weiterhin definiert der α -CVaR den erwarteten Gewinn oder Verlust in den schlechtesten $\alpha\%$ -Fällen (Rockafellar und Uryasev, 2000).

In Abhängigkeit dieser Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers können verschiedene Supply Chain-Strategien gewählt werden. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

2.4.3 Arten von Supply Chain-Strategien

Eine Supply Chain-Strategie spezifiziert, wie die Beschaffung, Produktion und Logistik sowie der Vertrieb der Produkte aufeinander abgestimmt sind und zielt durch die Nutzung von Supply Chain-Potenzialen, wie bspw. der Flexibilität, Lieferfähigkeit oder Kosteneffizienz einer Supply Chain, auf die Schaffung eines Wettbewerbsvorteils ab (Qi et al., 2011). Die Supply Chain-Strategie hat dabei einen signifikanten Einfluss auf die Profitabilität einer Wertschöpfungskette (Christopher und Ryals, 1999), wobei die Auswahl einer Strategie maßgeblich vom Produktportfolio sowie dem Marktumfeld abhängt. So sollte die Strategie in Abhängigkeit der angebotenen Produktvarianten, die Länge des Produktlebenszyklus, der Grad an Nachfrageunsicherheit sowie die Dauer der Lieferungen und die Markterwartungen hinsichtlich der Liefertreue konfiguriert werden (Fisher, 1997).

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über grundlegende Supply Chain-Strategien und deren Typologisierung gegeben. Auf Basis dieser Definition und den innovativen Charakter der betrachteten Produktvarianten wird anschließend der notwendige Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit in Bezug auf die Strategien abgeleitet. Dabei stellt sich unter den gegebenen Anforderungen heraus, dass sogenannte Postponement-Strategien ein effizientes Instrument zur Bewältigung der Anforderungen darstellen können. Daher werden Postponement-Strategien spezifiziert sowie die Ziele und Planungsaufgaben erläutert. Abschließend werden die bei der Planung zu berücksichtigenden Kostenstrukturen beschrieben.

Supply Chain-Strategien und deren Typologisierung

Zu den grundlegenden und in der Literatur sowie Praxis weit verbreiteten Strategien, zählen schlanke Supply Chain (engl. lean supply chain), agile Supply Chain (engl. agile supply chain) sowie hybride Supply Chain (engl. hybrid supply chain) Strategien (vgl. bspw. Fisher (1997), Christopher (2000) und Vonderembse et al. (2006)). Eine schlanke Supply Chain zielt dabei auf die kosteneffiziente Beschaffung, Produktion und Distribution von eher funktionalen Produkten ab. Ziel ist die Steigerung des Absatzvolumens, sodass beispielsweise aufgrund von Skaleneffekten Kostenreduzierungen erreicht werden. Im Gegensatz dazu zeichnen sich agile Supply Chains durch ein hohes Maß an Flexibilität aus und zielen auf die Befriedigung verschiedener Kundensegmente mit einem entsprechend großen Produktportfolio ab. Adressiert werden meistens stark veränderliche und wachstumsorientierte Märkte, auf denen kundenindividuelle, innovative Produkte angeboten werden. Hybride Supply Chain-Strategien kombinieren die Vorzüge der beiden Strategien und ermöglichen, durch eine späte kundenspezifische Produktspezifizierung, eine effiziente kundenindividuelle Massenproduktion (engl. mass customization) (Vonderembse et al., 2006).

Weiterhin typologisieren Meyr und Stadtler (2015, S. 66 ff.) eine Supply Chain anhand funktionaler und struktureller Eigenschaften. Bei den funktionalen Eigenschaften werden die Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Vertriebsstrategie unterschieden. Im Rahmen der Beschaffung gilt es u.a. die Anzahl und Art der zu beschaffenden Produkte sowie die Art der Versorgung festzulegen. Im Rahmen der Produktion werden die Organisation der Produktionsprozesse sowie die Art der Fertigung festgelegt. Die Distribution legt die Struktur der Logistik fest, d.h. es werden u.a. Entscheidungen über die zu realisierenden Transportverbindungen zwischen Standorten getroffen. Schließlich definiert die Vertriebsstrategie das Verhältnis zum Kunden. Bei den strukturellen Eigenschaften wird weiterhin zwischen der Topographie der Supply Chain und der Integration und Koordination unterschieden. Die Topographie fokussiert auf die Netzwerkstruktur und der Position des Kundenentkopplungspunktes, d.h. der Zeitpunkt ab dem ein Produkt einem Kundenauftrag

zugeordnet wird. Die Art der Integration und Koordination legt die Art des Informationsaustauschs und die Machtbalance zwischen den Organisationen fest.

Pagh und Cooper (1998) stellen heraus, dass Fragestellungen hinsichtlich der Integration und Ausführung von Produktions- und Logistikaktivitäten entscheidenden Einfluss auf die Effizienz von Wertschöpfungsnetzwerken haben. Sogenannte Postponement- und Spekulationsstrategien bieten dabei die Möglichkeit, Produkte zeit- und kosteneffizient herzustellen sowie anschließend an die Kunden auszuliefern. Die Vorteile derartiger Strategien werden auf Basis von rekonfigurierten Produktions- und Logistikstrukturen erzielt, indem beispielsweise die optimale Position des Kundenentkopplungspunktes bestimmt wird. Die im Planungsprozess von Postponement-Strategien zu treffenden Entscheidungen finden sich dabei auch in den von Meyr und Stadtler (2015, S. 65 ff.) und Vonderembse et al. (2006) spezifizierten Entscheidungsebenen wieder (bspw. Entscheidungen bezüglich des Kundenentkopplungspunktes sowie Entscheidungen hinsichtlich der Organisation von Produktions- und Logistikaktivitäten). Weiterhin enthält die Auswahl einer nach Vonderembse et al. (2006) definierten Strategie, mit dem Abwägen zwischen schlanken und agilen Strukturen, Fragestellungen, die auch im Rahmen von Postponement- und Spekulationsstrategien betrachtet werden. Da im Rahmen dieser Arbeit innovative Produkte betrachtet werden, sind Nachfrageprognosen mit gewissen Unsicherheiten behaftet (vgl. Abschnitt 2.3.3 und 2.4.2). Unter derartigen Unsicherheiten stellen Postponement-Strategien für Wertschöpfungsnetzwerke eine Möglichkeit dar, Entscheidungen über Produktions- und Logistikaktivitäten unter unsicherer Kundennachfrage solange zu verzögern, bis die Kundenaufträge vorliegen oder sich besser abschätzen lassen (van Hoek, 2001). Ziel des Verzögerns ist dabei, durch die bessere Antizipation der unsicheren Nachfrage eine Reduzierung der für das Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten anfallenden Kosten zu erzielen. Auch Yang et al. (2004) stellen die Bedeutung der Berücksichtigung von Postponement-Strategien insbesondere bei der Einführung von innovativen Produkten heraus. Deshalb liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Identifizierung von effizienten Postponement- und Spekulationsstrategien¹¹. Im Folgenden werden Postponement- und Spekulationsstrategien zunächst definiert. Anschließend werden die in der Literatur verbreiteten Formen erläutert.

Formen von Postponement- und Spekulationsstrategien

Das Konzept des Postponements wird bereits in den 1950er Jahren diskutiert und zunächst als Instrument zur Reduzierung von Marketingkosten aufgefasst (Alderson, 1950). Durch das Verschieben oder Verzögern einzelner oder mehrerer Produktions-

¹¹Der Begriff Supply Chain-Strategie wird im Rahmen dieser Arbeit synonym für Postponement- und Spekulationsstrategien verwendet.

und Logistikaktivitäten sollen die durch Unsicherheiten verursachten Kosten vermieden werden. Ziel ist die kosteneffiziente Rekonfiguration bestehender Produktions- und Logistikstrukturen und die gleichzeitige Reduzierung von Lieferzeiten (Pagh und Cooper, 1998). Kosten entstehen dabei in Abhängigkeit des Differenzierungsgrads der Produkte bei Durchführung entsprechender Aktivitäten. Hinsichtlich der Differenzierung wird zwischen Fertigstellungsgrad (engl. form), geographischer Position (engl. place) und zeitlichem Aspekt (engl. time) unterschieden (Pagh und Cooper, 1998). Eine Differenzierung nach Fertigstellungsgrad adressiert den Fertigungsprozess von Standardkomponenten eines Produktes bis hin zur kundenindividuellen Produktvariante. Die geographische Position bestimmt an welchem Standort innerhalb der Supply Chain Produktions- und Logistikaktivitäten durchgeführt werden. Schließlich definiert der zeitliche Aspekt den Zeitpunkt zu dem diese Aktivitäten ausgeführt werden (Bucklin, 1965). Insgesamt sollen Postponement-Strategien Herausforderungen hinsichtlich der unsicheren Kundennachfrage nach einzelnen Produktvarianten, steigende Lagerbestände und damit verbundene Kapitalbindungskosten sowie Fehlmengen bei nicht oder nicht rechtzeitig ausgelieferten Bestellungen bewältigen.

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Klassifizierung von Postponement-Strategien. Eine weit verbreitete Definition liefern Pagh und Cooper (1998), indem zunächst zwischen den Dimensionen Produktions- und Logistikaktivitäten differenziert wird. Die Extremfälle, also das Verzögern beider Aktivitätsarten bzw. das genaue Gegenteil, werden als vollständiges Postponement (engl. full postponement) bzw. als vollständige Spekulation (engl. full speculation) bezeichnet. Werden ausschließlich Produktionsaktivitäten bzw. Logistikaktivitäten verschoben, wird dieses als Produktionspostponement (engl. form postponement) bzw. als logistisches Postponement (engl. logistics postponement) bezeichnet:

- **Full Speculation:** Diese Strategie basiert vollständig auf Prognosen zukünftiger Absatzmengen und bedeutet, dass sowohl Produktions- als auch Logistikaktivitäten unter unsicherer Kundennachfrage durchgeführt werden. Es wird darauf spekuliert, dass die Absatzprognose mit der tatsächlich realisierten Nachfrage übereinstimmt. Sämtliche Produktionsaktivitäten zur Fertigstellung eines Produktes werden weder zeitlich, noch geographisch verschoben, sodass der Produktdifferenzierungspunkt innerhalb der Supply Chain auf einer tiefen Wertschöpfungsstufe liegt. Weiterhin sind zum Zeitpunkt des Auftragseingangs auch bereits alle Logistikaktivitäten durchgeführt, welches innerhalb einer Supply Chain in eine dezentrale Distributionsgestaltung mündet. Ein häufig genannter Vorteil dieser Strategie liegt in der Nutzung von Skaleneffekten aufgrund großer Produktionsmengen. Dagegen wird bei dieser Strategie eine dezentrale Lagerhaltung verfolgt, was unter Unsicherheiten zu hohen Lagerbeständen führen kann.

- **Form Postponement:** Hierbei wird darauf abgezielt (einige) Produktionsaktivitäten zeitlich und geographisch solange zu verzögern, bis sich im Idealfall die konkrete Nachfrage realisiert hat, oder bis bessere Prognosen vorliegen. Dadurch wird der Fertigstellungsgrad der Produkte erst nach dem Durchführen von (einigen) Logistikaktivitäten erreicht. Je nachdem wie viele und welche Produktionsaktivitäten verschoben werden, wird vom sogenannten „Labeling Postponement“, d.h. dem Verschieben von Produktionsaktivitäten zum Kennzeichnen der Produkte, dem „Packaging Postponement“, d.h. dem Verschieben von Produktionsaktivitäten zum Verpacken der Ware, dem „Assembly Postponement“, d.h. dem Verschieben von Produktionsaktivitäten zur Finalisierung von kundenindividuellen Varianten und dem „Manufacturing Postponement“, d.h. dem Verschieben von Produktionsaktivitäten zur Erstellung eines Grundproduktes. Durch Form Postponement wird eine spätere Produktdifferenzierung ermöglicht, wodurch potenziell Lagerbestände gesenkt werden können. Andererseits besteht die Gefahr, dass Skaleneffekte in der Produktion verloren gehen.
- **Logistics Postponement:** Diese Strategie bietet die Möglichkeit (einige) Logistikaktivitäten zeitlich zu verzögern, sodass Produkte erst dann weiter in Richtung der Kunden transportiert werden, wenn sich Nachfrageunsicherheiten aufgelöst oder reduziert haben. Dieses wird durch eine direkte Versorgung der Kunden mittels zentraler Lagerhaltung erreicht. Eine solche Strategie führt im Allgemeinen zu geringeren Lagerbeständen und reduziert somit die Lagerkosten. Auf der anderen Seite kann Logistics Postponement zu einem Anstieg der Transportkosten führen, da Transporte üblicherweise eine geringere Auslastung aufweisen.
- **Full Postponement:** Bei dieser Strategie werden sowohl Produktions- als auch Logistikaktivitäten verzögert. Damit stellt diese Strategie eine Kombination von Form Postponement und Logistics Postponement dar und ist dabei die Strategie bei der Postponement am stärksten ausgeführt wird. So können (einige) Produktions- und Logistikaktivitäten verzögert werden, sodass generische Produkte in einer zentralen Lagerhaltung bevorratet werden. Im Allgemeinen führt Full Postponement zu geringeren Lagerkosten, höheren Produktions- sowie Transportkosten und bietet die beste Möglichkeit um Nachfrageschwankungen zu antizipieren.

Abbildung 2.9 fasst die verschiedenen Postponement-Strategien nochmal graphisch zusammen. Für jede Art von Postponement-Strategie ist dabei eine mögliche Gestaltung der Supply Chain gegeben. Daraus werden die strukturellen Unterschiede hinsichtlich der Durchführung von Produktions- und Logistikaktivitäten deutlich. So

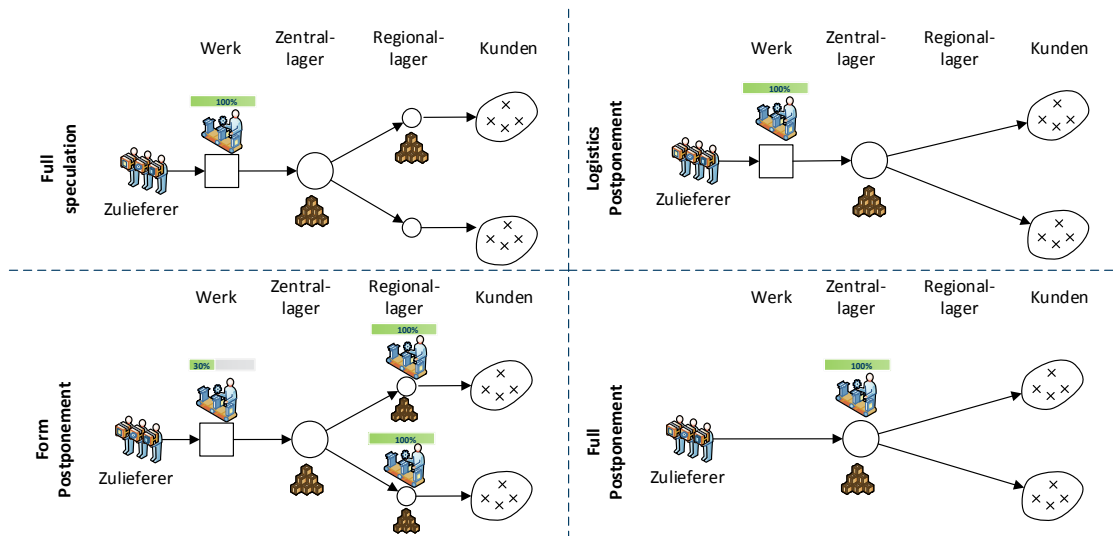


Abbildung 2.9: Arten von Postponement-Strategien

kann durch Form Postponement der Fertigstellungsgrad der Produkte (siehe Fortschrittsbalken in der Abbildung) verzögert werden und durch Logistics Postponement das Fortschreiten der geographischen Position eines Produktes in Richtung der Kunden aufgeschoben werden.

Resultierende Ziele und Planungsaufgaben

Innerhalb des Planungsproblems der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie werden verschiedene Ziele verfolgt. Primäres Ziel ist dabei die effiziente Durchführung der Produktions und Logistikaktivitäten, sodass Kennzahlen wie beispielsweise der Gewinn vor Steuern (EBIT) maximiert werden. Postponement-Strategien werden eingesetzt, um unsichere Nachfrage besser antizipieren zu können. Dadurch soll eine höhere Flexibilität in der Produktion und Logistik geschaffen werden, sodass Kosten gesenkt und Erlöse gesteigert werden können (Pagh und Cooper, 1998). Ein weiteres Ziel ist die Minimierung der aus den Nachfrageunsicherheiten resultierenden Supply Chain-Risiken. Dieses schließt u.a. nicht abgesetzte Lagerbestände und damit hohe Kapitalbindungskosten ein (van Hoek, 2001). Entsprechend der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers soll in dieser Arbeit die Auswahl der Strategie erfolgen. Insgesamt wird dabei die Supply Chain unter Einbeziehung aller Akteure betrachtet und für diese eine ganzheitliche Lösung identifiziert.

Um diese Ziele zu erreichen, sind verschiedene Planungsaufgaben zu durchlaufen. So muss zunächst die grundlegende Postponement Art identifiziert werden, indem eine der oben definierten Strategien selektiert wird. Darüber hinaus ist der Grad der

entsprechenden Strategie festzulegen. Dieser spezifiziert in welcher Form die jeweilige Strategie angewendet wird. Dies umfasst beim Form Postponement die Festlegung, welche Produktionsaktivitäten wie weit in Richtung der Kunden verschoben werden sollen. Entsprechend definiert der Grad beim Logistics Postponement welche Logistikaktivitäten verzögert werden sollen. Ein weiterer Freiheitsgrad und damit eine weitere Planungsaufgabe liegt in einer möglichen Resequenzierung von Produktionsaktivitäten, um den Produktdifferenzierungspunkt möglichst lange hinauszuzögern (Feitzinger und Lee, 1997). So ist zu prüfen, ob eine Änderung der Reihenfolge von Produktionsaktivitäten Auswirkungen auf die Ziele hat. Eine solche Resequenzierung kann bspw. dann sinnvoll sein, wenn dadurch ein Produkt möglichst lange in einem generischen Zustand belassen werden kann, sodass es erst später individualisiert wird.

Um diese Strategien hinsichtlich ihrer Vorteilhaftigkeit zu evaluieren, ist eine Betrachtung der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsplanung notwendig. Im Rahmen der Beschaffung müssen Bedarfsmengen von Rohmaterialien geplant werden. Weiterhin müssen Produktionsmengen und Lagermengen bestimmt werden sowie ein Distributionsproblem gelöst werden, indem identifiziert wird, auf welchem Transportweg die Produkte in welchen Mengen zum Kunden transportiert werden.

Das Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten führt dazu, dass innerhalb der Supply Chain verschiedene Kosten verursacht werden (Tompkins und Harmelink, 2004, S. 65). Die Gesamtkosten setzen sich dabei aus Produktions-, Lager- und Transportkosten zusammen. Grundsätzlich lassen sich die Produktionskosten in fixe und variable Kosten aufteilen. Diese unterscheiden sich je Produktionsstandort. Fixkosten (wie Anschaffungskosten von Maschinen und Personalkosten) fallen für das Bereitstellen von Produktionsaktivitäten in den jeweiligen Standorten an. Darüber hinaus fallen variable Produktionskosten in Abhängigkeit der produzierten Menge an. Dazu zählen beispielsweise Kosten für Hilfsmaterialien und Energiekosten. Jede Produktionsaktivität kann dabei individuell fixe sowie variable Kosten verursachen, wobei sich die Kosten im Planungszeitverlauf ändern können. Schließlich müssen Produkte über eine Distributionsstruktur zum Kunden transportiert werden. Durch das Etablieren und Betreiben dieser Strukturen entstehen Kosten. Diese können entweder durch Lageraktivitäten oder durch Transportaktivitäten verursacht werden. Fixe Kosten entstehen für das Etablieren von Lager- und Transportaktivitäten. Variable Kosten fallen für das Lagern bzw. das Transportieren von Produkten an. Gelagerte Produkte verursachen dabei in Abhängigkeit der Lagerdauer variable Kosten. Da Produkte in Abhängigkeit des Fertigstellungsgrades Lagerkapazitäten beanspruchen, fallen variable Lagerkosten in Abhängigkeit zum Fertigstellungsgrad der Produkte an. Weiterhin verursacht der Transport von Produkten je nach Distanz und Dauer variable Transportkosten. Wie bei den Lagerkosten fallen auch die Transportkosten

in Abhängigkeit des Fertigstellungsgrads der Produkte an. Durch den Verkauf von Produktvarianten werden in Abhängigkeit des Planungszeitverlaufs Erlöse generiert. Verkaufspreise können sich je Produktvariante unterscheiden und dabei im Planungszeitverlauf variieren. Je nach vorliegender Marktsituation können die Verkaufspreise Unsicherheiten unterliegen. Wird die Nachfrage nicht befriedigt treten Fehlmengen auf, welche mit Strafkosten sanktioniert werden, um einen möglichen Verlust von Marktanteilen zu vermeiden.

In Abhängigkeit der gewählten Strategie können die einzelnen Kostenarten teilweise im Zielkonflikt zueinander stehen und die Ziele der Maximierung des EBIT sowie der Minimierung der Risiken unterschiedlich stark beeinflussen. So kann eine Strategieänderung beispielsweise einerseits zu niedrigeren Transportkosten führen, andererseits die Produktionskosten jedoch erhöhen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine ganzheitliche Betrachtung der Supply Chain. Dies bedeutet, dass eine globale Planungslösung für alle Supply Chain Akteure identifiziert werden soll und impliziert, dass eine Kostenreduzierung bei einem Akteur in einen Kostenanstieg bei einem anderen Akteur führen kann. Das daraus resultierende Verteilungsproblem ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2.5 Zusammenfassung und Ableitung von Anforderungen

In diesem Kapitel wurde das integrierte Planungsproblem der Gestaltung eines Produktportfolios sowie der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie beschrieben. Ziel ist es, aus Sicht der betrachteten Supply Chain den Gewinn vor Steuern (EBIT) über den gesamten Planungszeitraum unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers zu maximieren. Dabei sollen zunächst im Rahmen der Gestaltung des Produktportfolios die auf dem Markt angebotenen Produktvarianten mit ihren entsprechenden Produktcharakteristiken und deren Ausprägungen identifiziert werden. Simultan dazu soll die Gestaltung der Supply Chain-Strategie erfolgen, indem aus verschiedenen Arten von Postponement, eine optimale Strategie ermittelt wird. Dazu ist zunächst auf Angebotsseite die Ermittlung der Marktdurchdringung für das definierte Produktportfolio notwendig. Anschließend erfolgt eine Kostenbetrachtung, in der die Kosten für Produktions- und Logistikaktivitäten einfließen.

Insgesamt ist ein Instrumentarium für die integrierte Planung des Produktportfolios und der Supply Chain-Strategie zu entwickeln, welches dabei dem Entscheidungsträger im Sinne einer Entscheidungsunterstützung dient. In diesem Instrumentarium sollen die Wechselwirkungen zwischen der Produktportfolioplanung und Gestaltung der Supply Chain-Strategie abgebildet werden, sodass die **Dynamik der Marktnachfrage** im Planungsprozess berücksichtigt werden kann. Weiterhin soll das Instrumentarium **domänenunabhängig** sein, damit es in verschiedenen An-

wendungsfällen eingesetzt werden kann. Die Gestaltung des Produktportfolios soll dabei folgende Aspekte einschließen:

- **Relevante Marktteilnehmer:** Die auf einem Markt agierenden Marktteilnehmer sollen mit ihren jeweiligen Zielen und Strategien berücksichtigt werden. Dazu zählen die Akteure (Anbieter), Kundensegmente (Nachfrager) sowie die Umfeldsituation.
- **Wettbewerb und Kooperationen:** Konkurrierende und komplementäre Produkte und Dienstleistungen inklusive deren Erlösmodelle (d.h. Marktmodelle) sollen berücksichtigt werden.
- **Unsichere Einflussfaktoren:** Aufgrund des innovativen Charakters der Produkte, erfolgt die Planung über einen langfristigen Planungszeitraum. Zum Zeitpunkt der Planung unterliegen Einflussfaktoren bezüglich des angebotenen Produktportfolios, des komplementären und konkurrierenden Angebots sowie der Kundeneigenschaften und Präferenzen Unsicherheiten, die es zu berücksichtigen gilt.

Weiterhin soll für die Supply Chain eine detaillierte Kostenbetrachtung erfolgen, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie zu ermitteln. Dabei gilt es folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- **Supply Chain:** Betrachtungsgegenstand ist ein gesamtes Wertschöpfungsnetzwerk inklusive der durchzuführenden Produktions- und Logistikaktivitäten, welches die dadurch verursachten variablen und fixen Kosten in die Betrachtung einschließt.
- **Postponement-Strategien:** Verschiedene Arten von Postponement-Strategien sollen hinsichtlich deren Vorteilhaftigkeit überprüft werden. Dabei gilt es den Grad von Postponement zu betrachten und sowohl geographisches als auch zeitliches Verschieben von Produktions- und Logistikaktivitäten zu berücksichtigen. Weiterhin soll ein Resequenzieren von diesen Aktivitäten möglich sein.
- **Unsichere Einflussfaktoren:** Die Evaluierung der Strategien über einen langfristigen Planungszeitraum und der innovative Charakter der Produkte erfordern die Betrachtung von unsicheren Einflussfaktoren, wie Nachfrageschwankungen.
- **Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers:** Postponement dient als Strategie zur Risikoreduzierung bei Unsicherheiten. Daher sollen Postponement-Strategien in Abhängigkeit der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers identifiziert werden.

3 Zugrundeliegende Modelle und Lösungsverfahren

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Grundlagen der Optimierung und Simulation gegeben. Zunächst werden dazu in Abschnitt 3.1 relevante Arten von mathematischen Optimierungsmodellen sowie deren Lösungsverfahren vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.2 eine Beschreibung der Grundlagen von Simulationstechniken.

3.1 Ausgewählte Modelle und Lösungsverfahren der mathematischen Optimierung

In zahlreichen Domänen werden heute zur Lösung von praxisrelevanten Fragestellungen mathematische Optimierungsmodelle erfolgreich eingesetzt (Suhl und Mellouli, 2013, S. 20 ff.). In Abhängigkeit der zugrundeliegenden Problemstellung eignen sich dabei unterschiedliche Arten von Optimierungsmodellen, die wiederum mit entsprechenden Lösungsverfahren gelöst werden können. Die für diese Arbeit relevanten Arten von Optimierungsmodellen und Lösungsverfahren werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.1.1 Mathematische Optimierungsmodelle

Zunächst lässt sich ein allgemeines mathematisches Optimierungsmodell in Standardform wie folgt formulieren (vgl. bspw. (Suhl und Mellouli, 2013, S. 31 ff.) und (Chvátal, 1983, S. 5 ff.)):

$$z = \min : \sum_{j=1}^n c_j x_j \tag{3.1}$$

$$s.t. : \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \tag{3.2}$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \tag{3.3}$$

Hierbei wird die lineare Zielfunktion (3.1) unter Berücksichtigung von $m + n$ linearen Gleichungen oder Ungleichungen, den sogenannten Restriktionen (siehe (3.2) und (3.3)), minimiert. Innerhalb der Zielfunktion repräsentieren x_1, \dots, x_n die Entscheidungsvariablen und c_1, \dots, c_n deren Koeffizienten. Die ersten m Restriktionen (3.2)

stellen lineare Gleichungen und Ungleichungen dar, wobei die linke Seite eine Linearkombination der Entscheidungsvariablen ($a_{ij}x_j$) und die rechte Seite eine reelle Konstante (b_i) abbilden. Die folgenden n Restriktionen stellen die Nichtnegativität der Entscheidungsvariablen sicher. Ziel ist es, eine Belegung der Entscheidungsvariablen zu finden, welche den Zielfunktionswert z minimiert.

Diese Standardform eines Optimierungsmodells kann in eine kompakte Formulierung überführt werden, anhand dessen im Folgenden die Arten der linearen Optimierungsmodelle vorgestellt werden.

Ein lineares Optimierungsmodell (engl. linear program (LP)) ist dabei wie folgt definiert (3.4):

$$(LP) \quad z = \min \{c^T x : Ax \leq b, x \in \mathbb{R}^+\} \quad (3.4)$$

Hierbei ist x ein $n \times 1$ -Vektor der Entscheidungsvariablen, A eine $m \times n$ -Matrix der Koeffizienten, c^T ein transponierter ($n \times 1$)-Spaltenvektor und b ein Spaltenvektor von reellen Zahlen der Form ($m \times 1$). LPs kennzeichnen sich dadurch, dass Werte der Entscheidungsvariablen aus der Menge der reellen positiven Zahlen stammen.

In praktischen Problemstellungen ist es häufig notwendig Ganzzahligkeit bei den Entscheidungsvariablen vorauszusetzen (beispielsweise um Fixkosten zu modellieren). Lineare ganzzahlige Optimierungsmodelle (engl. integer program (IP)) enthalten ausschließlich ganzzahlige Entscheidungsvariablen. Ein solches Modell kann wie folgt formuliert werden:

$$(IP) \quad z = \min \{c^T y : Ay \leq b, y \in \mathbb{Z}^+\} \quad (3.5)$$

Dabei stellt y einen $n \times 1$ -Vektor der ganzzahligen Entscheidungsvariablen dar. Alle weiteren Eigenschaften eines LPs bleiben bestehen.

Werden sowohl kontinuierliche als auch ganzzahlige Entscheidungsvariablen innerhalb eines Optimierungsmodells betrachtet, so ist dieses als lineares gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell (engl. mixed integer program (MIP)) definiert:

$$(MIP) \quad z = \min \{c^T x + hy : Ax + Gy \leq b, x \in \mathbb{R}^+, y \in \mathbb{Z}^+\} \quad (3.6)$$

In einigen Domänen können zum Zeitpunkt der Planung Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Ausprägungen von Parametern vorliegen. So können beispielsweise Nachfragedaten in Abhängigkeit der zukünftigen Entwicklung der Märkte variieren. Ein Ignorieren dieser Unsicherheiten kann zu ineffizienten oder im schlimmsten Fall sogar zu unzulässigen Lösungen führen (Ruszczyński und Shapiro, 2003). Die stochastische Optimierung bietet dabei die Möglichkeit diese Unsicherheiten mit in den Entscheidungsprozess einzubeziehen, um robuste Lösungen zu identifizieren und ist

im Bereich des Operations Research eine weitverbreitete Methode (vgl. (Wallace und Ziemba, 2005)). In stochastischen Optimierungsmodellen werden unsichere Parameter durch eine Zufallsgröße repräsentiert. Eine konkrete Ausprägung eines solchen unsicheren Parameters bildet dann ein Szenario. Für eine detaillierte Einführung in die stochastische Optimierung sei an dieser Stelle auf Birge und Louveaux (2011) verwiesen.

Zweistufig stochastische Optimierungsmodelle mit Kompensation gehen auf Dantzig (1955) zurück und unterteilen die Entscheidungsvariablen in zwei Klassen. Sogenannte Stufe-1-Variablen müssen unter unvollständigen Informationen und damit unter Unsicherheit getroffen werden. Im Gegensatz dazu können Stufe-2-Variablen unter vollständigen Informationen getroffen werden und werden somit erst nach Realisieren der Unsicherheit fixiert. Ein allgemeines stochastisches Optimierungsmodell kann wie folgt formuliert werden (vgl. (Kall und Wallace, 1994, S. 21) und (Birge und Louveaux, 2011, S. 59 f.):

$$z = \text{Minimize} : c^T x + E_\xi[\min q(\omega)^T y(\omega)] \quad (3.7)$$

$$\text{s.t.} : Ax \leq b, \quad (3.8)$$

$$T(\omega)x + Wy(\omega) \leq h(\omega) \quad (3.9)$$

$$x \geq 0, y(\omega) \geq 0 \quad (3.10)$$

Die Entscheidungsvariablen der ersten Stufe werden dabei durch den $(n \times 1)$ -Vektor x repräsentiert. Daran geknüpft stellen die Vektoren c^T und b in der Form $(n \times 1)$ und $(m \times 1)$ sowie die $(m \times n)$ -Matrix A die Koeffizienten dieser Entscheidungsvariablen dar. Auf der zweiten Stufe können sich zufällige Ereignisse $\omega \in \Omega$ realisieren, die im folgenden als Szenarien bezeichnet werden. Der Vektor y repräsentiert dabei die Entscheidungsvariablen der zweiten Stufe. Die daran geknüpften Koeffizienten können von den Realisierungen der einzelnen Szenarien abhängen, sodass für $q(\omega)$, $h(\omega)$ und $T(\omega)$ in der Form $(n' \times 1)$, $(m' \times 1)$ und $(m' \times n')$ erst dann konkrete Werte vorliegen, wenn sich die Unsicherheit aufgelöst hat. $\xi := (q, h, T, W)$ fasst den Vektor der Koeffizienten für die zweite Stufe zusammen. Die Zielfunktion (3.7) enthält einen deterministischen Term $c^T x$ sowie den Erwartungswert $E_\xi[\min q(\omega)^T y(\omega)]$ über alle Szenarien $\omega \in \Omega$, welcher auch als Kompensationsfunktion bezeichnet wird.

Stochastische Optimierungsmodelle mit $x \in \mathbb{R}^+$ und $y \in \mathbb{R}^+$ werden als stochastische lineare Optimierungsmodelle (engl. stochastic linear program (SLP)) bezeichnet. Falls einige Entscheidungsvariablen ganzzahlig sind, so handelt es sich um stochastische gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle (engl. stochastic mixed integer program (SMIP)).

3.1.2 Lösungsverfahren

In Abhängigkeit der Modellart eignen sich unterschiedliche Lösungsverfahren. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

LPs können häufig für sehr große praxisnahe Probleminstanzen optimal gelöst werden. Dazu werden Simplex-Methoden oder Innere-Punkte-Verfahren verwendet (Suhl und Mellouli, 2013, S. 42 f.). Seit den 1950er Jahren wurden diese Verfahren sukzessive weiterentwickelt, sodass heute verschiedene Formen existieren, die sich je nach Problemstruktur unterschiedlich gut eignen. Erweiterungen der Simplex Methode sind die revidierte Simplex-Methode (Chvátal, 1983, S. 97 ff.), das Netzwerk-Simplex-Verfahren (Chvátal, 1983, S. 291 ff.) und das duale Simplex-Verfahren (Martin, 1999, S. 191 ff.).

Bei MIPs handelt es sich um Formulierungen, mit denen auch komplexere Sachverhalte modelliert werden können. Die damit verbundenen Probleme weisen dafür häufig einen schwierigeren kombinatorischen Charakter auf, weshalb die effizienten Lösungsverfahren für LPs nicht zur Lösung verwendet werden können. Daher werden für MIPs Methoden wie Backtrackingverfahren, Branch&Bound-Verfahren oder dynamische Programmierung eingesetzt (Suhl und Mellouli, 2013, S. 133 ff.).

Schließlich stellen die in SLPs und SMIPs betrachteten Szenarien einen weiteren Komplexitätsanstieg dar. Eine Diskretisierung der Zufallsgröße führt zu einer endlichen Menge an Szenarien, sodass schließlich ein SLP oder SMIP relativ einfach in ein sogenanntes deterministisches Äquivalent überführt werden und dementsprechend mit Verfahren für LPs oder MIPs gelöst werden kann. Da die Problemgröße durch die Betrachtung von Szenarien häufig sehr groß ist und diese Verfahren die besondere Problemstruktur (die sogenannte Blockstruktur) von stochastischen Optimierungsmodellen nicht ausnutzen, sind diese Lösungsverfahren hinsichtlich der Laufzeit jedoch eher ineffizient (Birge und Louveaux, 2011, S. 181 ff.). Basierend auf der Dantzig-Wolfe Dekomposition (Dantzig und Wolfe, 1960) und der Benders Dekomposition (Benders, 1962) kann die Blockstruktur von stochastischen Optimierungsmodellen ausgenutzt werden, um die Probleme mit der sogenannten L-Shaped-Methode effizienter zu lösen (Birge und Louveaux, 2011, S. 181 ff.). Die Methode wendet dabei ein Dekompositionsverfahren an, sodass eine Approximation der Kompensationsfunktion des Modells gelöst wird.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Methoden garantieren Heuristiken und Metaheuristiken keine optimalen Lösungen, sondern zielen darauf ab in effizienterer Laufzeit gute Lösungen zu finden. Im Allgemeinen kann dabei keine Abschätzung über die gefundene Lösungsqualität getätigt werden (Suhl und Mellouli, 2013, S. 13). Zu den Metaheuristiken zählen beispielsweise Simulated-Annealing und die Variable-Neighborhood-Search, welche im Folgenden kurz erläutert werden. Simulated-Annealing ist eine Metaheuristik, die zur lokalen Suche in diskreten und

teilweise auch kontinuierlichen Optimierungsproblemen eingesetzt wird (Nikolaev und Jacobson, 2010, S. 1). Die Idee basiert darauf, in Anlehnung an einen Abkühlungsprozess bei hohen Temperaturen auch schlechtere Lösungen zu akzeptieren, um so eine hinreichende Diversifikation sicherzustellen. Mit Erreichen von niedrigeren Temperaturen sinkt die Wahrscheinlichkeit eine schlechtere Lösung zu übernehmen, sodass in der Phase der Intensivierung die gefundene Lösung iterativ verbessert wird. Eine weitere Metaheuristik stellt die Variable Neighborhood Search (VNS) dar. Grundidee ist dabei die systematische Änderung von Nachbarschaften, um zunächst mit Hilfe einer lokalen Suche ein lokales Optimum zu finden und anschließend in Kombination mit einer Diversifikations-Phase eine möglichst gute globale Lösung zu finden (Hansen et al., 2010, S. 62 f.). In der Literatur existieren verschiedene Arten der VNS. Dazu zählen die Variable Neighborhood Descent, die Reduced Variable Neighborhood Search (RVNS), welche sich besonders für große Probleminstanzen eignet sowie die Basic-Variable-Neighborhood-Search, welche deterministische und stochastische Änderungen der Nachbarschaften erlaubt.

Neben diesen Metaheuristiken existieren in der Literatur weitere Approximationsverfahren zur Lösung von stochastischen Optimierungsproblemen. Dazu zählt die sogenannte Sample Average Approximation (SAA) (Birge und Louveaux, 2011, S. 389 ff.). Dieses Verfahren löst das stochastische Problem iterativ jeweils für eine Teilmenge an Szenarien. Dazu kann entweder das deterministische Äquivalent oder die L-Shaped Methode verwendet werden. Das Verfahren lässt sich zusammenfassend in Anlehnung an Linderoth et al. (2006) wie folgt beschreiben. Zunächst wird auf Basis des originalen Problems eine Teilmenge an Szenarien zufällig ausgewählt. Anschließend wird dieses Teilproblem optimal gelöst und der Zielfunktionswert z sowie die Belegung der Entscheidungsvariablen der ersten Stufe gespeichert. Mit diesen fixierten Entscheidungsvariablen wird dann mehrfach ein Problem mit einer größeren Menge an Szenarien gelöst und so der Zielfunktionswert z' generiert. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Schließlich werden auf Basis von z und z' die Konfidenzintervalle für die obere und untere Schranke der Lösung berechnet.

3.2 Ausgewählte Simulationstechniken

Simulation definiert sich als die „Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633, 2013). Simulationsmodelle werden für sehr komplexe Systeme und Sachverhalte erstellt, bei denen Ursache-Wirkungs-Beziehungen nicht durch analytische Modelle beschrieben werden können (Scholl, 2001, S. 17) und stattdessen numerisch evaluiert werden müssen (Law, 2014,

S. 1). Daher werden Simulationsmodelle in der Regel nicht als Entscheidungsunterstützungsmodelle aufgefasst, sondern werden vielmehr als Modell gesehen, um Auswirkungen von Handlungsalternativen simulativ zu analysieren (Scholl, 2001, S. 18). Law (2014, S. 5 f.) klassifiziert Simulationsmodelle dabei anhand von drei Dimensionen. Diese Dimensionen umfassen die Betrachtung des Zeitverlaufs (statische vs. dynamische), die Modellierung der Eingangsdaten und Prozesse (deterministische vs. stochastische) und die Art der Zustandsübergänge (kontinuierliche vs. diskrete).

Diskrete ereignisorientierte Simulationen (engl. discrete event simulation) werden eingesetzt, um die Zustandsentwicklung eines Systems im Zeitverlauf zu simulieren. Änderungen an den Zustandsvariablen treten dabei an definierten diskreten Zeitpunkten auf und werden durch Ereignisse aufgerufen (Law, 2014, S. 6 f.). Die Hauptkomponenten sowie deren organisatorischer Aufbau einer diskreten ereignisorientierten Simulation lassen sich nach (Law, 2014, S. 9-11) wie folgt beschreiben: Ein Systemzustand wird durch eine Liste von Zustandsvariablen zu einem bestimmten Zeitpunkt repräsentiert. Eine Liste von Ereignissen enthält die auszuführenden Ereignisse, wobei sich diese in ihrem Typ unterscheiden können. Weiterhin gibt es eine Initialisierungsroutine zur Initialisierung der Simulation, eine Ereignisroutine zum Ausführen von Ereignissen und damit zum Verändern des Systemzustandes und eine Zeitroutine zum Einplanen des nächsten Ereignisses sowie zum Aktualisieren der Systemzeit.

Die diskrete ereignisorientierte Simulation stößt bei der Modellierung von hierarchisch angeordneten Bestandteilen oder Subsystemen jedoch an ihre Grenzen (Raffel, 2005, S. 14). Daher hat sich die agentenbasierte Simulation etabliert. Diese stellt einen agentenbasierten Modellierungsansatz dar, bei dem ein System als eine Menge von autonomen Entitäten (Agenten) mit eigenen Entscheidungsmöglichkeiten modelliert wird (Bonabeau, 2002). Dabei interagieren die Agenten miteinander und können den Umweltzustand verändern. So können zum einen heterogenes Verhalten abgebildet und zum anderen Interdependenzen zwischen verschiedenen Akteuren berücksichtigt werden. Ziel ist es, auf mikroskopischer Ebene dynamische Abhängigkeiten zu erklären (Bonabeau, 2002). Der Ansatz kann dabei als Verfeinerung der diskreten ereignisorientierten Simulation aufgefasst werden (vgl. (Raffel, 2005)) und wird in vielen Domänen wie der Simulation von Verkehrsflüssen, Märkten, Organisationen und der Diffusion von Innovationen eingesetzt (Bonabeau, 2002).

4 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird überprüft, inwiefern die Anforderungen der Problemstellung aus Kapitel 2 bisher von der Literatur abgedeckt werden. Dazu erfolgt in Abschnitt 4.1 eine Analyse des aktuellen Stands der Forschung bezüglich integrierter Ansätze zur Planung eines Produktportfolios und zur Gestaltung einer Supply Chain-Strategie. Aus dieser Literaturrecherche wird deutlich, dass die bestehenden Arbeiten dieses Forschungsfelds die Anforderungen der Problemstellung nicht vollständig erfüllen (bspw. hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten). Daher erfolgt im Anschluss eine separate Analyse der beiden Teilprobleme. So werden Planungsansätze zur Gestaltung eines Produktportfolios betrachtet, wobei Prognoseverfahren zur Ermittlung der Marktdurchdringung für Produktvarianten analysiert werden, da die zukünftige Nachfrage die relevante Zielgröße dieser Planungsebene ist (siehe Abschnitt 4.2). Anschließend werden in Abschnitt 4.3 Planungsansätze zur Identifizierung von effizienten Supply Chain-Strategien untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Postponement-Strategien, da sich diese in der theoretischen Literatur besonders bei der Einführung von innovativen Produkten mit unsicherer Nachfrage als besonders geeignet herausgestellt haben (vgl. Abschnitt 2.4.3). Abschließend erfolgt die Ableitung der Forschungslücke in Abschnitt 4.4 sowie die Formulierung der Ziele dieser Arbeit in Abschnitt 4.5.

4.1 Integrierte Planungsansätze zur Gestaltung eines Produktportfolios und einer Supply Chain

Bereits Fisher (1997) hebt hervor, dass eine Supply Chain-Strategie in Einklang mit den angebotenen Produkten und deren Eigenschaften gewählt werden sollte. Dadurch lasse sich ein Einsparungspotential bei den Kosten erzielen und biete so die Chance langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben. Auch Krishnan und Ulrich (2001) stellen die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen den Ebenen der Portfolioplanung, des Produktdesigns und des Operations Managements dar.

In der Literatur wird das Problem der integrierten Planung von Produktvarianten und der Supply Chain einerseits im Bereich des Produktdesigns und andererseits im Bereich der Gestaltung von Produktfamilien¹² betrachtet. Häufig wird dabei inner-

¹²Werden Produktvarianten auf Basis einer Plattform konfiguriert und weisen die einzelnen Produktvarianten ähnliche Eigenschaften auf, so werden diese auch als Produktfamilie bezeichnet (Jiao et al., 2007).

halb der Problemstellung darauf abgezielt, auf Basis einer Produktplattform unterschiedliche Produktvarianten durch das Hinzufügen von kundenindividuellen Komponenten bzw. Modulen zu konfigurieren sowie simultan dazu Fragestellungen zur Gestaltung einer Supply Chain zu beantworten. Insgesamt existieren in der Literatur konzeptionelle Ansätze, Ansätze aus der Spieltheorie sowie mathematische Optimierungsmodelle. Im Folgenden wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in diesem Bereich gegeben.

Im Bereich der konzeptionellen Ansätze präsentiert Fixson (2005) ein theoretisches mehrdimensionales Framework zur Planung einer Produktarchitektur. Dabei wird der Zusammenhang von Entscheidungen des Produktdesigns, Prozessentscheidungen sowie Entscheidungen zur Gestaltung einer Supply Chain betrachtet. Salvador et al. (2004) führen eine qualitative Analyse durch, in welcher Auswirkungen des Individualitätsgrads von Produkten auf die Effizienz eines Produktions- und Distributionsnetzwerks mit Mass-Customizing Strategien behandelt werden. Zur Evaluation werden empirischen Analysen anhand von Fallstudien aus den Bereichen Telekommunikation, Mobilität und Elektronik durchgeführt. Mansoornejad et al. (2010) stellen ein hierarchisches Verfahren zur integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain vor. Dazu wird auf eine Sammlung von Methoden, wie Marktanalysen und technisch-wirtschaftliche Analysen, zurückgegriffen. So werden im Rahmen der Gestaltung des Produktportfolios zunächst die zu produzierenden Produkte und die dazu notwendigen Prozesse ausgewählt. Anschließend werden die einzelnen Produktlinien konfiguriert, wobei insbesondere die Flexibilität innerhalb der Herstellung Berücksichtigung findet. Im letzten Schritt erfolgt die strategische Netzwerkplanung für die gesamte Supply Chain. Ergebnis ist ein mehrkriterielles Framework zur Entscheidungsunterstützung, mit dem die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Supply Chain untersucht werden kann. Jiao et al. (2007) liefern ein Entscheidungs-Framework für die ganzheitliche Betrachtung des Produktfamiliendesigns und schließen dabei Aspekte der Angebotsseite sowie die Prozesssicht einer Supply Chain mit in den Entscheidungsprozess ein.

Weiterhin existieren Ansätze aus der Spieltheorie. Dabei werden oftmals sogenannte Stackelbergmodelle¹³ zur Lösung des Problems eingesetzt. Huang et al. (2007) verwenden einen dreistufigen dynamischen Spieltheorie-Ansatz zur Konfiguration von Produktplattformprodukten und einer Supply Chain. Die Produktvarianten sind dabei bereits fixiert, sodass im Rahmen der Produktgestaltung ausschließlich über die verwendeten Module entschieden wird. In einem dreistufigen Entscheidungsprozess wird zunächst die Produktplattform konfiguriert sowie Auswahlentscheidungen be-

¹³In einem Stackelbergmodell werden Entscheidungen hierarchisch zwischen einem Stackelbergführer (engl. leader) und einem Stackelbergfolger (engl. follower) getroffen (siehe bspw. (von Stackelberg, 1952)).

züglich Lieferanten getroffen. Anschließend werden Lieferantenentscheidungen über Bestellstrategien und Rabattstrukturen und im letzten Schritt Entscheidungen über Bestellungen von Herstellern getroffen. Yu und Huang (2010) wählen einen dualen Nash-Game-Ansatz und fokussieren sich stärker auf die Wertschöpfungsstufen in Richtung der Kunden. So wird die Interaktion zwischen Herstellern und verschiedenen Händlern betrachtet, um Marketingstrategien, Produktvarianten und Lagerhaltungsstrategien zu optimieren. Insgesamt kann der Ansatz dazu verwendet werden, um ein effizientes Produktportfolio zu identifizieren. Weiterhin formulieren Yang et al. (2015) ein Stackelbergmodell, welches sich durch einen hierarchischen Optimierungsmechanismus zur Koordination der Entscheidungen für die Gestaltung einer Produktfamilie und einer Supply Chain auszeichnet. Entscheidungen werden dabei jedoch von den beiden Planungsebenen jeweils eigennützig getroffen. So sind Produktfamilienentscheidungen als Leader formuliert, während Entscheidungen zur Gestaltung der Supply Chain als Follower modelliert sind. Im Rahmen der Gestaltung der Supply Chain kann daher lediglich auf die vorgelagerten Entscheidungen reagiert werden. Bei der Gestaltung der Produktfamilie findet eine Auswahl und Konfiguration von Produktvarianten statt und die Gestaltung der Supply Chain umfasst die Auswahl von Produktions- und Distributionsstandorten sowie die Auswahl von Zulieferern. Dabei werden auch Produktionsmengen und Lieferzeiten bestimmt.

Insgesamt treffen die Ansätze der Spieltheorie die Annahme einer bereits statisch vorgegeben Nachfrage je Produktvariante und berücksichtigen keine Unsicherheiten. Weiterhin zielen die Arbeiten auf die Identifizierung eines Nash-Gleichgewichts ab, sodass es sich für keinen Akteur lohnt, einseitig von den getroffenen Entscheidungen abzuweichen. Sofern es möglich ist Entscheidungen für alle beteiligten Akteure zu treffen, bieten ganzheitliche Ansätze (im Gegensatz zu Ansätzen der Spieltheorie) die Chance, das Gesamtoptimum zu identifizieren.

Neben den Ansätzen der Spieltheorie existieren in der Literatur mathematische Optimierungsmodelle zur Entscheidungsunterstützung. Dazu zählen zunächst Ansätze der integrierten Gestaltung von Produktfamilien und Supply Chains, welche wie die Ansätze der Spieltheorie eine statisch und deterministisch gegebene Nachfrage je Produktvariante unterstellen. So präsentieren Huang et al. (2005) einen integrierten Planungsansatz, um Produktplattform-, Produktions- sowie Beschaffungsentscheidungen simultan zu betrachten. Ziel ist es, die Gesamtkosten der Supply Chain, bestehend aus Lager-, Produktions- und Beschaffungskosten, zu minimieren. Dabei wird eine generische Stückliste (engl. generic bill of materials) verwendet, um in einem nichtlinearen MIP die Produktvarianten und deren Eigenschaften abzubilden. Darüber hinaus liefern Zhang et al. (2008) ein MIP inklusive enumerativen Lösungsverfahren zur integrierten Gestaltung von Produktvarianten und der Supply Chain. Die Supply Chain umfasst dabei einen Hersteller und mehrere potentielle Lieferanten.

Insgesamt liegt dabei innerhalb der Supply Chain der Fokus auf der Beschaffungsseite. So ist es das Ziel, einerseits kostenminimale Pläne hinsichtlich der zu entwickelnden und zu produzierenden Produktvarianten inklusive der verwendeten Module zu identifizieren und andererseits Auswahlentscheidungen bezüglich der Lieferanten sowie Entscheidungen über die Anlieferfrequenzen zu treffen. Dabei besteht die Möglichkeit einige Module durch andere zu substituieren. Auf Basis des relativ simplen Lösungsverfahrens schlagen Zhang et al. (2008) die Entwicklung eines heuristischen Verfahrens als zukünftigen Forschungsbedarf vor. Diesen Forschungsbedarf greifen Kumar und Chatterjee (2013) auf und entwickeln ein heuristisches Lösungsverfahren für ein MIP zur Identifizierung von profitablen Produktvarianten und der Auswahl von Lieferanten. Ein MIP zur ganzheitlichen Planung einer Produktarchitektur und zum Supply Chain Design formulieren Fujita et al. (2013). Auf der Angebotsseite werden Entscheidung über die in den Produktvarianten verbauten Module getroffen. Auf der Prozessseite gilt es Produktionsstandorte zu selektieren sowie Produktions- und Transportmengen zu bestimmen.

Insgesamt betrachten die genannten Optimierungsmodelle viele relevante Aspekte bei der Planung des integrierten Planungsproblems. Die Dynamik der Marktnachfrage wird in diesen Modellen jedoch nicht berücksichtigt. Stattdessen wird die Annahme einer statischen Nachfrage getroffen.

Im Gegensatz zu diesen Ansätzen betrachten Luo et al. (2011) und Cao et al. (2012) das Kundenverhalten bzw. den Kundenentscheidungsprozess als endogene Modellgröße und verwenden jeweils ein nichtlineares MIP zur Gestaltung und Auswahl von Produktvarianten sowie zur Auswahl von Lieferanten. Luo et al. (2011) betrachten dabei die Entscheidungen, wie viele und welche Produktvarianten zu welchem Preis angeboten werden, welche Module innerhalb der Produktvarianten dabei verbaut werden und welche Lieferanten welche Module anliefern. Ziel ist es, die Produktvarianten derart zu gestalten, dass der Umsatz maximiert wird und gleichzeitig die Kosten für die Produktion und Beschaffung minimiert werden. Ein genetischer Algorithmus wird zur effizienten Lösung des Modells vorgeschlagen. Cao et al. (2012) erweitern diesen Ansatz, indem der Kundenauswahlprozess durch ein Multinomial-Logit Modell ersetzt wird. Auch Deng et al. (2014) betrachten Kunden sowie deren Präferenzen, um eine Auswahlentscheidung hinsichtlich der Produktvarianten einer Produktlinie zu treffen und gleichzeitig eine Lieferantenauswahl zu tätigen. Deng et al. (2014) verfolgen einen mehrkriteriellen Optimierungsansatz (d.h. Maximierung des Profits, Maximierung der Performance und der Qualität der Produkte sowie Minimierung der Kosten). Auf der Kostenseite wird allerdings nur die Fragestellung hinsichtlich der Lieferantenauswahl betrachtet.

Diese Arbeiten bilden die Wechselwirkungen zwischen den beiden Planungsebenen in einem Modell ganzheitlich ab. Festzuhalten ist jedoch, dass innerhalb der Supply

Chain nur die Lieferantenauswahl berücksichtigt wird. So werden bspw. Transporte, Lagerhaltung und folglich verschiedene Supply Chain-Strategien nicht berücksichtigt. Weiterhin werden in diesen Arbeiten keine Unsicherheiten betrachtet und damit keine robusten Lösungen identifiziert. Außerdem sind die verwendeten Consumer-Choice Modelle nur bedingt geeignet, um komplexe Interdependenzen auf der Marktnachfrageseite zu modellieren (siehe Abschnitt 4.2).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in der Literatur einige integrierte Planungsansätze zur Auswahl von effizienten Produktvarianten und deren Eigenschaften sowie der Gestaltung der Supply Chain existieren. Während Ansätze der Spieltheorie darauf abzielen Lösungen zu identifizieren, die für alle Akteure in einem Gleichgewicht resultieren, zielen mathematische Optimierungsmodelle auf die Identifizierung eines globalen Optimums ab und sind daher bei ganzheitlicher Betrachtung der Supply Chain vorzuziehen. Im Bereich der Optimierungsmodelle nehmen die meisten Arbeiten eine deterministisch gegebene Nachfrage für die einzelnen Produktvarianten an, welches insbesondere aufgrund der Dynamik der Marktnachfrage eine wesentliche Einschränkung darstellt. Während die Arbeiten mit bereits definierter Marktnachfrage, neben den Entscheidungen über das Produktangebot auch häufig die relevanten Aspekte einer Supply Chain (d.h. die Beschaffung, Produktion und Distribution) berücksichtigen, fokussieren Ansätze mit dynamischer Marktnachfrage bisher lediglich auf die Beschaffung (siehe bspw. Cao et al. (2012)).

Weiterhin betrachten die untersuchten Modelle weder bei der Gestaltung von Produktvarianten noch bei der Konfiguration der Supply Chain unsichere Einflussgrößen. Aufgrund des langfristigen Planungshorizontes bestehen Unsicherheiten aber sowohl bei der Gestaltung eines Produktportfolios (siehe Abschnitt 2.3.3) als auch bei der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie (siehe Abschnitt 2.4.2).

4.2 Ansätze zur Prognose der Marktdurchdringung eines Produktportfolios

Im vorangegangenen Abschnitt wurde herausgestellt, dass bisher nur wenige Arbeiten die Dynamik der Marktnachfrage innerhalb eines integrierten Planungsproblems betrachten. Diese Ansätze berücksichtigen dabei nicht alle Anforderungen der Problemstellung dieser Arbeit (bspw. Betrachtung von Unsicherheiten), weshalb im Folgenden Ansätze zur Planung des Produktportfolios untersucht werden. Da die Gestaltung eines Produktportfolios wesentlich von den Bedarfsanforderungen der Kunden und der Marktsituation abhängt (Meffert et al., 2015, S. 365 f.), ist die Bestimmung der Marktdurchdringung eine wesentliche Zielgröße, um die Güte eines Produktportfolios zu bestimmen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die prognostizierte Nachfrage je Produktvariante das Umsatzpotential vorgibt und damit eine notwendige Bedin-

gung für die wirtschaftliche Tragfähigkeit darstellt. Daher werden im Folgenden Ansätze zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung von innovativen Produkten in Abhängigkeit der jeweiligen Umfeldsituation untersucht.

Dazu werden in der Literatur vielfältige Verfahren bzw. Modelle eingesetzt. So liefern Al-Alawi und Bradley (2013) beispielsweise einen Überblick über Marktdurchdringungsstudien in der Domäne der Elektromobilität. Im Wesentlichen werden demnach Modelle der Diffusionstheorie, Consumer-Choice Modelle sowie (agentenbasierte) Simulationsmodelle zur Ermittlung der Marktdurchdringung von innovativen Produkten eingesetzt. Diese Methoden finden sich auch in anderen Anwendungsfeldern wieder (siehe bspw. Meade und Islam (2006) und Kiesling et al. (2012)). Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Überblick dieser Verfahren gegeben und in Abhängigkeit des Betrachtungsgegenstands dieser Arbeit analysiert, welche dieser Ansätze grundsätzlich für eine Adaption auf die Problemstellung dieser Arbeit in Frage kommen. Anschließend werden die geeigneten Ansätze (d.h. Ansätze zur Marktsimulation) näher spezifiziert.

Überblick über Ansätze zur Prognose der Marktdurchdringung

Modelle der Diffusionstheorie beschreiben den Verlauf der Marktdurchdringung eines neuen Produktes im zeitlichen Verlauf. Untersuchungsgegenstand ist dabei häufig die Frage, mit welcher Diffusionsgeschwindigkeit sich eine Innovation am Markt durchsetzt. Innerhalb dieser Modelle können exogene Parameter wie die Art der Käufer (bspw. Innovatoren oder Imitatoren) berücksichtigt werden. In vielen Anwendungsgebieten werden Diffusionsmodelle aufgrund der leichten Adaptierbarkeit eingesetzt und basieren dabei auf den grundlegenden Modellen von Fourt und Woodlock (1969) sowie Bass (1969). Ein Nachteil besteht allerdings in den schwer zu beschaffenden Datenbasis, welche für die Parametrisierung der Modelle notwendig ist. So muss bspw. der Zeitpunkt des maximalen Absatzes im Voraus bekannt sein. Weiterhin liefern die Modelle keine validen Ergebnisse im Fall, dass konkurrierende Produkte existieren (Al-Alawi und Bradley, 2013). Da in dieser Arbeit neben komplementären Angeboten auch Angebote von Wettbewerbern betrachtet werden, sind Modelle der Diffusionstheorie im vorliegenden Anwendungsfall nicht geeignet.

Discrete-Choice Modelle gehen auf McFadden (1974) zurück und werden in der Literatur verwendet um individuelles sowie kollektives Entscheidungsverhalten zu modellieren. Ziel dieser Modelle ist die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, mit denen eine Alternative aus einer Menge von diskreten Alternativen gewählt wird. Um einen Kaufentscheidungsprozess abzubilden werden entweder beobachtete Daten bezüglich Kundenpräferenzen (engl. revealed preferences) oder durch Umfragen abgeleitete Präferenzen (engl. stated preferences) als Input der Modelle verwendet (Train, 2009, S. 152 ff.). Im Rahmen eines theoretischen Modells ist die Anwendung von Discrete-

Choice Modellen nur bedingt möglich, da eine Verarbeitung von großen Datenmengen (bspw. szenariospezifische Daten) kaum möglich ist. Um dieses Defizit zu lösen, werden Discrete-Choice Modelle in Simulationen integriert (siehe Train (2009) für einen Überblick).

Weiterhin können agentenbasierte Simulationen zur Prognose der zukünftigen Nachfrage je Produktvariante eingesetzt werden (Al-Alawi und Bradley, 2013). Dabei werden Akteure (Anbieter) und Kunden (Nachfrager) in einem Simulationsmodell als Agenten abgebildet und der Kaufentscheidungsprozess im Zeitverlauf simuliert. Agenten können sich dabei in ihrem Entscheidungsverhalten beeinflussen indem diese miteinander interagieren. Dazu werden für jeden Agenten dessen Eigenschaften und Verhalten definiert. Im Rahmen einer solchen agentenbasierten Simulation können nahezu beliebig komplexe Sachverhalte im Rahmen einer Marktsimulation abgebildet werden, welches gegenüber Modellen der Diffusionstheorie und theoretischen Discrete-Choice Modellen einen Vorteil darstellt. Gleichzeitig besteht jedoch auch die Gefahr, dass komplexe Modelle bei geringer Transparenz schwer zu validieren und verifizieren sind (Al-Alawi und Bradley, 2013).

Trotz dieser Herausforderungen hinsichtlich der Validierung und Verifizierung von agentenbasierten Simulationen, kann festgehalten werden, dass bei Betrachtung der Anforderungen aus Abschnitt 2.3 ein Simulationsansatz notwendig ist, um den Problemgegenstand ganzheitlich abzubilden. Besonders aufgrund der Notwendigkeit der Berücksichtigung von verschiedenen Szenarien und deren Abhängigkeit auf diverse Zielgrößen sowie aufgrund der zahlreichen Interdependenzen zwischen den kooperierenden und konkurrierenden Akteuren als auch zwischen den Kundensegmenten, können die alternativen Methoden nicht adaptiert werden. Daher wird im Folgenden der aktuelle Stand der Forschung im Bereich von (agentenbasierten) Marktsimulationen analysiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Ansätzen, die innovative Produkte betrachten und so eine rudimentäre Anforderung aus Abschnitt 2.3 erfüllen. Weiterhin wird die Transparenz und eine mögliche domänenübergreifende Anwendbarkeit untersucht, um dadurch die oben definierten Herausforderungen angemessen zu adressieren.

Ansätze zur Marktsimulation

Kiesling et al. (2012) liefern einen umfangreichen Überblick über agentenbasierte Simulationen zur Prognose der Diffusion von innovativen Produkten. Bei den identifizierten Arbeiten unterscheiden die Autoren zwischen abstrakten theoretischen Modellen und Modellen für eine domänenspezifische Anwendung. Abstrakte theoretische Modelle (siehe bspw. (Rahmandad und Sterman, 2008)) erklären die konzeptionellen Abhängigkeiten innerhalb des Entscheidungsprozesses. Sie zielen dabei jedoch nicht darauf ab, Prognosen für spezifische Anwendungsfälle zu erstellen und bieten somit

auch keine praktische Entscheidungsunterstützung an. Weiterhin heben Kiesling et al. (2012) hervor, dass sich die quantitativen Ergebnisse dieser Arbeiten ausschließlich zur qualitativen Interpretation im Hinblick auf die entwickelten konzeptionellen Modelle und Methoden eignen. Daher können diese Arbeiten nicht zur Problemlösung innerhalb dieser Arbeit verwendet werden.

Darüber hinaus existieren einige domänenspezifische Modelle, die zur Entscheidungsunterstützung und zur Evaluierung von Strategien der jeweils betrachteten Akteure eingesetzt werden. Kiesling et al. (2012) identifizieren 15 relevante Arbeiten aus verschiedenen Domänen. Die Automobilindustrie sticht dabei - mit der Fragestellung bezüglich der Diffusion von alternativen Antrieben - als meistgenutztes Anwendungsgebiet heraus. Limitationen dieser Arbeiten finden sich dabei u.a. in der Berücksichtigung des kompetitiven Umfelds, da häufig die Annahme eines exklusiven Marktpotentials getroffen wird (Kiesling et al., 2012).

Über die Arbeit von Kiesling et al. (2012) hinausgehend, existieren weitere Marktsimulationen in der Domäne der Automobilindustrie. So liefern Shafiei et al. (2013) ein konzeptionelles Framework zur Prognose der zukünftigen Diffusion von alternativen Antriebstechnologien. Dabei werden die wichtigsten Marktteilnehmer (d.h. Automobilhersteller, Energieversorger und Kunden) sowie deren Ziele in einem mathematischen Modell abgebildet. Die Akteure interagieren dabei miteinander und können sich in ihren Entscheidungen beeinflussen. Es wird ein integrierter Simulationsansatz verwendet (System Dynamics und agentenbasierte Simulation), sodass die Berechnungen im Rahmen der Simulation je nach notwendigem Detaillierungsgrad auf aggregierter oder individueller Ebene durchgeführt werden können. Auch Kieckhäfer et al. (2014) präsentieren ein hybrides Simulationsframework¹⁴ (System Dynamics und agentenbasierte Simulation), um die Wechselwirkung zwischen aggregierten Systemverhalten und individuellen Kundenentscheidungen zu analysieren. Ziel ist dabei die effiziente Gestaltung eines von einem Automobilhersteller angebotenen Produktportfolios. Das Produktportfolio umfasst die Art der angebotenen Produkte sowie deren zeitliche Markteinführung. Weiterhin werden verschiedene Umfeldszenarien (wie bspw. regulatorische Rahmenbedingungen und Energiepreise) berücksichtigt. Einen weiteren Simulationsansatz zur Ermittlung der Diffusion von alternativen Antrieben liefert Massiani (2015). Schwerpunkt ist dabei die Kosten-Nutzen-Analyse von politischen Handlungsoptionen, wie eine Kaufpreisförderung. Dazu wird ein System Dynamics Modell verwendet. Gnann et al. (2015) stellen ein Simulationsmodell zur Analyse der Diffusion von alternativen Antriebstechnologien für den deutschen Markt dar. Die Kundenentscheidungen im Rahmen des Kaufprozesses werden auf Basis der Total Cost of Ownership Kennzahl durchgeführt. Dabei werden für einen Kunden nur diejenigen Fahrzeugmodelle berücksichtigt, mit denen der Kunde sein individuelles

¹⁴Siehe auch (Kieckhäfer, 2013)

Fahrprofil zurücklegen kann. In verschiedenen Szenarien werden externe Einflussgrößen zusammengefasst und deren Auswirkungen auf die Marktanteile im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Die genannten Arbeiten berücksichtigen insgesamt viele der in Kapitel 2 definierten Anforderungen (bspw. innovative Produkte, heterogene Kundensegmente und Unsicherheiten). Dagegen findet eine Betrachtung von Dienstleistungen inklusive der Berücksichtigung von unterschiedlichen Erlösmodellen bisher nicht statt.

Über die Domäne der Automobilindustrie hinaus, werden Marktsimulationen in weiteren Anwendungsbereichen eingesetzt. So präsentieren Choi et al. (2013) einen Ansatz zur strategischen Nachfrageprognose für den Computermarkt. Dazu wird ein Logit Modell in ein Simulationsmodell integriert, mit Hilfe dessen verschiedene Szenarien analysiert werden. Ziel ist es, diejenigen Einflussfaktoren zu identifizieren, welche die größten Auswirkungen auf die Prognosen haben. Auch Kim (2014) betrachten den Computermarkt und analysieren anhand der Ergebnisse aus einer agentenbasierten Simulation die Diffusionsgeschwindigkeit der einzelnen Produkte. Produkteigenschaften stellen dabei die Freiheitsgrade innerhalb des Modells dar. Ziel ist es, diese mithilfe eines genetischen Algorithmus derart zu gestalten, dass das Risiko eines Misserfolgs einer Produktinnovation minimiert wird.

Stummer et al. (2015) liefern einen agentenbasierten Simulationsansatz für die Domäne der Biokraftstoffe und betrachten somit eine Produktart, welche wiederkehrend erworben wird. Innerhalb des Modells werden heterogene Kunden betrachtet, die über ein Netzwerk miteinander kommunizieren und sich so in ihren Kaufentscheidungen beeinflussen können. Der Kaufentscheidungsprozess ist dabei in fünf Phasen abgebildet. Im Vergleich zu anderen agentenbasierten Simulationen im Bereich der Marktdurchdringung, hebt sich dieser Ansatz durch die Repräsentation des Planungszeitverlaufs ab. So wird der Zeitpunkt eines Ereignisses (bspw. der Kauf eines Produktes) durch einen stochastischen Prozess auf einer kontinuierlichen Zeitskala ermittelt. Mithilfe des Simulationsmodells können Produkteinführungsstrategien für kompetitive Märkte für verschiedene Szenarien ermittelt werden.

Insgesamt behandeln diese Arbeiten viele relevante Aspekte zur Prognose von Marktanteilen für innovative Produkte. Dazu zählen die Berücksichtigung von Abbildung von Marktteilnehmern und ihren Interaktionen und die Berücksichtigung von Szenarien. Die Arbeiten schließen dabei jedoch keine explizite Betrachtung von Dienstleistungen sowie unterschiedlichen Erlösmodellen ein. Weiterhin beziehen sich die Arbeiten auf konkrete Anwendungsbeispiele und bieten keine generischen Strukturen, welche eine leichte Adaptierbarkeit auf anderen Domänen ermöglichen würde.

4.3 Ansätze zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt Planungsansätze zur Gestaltung des Produktportfolios betrachtet worden sind, liegt der Fokus in diesem Abschnitt auf existierenden Ansätzen zur Gestaltung von Supply Chain-Strategien. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Postponement-Strategien, da diese sich insbesondere für innovative Produkte (Yang et al., 2004) mit einem hohen Grad an Kundenindividualität und Nachfrageunsicherheiten in der theoretischen Literatur als vorteilhaft herausgestellt haben (Pagh und Cooper, 1998). Daher werden im folgenden Absatz Ansätze aus dem Bereich der Postponement-Literatur analysiert. Anschließend werden Ansätze aus dem Bereich des Supply Chain Netzwerk Designs in Abschnitt 4.3.2 hinsichtlich der Adaptierbarkeit auf die betrachtete Problemstellung überprüft, da hier ähnliche Problemaspekte betrachtet werden.

4.3.1 Ansätze aus der Postponement-Literatur

Postponement wird in zahlreichen Publikationen als Strategie zur Risikominimierung eingesetzt. Dabei kann zwischen theoretischen und empirischen Arbeiten sowie quantitativen Modellen zur Entscheidungsunterstützung differenziert werden. In diesen Arbeiten wird häufig auch die Anwendbarkeit von Konzepten des Postponements auf Fragestellungen aus der Praxis berücksichtigt (vgl. bspw. (Lee et al., 1993) und (Thonemann und Brandeau, 2000)). Im Folgenden wird der Stand der Forschung vorgestellt.

Theoretische und empirische Arbeiten

In der Literatur wird das Konzept des Postponements erstmals 1950 von Alderson (1950) auf theoretischer Ebene eingeführt. Postponement wird dabei aus Sicht des Marketing-Managements als Instrument zur Reduzierung von Kosten des Marketings unter Nachfrageschwankungen betrachtet. Eine Kostenreduktion lässt sich durch das Verzögern der Produktdifferenzierung erreichen, welche entweder im Sinne der späteren Produktspezifizierung (d.h. die spätere Festlegung der individuellen Produkteigenschaften) oder durch das Verzögern von Änderungen hinsichtlich der Lagerpositionen realisiert werden kann. Bucklin (1965) erweitert dieses Konzept auf die Distribution und betrachtet Postponement als Instrument, um Risiken eines großen Produktbestandes auf andere Akteure zu übertragen.

Ein Klassifikationsschema zur Abgrenzung von unterschiedlichen Postponement-Strategien präsentieren Zinn und Bowersox (1988). Dieses dient Entscheidungsträgern als Leitfaden zur qualitativen Ableitung, in welchen Fällen Postponement vorteilhaft ist. Pagh und Cooper (1998) erweitern diese Arbeit und stellen dabei vier wesentliche Postponement-Strategien heraus: Full Speculation, Form Postponement, Logistics

Postponement und Full Postponement (siehe Abschnitt 2.4.3). Es werden Determinanten identifiziert, die einen Einfluss auf die Wahl der Art der Postponement-Strategie haben. Dazu zählen Eigenschaften der Produkte, die Struktur der Märkte und der Nachfrage sowie Eigenschaften der Produktion und Logistik. Kim (2014) erweitern diese Arbeit, sodass ein Framework zur strategischen Entscheidungsfindung für Supply Chains entsteht.

Weiterhin werden in der Literatur mögliche Implikationen von Postponement-Strategien auf Supply Chains analysiert. So betrachten Yang und Burns (2003) die Auswirkungen von Postponement auf den Kundenentkopplungspunkt, die Art der Supply Chain Integration, die Steuerung der Supply Chain sowie die Kapazitätsplanung der Produktion. Es wird herausgestellt, dass insbesondere Unsicherheiten, wie bspw. Nachfrageunsicherheiten (Yang et al., 2004), und unvorhergesehene Ereignisse, wie bspw. Störungen bei der Beschaffung von Rohmaterialien ((Tang, 2006) und (Yang und Yang, 2010)), bei ineffizienten Strategien zu hohen Kosten führen können. Postponement wird in diesem Zusammenhang als Instrument zur Risikominimierung eingesetzt, um so im Rahmen einer agilen Supply Chain die Flexibilität und die Reaktionsbereitschaft der Supply Chain zu erhöhen (Qrunfleh und Tarafdar, 2013).

Eine Analyse des Mehrwerts einer Resequenzierung von Produktionsaktivitäten erfolgt in Venkatesh und Swaminathan (2004). Ziel ist eine möglichst späte Produktindividualisierung zu erreichen, sodass ein Produkt möglichst lange in einem generischen Zustand belassen werden kann. In diesem Zusammenhang wird Postponement auch in Abhängigkeit vom Grad der Produktmodularisierung (Ernst und Kamrad, 2000), des Grads der Standardisierung von Produkten ((Lampel und Mintzberg, 1996) und (Yang und Burns, 2003)) und der Größe der Variantenvielfalt (van Hoek, 2001) betrachtet. Aus Markt- und Kundensicht eignen sich Postponement-Strategien insbesondere bei großen Nachfrageschwankungen ((Pagh und Cooper, 1998) und (Yang et al., 2004)), negativ korrelierender Nachfrage von Produkten (Lee und Billington, 1994) und langen Lieferzeiten (Lee und Billington, 1994).

Neben diesen theoretischen und konzeptionellen Arbeiten, existieren in der Literatur zahlreiche empirische Arbeiten und Fallstudien. Ziel dieser Arbeiten ist es, die Vor- bzw. Nachteile von Postponement anhand von Einflussfaktoren darzulegen und die Praxistauglichkeit zu demonstrieren. Dadurch soll ein besseres Problemverständnis geschaffen werden (van Hoek, 1997). Fallstudien existieren dabei in verschiedenen Domänen. So werden beispielsweise die Textilindustrie ((Dapiran, 1992), (Chaudhry und Hodge, 2012)), die Elektronikindustrie ((Feitzinger und Lee, 1997), (Appelqvist und Gubi, 2005)) und die Lebensmittelindustrie ((van Hoek, 1997) und (Wong et al., 2011)) untersucht.

In diesen Studien werden unterschiedliche Techniken bzw. Methoden eingesetzt. Dazu zählen beispielsweise strukturierte Interviews, um Daten über die Anwendbarkeit

von Postponement zu sammeln (Chaudhry und Hodge, 2012). Aus derartigen Ergebnissen kann abgeleitet werden, welchen Einfluss die Produkt-, Nachfrage- und Supply Chain Struktur auf die Wahl einer effizienten Postponement-Strategie haben. Dapiran (1992) zeigen am Beispiel Benetton den Einfluss einer Resequenzierung von Produktionsprozessen auf. In einer Fallstudie wird dabei die Reihenfolge des Färb- und Nähprozesses getauscht, sodass eine spätere Produktdifferenzierung erreicht und schließlich Kosteneinsparungen sowie ein besserer Kundenservice erzielt werden. Weiterhin findet das Konzept des Postponements im Rahmen des Mass-Customizings Betrachtung. So lässt sich nach Feitzinger und Lee (1997) Mass-Customizing innerhalb einer Supply Chain dadurch effizient umsetzen, indem der Produktdifferenzierungspunkt möglichst weit in Richtung der Kunden verschoben wird. Dadurch lassen sich Auslieferungszeiten von kundenindividuellen Produkten verkürzen sowie Kosten senken. Wong et al. (2011) betrachten eine Supply Chain im Bereich der Kaffeeherstellung. Auf Basis quantitativer Daten werden eine Vielzahl von Kostentreiber diskutiert. In der Studie wird gezeigt, dass Postponement besonders unter Nachfrageunsicherheit und der Bedingung eines entkoppelbaren Produktionsprozesses zu einer deutlichen Reduzierung der Lagerbestände beitragen und dadurch ein Einsparungspotential bei den Lagerkosten darstellen kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Konzept des Postponements in der Literatur ausführlich diskutiert wird. Einen Literaturüberblick liefern dabei auch die Arbeiten von van Hoek (2001), Boone et al. (2007) und Ferreira et al. (2015). Theoretische und konzeptionelle Arbeiten heben insgesamt die Vor- und Nachteile von Postponement-Strategien systematisch hervor. Dabei werden viele (wenn nicht alle) relevanten Einflussfaktoren in den Entscheidungsprozess zur Identifizierung profitabler Strategien einbezogen. Offen bleibt bei diesen Arbeiten weitgehend die Frage, welche Entscheidungen getroffen werden sollen, wenn konkrete Ausprägungen von Einflussfaktoren vorliegen (d.h. ab welchem Grad an Nachfrageschwankungen lohnt sich bspw. ein Verschieben von Produktionsaktivitäten). Besonders aufgrund des strategischen Planungshorizontes ist dieses wichtig, da Entscheidungen häufig mit hohen Kosten verbunden sind (bspw. Fixkosten für das Verschieben einer Produktionsaktivität) und teilweise nur schwer revidiert werden können. Weiterhin ist es innerhalb der konzeptionellen Arbeiten nicht möglich, alle Wechselwirkungen zwischen Einflussfaktoren gleichzeitig zu berücksichtigen. Dieses wird besonders relevant, wenn die Implikationen gegensätzlich ausfallen, beispielsweise wenn hohe Unsicherheiten (impliziert nach Pagh und Cooper (1998) tendenziell vollständiges Postponement) und gleichzeitig wenig standardisierte Produktvarianten (impliziert nach Pagh und Cooper (1998) tendenziell vollständige Spekulation) vorliegen.

Fallstudien werden, wie oben dargestellt, teilweise auf Basis von konkreten Unternehmensdaten durchgeführt, sodass ein durch Postponement erzieltetes Einsparungs-

potential quantifiziert werden kann (siehe bspw. Wong et al. (2011)). Dadurch können Entscheidungen auf Basis konkreter Ausprägungen von Einflussfaktoren getroffen werden. Fallstudien bieten jedoch keine Entscheidungsunterstützung für generische Problemstellungen an. Auch das Berücksichtigen vieler, unter Umständen sogar entgegen gerichteter Zielstellungen, stellt sich in Fallstudien als schwierig dar. Daher sollen in den folgenden Abschnitten quantitative Modelle zur Entscheidungsunterstützung analysiert werden.

Mathematische Optimierungsmodelle

Im Bereich der quantitativen Modelle zur Entscheidungsunterstützung schlagen einige Autoren mathematische Optimierungsmodelle zur Evaluation von Postponement-Strategien vor. Diese werden im Folgenden beschrieben und gegen den Betrachtungsgegenstand der Arbeit abgegrenzt. Tabelle 4.1 fasst die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammen. Dabei werden die relevanten Arbeiten mit mathematischen Optimierungsmodellen berücksichtigt und anhand von Kriterien klassifiziert. Die gestrichelte Linie trennt dabei deterministische und stochastische Ansätze.

In einigen dieser Arbeiten werden dabei Annahmen einer *deterministischen Kundennachfrage* getroffen (siehe (Rau und Liu, 2006), (Schwartz und Voß, 2007) und (Lu und Jing, 2013)). So präsentieren Rau und Liu (2006) ein MIP zur Analyse von Manufacturing Postponement, Packaging Postponement und Logistics Postponement. Ziel ist es, die Gesamtkosten zu minimieren, indem die optimale Netzwerkstruktur identifiziert wird. Eine mögliche Resequenzierung von Produktions- und Logistikaktivitäten wird dabei nicht berücksichtigt. Zudem eignet sich das Modell lediglich für den Fall von zwei Endprodukten. Ein weiteres MIP zum Netzwerkdesign unter Berücksichtigung von Form Postponement liefern Schwartz und Voß (2007). Ziel ist es, die optimale geographische Position von Produktionsaktivitäten innerhalb einer Supply Chain zu identifizieren, sodass die Gesamtkosten (d.h. fixe und variable Produktionskosten sowie variable Transportkosten) minimiert werden. Eine potentielle Resequenzierung von Produktionsaktivitäten stellt dabei einen Freiheitsgrad des statischen Modells¹⁵ dar. Auch Lu und Jing (2013) untersuchen anhand eines MIPs den Einfluss von Postponement-Strategien im Kontext einer Supply Chain. Dabei werden verschiedene Arten von Form Postponement berücksichtigt und Produktions-, Lager-, Transport- sowie Strafkosten mit in den Entscheidungsprozess einbezogen. Das statische Modell unterstützt im Gegensatz zur Arbeit von Schwartz und Voß (2007) allerdings nicht bei Designentscheidungen bezüglich der Produktionsaktivitäten.

¹⁵In statischen Modellen bezieht sich der Betrachtungsgegenstand auf einen Zeitpunkt. Im Vergleich dazu betrachten dynamische Modelle einen Zeitverlauf mit mehreren Zeitpunkten bzw. Perioden (Klein und Scholl, 2011, S. 39).

Publikation	Modellart	Zielfunktion	Postponement Art	Grad Postponement	Repositionierung Produktionsaktivitäten	Lagerhaltung	Supply Chain	Planungshorizont	Risikobereitschaft	Kostenarten
Rau und Liu (2006)	MIP	min K	VS,PP,LP	z,g	-	x	x	eP	-	vP,vT,vL,S
Schwartz und Voß (2007)	MIP	min K	VS,PP	g	x	-	x	eP	-	fP,vP,vT
Lu und Jing (2013)	MIP	min K	VS,PP	g	-	x	x	eP	-	vP,vL,vT,S
Swaminathan und Tayur (1998)	SMIP	min eK	VS,PP	z	-	x	-	mP	-	vP,vL,S
Leung und Ng (2007a)	SMIP	min eK	VS,PP	z	-	x	-	mP	-	fP,vP,vL,S
Leung und Ng (2007b)	GP	min K	VS,PP	z	-	x	-	mP	-	fP,vP,vL,S
Cholette (2009)	SLP	max eP	VS,PP	z	-	-	-	eP	-	vP,vL,S
Graman (2010)	NLP	min eK	VS,PP	z	-	x	-	eP	-	vP,vL
Guericke et al. (2012)	SMIP	max eP	VS,PP	z,g	x	-	x	eP	-	fP,vP,vT
Khakdaman et al. (2015)	ROLP	min eK max eMe	VS, PP	z	-	x	x	mP	(x)	vP,vL,(vT),S

Tabelle 4.1: Übersicht der Publikationen zur mathematischen Optimierung im Bereich Postponement

Legende:

Modellart - MIP: Mixed Integer Program, SMIP: Stochastic Mixed Integer Program, GP: Goal Program, SLP: Stochastic Linear Program, NLP: Non Linear Program, ROLP: Robust Optimization Linear Program

Zielfunktion - min K: Minimiere Kosten, min eK: Minimiere erwartete Kosten, max eP: Maximiere erwarteten Profit, max eMe: Maximiere Maschineneffizienz

Grad Postponement - z: zeitliche Verschiebung, g: geographische Verschiebung

Repositionierung Produktionsaktivitäten \ Lagerhaltung \ Risikobetrachtung \ Supply Chain - x: ja, -: nein, (x): teilweise

Planungshorizont - eP: einperiodig, mP: mehrperiodig

Kostenarten - fP: fixe Produktionskosten, vP: variable Produktionskosten, fL: fixe Lagerkosten, vL: variable Lagerkosten, fT: fixe Transportkosten, vT: variable Transportkosten, S: Strafkosten

Insgesamt eignen sich diese Modelle nur bedingt zur Analyse von Postponement-Strategien, da jeweils die Annahme einer deterministischen Nachfrage getroffen wird. Die theoretische Literatur sieht Postponement dagegen als Konzept, um Nachfrageschwankungen besser antizipieren zu können. Diese Anforderung können deterministische Modelle jedoch nicht erfüllen.

Darüber hinaus existieren in der Literatur einige Arbeiten, welche die Evaluierung von Postponement-Strategien unter *unsicherer Kundennachfrage* betrachten. Teilweise wird dabei ausschließlich die zeitliche Verzögerung von Produktionsaktivitäten aus Sicht eines Produktionsstandortes betrachtet. So benutzen Swaminathan und Tayur (1998) ein zweistufiges SMIP, um variantenreiche Produktlinien durch eine zeitlich spätere Produktdifferenzierung effizienter zu gestalten. Dabei werden die erwarteten Produktions-, Lager- und Strafkosten minimiert. Leung und Ng (2007a) präsentieren ein zweistufiges SMIP für die aggregierte Produktionsplanung. Ziel ist die Bestimmung von Produktionsmengen unter Nachfrageunsicherheiten. Um eine zeitlich

spätere Produktdifferenzierung im Modell zu betrachten, wird bei den Produktionsmengen zwischen der Art der Transformationen unterschieden (d.h. zwischen Transformationen von Rohmaterial zu Endprodukt, Rohmaterial zu Zwischenprodukt oder Zwischenprodukt zu Endprodukt). Weiterhin ist die Arbeitszeitplanung Bestandteil des Modells, sodass eine detaillierte Kostenbetrachtung möglich ist. So werden neben fixen Kosten für die Produktion von Produkten und Lagerhaltungskosten auch variable Produktionskosten betrachtet, die u.a. auch Kosten für Überstunden enthalten. In einer weiteren Arbeit betrachten Leung und Ng (2007b) erneut den Planungsgegenstand der aggregierten Produktionsplanung. Um mehrere sich ggf. widersprechende Zielsetzungen zu berücksichtigen und damit praxisnahe Anforderungen zu berücksichtigen, verwenden Leung und Ng (2007b) das Verfahren der Zielprogrammierung (engl. goal programming). Dabei werden die Produktionskosten, Lagerhaltungskosten und die Kosten für die Personalbeschaffung minimiert und fließen je nach Priorität hierarchisch in den Entscheidungsprozess ein.

Cholette (2009) präsentiert ein zweistufiges SLP zur Analyse von Packaging Postponement sowie Labeling Postponement, welches anhand einer Fallstudie aus der Weinindustrie evaluiert wird. Ziel ist die Maximierung des erwarteten Profits, indem unter Nachfrageunsicherheit über die Produktionsmenge an Endprodukten sowie über die Lagermenge an Zwischenprodukten entschieden wird. Nach der Realisierung der Unsicherheiten werden Entscheidungen über die transformierte Menge von Zwischenprodukten in Endprodukten, die Menge der verkauften Produkte, Restmengen sowie die Menge der Nachfrageausfälle getroffen. Graman (2010) entwickelt ein nichtlineares Optimierungsmodell (engl. nonlinear program (NLP)), um Auswirkungen einer späteren Produktdifferenzierung auf die Kosten zu untersuchen. Dabei werden die erwarteten Kosten minimiert, indem optimale Entscheidungen hinsichtlich der zeitlichen Verzögerung von Produktionsaktivitäten (für zwei Endprodukte) für einen einzelnen Produktionsstandort getroffen werden. Graman (2010) stellt heraus, dass eine Erweiterung hinsichtlich der Betrachtung von beliebig vielen Produkten zu einem deutlichem Anstieg der Modellkomplexität führen würde und schlägt daher die Anwendung eines zweistufigen SLPs vor.

Insgesamt können die hier aufgeführten Optimierungsmodelle eingesetzt werden, um Auswirkungen von Parameteränderungen auf die betrachteten Postponement-Strategien innerhalb von Sensitivitätsanalyse zu untersuchen und Unternehmen dadurch eine bessere Entscheidungsgrundlage zu geben (Cholette, 2009). Da die Arbeiten sich jedoch auf einen einzelnen Produktionsstandort beschränken, kann das geographische Verschieben von Produktionsaktivitäten nicht berücksichtigt werden. Abschließend sind die Arbeiten aufgeführt, welche Postponement im Kontext einer Supply Chain betrachten.

Innerhalb eines globalen Produktions- und Distributionsnetzwerks betrachten Guericke et al. (2012) verschiedene Auswirkungen von Postponement-Strategien auf den erwarteten Profit. Mithilfe eines zweistufigen SMIP kann die Vorteilhaftigkeit der Strategien Full Speculation, Form Postponement ohne potentielle Resequenzierung sowie Form Postponement mit potentieller Resequenzierung der Produktionsaktivitäten miteinander verglichen werden. Bei den Postponement-Strategien ist neben der zeitlichen Verzögerung von Produktionsaktivitäten auch ein geographisches Verschieben dieser Aktivitäten möglich. Da das statische Modell keine explizite Lagerhaltung betrachtet, ist Logistics Postponement kein Bestandteil der Arbeit. In den Entscheidungsprozess fließen neben fixen Kosten für Produktionsaktivitäten, variable Produktions- und Transportkosten ein.

Schließlich liefern Khakdaman et al. (2015) einen taktischen Produktionsplanungsansatz für die kombinierte Betrachtung von Make-To-Stock und Make-To-Order Produkten. Es wird ein robustes Optimierungsmodell vorgestellt, welches für mehrere Produkte über einen mehrperiodigen Planungszeitraum die erwarteten Kosten minimiert sowie die Effizienz der Maschinen maximiert. Zu den betrachteten Unsicherheitsfaktoren zählen Nachfrageschwankungen, Anlieferunsicherheiten (bspw. Kosten für Rohmaterialien) sowie Prozessunsicherheiten (bspw. Produktionskosten). Aufgrund der mehrkriteriellen Zielfunktion und des robusten Optimierungsansatzes ist es möglich die Wechselwirkungen zwischen erwarteten Kosten und nicht erfüllter Nachfrage zu analysieren. Dieser ermöglicht es, die Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers zu berücksichtigen. Da Khakdaman et al. (2015) zwar verschiedene Maschinenzentren betrachten, zwischen diesen allerdings keine Transportkosten und Transportzeiten anfallen und weiterhin keine Designentscheidungen bezüglich Produktions- und Logistikaktivitäten sowie Entscheidungen hinsichtlich der Resequenzierung getroffen werden, erfolgt die Betrachtung der Risikobereitschaft in Bezug auf Postponement-Strategien nur ansatzweise.

Weitere quantitative Modelle

Neben den mathematischen Optimierungsmodellen existieren in der Literatur weitere quantitative Modelle, die zur Evaluierung von Postponement-Strategien eingesetzt werden. Zu diesen zählen Simulationsmodelle ((Cheng et al., 2010), (Choi et al., 2012)), Modelle aus der Warteschlangentheorie ((Su et al., 2005), (Wong et al., 2009)) sowie analytische Modelle ((Lee und Tang, 1997), (Garg und Tang, 1997)). Diese werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die Problemstellung dieser Arbeit überprüft.

Wie bereits im Abschnitt der mathematischen Optimierungsmodelle herausgestellt, lassen sich die Arbeiten danach klassifizieren, ob Postponement im Kontext einer Supply Chain untersucht wird. Da sich Arbeiten ohne explizite Betrachtung eines Wert-

schöpfungsnetzwerks (siehe bspw. (Ma et al., 2002) und (Silver und Minner, 2005)) wie oben herausgestellt nicht für die Analyse eines geographischen Verschiebens von Produktionsaktivitäten eignen, werden im Folgenden nur die Arbeiten berücksichtigt, die Postponement im Kontext einer Supply Chain betrachten.

Lee und Tang (1997) bestimmen mithilfe eines analytischen Modells den optimalen Produktdifferenzierungspunkt für eine Supply Chain. Damit können Auswirkungen von Postponement auf die Kosten in Abhängigkeit zum Grad der Standardisierung und Modularisierung der Produkte untersucht werden. Wie auch in der Arbeit von Garg und Tang (1997) bildet das Modell den Zwei-Produkt-Fall ab. Garg und Tang (1997) betrachten zusätzlich mehrere Punkte der Produktdifferenzierung sowie Lagermanagement. Choi et al. (2012) übertragen den Ansatz von Lee und Tang (1997) in ein Simulationsmodell (System Dynamics Ansatz) und erweitern diesen, indem sie ein globales Produktions- und Distributionsnetzwerk betrachten. Ernst und Kamrad (2000) präsentieren ein analytisches Framework zur Evaluierung von Supply Chain-Strukturen auf Kostenbasis. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung von verschiedenen Arten der Modularisierung von Produkten für einen diskreten Zeitpunkt. Weiterhin werden die Auswirkungen einer späteren Produktdifferenzierung auf Lagermengen und Lieferzeiten in verschiedenen Kostenmodellen analysiert (Tang, 2011). Auch Shao und Ji (2008) behandeln eine spätere Produktdifferenzierung und erlauben dabei eine Resequenzierung von Produktionsaktivitäten. Einige Kostenarten, wie Produktions- und Restrukturierungskosten, die Einfluss auf die Entscheidungen bezüglich der Postponement-Strategie haben, werden jedoch nicht betrachtet.

Su et al. (2005) evaluieren die zeitliche und geographische Verzögerung von Produktionsaktivitäten mithilfe von Warteschlangenmodellen. Als Bewertungskriterien dienen die erwarteten Gesamtkosten und die Wartezeiten der Kunden. Die Verwendung der Warteschlangentheorie erfordert hier einige Annahmen. So wird bspw. bei der zeitlichen Verzögerung von Produktionsaktivitäten angenommen, dass alle notwendigen Produktionsschritte zentralisiert durchgeführt werden. Einen weiteren Ansatz aus der Warteschlangentheorie präsentieren Anand und Girotra (2007). Bei der Konfiguration einer zweistufigen Supply Chain soll die Entscheidung zwischen früher und später Produktdifferenzierung unter Nachfrageunsicherheit getroffen werden. Den Schwerpunkt der Analysen bilden Auswirkungen von verschiedenen Strukturen der Märkte. Weiterhin existieren in der Literatur einige Economic-Order-Quantity (EPQ) Modelle zur Analyse von Postponement-Strategien. So vergleichen Li et al. (2008) für einen Hersteller, der in einer Supply Chain agiert, ein System mit Postponement und ein System ohne Postponement. Auch Cheng et al. (2010) präsentieren verschiedene EPQ Modelle. In einem stochastischen Modell werden dabei die Auswirkungen von Form Postponement auf die Supply Chain analysiert. Logistics Postponement wird im Rahmen dieser Arbeiten jedoch nicht betrachtet.

Aus der Literaturanalyse der quantitativen Modelle zur Evaluierung von Postponement-Strategien lässt sich zusammenfassend festhalten, dass häufig das Konzept des Form Postponements und damit der Produktdifferenzierungspunkt innerhalb der Supply Chain betrachtet wird. Ein ganzheitlicher Ansatz, der auf der Ebene einer Supply Chain sowohl Form Postponement als auch Logistics Postponement und insbesondere auch die Risikobereitschaft eines Entscheiders integriert betrachtet, fehlt bisher jedoch auch in diesem Bereich.

4.3.2 Ansätze des Supply Chain Netzwerk Designs unter Unsicherheiten

Neben den Ansätzen aus der Postponement-Literatur behandeln im Forschungsbe-
reich des Supply Chain Netzwerk Design (SCND) zahlreiche Arbeiten die Identifi-
zierung von Supply Chain-Strukturen. Die meisten dieser Arbeiten betrachten dabei
keine Postponement-Strategien¹⁶, weisen jedoch mit der Beschaffungs-, Produktions-
und Distributionsplanung einen ähnlichen Betrachtungsgegenstand auf. Daher wer-
den die Arbeiten aus dem Bereich des SCNDs in diesem Abschnitt analysiert.

Die Arbeiten in diesem Bereich gehen dabei auf Geoffrion und Graves (1974) zu-
rück, welche ein gemischt-ganzzahliges lineares Modell zur Gestaltung eines Distri-
butionssystems für den Mehr-Produkt-Fall formulieren. Auf dieser Basis sind eine
große Anzahl an Publikationen zum SCND entstanden. Übliche Entscheidungen die
innerhalb des SCND betrachtet werden, umfassen die Identifizierung der Anzahl,
Kapazität und Lage von Produktionsstandorten. Häufigstes Ziel ist dabei die Mini-
mierung der Netzwerkkosten. Neben strategischen Entscheidungen werden oftmals
auch Entscheidungen auf taktischer Ebene mit in den Lösungsprozess einbezogen.
Farahani et al. (2014), Melo et al. (2009) und Meixell und Gargeya (2005) bieten
einen umfassenden Literaturüberblick.

Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, wird Postponement in der Literatur insbeson-
dere als Strategie zur Risikominimierung unter Unsicherheiten vorgeschlagen. Daher
werden im Folgenden ausschließlich die Arbeiten aus dem Bereich des SCNDs be-
trachtet, welche explizit das Thema der Unsicherheiten adressieren. Weiterhin gilt es
bei der Evaluierung von Postponement-Strategien die Beschaffungs-, Produktions-
und Distributionsplanung zu betrachten, da sich Entscheidungen bzgl. der Produkti-
ons- und Logistikaktivitäten auf Kosten dieser drei Planungsebenen auswirken kön-
nen. Aus diesem Grund werden in der folgenden Literaturanalyse nur diejenigen
Arbeiten näher analysiert, welche die Beschaffungs-, Produktions- und Distribu-
tionsplanung simultan betrachten. Im Folgenden sind die relevanten Arbeiten aufgeführt.
Zur besseren Übersicht sind die Arbeiten nach Risikobetrachtung gruppiert.

¹⁶Sofern die Arbeiten das Konzept des Postponements betrachten, sind diese in Abschnitt 4.3.1
aufgeführt.

SCND-Modelle ohne explizite Risikobetrachtung

In Tabelle 4.2 sind zunächst die Arbeiten ohne explizite Risikobetrachtung aufgeführt. Die einzelnen Arbeiten werden dabei anhand ihrer relevanten Eigenschaften des Betrachtungsgegenstands klassifiziert.

Alonso-Ayuso et al. (2003), Santoso et al. (2005) und Schütz et al. (2009) liefern Optimierungsmodelle, mit denen eine spätere Produktdifferenzierung potentiell betrachtet werden kann. So stellen Alonso-Ayuso et al. (2003) ein zweistufiges stochastisches Optimierungsmodell zur Bestimmung einer Supply Chain Netzwerk Topologie unter Preis- und Nachfrageunsicherheiten sowie Unsicherheiten hinsichtlich Beschaffungs- und Produktionskosten vor. Auf strategischer Ebene werden Entscheidungen zur Auswahl und Dimensionierung von Produktionsstandorten, zur Auswahl von Lieferanten und zur Allokation von Produkten zu Produktionsstandorten getroffen sowie auf taktischer Ebene Produktions-, Transport- und Lagermengen festgelegt. Endprodukte werden aus Rohmaterialien und Halbfertigerzeugnisse hergestellt. Die dafür notwendigen Produktionsprozesse sind dabei bereits innerhalb der Standorte fixiert. Insgesamt wird ein mehrperiodiger Planungshorizont betrachtet und der erwartete Profit maximiert. Ein weiteres stochastisches Modell zum Supply Chain Design inklusi-

Publikation	Zielfunktion	Späte Produktdifferenzierung	Designentscheidung Produktions- und Logistikkaktivitäten		Lagerhaltung	Planungshorizont	Risikobetrachtung	Kostenarten
			Prod.	Log.				
Alonso-Ayuso et al. (2003)	max P	g	fM	L	x	mP	-	fP, vP, vL, vT
Santoso et al. (2005)	min K	g	M	-	-	mP	-	fP, vP, vT
Aghezzaf (2005)	min K	-	S	L	x	mP	-	fP, vP, fL, vL, vT
Schütz et al. (2009)	min K	g	M	-	x	mP	-	fP, vP, vT, S
Bihlmaier et al. (2009)	max Kw	-	S	-	-	mP	-	fP, vP, vT, S
El-Sayed et al. (2010)	max P	-	S	L,T	x	mP	-	fP, vP, fL, vL, vT, S
Georgiadis et al. (2011)	min K	-	-	L,T	x	mP	-	vP, vT, fL, vL
Bidhandi und Yusuff (2011)	min K	-	S	L,T	x	eP	-	fP, fT, vT, fL, S
Longinidis und Georgiadis (2014)	max fM	-	-	L,T	x	mP	-	vP, vT, fL, vL

Tabelle 4.2: Übersicht der Publikationen zum SCND ohne Risikobetrachtung

Legende:

Zielfunktion - P: Profit, K: Kosten, Kw: Kapitalwert, fM: finanzieller Mehrwert

Produktdifferenzierung - g: geographisch, z: zeitlich

Designentscheidungen - S: einzelne Produktionsaktivität, fM: mehrere Produktionsaktivitäten (aber fixiert), M: mehrere Produktionsaktivitäten, L: Logistikkaktivitäten, T: Transportaktivitäten

Lagerhaltung Risikobetrachtung - x: ja, -: nein

Planungshorizont - eP: einperiodig, mP: mehrperiodig

Kostenarten - fP: fixe Produktionskosten, vP: variable Produktionskosten, fL: fixe Lagerkosten, vL: variable Lagerkosten, fT: fixe Transportkosten, vT: variable Transportkosten, S: Strafkosten

ve Lösungsverfahren (d.h. Sample Average Approximation) für praxisnahe Instanzen mit vielen Szenarien liefern Santos et al. (2005). Im Rahmen der Planung wird neben Standortentscheidungen (primäre Entscheidung) auch über die Anordnung von Produktionsprozessen entschieden (sekundäre Entscheidung) sowie auf operationaler Ebene optimale Transportmengen ermittelt. Lagerhaltung wird in diesem Modell nicht explizit betrachtet. Schütz et al. (2009) betrachten auf strategischer Ebene das Design und die Struktur der Supply Chain unter Berücksichtigung operativer Entscheidungen (d.h. die Produktion, Lagerhaltung und den Transport von Produkten). Dabei werden die erwarteten Kosten über einen mehrperiodigen Planungszeitraum minimiert und Strafkosten für nicht befriedigte Nachfrage einbezogen. Es werden verschiedene Produktionsprozesse betrachtet, welche Produkte aufteilen und zusammenführen können, wodurch eine geographische Differenzierung der Produkte im Netzwerk möglich ist.

Aghezzaf (2005) verfolgt den Ansatz der robusten Optimierung, um Produktionskapazitäten sowie Lagerstandorte unter Nachfrageunsicherheiten zu optimieren. Es wird der Ein-Produkt-Fall betrachtet, wobei das Produkt in einem nicht weiter unterteilbaren Produktionsprozess hergestellt wird. Dabei werden die Kosten über den betrachteten Planungshorizont minimiert. Im Bereich der Automobilindustrie wird ein zweistufig stochastisches Optimierungsmodell eingesetzt, um auf strategischer Ebene über Produktionsstandorte und die Zuordnung von Produkten zu Standorten zu entscheiden (Bihlmaier et al., 2009). Auf taktischer Ebene werden flexible Schichtmodelle mit in den Entscheidungsprozess eingebunden. Um Investitionsentscheidungen adäquat für einen langfristigen Planungshorizont treffen zu können, wird der erwartete Kapitalwert der Investitionen maximiert. Es erfolgt keine explizite Betrachtung der Lagerhaltung.

In weiteren Modellen wird auf Design Entscheidungen bezüglich der Lagerhaltung und des Transportes fokussiert. So analysieren El-Sayed et al. (2010) die Reverslogistik innerhalb einer Supply Chain mithilfe eines mehrstufigen stochastischen Modells. Ziel ist es, den erwarteten Profit für einen mehrperiodigen Planungszeitraum zu maximieren. Für den Ein-Produkt-Fall werden Designentscheidungen hinsichtlich der Position von Produktions- und Lagerstandorten sowie der Realisierung von Transportverbindungen getroffen. Dazu werden taktische Entscheidungen (Produktions-, Transport- und Lagermengen) in den Entscheidungsprozess einbezogen. Georgiadis et al. (2011) präsentieren ein zweistufig stochastisches Optimierungsmodell zur Bestimmung von Lager- und Distributionsstandorten sowie Transportverbindungen zwischen diesen Standorten. Während Produktionsstandorte im Modell bereits fixiert sind, wird auf taktischer Ebene über Produktions-, Transport- und Lagermengen entschieden. Dabei werden verschiedene Produkte in einem nicht weiter unterteilten Produktionsprozess gefertigt, wobei sich die Produkte gemeinsame Produktionsressourcen in den Standorten teilen. Ziel ist es, die erwarteten Kosten über alle Sze-

narien zu minimieren. Ein weiteres stochastisches Modell zur Planung des Supply Chain Designs inklusive Lösungsverfahren (d.h. eine modifizierte Version der Sample Average Approximation) liefern Bidhandi und Yusuff (2011). Im Rahmen eines einperiodigen Optimierungsmodells werden strategische und taktische Entscheidungen getroffen, sodass die erwarteten Kosten des Netzwerks minimiert werden. Die Entscheidungen umfassen auf der strategischen Ebene die Lieferantenauswahl, die Position von Produktions- und Lagerstandorten sowie die Allokation von Produkten und Rohmaterialien. Auf taktischer Ebene werden Produktions-, Lager-, Transport- und Fehlmengen fixiert. Longinidis und Georgiadis (2014) präsentieren ein gemischt-ganzzahliges nichtlineares Modell (engl. mixed integer nonlinear program (MINLP)) zur Identifizierung der Position, Kapazitäten und Anzahl von Warenlagern sowie zur Auswahl von Transportverbindungen. Die aus dem Bereich des Finanzmanagements bekannte Methode des Sale-Lease-Backs wird dabei im Modell berücksichtigt, sodass die Möglichkeit besteht Warenlager durch verschiedene Finanzierungsalternativen zu betreiben. Um praxisnahe Problem instanzen zu lösen, wird das nichtlineare Modell im Rahmen einer Reformulierung zu einem gemischt-ganzzahligen linearen Modell überführt. Mithilfe des Modells kann die Konfiguration der Supply Chain unter Nachfrageunsicherheiten optimiert werden. Dabei wird der finanzielle Mehrwert maximiert, welcher sich aus dem Geschäftsergebnis nach Steuern und den Verlust durch das Sale-Lease-Back Geschäft zusammensetzt.

Insgesamt betrachten die vorgestellten Publikationen aus dem Bereich des strategischen Netzwerk Designs viele Aspekte, die zur Analyse von Postponement-Strategien notwendig sind. Eine explizite Berücksichtigung von Aspekten des Supply Chain-Risikos findet in diesen Arbeiten jedoch nicht statt, sodass die Entscheidungsfindung stets unter neutraler Risikobereitschaft des Planers durchgeführt wird. Weiterhin wird das Thema der Produktdifferenzierung in diesen Arbeiten nur ansatzweise betrachtet. So findet in wenigen Arbeiten eine geographische Differenzierung der Produktionsaktivitäten statt. Eine zeitlich spätere Produktdifferenzierung (d.h. das zeitliche Verzögern von Aktivitäten bis sich Unsicherheiten verringert oder aufgelöst haben) wird in keiner dieser Arbeiten betrachtet. Darüber hinaus existieren in der Literatur einige Arbeiten aus dem Bereich des SCNDs, welche die Risikobereitschaft explizit betrachten. Der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeiten wird im Folgenden erläutert.

SCND-Modelle mit expliziter Risikobetrachtung

In Tabelle 4.3 sind die entsprechenden Arbeiten des SCNDs mit expliziter Risikobetrachtung aufgeführt. Die einzelnen Arbeiten werden dabei anhand ihrer relevanten Eigenschaften des Betrachtungsgegenstands klassifiziert.

Publikation	Zielfunktion	Späte Produkt- differenzierung	Designentscheidung Produktions- und Logistikaktivitäten		Lagerhaltung	Planungshorizont	Risikobetrachtung	Kostenarten
			Prod.	Log.				
Guillén et al. (2005)	max eKw, max SL, min DR	-	S	L	x	mP	x	fP,vP,vT,vL
Azaron et al. (2008)	min eK, min VK, min RB	-	S	-	-	eP	x	fP,vP,vT,S
Pan und Nagi (2010)	min eK, min VK	g	fM	T	x	mP	x	fP,vP,fT,vT, vL,S
Carneiro et al. (2010)	max eKw	g	M	T	-	mP	x	fP,vP,fT,vT
Nickel et al. (2012)	max eROI, min DR	-	S	-	-	mP	x	fP,vP,vT
Gebreslassie et al. (2012)	min eK, min DR	-	S	L,T	x	mP	x	fP,vP,fT,vT, fL,vL,S
Huang und Goetschalckx (2014)	max eP, min SA	-	S	L	x	eP	x	fP,vT,fL
Subulan et al. (2015)	min eK, max eR	-	S	-	-	eP	x	fP,vP,vT
Sahling und Kayser (2016)	max eKw, max CVaR	-	S	L	x	mP	x	fP,vP,vT,fL,vL

Tabelle 4.3: Übersicht der Publikationen zum SCND mit Risikobetrachtung

Legende:

Zielfunktion - eKw: erwarteter Kapitalwert, SL: Service Level, DR: Downside Risiko, eK: erwartete Kosten, VK: Varianz der Kosten, RB: Risiko Budgetüberschreitung, eROI: erwartete Kapitalrentabilität, eP: erwarteter Profit, SA: Standardabweichung, eR: erwarteter Rücklauf

Produktdifferenzierung - g: geographisch, z: zeitlich

Designentscheidungen - S: einzelne Produktionsaktivität, fM: mehrere Produktionsaktivitäten (aber fixiert), M: mehrere Produktionsaktivitäten, L: Logistikaktivitäten, T: Transportaktivitäten

Lagerhaltung \ *Risikobetrachtung* - x: ja, -: nein

Planungshorizont - eP: einperiodig, mP: mehrperiodig

Kostenarten - fP: fixe Produktionskosten, vP: variable Produktionskosten, fL: fixe Lagerkosten, vL: variable Lagerkosten, fT: fixe Transportkosten, vT: variable Transportkosten, S: Strafkosten

In Guillén et al. (2005) wird ein mehrkriterielles Modell zur Maximierung des erwarteten Kapitalwertes und der Nachfragebefriedigung sowie zur Minimierung des finanziellen Risikos unter Nachfrageunsicherheiten präsentiert. Neben strategischen Entscheidungen hinsichtlich der Anzahl, Position und Kapazität der Produktions- und Lagerstandorte werden taktische Entscheidungen hinsichtlich der Produktions- und Lagermengen getroffen. Verschiedene Produkte werden dabei in einem einzigen Produktionsschritt gefertigt. Im Rahmen der Analysen werden die Wechselwirkungen der Zielfunktionsbestandteile für den deterministischen und stochastischen Fall diskutiert.

Goh et al. (2007) präsentieren ein mehrstufiges stochastisches Modell zur Bestimmung einer Supply Chain-Konfiguration unter Nachfrageunsicherheiten und Wechselkursrisiken. Das Modell basiert dabei auf einem zweistufigen stochastischen Modell von Cohen und Huchzermeier (1999). Für den Ein-Produkt-Fall werden dabei Entscheidungen über die Position von Produktionsstandorten und Transportmengen getroffen, sodass der erwartete Profit maximiert und das Risiko minimiert wird.

In einem einperiodigen mehrkriteriellen stochastischen Modell analysieren Azaron et al. (2008) die Wechselwirkungen zwischen kosten- und risikominimalen Lösungen für das SCND. Das Modell basiert dabei auf einer deterministischen Modellvariante von Santoso et al. (2005). Als Risikomaße werden die Varianz der Kosten sowie die Wahrscheinlichkeit einer Budgetüberschreitung verwendet. Die Berücksichtigung der Varianz der Kosten führt dabei zu einem nichtlinearen Modell.

Pan und Nagi (2010) stellen ein robustes gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell zur Konfiguration eines Produktions- und Distributionssystems vor. Neben der Auswahl von Produktionsstandorten, werden Entscheidungen über Allianzen innerhalb des Netzwerks betrachtet (d.h. es wird entschieden, ob Standorte auf zwei benachbarten Wertschöpfungsstufen miteinander kooperieren). Die mehrkriterielle Zielfunktion beinhaltet neben der Minimierung der erwarteten Kosten, die Minimierung der Variabilität der Kosten sowie die erwarteten Strafkosten für nicht befriedigte Nachfrage. Es wird ein einzelnes Endprodukt betrachtet, welches ein neues Marktpotential darstellt. Die Reihenfolge der Produktionsaktivitäten ist bereits im Modell fixiert und pro Wertschöpfungsstufe kann ein Standort ausgewählt werden.

In der Arbeit von Carneiro et al. (2010) wird ein zweistufiges stochastisches Optimierungsmodell für die Gestaltung einer Supply Chain in der Ölindustrie formuliert. Neben strategischen Entscheidungen bezüglich der Investition in Produktionsstandorten und Transportverbindungen werden operationale Entscheidungen über die Produktions- und Transportmengen einbezogen. Lagerhaltung wird nicht berücksichtigt. Insgesamt wird der erwartete Profit maximiert und eine explizite Risikobetrachtung erfolgt durch die Berücksichtigung des CVaRs in den Modellrestriktionen. Ein mehrstufiges stochastisches Modell zum SCND mit finanziellen Entscheidungen formulieren Nickel et al. (2012). Dabei werden verschiedene Formen der Investition sowie Darlehen berücksichtigt. Dazu steht je Periode des Planungszeitraums ein Investitionsbudget zur Verfügung. Ziel ist es, neben dem Netto-Cashflow auch den Service-Level zu maximieren sowie das Risiko (Downside-Risk) des Verfehlens der geplanten Umsatzrendite zu minimieren.

Gebreslassie et al. (2012) präsentieren ein mehrperiodiges stochastisches gemischt-ganzzahliges Modell mit einer mehrkriteriellen Zielfunktion zur Bestimmung der Anzahl, Kapazität sowie Position der Produktionsstandorte und definieren zusätzlich die genutzte Technologie innerhalb eines Standortes als Freiheitsgrad. Außerdem werden Produktions-, Lager- und Transportmengen ermittelt, um schließlich die erwarteten

Kosten sowie das Risiko (Downside-Risk und CVaR) zu minimieren. Eine spätere Produktdifferenzierung ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

Auf Grundlage eines gemischt-ganzzahligen Modells mit quadratischer Zielfunktion analysieren Huang und Goetschalckx (2014) die Pareto-optimalen Lösungen für das SCND. Der Zielkonflikt besteht dabei zwischen der Effizienz des Netzwerks, welche durch den erwarteten Profit repräsentiert wird, und dem Risiko der Supply Chain, welches durch die Standardabweichung der Profite über alle Szenarien abgebildet wird. Zwar werden in dem einperiodigen Modell keine taktischen Lagermengen betrachtet, die Autoren weisen aber darauf hin, dass diese Limitation leicht beseitigt werden könne.

Subulan et al. (2015) betrachten eine Supply Chain inklusive Reverslogistik in der Domäne der Bleiakkumulatoren. In einem hybriden gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell können stochastische und possibilistische Parameter abgebildet werden. In einer mehrkriteriellen Zielfunktion werden die erwarteten Kosten minimiert und die erwartete Abdeckung von Rücknahmestandorten maximiert, sodass möglichst viele Batterien recycelt werden können. Dazu werden verschiedene Arten von Standortentscheidungen getroffen.

Sahling und Kayser (2016) formulieren ein stochastisches Modell zum SCND inklusive Auswahl von Zulieferern unter Beachtung, dass diese mit unternehmensspezifischen Tools ausgestattet werden müssen. Es werden Entscheidungen hinsichtlich der Auswahl von Produktionsstandorten, der Zuordnung von Produkten zu Produktionsstandorten, der Auswahl von Lieferanten und der Zuordnung von Händlern zu Produktionsstandorten getroffen. Eine Abfolge von Produktionsprozessen wird nicht berücksichtigt. In einem zweistufigen stochastischen Modell wird die gewichtete Zielfunktion bestehend aus erwartetem Kapitalwert und CVaR maximiert.

Zusammenfassend geht aus der Analyse der Literatur hervor, dass zunehmend Risikomaße im Rahmen des SCNDs betrachtet werden. Weiterhin werden viele für die Abbildung von Postponement-Strategien notwendige Aspekte, wie modulare Produktstrukturen, verschiedene Produktionsaktivitäten und Lagerhaltung in den Arbeiten berücksichtigt. Allerdings wird in den Arbeiten eine spätere Produktdifferenzierung nur geographisch und nicht zeitlich betrachtet. Die vorgestellten Arbeiten können daher nicht direkt zum Lösen des in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Problems verwendet werden. Jedoch sind die in den Arbeiten betrachteten Risikomaße domänenunabhängig und können auf die vorliegende Problemstellung übertragen werden.

4.4 Fazit der Literaturrecherche und Ableitung des Forschungsbedarfs

In Abschnitt 4.1 wurden Arbeiten zur integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie vorgestellt. Da bisher keine dieser Arbeiten die Anforderungen aus Kapitel 2 vollständig erfüllt, wurde das ganzheitliche Problem in zwei Teilprobleme dekomponiert (siehe Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3) und der Stand der Forschung in den beiden Bereichen analysiert. Im Folgenden wird der identifizierte Forschungsbedarf zusammengefasst. Darauf basierend werden in Abschnitt 4.5 die Forschungsziele dieser Arbeit definiert.

Integrierte Planung von Produktportfolios und der Supply Chain-Strategie

Insgesamt lässt sich nach Analyse des Forschungsstands im Bereich der integrierten Planungsansätze für die Gestaltung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie festhalten, dass bisher nur wenige Arbeiten in diesem Bereich existieren. Dabei werden Entscheidungen des Produktportfolios (bspw. die Anzahl und Art der Produktvarianten) entweder ausschließlich auf Basis von Marktpräferenzen getroffen, sodass Strategieentscheidungen der Supply Chain ignoriert werden (Krishnan und Ulrich, 2001) oder die Dynamik der Marktnachfrage bei der Gestaltung der Produktvarianten und der Supply Chain vernachlässigt (siehe bspw. Zhang et al. (2008) und Kumar und Chatterjee (2013)). Nur wenige Arbeiten bilden bisher die Marktdynamik in einem ganzheitlichen Modell ab (siehe (Cao et al., 2012) und (Deng et al., 2014)). Dabei werden jedoch Discrete-Choice Modelle zur Ermittlung der Marktnachfrage verwendet, sodass auf der Angebotsseite Aspekte eines komplementären Angebots durch zusätzliche Dienstleistungen sowie konkurrierende Angebote von Wettbewerbern bisher nicht betrachtet werden können. Daraus resultiert eine potentielle Unter- bzw. Überschätzung der Nachfrage. Weiterhin werden trotz des langfristigen Planungszeitraums Unsicherheiten bisher nicht innerhalb der bestehenden Modelle betrachtet. Unsichere Einflussfaktoren bestehen jedoch sowohl bei der Gestaltung des Produktportfolios (siehe Abschnitt 2.3.3) als auch bei der Gestaltung der Supply Chain-Strategie (siehe Abschnitt 2.4.2).

Zudem besteht Forschungsbedarf bei der ganzheitlichen Betrachtung einer Supply Chain, sodass neben der Beschaffung und Produktion auch die Distribution einbezogen wird (Kumar und Chatterjee, 2013). Da sich die Arbeiten häufig auf die Auswahl von Lieferanten fokussieren, können Supply Chain-Strategien bisher in diesen Modellen nicht betrachtet werden. Flexible Supply Chain-Strategien bieten jedoch gerade bei innovativen Produkten mit schwankender Nachfrage Einsparungspotential (Fisher, 1997). Insbesondere die Vorteilhaftigkeit von Postponement-Strategien sollte bei einem innovativen Produktportfolio überprüft werden (Yang et al., 2004).

Gestaltung eines Produktportfolios

Die Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung im Bereich Gestaltung eines Produktportfolios hat zunächst aufgezeigt, dass die Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung eine wesentliche Zielgröße bei der Planung darstellt. Der Forschungsbedarf im Bereich von Marktsimulationen zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung für innovative Produkte besteht insbesondere in der integrierten Betrachtung von Produkten und Dienstleistungen inklusive verschiedener Erlösmodelle. Die meisten Arbeiten verwenden bei der Darstellung von Produkteigenschaften bzw. Attributen einen eindimensionalen Vektor. Durch eine derartige Operationalisierung der Produkte ist es möglich grundlegende Eigenschaften, wie den Kaufpreis eines Produktes, zu betrachten. Dagegen können komplexere Erlösmodelle, wie das Leasen von Produkten, damit nicht dargestellt werden.

Weiterhin besteht nach Kiesling et al. (2012) Forschungsbedarf bei der Entwicklung eines domänenunabhängigen Frameworks, welches eine hohe Adaptierbarkeit aufweist und auf verschiedene Anwendungsfelder als Instrument zur Entscheidungsunterstützung übertragen werden kann:

„Future research may also aim at bridging the gap between highly abstract theoretic models on the one hand, and very specific models for particular applications on the other hand“ (Kiesling et al., 2012).

Die analysierten Arbeiten betrachten jeweils einen konkreten Anwendungsfall. Einige der Arbeiten bieten dabei ein Konzept, was potentiell auf weitere Domänen übertragen werden kann. Dazu müssen allerdings die Simulationsmodelle problemspezifisch angepasst werden (vgl. bspw. (Kieckhäfer, 2013, S. 160-161)). Forschungsbedarf besteht daher in der Entwicklung eines generischen Modells, welches das Abbilden der relevanten Aspekte des Problembereichs (d.h. die relevanten Marktakteure, Wettbewerb und Kooperationen sowie unsichere Einflussfaktoren) domänenübergreifend ermöglicht. Eine strikte Trennung zwischen generischer Modellstruktur und den verwendeten Daten könnte dabei einen ersten Ansatz zur leichteren Adaptierbarkeit darstellen.

Identifizierung von Supply Chain-Strategien

Postponement-Strategien werden in der Literatur als lohnenswertes Konzept gesehen, sofern ein dynamisches Umfeld gegeben ist (d.h., dass innovative Produkte mit modularer Produktstruktur (Yang et al., 2004), mit kurzen Produktlebenszyklen in volatilen Märkten (Pagh und Cooper, 1998) vorliegen). Entscheidungsunterstützungskomponenten existieren dabei in Form von theoretischen Arbeiten, empirischen Arbeiten sowie in Form von quantitativen Modellen. Die Analyse des aktuellen Forschungsstandes hat gezeigt, dass sich theoretische Arbeiten und Fallstudien nur bedingt

eignen, da sie entweder nur einen groben Leitfaden zur Verfügung stellen oder keine generische Anwendbarkeit erlauben. Im Bereich der quantitativen Modelle hat sich herausgestellt, dass (stochastische) mathematische Optimierungsmodelle für die Entscheidungsunterstützung im Rahmen von Postponement eingesetzt werden können (siehe bspw. (Cholette, 2009)). Handlungsbedarf besteht dabei aber in der integrierten Betrachtung von verschiedenen Postponement-Strategien und damit verbunden in der Identifizierung von vorteilhaften Strategien unter Berücksichtigung der durch Produktions- und Logistikaktivitäten verursachten Kosten. Bei diesen Strategieentscheidungen müssen auch der Grad von Postponement und eine mögliche Resequenzierung von Produktions- und Logistikaktivitäten berücksichtigt werden. Es fehlt ein generisches Optimierungsmodell, welches diese Anforderungen erfüllt und so die zunehmende Komplexität innerhalb der Supply Chains bei der Planung bewältigt.

Weiterhin wird Postponement in der theoretischen Literatur häufig als Konzept zur Risikoreduzierung diskutiert. Im Rahmen von quantitativen Modellen zur Identifizierung von tragfähigen Postponement-Strategien werden jedoch häufig nur die erwarteten Kosten oder Gewinne des Netzwerks berücksichtigt. Dieses führt zur Annahme einer neutralen Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers. Eine explizite Berücksichtigung der Risikobereitschaft des Planers sowie eine quantitative Analyse der Auswirkungen fehlen bisher in der Literatur. Eine Integration der Risikomaße aus dem Bereich des Supply Chain Netzwerk Designs (SCND) kann helfen, diese Limitation zu bewältigen (vgl. Abschnitt 4.3.2).

4.5 Forschungsziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung eines domänenübergreifenden Instrumentariums für die integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie, welches dabei dem Entscheidungsträger im Sinne einer Entscheidungsunterstützung dient. Auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche und dem daraus abgeleiteten Forschungsbedarf ergeben sich folgende Teilziele für diese Arbeit:

Formalisierung des Kundenentscheidungsprozesses und Entwicklung einer domänenunabhängigen Marktsimulation für die Produktportfolioplanung

Erstes Teilziel ist die Konzeption und Entwicklung einer Marktsimulation für *innovative Produktvarianten und Dienstleistungen* unter Berücksichtigung verschiedener *Erlösmodelle*, welche zur Prognose der Nachfrage von Marktmodellen eingesetzt werden kann und somit eine wesentliche Kennzahl für die Planung eines Produktportfolios liefert. Dabei sollen die relevanten Marktteilnehmer mit ihren Zielen und Strategien berücksichtigt und entsprechend in einem Modell formalisiert werden.

Um die Forschungslücke zwischen den abstrakten theoretischen Modellen auf der einen Seite und den spezifischen anwendungsorientierten Modellen auf der anderen Seite (vgl. Kiesling et al. (2012)) zu schließen, soll eine *domänenübergreifende Marktsimulation* entwickelt werden. Dazu müssen eine adäquate Struktur und Verhalten einer solchen Marktsimulation spezifiziert werden. Schließlich ist die Anwendbarkeit der entwickelten Marktsimulation anhand einer *Fallstudie* zu *evaluieren*. Dabei sind Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Ergebnisse zu zeigen und so kritische Einflussfaktoren zu identifizieren.

Entwicklung eines Optimierungsmodells und Adaption geeigneter Lösungsverfahren zur Identifizierung von wirtschaftlich tragfähigen und risikoaversen Supply Chain-Strategien

Zweites Teilziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines *mathematischen Optimierungsmodells* zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien unter Nachfrageunsicherheit. Den Freiheitsgrad sollen dabei unterschiedliche *Postponement-Strategien*, der entsprechende *Grad von Postponement* und die *Reihenfolge der Produktions- und Logistikaktivitäten* darstellen. Zur Evaluierung dieser Strategieentscheidungen sollen die durch diese Aktivitäten verursachten Kosten in den Entscheidungsprozess einfließen, um so mögliche Wechselwirkungen zwischen den Handlungsalternativen berücksichtigen zu können. Da in der theoretischen Literatur Postponement häufig als Konzept zur Risikoreduzierung gesehen wird, dieses in den quantitativen Modellen bisher jedoch nicht betrachtet wird, soll in dem Modell eine Betrachtung des *Zielkonflikts zwischen Gewinnmaximierung und Risikominimierung* erfolgen.

Darüber hinaus sind für das zu entwickelnde Optimierungsmodell *adäquate Lösungsverfahren* auszuwählen, welche in annehmbare Zeit Lösungen generieren. Neben exakten Verfahren, die eine optimale Lösung sicherstellen, sollen auch approximative Verfahren betrachtet werden. Eine Laufzeitanalyse soll Aufschluss über das Laufzeitverhalten und die Lösungsqualität der Verfahren liefern. Schließlich soll der ökonomische Mehrwert des Optimierungsmodells anhand einer *Fallstudie* *demonstriert* werden. So sind in verschiedenen Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen von Parameteränderungen, Wechselwirkungen von Parameterkombinationen sowie der Zielkonflikt zwischen Gewinnmaximierung und Risikominimierung in Bezug auf die optimale Planungslösung in Form einer Supply Chain-Strategie zu untersuchen.

Integration der Simulations- und Optimierungskomponenten in ein ganzheitliches Instrumentarium zur Identifizierung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

Das letzte Teilziel dieser Arbeit umfasst die Integration der entwickelten Marktsimulation und Optimierungskomponenten in ein *ganzheitliches Instrumentarium*, um

die integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie automatisiert durchführen zu können. Dazu ist eine geeignete *Schnittstelle* zwischen der Marktsimulation und der stochastischen Optimierung zu konzipieren und umzusetzen, sodass für ein Produktportfolio eine effiziente Supply Chain-Strategie identifiziert werden kann (d.h. eine sequentielle Planung wird ermöglicht). Damit die Marktdynamik im Planungsprozess berücksichtigt werden kann, ist anschließend eine *Rückkopplung* zwischen den Planungsebenen zu spezifizieren, sodass Auswirkungen von Entscheidungen bezüglich eines Produktportfolios auf die wirtschaftliche Tragfähigkeit sowie das verbundene Supply Chain-Risiko automatisiert analysiert werden können. Im nächsten Schritt ist ein *Steuerungsmechanismus* zu entwickeln, welcher die Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie derart koordiniert, dass eine ganzheitliche Lösung identifiziert wird. Der theoretische Mehrwert des integrierten Planungsverfahrens soll abschließend anhand einer *Fallstudie demonstriert* werden. Dazu sind in Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Zielstellungen eines Entscheidungsträgers zu untersuchen.

Abbildung 4.1 stellt eine schematische Übersicht über das zu entwickelnde Instrumentarium dar und skizziert den weiteren Aufbau dieser Arbeit. In Kapitel 5 erfolgt die Konzeption und Entwicklung der domänenübergreifenden Marktsimulation. Anschließend wird in Kapitel 6 ein Optimierungsansatz zur Ermittlung von effizienten Supply Chain-Strategien unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers präsentiert. Schließlich werden in Kapitel 7 die beiden Komponenten zu einem ganzheitlichen Instrumentarium zusammengeführt. Der Lösungsprozess läuft iterativ ab und besteht insgesamt aus der Simulation der Marktdurchdringung des Produktportfolios, der Optimierung der Supply Chain-Strategie sowie der anschlie-

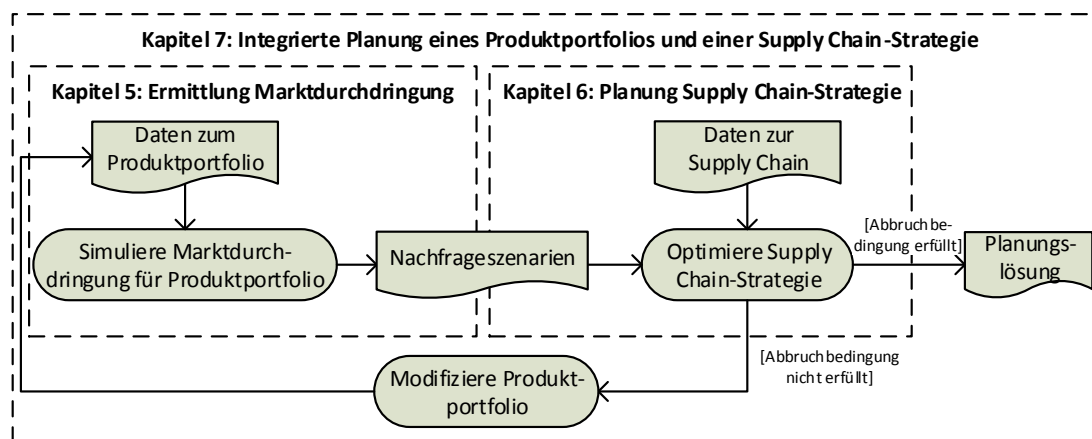


Abbildung 4.1: Kapitelstruktur der weiteren Arbeit in Anlehnung an das zu entwickelnde Instrumentarium

ßenden Modifikation des Produktportfolios. Durch ein solches integriertes Verfahren kann die Marktdynamik berücksichtigt werden, sodass effiziente Produktportfolios und Supply Chain-Strategien identifiziert werden können. Ein solcher Lösungsprozess existiert in der Literatur bisher nicht. Die zu entwickelnden Verfahren sollen im Rahmen dieser Arbeit konzipiert, prototypisch umgesetzt und anhand von Fallstudien evaluiert werden.

5 Ermittlung der Marktdurchdringung für ein Produktportfolio

Die Ergebnisse der Literaturrecherche haben aufgezeigt, dass im Bereich integrierter Planungsansätze zur Ermittlung eines effizienten Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie bisher wenige Arbeiten existieren, welche die Marktdynamik im Modell abbilden. Daher wurde das ganzheitliche Planungsproblem in Kapitel 4 in die zwei Teilprobleme der Bestimmung der Marktdurchdringung für ein Produktportfolio und der Gestaltung der Supply Chain-Strategie dekomponiert.

In diesem Kapitel wird zunächst aus Sicht der Produkt- und Portfoliopolitik das angebotene Produktportfolio betrachtet und ein agentenbasierter diskreter ereignisorientierter Simulationsansatz¹⁷ zur Ermittlung der Marktdurchdringung für Produktvarianten eines Produktportfolios konzipiert. Ziel liegt dabei auf der Domänenunabhängigkeit des Ansatzes, sodass dieser in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt werden kann und es erlaubt, problemspezifische Aspekte der Anwendungsgebiete möglichst einfach zu ergänzen.

Zunächst wird dazu in Abschnitt 5.1 ein Metamodell entwickelt, welches unabhängig von der Domäne die Abbildung der Struktur des betrachteten Planungsproblems erlaubt. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 5.2 die Spezifikation des Simulationsverhaltens. Anschließend wird die Marktsimulation anhand eines Fallbeispiels aus der Domäne der Elektromobilität in Abschnitt 5.3 evaluiert. Dabei werden Ergebnisse von Sensitivitätsanalysen präsentiert und interpretiert, woraus der theoretische Mehrwert der entwickelten Marktsimulation hervorgeht.

5.1 Metamodell zur Abbildung der Problemstruktur für eine Marktsimulation

Im Kontext von Simulationen zur Prognose der Marktdurchdringung von innovativen Produkten besteht Forschungsbedarf bei der Entwicklung einer domänenunabhängigen Simulation, welche die Forschungslücke zwischen abstrakten theoretischen Modellen und problemspezifischen Modellen für spezielle Anwendungsfälle schließt (vgl. Abschnitt 4.4). Um diese Forschungslücke zu adressieren, wird im Folgenden zunächst ein Metamodell zur Spezifizierung der Struktur des Planungsproblems entwickelt.

¹⁷Der Begriff Marktsimulation wird in dieser Arbeit synonym verwendet.

Grundlage hierfür bildet eine im Rahmen des Forschungsprojekts SMART EM¹⁸ entwickelte Marktsimulation. Diese ist für die Betrachtung von Geschäfts- und Marktmodellen ausgelegt (Weskamp et al., 2014). Das konzeptionelle Vorgehen der Marktsimulation wird auf die Problemstellung dieser Arbeit übertragen. Nachfolgend wird ein Überblick über das entwickelte Metamodell gegeben. Anschließend werden die einzelnen Elemente des Metamodells erläutert.

5.1.1 Übersicht über das Metamodell

Ziel der Entwicklung des Metamodells ist es, die Struktur der problemspezifischen Aspekte für die Ermittlung der Marktdurchdringung für innovative Produktvarianten inklusive Betrachtung von kooperierenden und konkurrierenden Angeboten in Form von Produkten und/oder Dienstleistungen generisch abzubilden. Das Metamodell soll dabei unabhängig von der Domäne instanziiert werden können, sodass mit Hilfe der Marktsimulation verschiedene Fallstudien untersucht werden können. Weiterhin soll die generische Struktur eine leichte Erweiterbarkeit sowie eine hohe Adaptierbarkeit bieten (vgl. Abschnitt 4.4 und Abschnitt 4.5). Die dazu entwickelten Modellelemente gliedern sich in Elemente zur Abbildung von Marktmodellen, Kundensegmenten, des Planungszeitraums, der Unsicherheiten sowie Modellelemente zur Definition des Verhaltens der Kunden und Stakeholder. Eine Übersicht aller Modellelemente und deren Zusammenhang ist in Abbildung 5.1 gegeben.

Das *Modellelement zur Abbildung von Marktmodellen* dient dazu, die problemspezifischen Aspekte des Angebotes zu definieren. Das Angebot wird dabei gemäß dessen Eigenschaften in quantitative und qualitative Attribute operationalisiert. Dabei erfolgt eine Differenzierung zwischen angebotenen Produktvarianten und zusätzlichen Dienstleistungen, welche je nach Anbieter einem Marktakteur zugeordnet werden können. Dadurch lassen sich sowohl komplementäre Produktdienstleistungsbündel als auch konkurrierende Angebote in einem Marktmodell abbilden.

Grundvoraussetzung zur Abbildung des Kundenentscheidungsprozesses im Modell ist die Abbildung von Kunden. Strukturen zur Modellierung bietet dabei das *Modellelement zur Abbildung von Kunden*. Dazu werden homogene Kunden in einem Kundensegment zusammengefasst und (äquivalent zum Angebot) Eigenschaften der Kunden in qualitative und quantitative Präferenzen operationalisiert. Diese lassen sich dann weiter in Anforderungsattributen zur Formulierung von Restriktionen und Nutzenattributen zur Formulierung von Zielfunktionen unterteilen. Außerdem unterscheiden sich Kundensegmente anhand von demographischen Eigenschaften, wie beispielsweise das Durchschnittsalter der Kunden.

¹⁸SMART EM - Domänenübergreifende **S**imulation von **M**arktmodellen für eine effektive **E**lektromobilitätsinfrastruktur. Für weitere Informationen zum Forschungsprojekt SMART EM siehe <http://www.smart-em.de/>

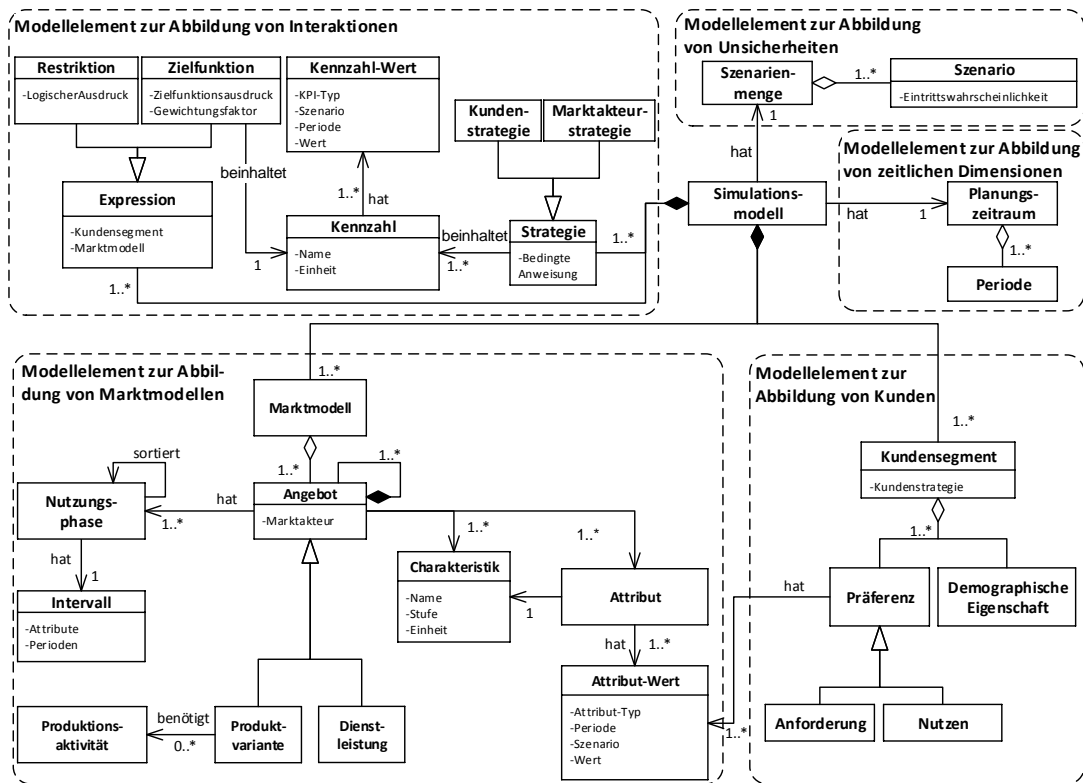


Abbildung 5.1: Metamodell der Marktsimulation

Da sich die Güte eines Produktportfolios nur auf strategischer Ebene ermitteln lässt, muss auch der Zeitverlauf in einem Modellelement berücksichtigt werden. Dazu wird im *Modellelement zur Abbildung von zeitlichen Dimensionen* ein Planungszeitraum mit einer diskreten Anzahl an Perioden abgebildet. Sowohl die Eigenschaften der Produktvarianten als auch die der Kundensegmente können sich im Zeitverlauf ändern, weshalb sich Attribute in Abhängigkeit einer Periode definieren lassen müssen. Zudem unterliegen zum Zeitpunkt der Planung einige Einflussfaktoren Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 2.3.3). Innerhalb des Metamodells können diese im *Modellelement zur Abbildung von Unsicherheiten* abgebildet werden. Dieses Modellelement bietet die Möglichkeit eine endliche Anzahl an Szenarien zu spezifizieren, welche zu einer Menge von Szenarien zusammengefasst werden und so die möglichen zukünftigen Situationen repräsentieren. Da Unsicherheiten sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite betreffen können, ist es möglich, Attribute der Marktmodelle und Kundensegmente in Abhängigkeit eines Szenarios zu definieren.

Schließlich stellt das *Modellelement zur Abbildung von Interaktionen* Möglichkeiten zur Abbildung der Dynamik zwischen Kunden und dem Angebot bereit. Durch diese Strukturen kann somit das Kundenverhalten in Abhängigkeit des jeweiligen Ange-

botes modelliert werden. Dazu können sowohl Restriktionen als auch Zielfunktionen zwischen Marktmodellen und Kundensegmenten definiert werden. Außerdem können für Agenten der Simulation (d.h. Kundensegmente und Marktakteure) Strategien definiert werden. Diese spezifizieren, in welcher Form Agenten auf veränderte Umweltzustände reagieren. Dazu wurden Strukturen zur Definition von Entscheidungsregeln im Metamodell hinzugefügt. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Modellelemente näher spezifiziert. Zur Veranschaulichung werden dabei beispielhafte Instanziierungen gegeben.

5.1.2 Abbildung von zeitlichen Dimensionen

Produktvarianten eines Produktportfolios werden Kunden über verschiedene Phasen eines Produktlebenszyklus angeboten (Stark, 2011, S.2). Die Identifizierung eines effizienten Produktportfolios erfordert daher die Betrachtung des gesamten Planungszeitraums, in dem das Angebot an die Kunden besteht. Somit erfordert auch eine Marktsimulation zur Prognose der Marktdurchdringung ein entsprechendes Modellelement zur Repräsentation eines Planungszeitraums.

In dieser Arbeit wird die Simulationszeit über eine Menge an diskreten Perioden realisiert, sodass Übergänge zwischen Simulationszuständen zu diskreten Zeitpunkten stattfinden. In der Literatur finden sich derartige Ansätze der diskreten Simulationen in solchen Anwendungsgebieten wieder, in denen eine kontinuierliche Zeitbetrachtung wenig zusätzlichen Mehrwert hinsichtlich der Ergebnisse liefert und in denen durch die kontinuierliche Zeitbetrachtung entstehende hohe Rechenkomplexität zu aufwendig ist (Law, 2014). Da in dieser Arbeit strategische Entscheidungen getroffen werden, reicht es aus, den Kaufentscheidungsprozess in regelmäßigen Abständen an diskreten Zeitpunkten durchzuführen. Dieses Vorgehen wird im Kontext von Marktsimulationen zur Prognose der Marktdurchdringung von innovativen Produkten häufig angewendet (vgl. bspw. Kieckhäfer (2013, S.100)).

Das Modellelement zur Abbildung von zeitlichen Dimensionen enthält einen Planungszeitraum mit beliebig vielen Perioden. Ein Planungszeitraum beginnt dabei mit einer Periode, welche den aktuellen Planungszeitpunkt markiert und endet mit einer Periode zur Abbildung des Planungshorizonts. Zwischen dem Planungszeitpunkt und dem Planungshorizont können entsprechend der Präferenzen des Entscheidungsträgers beliebig viele weitere Perioden definiert werden (vgl. Abbildung 5.2). So hat ein Entscheidungsträger die Möglichkeit, in Abhängigkeit des Produktlebenszyklus und des Investitionsvolumens die zeitliche Auflösung der Betrachtung individuell festzulegen¹⁹. Als Resultat dieses Modellelements steht schließlich die Möglichkeit, Eigenschaften der Marktmodelle und Kundensegmente dynamisch im Zeitverlauf zu mo-

¹⁹Beispielsweise können Entscheidungen, die mit größeren Investitionen verbunden sind mit höherer zeitlichen Auflösung betrachtet werden als Entscheidungen mit geringeren Investitionsvolumen.

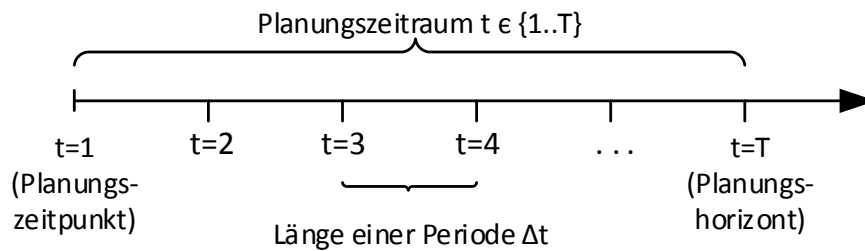


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Simulationszeit

dellieren. So kann beispielsweise eine Zeitreihe definiert werden, welche eine Trend-, Saison- und Störkomponente beinhaltet.

5.1.3 Abbildung von Unsicherheiten

Für die Ermittlung der zukünftigen Marktdurchdringung eines Produktportfolios müssen unsichere Einflussfaktoren als Eingabedaten berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). So können beispielsweise zukünftige Preise von Wettbewerbern oder das Kundenverhalten nur prognostiziert werden und unterliegen somit zum Planungszeitpunkt Unsicherheiten.

Um diesen Problemaspekt im Metamodell zu berücksichtigen, wird im Modellelement der Unsicherheiten eine Menge an Szenarien abgebildet. Jedes dieser Szenarien stellt eine mögliche zukünftige Situation dar und realisiert sich mit einer definierten Eintrittswahrscheinlichkeit. Unsichere Einflussfaktoren können somit durch die Marktmodell- und Kundensegmentattribute in Abhängigkeit dieser Szenarien definiert werden. Im Fall von mehreren betrachteten unsicheren Einflussfaktoren müssen deren Ausprägungen innerhalb der einzelnen Szenarien konsistent zueinander sein. Abbildung 5.3 stellt die konsistente Zusammenfassung zweier unsicherer Einflussfaktoren schematisch dar. Für beide Einflussfaktoren ist jeweils eine positive und negative Entwicklung im Zeitverlauf gegeben. Im Beispiel wird in Szenario 1 die negative Entwicklung der Einflussfaktoren zusammengefasst, während die positive Entwicklung entsprechend in Szenario 2 abgebildet wird. Zur Bildung dieser konsistenten Szenarien kann beispielsweise die Methodik der Szenario-Technik eingesetzt werden (vgl. (von Reibnitz, 1992)). Weiterhin werden diejenigen Werte, die keinen Unsicherheiten unterliegen, wie beispielsweise die Ausprägung von Einflussfaktoren zu Beginn des Planungszeitraums, als szenario-unabhängiges Attribut modelliert. Dadurch ergibt sich für diese ein identischer Attribut-Wert über alle Szenarien.

Zusammenfassend erlaubt das Modellelement zur Abbildung von Unsicherheiten dem Entscheidungsträger Eigenschaften des Angebotes und der Kundensegmente als unsichere Größen zu modellieren. Dies ermöglicht der Marktsimulation je Szenario

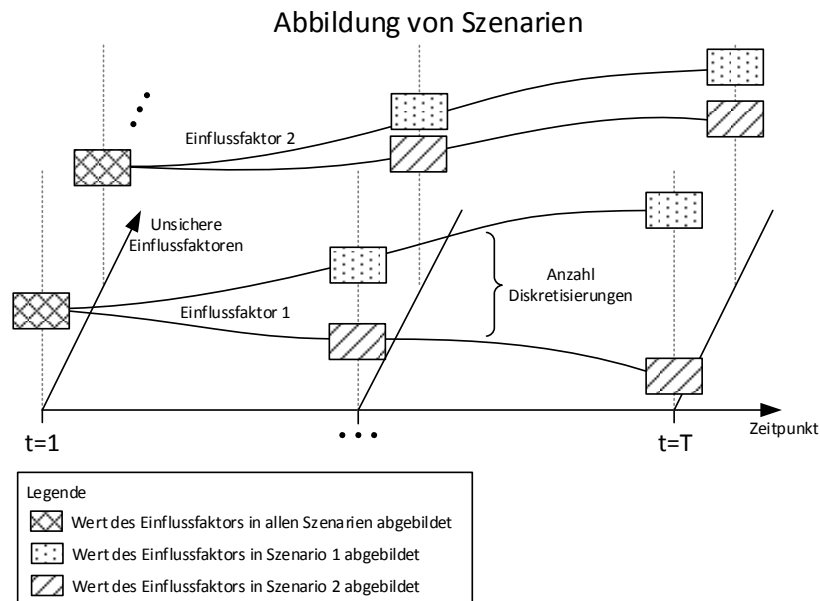


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung von Szenarien

die Ermittlung der prognostizierten zukünftigen Marktdurchdringung von Marktmodellen. Dadurch lassen sich aus Perspektive des Entscheidungsträgers Risikobetrachtungen für verschiedene Einflussfaktoren vornehmen.

5.1.4 Abbildung von Marktmodellen

Wie in Abschnitt 4.4 herausgestellt, bieten bisherige Marktsimulationen keine generischen Strukturen an, um das Gesamtangebot aus Marktsicht unter Berücksichtigung von Produktvarianten, Dienstleistungen sowie verschiedenen Erlösmodellen ganzheitlich zu spezifizieren. Daher wird in diesem Abschnitt ein solches Modell-element zur Spezifizierung von Marktmodellen definiert. Grundlage hierfür stellt eine von Becker et al. (2009) entwickelte Modellierungssprache für hybride Produkt-Dienstleistungsbündel (H2-ServPay) dar. H2-ServPay zielt darauf ab, einen individuellen Kunden bei der Konfiguration eines hybriden Produkt-Dienstleistungsbündels zu unterstützen, indem diese Bündel aus einer Menge an Optionen konfiguriert werden. Auf Anbieterseite erfolgt dabei eine Kostenberechnung für die durchzuführenden Aktivitäten und Ressourcen, sodass das entwickelte Modell sowohl Anbietern beim Verkauf von Produkt-Dienstleistungsbündeln als auch Kunden beim Kauf eines Produkt-Dienstleistungsbündels als Instrument zur Entscheidungsunterstützung dient. Dagegen werden in H2-ServPay ein Marktumfeld mit möglichen kooperierenden und konkurrierenden Anbietern sowie unsichere Einflussfaktoren nicht berücksichtigt, weshalb Erweiterungen notwendig sind.

Das Modellelement zur Abbildung von Marktmodellen ermöglicht die Definition eines Marktumfelds, in welchem verschiedene Marktmodelle im Wettbewerb zueinander stehen. Ein Marktmodell fasst dabei mehrere komplementäre Angebote bestehend aus Produktvarianten und/oder Dienstleistungen zusammen. Um Produktvarianten möglichst einfach zu definieren, können Angebote hierarchisch aufgebaut werden, sodass bereits definierte Komponenten in anderen Varianten wiederverwendet werden können (wie auch in Becker et al. (2009)). Ein Angebot wird durch einen Marktakteur bereitgestellt, welcher mehrere Angebote in unterschiedlichen Marktmodellen formulieren kann. Produktvarianten und Dienstleistungen unterscheiden sich grundsätzlich darin, dass Produktvarianten des betrachteten Unternehmens Produktionsaktivitäten erfordern, wodurch bei der Herstellung Produktionskosten anfallen. Weiterhin werden Produktvarianten und Dienstleistungen durch eine attributbasierte Darstellung repräsentiert, indem beliebig viele Produktcharakteristiken definiert werden können. Zu jedem Charakteristikum kann eine Menge an Ausprägungen (Attribute) spezifiziert werden. Anhand dieser wird im Kaufentscheidungsprozess die Güte eines Angebots durch den Kunden ermittelt. Folgende Typen von Attributen werden dabei unterschieden:

- **Qualitative vs. quantitative Attribute:** Einige Charakteristiken, wie beispielsweise die Marke eines Produktes, können nur durch qualitative Ausprägungen auf einer Nominalskala beschrieben werden. Solche Attribute können innerhalb des Kundenentscheidungsprozesses Bestandteil einer Restriktion darstellen, wobei die logischen Operatoren „=“ und „≠“ in der Restriktion verwendet werden können (siehe auch Abschnitt 5.1.6). Andere Charakteristiken können durch quantitative Ausprägungen auf einer Ordinal- oder Kardinalskala beschrieben werden. Attribute mit einer Ordinal- oder Kardinalskala können innerhalb des Kundenentscheidungsprozesses Bestandteil einer Restriktion sein, wobei die logischen Operatoren „=“, „≠“, „≤“ und „≥“ in der Restriktion verwendet werden können. Zudem können Attribute mit Kardinalskala in eine Zielfunktion der Kundensegmente einfließen.
- **Statische vs. dynamische Attribute:** Einige Ausprägungen von Charakteristiken, wie beispielsweise der Preis eines Produktes, können im Zeitverlauf variieren (dynamische Attribute). So können Trendkomponenten, saisonale Einflüsse und Strukturbrüche durch Zeitreihen abgebildet werden. Dadurch kann das Angebot durch die Kunden zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich wahrgenommen und bewertet werden. Im Gegensatz dazu verändern sich statische Attribute über den gesamten Planungszeitraum nicht.
- **Deterministische vs. stochastische Attribute:** Deterministische Attribute werden unabhängig von einem Szenario definiert, sodass sich die Ausprägungen über die Szenarien nicht unterscheiden. Bei stochastischen Attributen können

die Ausprägungen dagegen in Abhängigkeit eines Szenario spezifiziert werden. Routinen zur Überprüfung der Konsistenz stellen dabei sicher, dass für eine Charakteristik je Szenario genau ein Attribut definiert ist.

Schließlich bieten die Modellkomponenten der Nutzungsphase und der Intervalle die Möglichkeit, verschiedene Nutzungsphasen der Kunden abzubilden. Diese sind in Anlehnung an Becker et al. (2009) modelliert, sodass in Abhängigkeit der Nutzungsphase die Eigenschaften der Angebote über den Nutzungszeitraum der Kunden definiert werden können. So kann beispielsweise modelliert werden, dass ein Kaufpreis für ein Angebot zum Zeitpunkt der Anschaffung anfällt, während über den Nutzungszeitraum variable Verbrauchskosten entstehen. Dadurch ist es möglich verschiedene Erlösmodelle, wie beispielsweise Leasing, zu modellieren.

5.1.5 Abbildung von Kunden

Um den Kaufentscheidungsprozess auszuwerten, müssen neben den Angeboten der Marktteilnehmer auch die Kunden betrachtet werden. H2-ServPay bietet die Möglichkeit, für einen individuellen Kunden Präferenzen abzubilden, betrachtet dabei jedoch nicht den Kaufentscheidungsprozess von mehreren in Kundensegmenten angeordneten Kunden. Marktsimulationen für innovative Produkte schließen diese Lücke und betrachten üblicherweise heterogene Kunden sowie deren Eigenschaften (vgl. beispielsweise Kieckhäfer (2013) und Gnann et al. (2015)). Auch in dieser Arbeit werden heterogene Kunden betrachtet, welche gemäß ihrer demographischen Eigenschaften und Präferenzen zu Kundensegmenten zusammengefasst werden. Diese Struktur ist konsistent mit den von Al-Alawi und Bradley (2013) vorgeschlagenen Konzepten.

So werden im Modellelement zur Abbildung von Kunden zunächst verschiedene Kunden innerhalb eines Kundensegments zusammengefasst. Ein Kundensegment lässt sich anhand der Präferenzen und demographischen Eigenschaften der Kunden klassifizieren. Präferenzen stellen die kaufentscheidenden Kriterien an die Marktmodelle dar und lassen sich weiterhin in Anforderungs- und Nutzenattribute aufteilen. Durch diese Unterscheidung kann ein zwei-stufiger Entscheidungsprozess der Kunden in Anlehnung an Mueller und de Haan (2009) abgebildet werden. Zunächst werden dabei die angebotenen Marktmodelle von den Kunden analysiert und diejenigen ausgefiltert, welche nicht den Restriktionen der Kunden entsprechen. Diese können auf Basis der Anforderungsattribute in Hinblick auf die Marktmodelle spezifiziert werden. Die verbleibenden Marktmodelle werden in einer zweiten Phase hinsichtlich des Nutzens für den Kunden durch eine Zielfunktion bewertet. Eine solche Zielfunktion definiert den Nutzen eines Kundensegmentes für ein Marktmodell und kann unter Verwendung der Nutzenattribute erstellt werden. Diese Attribute folgen den Strukturen der attributbasierten Darstellung innerhalb der Marktmodelle und können zeitlich und szenarioabhängig definiert werden.

Weiterhin stellen demographische Eigenschaften grundlegende Aspekte zur Beschreibung eines Kundensegments dar. Dazu zählen beispielsweise das Durchschnittsalter oder Durchschnittseinkommen der Kunden. Durch diese Informationen können später Analysen hinsichtlich der Käuferart durchgeführt werden.

Um das Kundenverhalten weiter zu spezifizieren, können schließlich noch Kundenstrategien definiert werden. Derartige Strategien definieren Handlungen, die unter bestimmten Bedingungen bzw. Voraussetzungen ausgeführt werden. Dadurch können die einzelnen Kundensegmente (Agenten) miteinander interagieren. Die Funktionsweise dieser Kundenstrategien wird im Folgenden Abschnitt erläutert.

5.1.6 Abbildung von Interaktionen von Marktteilnehmern

Die bisherigen Modellelemente stellen Strukturen zur Abbildung der Problemaspekte des Marktumfelds, der Kundensegmente sowie der zeitlichen Dimension und Unsicherheiten zur Verfügung. Darüber hinaus werden noch Modellelemente benötigt, welche Strukturen zur Abbildung der Wahrnehmung des Angebotes aus Kundensicht bilden. Ein solches Modellelement soll die Grundlage für den Kaufentscheidungsprozess bereitstellen und als Schnittstelle zwischen dem Angebot und den Kundensegmenten fungieren. Weiterhin gilt es auf Basis des dynamischen Marktumfelds unterschiedliche Marktteilnehmer inklusive ihrer Interessen und Strategien zu berücksichtigen. Ein Informationsaustausch der Marktteilnehmer untereinander kann dabei zu einem veränderten Entscheidungsverhalten bei anderen Marktteilnehmern führen. Um diese Problemaspekte im Metamodell abzubilden, werden zunächst (Ergebnis-) Kennzahlen benötigt auf deren Basis die Kaufentscheidungsprozesse bzw. Strategien durchgeführt werden.

Strukturen zur Abbildung von (Ergebnis-) Kennzahlen

Ein Modellelement zur Abbildung von Kennzahlen ermöglicht zunächst die Definition von unterschiedlichen Messgrößen zur Bewertung von Zuständen der Simulation. Durch Kennzahlen kann so beispielsweise der Nutzen eines Marktmodells für ein Kundensegment oder das realisierte Marktvolumen eines Marktmodells in einem Szenario ausgedrückt werden. Derartige Kennzahlen können dabei auf verschiedenen Ebenen definiert werden, welche die Art der Ermittlung sowie die spätere Verwendung im Rahmen der Marktsimulation vorgeben. Dabei wird zwischen folgenden Typen von Kennzahlen differenziert:

- **Statische vs. dynamische Kennzahlen:** Dieser Typ bestimmt, ob eine Kennzahl in Abhängigkeit der zeitlichen Dimension definiert und ermittelt wird. Statische Kennzahlen werden unabhängig von der zeitlichen Dimension definiert. Dazu zählen Kennzahlen, die den gesamten Planungszeitraum betreffen. Als Beispiel für eine statische Kennzahl ist die Gesamtnachfrage nach einem

Marktmodell aufzuführen. Im Gegensatz dazu werden dynamische Kennzahlen in Abhängigkeit eines diskreten Zeitpunktes definiert und können folglich mit Fortschreiten der Simulationszeit variieren. Dazu zählt beispielsweise die Anzahl der Kundenentscheidungen für ein Marktmodell zu einem bestimmten Zeitpunkt.

- **Szenario-spezifische vs. Szenario-übergreifende Kennzahlen:** Diese Art von Kennzahl gibt an, ob die Definition und Ermittlung der Kennzahl in Abhängigkeit eines Szenarios erfolgt. Szenario-spezifische Kennzahlen werden verwendet, um Größen innerhalb eines Szenarios auszudrücken. Dazu zählt beispielsweise die Marktdurchdringung in einem bestimmten Szenario. Dagegen aggregieren Szenario-übergreifende Kennzahlen entsprechende Größen über mehrere Szenarien und können so beispielsweise einen Erwartungswert über alle Szenarien ausdrücken.
- **Kennzahlen in Abhängigkeit eines Marktmodells bzw. eines Kundensegments:** Kennzahlen lassen sich weiterhin klassifizieren, ob diese für ein spezifisches Marktmodell oder Kundensegment definiert und ermittelt werden. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise das Marktvolumen für ein gegebenes Marktmodell oder ein Zielfunktionswert für ein spezifisches Kundensegment spezifiziert werden soll.
- **Simulationsinterne vs. benutzerdefinierte Kennzahlen:** Simulationsinterne Kennzahlen stellen vordefinierte Kennzahlen dar, welche in jeder Instanziierung eines Simulationsmodells zur Verfügung stehen. Dazu zählt die Anzahl an Kunden eines Kundensegmentes, welche sich zu einem diskreten Zeitpunkt in einem Szenario für ein Marktmodell entscheiden. Benutzerdefinierte Kennzahlen können auf Basis von mathematischen Ausdrücken je nach Instanz und Untersuchungsgegenstand individuell spezifiziert werden. In einem solchen mathematischen Ausdruck können dabei quantifizierte kardinale Marktmodellattribute, Kundenpräferenzen und andere Kennzahlen enthalten sein.

Mithilfe dieser Strukturen zur Formulierung von Kennzahlen können Ergebnisgrößen der Marktsimulation durch den Entscheidungsträger spezifiziert werden. Weiterhin dienen Kennzahlen als Kriterien im Rahmen des Entscheidungsprozesses der Kundensegmente. Dazu wird das Metamodell um zusätzliche Modellstrukturen zur Abbildung der Wahrnehmung des Angebotes aus Kundensicht erweitert.

Strukturen zur Abbildung des Kundenentscheidungsprozesses

Zur Abbildung des Kundenentscheidungsprozesses wird in der Literatur häufig ein auf Mueller und de Haan (2009) basierender zweistufiger Entscheidungsprozess eingesetzt. Dieser beinhaltet in der ersten Phase zunächst die Selektion der aus Kundensicht validen Marktmodelle. In einer zweiten Phase werden anschließend alle validen

Marktmodelle bewertet und zuletzt die beste Alternative ausgewählt. Existierende Ansätze betrachten dabei meistens ein domänenspezifisches Konzept, sodass in der Phase der Selektion der von Kunden berücksichtigten Marktmodelle feste Attribute innerhalb des Simulationsmodells verwendet werden²⁰.

Um eine domänenübergreifende Anwendbarkeit zu gewährleisten erfolgt in dieser Arbeit die Formulierung eines generischen Konzeptes zur Spezifizierung der Modellelemente für die Selektions- und Auswahlphase. Dazu wird ein Modellelement zur Abbildung von mathematischen Ausdrücken verwendet, sodass für Kundensegmente Restriktionen und Zielfunktionen definiert werden können.

Restriktionen stellen dabei aus Kundensicht harte Anforderungen an die Marktmodelle dar und verbinden Marktmodell- sowie Kundensegmentattribute über logische Ausdrücke. Je nach Typ des Attributes stehen dazu Vergleichsoperatoren (d.h. „=“, „≠“, „≤“ und „≥“) zur Verfügung. Dabei wird sichergestellt, dass nur Attribute vom gleichen Typ innerhalb einer Restriktion verwendet werden. Zwischen Marktmodellen und Kundensegmenten können allgemeingültige oder spezifische Restriktionen formuliert werden. Während allgemeingültige Verknüpfungen zwischen allen Marktmodellen und allen Kundensegmenten gelten, sind spezifische Verknüpfungen jeweils zwischen genau einem Marktmodell und einem Kundensegment definiert.

Weiterhin spezifiziert eine Zielfunktion eine mathematische Funktion, welche aus Sicht eines Kundensegments verwendet wird, um den Nutzen eines Marktmodells in Abhängigkeit der enthaltenen Attribute auszudrücken. Zielfunktionen werden in der Auswahlphase ausgewertet, sodass schließlich die Alternative mit dem größten Nutzen identifiziert werden kann. Eine Zielfunktion verknüpft dabei kardinale Attribute eines Marktmodells mittels Rechenoperatoren mit Nutzenattributen eines Kundensegmentes. Für jede Zielfunktion ist eine Optimierungsrichtung definiert. Zudem wird mittels Kennzahlen ein Ergebnistyp für eine Zielfunktion spezifiziert. Wird mehr als eine Zielfunktion definiert, so muss je Zielfunktion ein Gewichtungsfaktor definiert werden mit der die jeweilige Zielfunktion in das Gesamtergebnis einfließt.

Abbildung 5.4 stellt eine beispielhafte Modellierung für eine Restriktion und eine Zielfunktion aus der Domäne der Elektromobilität dar. Die Restriktion stellt sicher, dass Kundensegmente nur solche Marktmodelle in den Auswahlprozess einbeziehen, mit denen sie ihren Mobilitätsbedarf erfüllen können. Dazu wird ein entsprechendes Marktmodellattribut definiert, welches angibt, ob ein Marktmodell m den Mobilitätsbedarf eines Kundensegments k zum Zeitpunkt t in Szenario s erfüllt. Dieses wird mit einer Kundenpräferenz hinsichtlich der Erfüllbarkeit verglichen. Dabei wird im

²⁰So beschränken sich beispielsweise in der Domäne der Elektromobilität Kieckhäfer et al. (2014) auf die Betrachtung der Fahrzeuggröße und des Fahrzeugantriebs, während Gnann et al. (2015) die Fahrzeuggröße und die Erfüllbarkeit des Mobilitätsbedürfnisses eines Kunden mit in den Auswahlprozess einbeziehen.

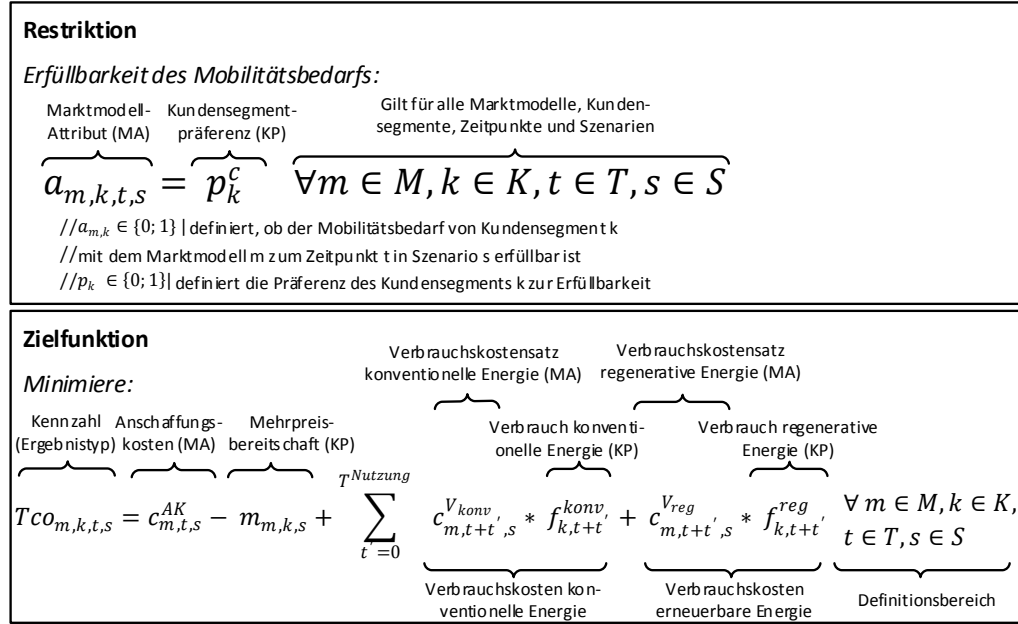


Abbildung 5.4: Beispielhafte Modellierung von Restriktionen und Zielfunktionen

Beispiel aus Kundensegmentsicht k die Anforderung gestellt, dass ein Marktmodell zeit- und szenario-unabhängig die Erfüllbarkeit des Mobilitätsbedarfs sicherstellt. Die Marktmodellattribute sowie die Kundenpräferenz sind dabei auf Basis einer Ordinalskala definiert.

Weiterhin ist in Abbildung 5.4 die Minimierung der Total-Cost-of-Ownership Kennzahl beispielhaft als Zielfunktion abgebildet. Die Kennzahl wird dabei in Abhängigkeit eines Marktmodells m , eines Kundensegments k und zum Zeitpunkt der Anschaffung t für ein Szenario s bestimmt. Dazu werden die innerhalb eines Marktmodells anfallenden einmaligen Anschaffungskosten, die wiederkehrenden Verbrauchskosten über die gesamte Nutzungsphase sowie die Mehrpreisbereitschaft des Kundensegments summiert. Die Total-Cost-of-Ownership Kennzahl wird in diesem Beispiel für jede Kombination von validem Marktmodell und Kundensegment sowie in Abhängigkeit des Anschaffungszeitpunkts t und Szenarios s bestimmt.

Strukturen zur Abbildung von Interaktionen zwischen Marktteilnehmern

Marktteilnehmer können sich durch Informations- und Kommunikationsflüsse gegenseitig beeinflussen, wodurch auch die Diffusionsgeschwindigkeit einer Innovation beeinträchtigt werden kann (vgl. beispielsweise (Rogers, 2003)). Durch den Austausch von Informationen entsteht ein dynamisches Marktumfeld, indem Akteure auf veränderte Umgebungsbedingungen mit neuen Handlungsentscheidungen reagieren und so

beispielsweise das vorhandene Marktangebot anpassen können. Auch Kunden interagieren miteinander und können sich in ihrem Kaufverhalten gegenseitig beeinflussen, indem beispielsweise Adaptoren Kaufentscheidungen von Innovatoren nachahmen (vgl. (Rogers, 2003)). Um diese Dynamiken im Simulationsmodell darzustellen, bieten agentenbasierte Simulationen die Möglichkeit, Marktteilnehmer (d.h. Agenten) mit eigenem Entscheidungsverhalten zu modellieren sowie Auswirkungen von Handlungsentscheidungen auf den Umweltzustand abzubilden (Bonabeau, 2002).

Um diese Problemaspekte zu modellieren, sind im Modellelement der Interaktionen Strukturen zur Spezifizierung von Strategien für Kundensegmente und Marktakteure umgesetzt. Die für einen Marktteilnehmer definierte Strategie spezifiziert dabei, mit welchen Handlungen Marktteilnehmer auf einen eintretenden Umweltzustand reagieren. Das Metamodell bietet dabei die Möglichkeit solche Strategien als bedingte Anweisung zu formulieren. Als Bedingung können dabei die oben spezifizierten Kennzahlen im Rahmen eines logischen Ausdrucks miteinander verknüpft werden. Als Anweisung können verschiedene Aktionen zur Modifizierung der Marktmodell- und Kundensegmenteigenschaften spezifiziert werden. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

5.2 Verhalten der Marktsimulation

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt Modellelemente zur Abbildung der Problemstruktur beschrieben worden sind, erfolgt in diesem Abschnitt die Spezifizierung des Verhaltens der Simulation. Dazu wird zunächst in Abschnitt 5.2.1 die Simulationsart spezifiziert. Anschließend erfolgen die Beschreibung des Ablaufs des Kundenentscheidungsprozesses sowie der Prozess zur Interaktion der Marktteilnehmer in Abschnitt 5.2.2.

5.2.1 Klassifizierung der Simulationsart

Law (2014, S. 5 f.) klassifiziert Simulationsmodelle anhand von drei Dimensionen. Diese Dimensionen umfassen die Betrachtung des Zeitverlaufs (statische vs. dynamische), die Modellierung der Eingangsdaten und Prozesse (deterministische vs. stochastische) und die Art der Zustandsübergänge innerhalb eines Simulationsmodells (kontinuierliche vs. diskrete). Im Folgenden wird zunächst die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulation anhand dieser Dimensionen eingeordnet.

Zur Ermittlung der Nachfrage nach den einzelnen Marktmodellen, wird ein *dynamischer* Simulationsansatz verwendet, sodass die Durchdringung der Marktmodelle im Zeitverlauf betrachtet werden kann. Die Verwendung eines statischen Simulations-

ansatzes würde dagegen Parameteränderungen in Abhängigkeit der zeitlichen Komponente nicht erlauben. Da jedoch Parameter sowohl innerhalb der Marktmodelle als auch innerhalb der Kundensegmente variieren können und Marktteilnehmer in Abhängigkeit der ermittelten Nachfrage Strategieänderungen, wie beispielsweise die Reduzierung von Kaufpreisanreizen aufgrund einer erreichten angestrebten Marktdurchdringung, durchführen können, ist ein dynamischer Simulationsansatz notwendig.

Weiterhin sind innerhalb der Marktsimulation alle Prozesse deterministisch abgebildet und zudem sämtliche Eingangsdaten zum Simulationsstart bereits vorgegeben. Auch die Daten der unsicheren Parameter sind über Szenarien abgebildet (d.h. innerhalb eines Szenarios sind die Ausprägungen eines Parameters deterministisch vorgegeben). Somit handelt es sich um einen *deterministischen* Simulationsansatz.

Die dritte Dimension spezifiziert die Art der Zustandsübergänge innerhalb der Simulation. In der entwickelten Marktsimulation sind dabei Zustandsübergänge an *diskreten* Zeitpunkten möglich. Dies bedeutet, dass sämtliche Interaktionen der Marktteilnehmer zu diesen Zeitpunkten ausgeführt werden und impliziert, dass auch Ergebnisse bezüglich der Marktdurchdringung für diese Zeitpunkte bestimmt werden.

In der Literatur werden agentenbasierte Simulationen verwendet, um eine Menge an Agenten mit eigenem Entscheidungsverhalten abzubilden (Bonabeau, 2002). Die in dieser Arbeit entwickelte Marktsimulation basiert auf einer diskreten ereignisorientierten Simulation, welche Konzepte der agentenbasierten Simulation integriert, um das Verhalten verschiedener Marktteilnehmer im Modell abbilden zu können. Dabei kann das Verhalten und die Strategie individuell für einen Marktteilnehmer durch die in Abschnitt 5.1 präsentierte Modellstruktur festgelegt werden.

5.2.2 Ablauf der Marktsimulation

Basierend auf der oben spezifizierten Simulationsart ist das Verhalten der Simulation entsprechend umgesetzt. Ausgangspunkt ist die Initialisierung der Simulation durch einen Entscheidungsträger. Dazu sind die Marktmodelle, die entsprechenden Akteure und Kundensegmente mit den jeweiligen Strategien sowie dem betrachteten Planungszeitraum und mögliche Unsicherheiten zu spezifizieren. Der grundlegende Ablauf des Simulationsalgorithmus ist in Abbildung 5.5 dargestellt und lässt sich mit der Auswertung der Restriktionen und Zielfunktionen der Kunden, der Durchführung des Kundenentscheidungsprozesses sowie des Interaktionsprozesses der Marktteilnehmer zu drei Prozessschritten zusammenfassen.

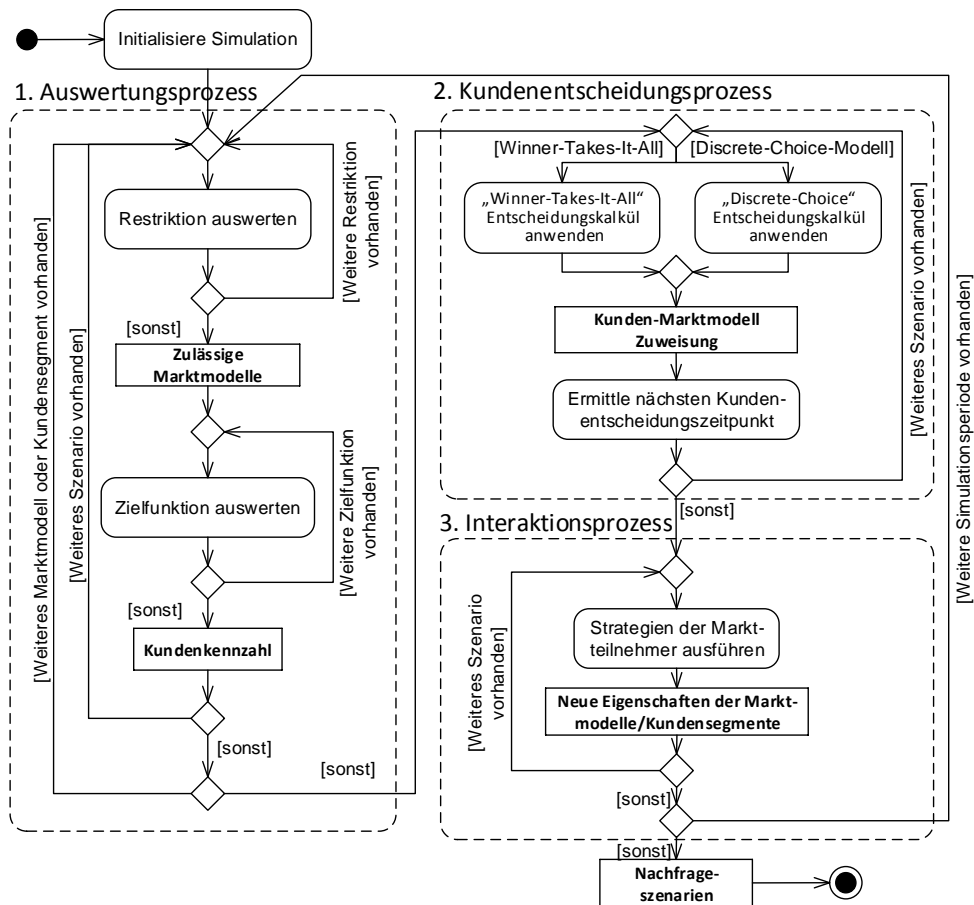


Abbildung 5.5: Überblick über den Ablauf der Marktsimulation

Auswertungsprozess der Kundenpräferenzen und Restriktionen

In einem ersten Prozessschritt wird zunächst für jedes sich aktuell im Entscheidungsprozess befindende Kundensegment die Menge der zulässigen Marktmodelle sowie deren Kundenkennzahlen (d.h. deren Zielfunktionswerte) ermittelt. Dabei werden alle am Markt zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung offerierten Marktmodelle berücksichtigt. Das Ergebnis dieses Prozesses stellt später die Grundlage für die tatsächliche Kaufentscheidung der Kundensegmente dar. Der Auswertungsprozess ist dabei in Anlehnung an Mueller und de Haan (2009) als zweistufiger Prozess umgesetzt.

Der Ablauf dieses ersten Prozessschrittes ist in Abbildung 5.6 weiter spezifiziert. Zunächst wird für jedes Kundensegment die Menge der zulässigen Marktmodelle ermittelt (vgl. linkes Ablaufdiagramm von Abbildung 5.6). Diese Menge repräsentiert die Marktmodelle, welche von einem Kundensegment in den Entscheidungsprozess

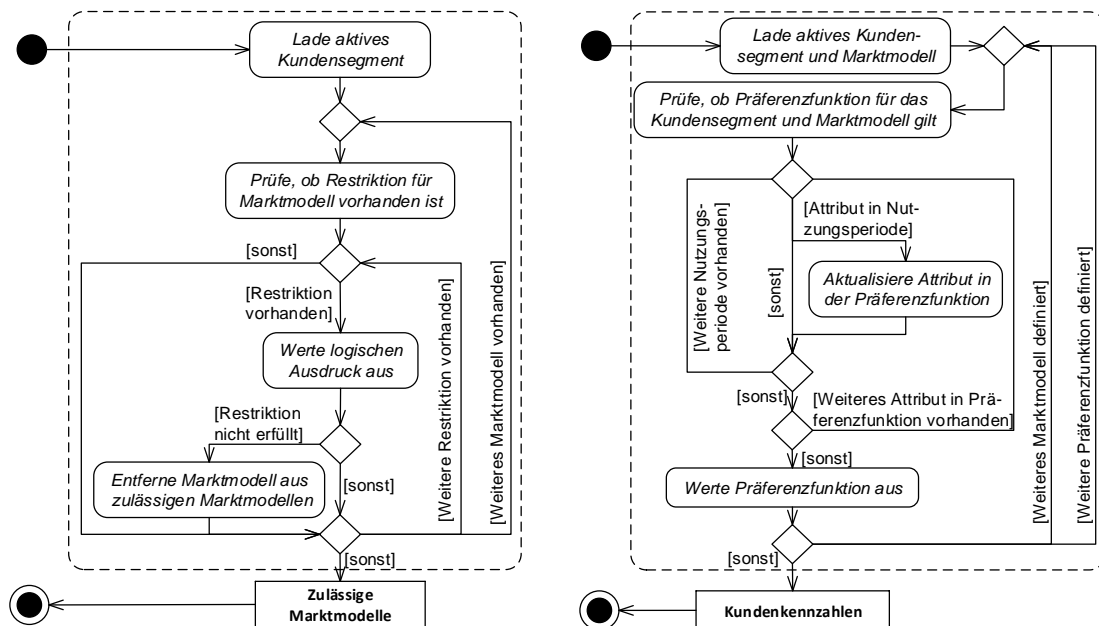


Abbildung 5.6: Ablauf der Auswertung von Restriktionen und Präferenzen von Kundensegmenten

einbezogen wird. Dazu werden alle Restriktionen eines Kundensegments iterativ auf deren Erfüllbarkeit geprüft, indem der in einer Restriktion formulierte logische Ausdruck in Abhängigkeit eines Marktmodells ausgewertet wird. Falls ein Marktmodell eine solche Restriktion nicht erfüllt, wird dieses aus der Menge der zulässigen Marktmodelle entfernt.

Auf Basis der zulässigen Menge an Marktmodellen wird anschließend für jedes dieser Marktmodelle mindestens eine Kundenkennzahl ermittelt (vgl. rechtes Ablaufdiagramm von Abbildung 5.6). Dazu werden die als mathematische Ausdrücke definierten Zielfunktionen der Kundensegmente ausgewertet. Zur Auswertung werden die im mathematischen Ausdruck enthaltenen Attribute mit den entsprechenden Ausprägungen in Abhängigkeit der Nutzungsperiode und des Szenarios iterativ initialisiert, sodass anschließend der Ergebniswert der Zielfunktion berechnet werden kann. Dieses Vorgehen wird für alle Zielfunktionen eines Marktmodells sowie anschließend für die weiteren zulässigen Marktmodelle wiederholt, sodass schließlich eine Matrix resultiert, welche für jede Kombination von Kundensegment und Marktmodell Kundenkennzahlen beinhaltet.

Kundenentscheidungsprozesses

Auf Basis der berechneten Kundenkennzahlen wird in einem zweiten Prozessschritt der Kundenentscheidungsprozess simuliert. Dabei wird durch die Marktsimulation

ermittelt, auf welches Marktmodell welche Kundensegmente mit wie vielen Kunden ihre Nachfrage richten. Die Anzahl der Käufer wird über die Kaufwahrscheinlichkeit und die sich zum Entscheidungszeitpunkt im Entscheidungsprozess befindenden Kunden dabei wie folgt berechnet:

$$n_{k,m,t,s} = p_{k,m,t,s} * N_{k,t,s}^G \quad (5.1)$$

mit:

$n_{k,m,t,s}$: Anzahl Kunden eines Kundensegments k , die sich in Periode t und in Szenario s für Marktmodell m entscheiden.

$p_{k,m,t,s}$: Kaufwahrscheinlichkeit ($p \in \mathbb{R} | 0 \leq p \leq 1$) für ein Kundensegment k , welches sich in Periode t und in Szenario s für Marktmodell m entscheidet. Es gilt: $\sum_{m \in M} p_{k,m,t,s} = 1 \quad \forall k \in K, t \in T, s \in S$

$N_{k,t,s}^G$: Gesamtzahl an Kunden eines Kundensegments k , die sich zum Zeitpunkt t in Szenario s im Entscheidungsprozess befinden.

Zur Ermittlung der Kaufwahrscheinlichkeit stehen dem Entscheidungsträger zwei Entscheidungskalküle zur Verfügung, welche sich in der Art der Zuordnung von Kunden auf die Marktmodelle unterscheiden. Diese werden im Folgenden erläutert:

- **Winner-Takes-It-All-Prinzip**

Bei diesem Entscheidungskalkül wählen alle Kunden eines Kundensegments, die sich zum Entscheidungszeitpunkt im Kaufentscheidungsprozess befinden, das für sie optimale Marktmodell. Je nach Zielrichtung wird dabei die Zielfunktion minimiert oder maximiert, welche weiterhin als gewichtete Summe von verschiedenen Kundenkennzahlen formuliert werden kann. Durch Auswertung der Werte der Zielfunktionen je Marktmodell $m \in M$, Kundensegment $k \in K$, Periode $t \in T$ und Szenario $s \in S$ ergibt sich folgende Berechnung für die Kaufwahrscheinlichkeit:

$$p_{k,m,t,s} = \begin{cases} \frac{1}{a_{k,t,s}} & \text{falls das Marktmodell } m \in M \text{ für Kundensegment } k \in K \\ & \text{in Periode } t \in T \text{ in Szenario } s \in S \text{ die optimale Entscheidung darstellt.} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$a_{k,t,s}$: Anzahl der aus Kundensicht $k \in K$ in Periode $t \in T$ in Szenario $s \in S$ optimalen Marktmodelle.

- **Discrete-Choice-Modell**

Bei diesem Entscheidungskalkül wird ein Discrete-Choice-Modell verwendet, um den Kaufentscheidungsprozess der Kunden zu simulieren. Dadurch können sich Kunden innerhalb eines Kundensegments partial für unterschiedliche

Marktmodelle entscheiden. Im Gegensatz zum oben erläuterten Winner-Takes-It-All-Prinzip ist es damit möglich, dass sich Kunden eines Kundensegmentes in Periode t in Szenario s für unterschiedliche Marktmodelle entscheiden. Um die Kaufwahrscheinlichkeiten zu berechnen, wird zunächst wie oben beschrieben die Zielfunktionen ausgewertet. Anschließend wird auf Basis eines Discrete-Choice-Modells (siehe beispielsweise (Train, 2009)) die Kaufwahrscheinlichkeit ermittelt. Diese ermittelt sich aus dem Zielfunktionswert eines Marktmodells sowie der Summe der Zielfunktionswerte aller Marktmodelle und ist wie folgt definiert:

$$p_{k,m,t,s} = \frac{\exp(P(k,m,t,s))}{\sum_{m' \in M} \exp(P(m',k,t,s))}$$

Das Ergebnis des Kundenentscheidungsprozesses stellt schließlich die Kunden-Marktmodell-Zuweisung dar, welche gleichzeitig die Nachfrage nach den Marktmodellen definiert. Auf dieser Basis wird im Kundenentscheidungsprozess schließlich noch für die zugeordneten Kunden der Zeitpunkt des nächsten Entscheidungszeitpunkts ermittelt. Dabei werden die Präferenzen der Kunden sowie die durchschnittliche Nutzungszeit eines Marktmodells berücksichtigt.

Interaktionsprozess der Marktteilnehmer

Im letzten Prozessschritt der Simulation wird die Interaktion von Marktteilnehmern simuliert. Dabei wird das Agieren von Marktteilnehmern und das Austauschen von Informationen sowie das sich daraus ergebende Beeinflussen von Handlungen simuliert. Sowohl Marktakteure (Anbieter) als auch Kundensegmente (Nachfrager) können gemäß der definierten Strategie aktiv werden. Strategien sind dabei als bedingte Anweisung formuliert (vgl. Abschnitt 5.1). In diesem Prozessschritt wird die Bedingung (d.h. ein logischer Ausdruck) überprüft und sofern diese erfüllt ist, die Handlung des Akteurs durchgeführt. Dabei können folgende Aktionen durchgeführt werden:

- **Marktmodellattribute modifizieren/hinzufügen/entfernen**

Akteure haben die Möglichkeit Eigenschaften von Marktmodellen zu verändern, sofern diese im jeweiligen Handlungsspielraum des Entscheidungsträgers liegen. So kann ein Akteur das eigene Angebot ändern, während Angebote von konkurrierenden und kooperierenden Unternehmen dementsprechend nicht modifiziert werden können. So können in Abhängigkeit einer definierten Bedingung bestehende Attribute von Marktmodellen modifiziert (beispielsweise kann der Verkaufspreis bei Erreichen einer angestrebten Marktdurchdringung gesenkt werden), neue Attribute hinzugefügt (bspw. das Anbieten einer zusätzlichen Dienstleistung aufgrund einer angespannten Wettbewerbssituation) und bestehende Attribute entfernt werden (beispielsweise die Streichung einer Subvention aufgrund eines erreichten Marktvolumens).

- **Kundensegmenteigenschaften modifizieren/hinzufügen/entfernen**
Um die Interaktion von Kunden verschiedener Kundensegmente zu simulieren, können bedingte Anweisungen für Kundensegmente spezifiziert werden. In diesem Prozessschritt werden diese Bedingungen ausgewertet. Dabei können Kundensegmenteigenschaften modifiziert, hinzugefügt und entfernt werden. Dadurch lassen sich beispielsweise Innovatoren und Adaptoren modellieren, indem bei Adaptoren darstellenden Kundensegmenten ab einem gewissen Marktvolumen der Wert eines Attributs zur Repräsentation des Marktmodellnutzens hinzugefügt bzw. geändert wird.
- **Restriktionen und Zielfunktionen modifizieren/hinzufügen/entfernen**
Schließlich können Restriktionen und Zielfunktionen von Kundensegmenten angepasst werden. Dadurch lässt sich im Zeitverlauf ein dynamisches Entscheidungsverhalten der Kundensegmente realisieren.

5.3 Analyse der Marktsimulation anhand einer Fallstudie

In diesem Abschnitt wird die entwickelte Marktsimulation anhand einer Fallstudie aus der Elektromobilität evaluiert. Dazu wird im Folgenden zunächst die Fallstudie mit den betrachteten Problemaspekten spezifiziert (siehe Abschnitt 5.3.1). Anschließend werden die im Rahmen von Analysen erzielten Ergebnisse präsentiert. Durch die Analysen wird demonstriert, dass die entwickelte Marktsimulation zur Prognose der Marktdurchdringung von Marktmodellen eingesetzt werden kann, wodurch Entscheidungsträgern eine bessere Entscheidungsgrundlage geboten wird. In einer ersten Analyse wird in Abschnitt 5.3.2 der Einfluss von Unsicherheiten untersucht. Dazu werden zunächst die Auswirkungen von unsicheren Einflussfaktoren auf die Nachfrage der einzelnen Marktmodelle dargestellt und kritische Einflussfaktoren identifiziert. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.3.3 eine Sensitivitätsanalyse zum Mehrwert von zusätzlich angebotenen Dienstleistungen innerhalb von Marktmodellen. In Abschnitt 5.3.4 wird schließlich der Einfluss einer Erweiterung eines Produktportfolios auf die prognostizierte Marktdurchdringung präsentiert.

5.3.1 Fallstudie und Untersuchungsaufbau

In der Literatur sticht im Bereich von Marktsimulationen für innovative Produkte die Automobilindustrie als Anwendungsdomäne mit Fragestellungen hinsichtlich der Diffusion von alternativen Antrieben als häufig verwendete Fallstudie hervor (vgl. (Kiesling et al., 2012)). Daher wird auch in dieser Arbeit die entwickelte Marktsimulation anhand der Elektromobilität evaluiert. Als Datengrundlage dienen dazu die Studien von Plötz et al. (2014) und Gnann et al. (2015), welche im Rahmen des For-

schungsprojektes Smart EM²¹ hinsichtlich der Spezifizierung von Dienstleistungen, Szenarien und Kundenpräferenzen gemeinsam mit Praxispartnern erweitert wurden.

Abbildung 5.7 stellt zunächst die im Rahmen der Fallstudie betrachteten Marktteilnehmer sowie beispielhaft das jeweils an die Kunden gerichtete Angebot schematisch dar. Zu den Marktteilnehmern zählen die betrachtete Supply Chain, kooperierende und konkurrierende Unternehmen bzw. Supply Chains sowie die zu Kundensegmenten zusammengefassten Kunden. Bei der betrachteten Supply Chain handelt es sich im Rahmen der Fallstudie um einen Batteriehersteller, welcher ein Angebot in Form von Marktmodellen in Kooperation mit einem Automobilhersteller, einem Privatladeanbieter, einem Infrastrukturanbieter sowie der öffentlichen Hand an die Kunden richtet. Außerdem bieten konkurrierende Unternehmen bzw. Supply Chains den Kunden weitere Marktmodelle an. Zu diesen zählen Automobilhersteller, Tankstellenbetreiber sowie die öffentliche Hand. Im Folgenden werden die am Markt offerierten Marktmodelle beschrieben.

Das *Produktportfolio des Batterieherstellers* umfasst verschiedene Batteriesysteme, welche zunächst anhand der Batteriekapazität und der Entladetiefe charakterisiert werden können. Der Antriebstyp des Fahrzeugs (d.h. reine Elektrofahrzeuge (BEV), Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) und Range-Extender (REEV)) für welchen das Batteriesystem konzipiert ist, sowie die Größenklasse des Fahrzeugs und damit die Form des Batteriesystems, stellen weitere Charakteristiken des Batteriesystems dar. Da ein Batteriesystem als alleinstehendes Produkt nur schwer am Markt platziert werden kann, wird ein Batteriesystem im Rahmen der Fallstudie zusammen mit weiteren *komplementären Produkten und Dienstleistungen* innerhalb eines Marktmodells angeboten. Dazu zählt zunächst das durch einen Automobilhersteller offerierte Fahrzeugangebot. Fahrzeuge unterscheiden sich dabei anhand der Antriebsart (d.h. BEV, PHEV und REEV) sowie der Größenklasse (d.h. Kleinwagen, Mittelklassewagen und Oberklassewagen). Weitere komplementäre Produkte und Dienstleistungen werden von einem Privatladeanbieter und einem Infrastrukturanbieter angeboten. Dazu zählen private und öffentliche Lademöglichkeiten in Form von Wallboxen bzw. Ladesäulen inklusive zweier Tarifsyste (d.h. ein Pay-per-use Tarif sowie ein dynamischer Tarif). Sofern in einem Marktmodell ein Hybrid-Fahrzeug angeboten wird, ergänzen Tankstellenbetreiber die entsprechenden Marktmodelle um Tankmöglichkeiten und versorgen die Hybrid-Fahrzeuge dementsprechend mit Treibstoff. Schließlich ergänzt die öffentliche Hand die Marktmodelle um Komponenten zur Subvention in Form einer Kaufpreisprämie für Elektro- und Hybridfahrzeuge und zur Besteuerung. Sowohl die Höhe der Subvention als auch die Höhe der Steuern werden in Abhängigkeit zur Antriebsart der Fahrzeuge definiert. Die öffentliche Hand verfolgt dabei die Strategie Elektro- und Hybridfahrzeuge jeweils bis zu einem Marktanteil von 30% zu fördern.

²¹Weitere Informationen siehe Projektwebseite: <http://www.smart-em.de/>

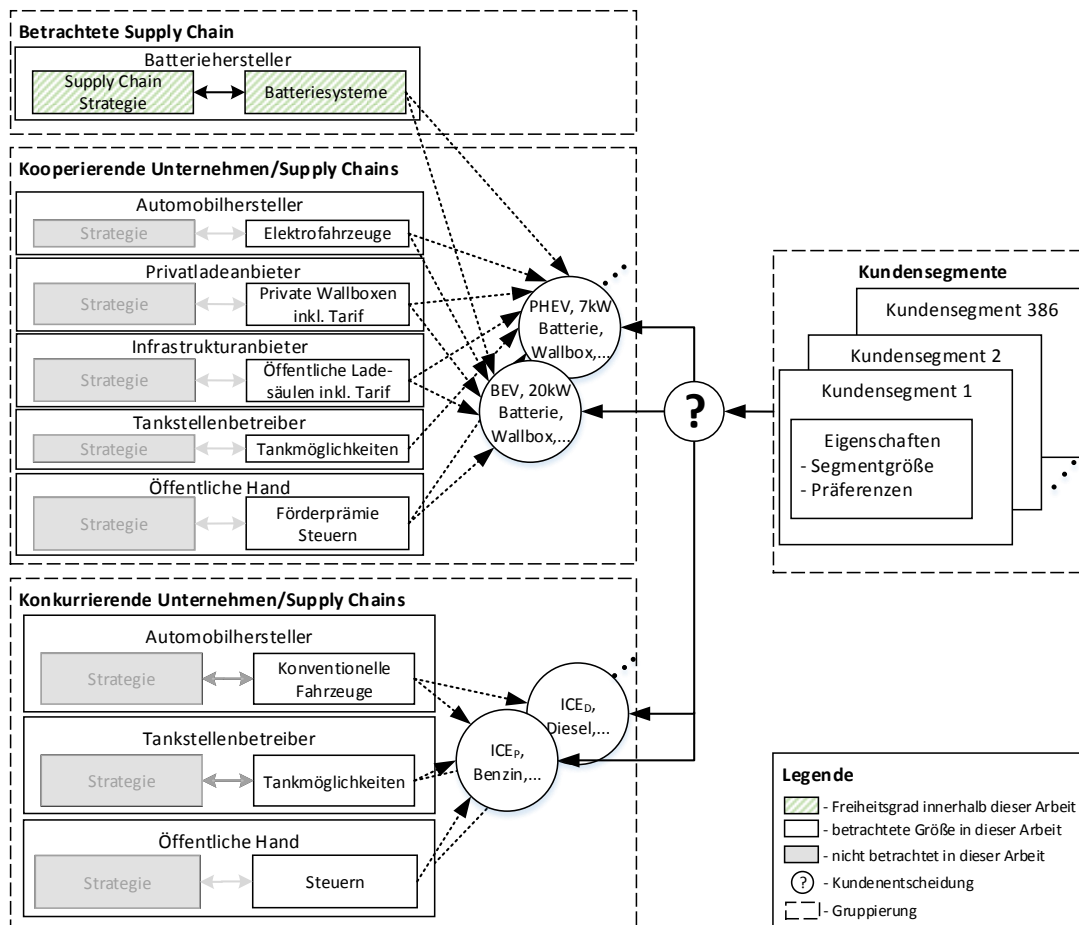


Abbildung 5.7: Übersicht der betrachteten Marktteilnehmer innerhalb der Fallstudie

Zusätzlich zu dem bereits definierten Angebot, werden *konkurrierende Marktmodelle* vom Automobilhersteller, Tankstellenbetreiber und der öffentlichen Hand angeboten. Automobilhersteller bieten dabei konventionelle Fahrzeuge (d.h. Benzin (ICE_P) und Diesel (ICE_D)) in unterschiedlichen Fahrzeuggrößenklassen an. Zudem stellen Tankstellenbetreiber Tankmöglichkeiten (d.h. Benzin oder Diesel) für die konventionellen Antriebe bereit. Schließlich ergänzt die öffentliche Hand diese Marktmodelle um Steuermodelle für die konventionellen Fahrzeuge. Die Höhe der Steuern werden dabei in Abhängigkeit zur Antriebsart definiert. Insgesamt werden in der Fallstudie 24 Marktmodelle berücksichtigt²². Tabelle 5.1 fasst diese inklusive der wichtigsten Eigenschaften zusammen.

²²In den folgenden Sensitivitätsanalysen variiert die Anzahl sowie die Eigenschaften der berücksichtigten Marktmodelle. Die sich daraus ergebenden Änderungen an den Marktmodellen werden in der jeweiligen Sensitivitätsanalyse beschrieben.

Id	Fahrzeug		Batterie	Ladeinfrastruktur				Subvention
	Typ	Größe	Kapazität	Öffentliches Laden		Privates Laden		
				Ladeart	Tarif	Ladeart	Tarif	
M1	ICE _D	K						
M2	ICE _P	K						
M3	PHEV	K	7	L 3,7	P	W 3,7	P	+
M4	BEV	K	20	L 3,7	P	W 3,7	P	++
M5	REEV	K	13	L 3,7	P	W 3,7	P	+
M6	ICE _D	M						
M7	ICE _P	M						
M8	PHEV	M	10	L 3,7	P	W 3,7	P	+
M9	BEV	M	24	L 3,7	P	W 3,7	P	++
M10	REEV	M	16	L 3,7	P	W 3,7	P	+
M11	ICE _D	O						
M12	ICE _P	O						
M13	PHEV	O	13	L 3,7	P	W 3,7	P	+
M14	BEV	O	28	L 3,7	P	W 3,7	P	++
M15	REEV	O	19	L 3,7	P	W 3,7	P	+
M16	PHEV	K	7	L 3,7	D	W 3,7	D	+
M17	BEV	K	20	L 3,7	D	W 3,7	D	++
M18	REEV	K	13	L 3,7	D	W 3,7	D	+
M19	PHEV	M	10	L 3,7	D	W 3,7	D	+
M20	BEV	M	24	L 3,7	D	W 3,7	D	++
M21	REEV	M	16	L 3,7	D	W 3,7	D	+
M22	PHEV	O	13	L 3,7	D	W 3,7	D	+
M23	BEV	O	28	L 3,7	D	W 3,7	D	++
M24	REEV	O	19	L 3,7	D	W 3,7	D	+

Tabelle 5.1: Übersicht der betrachteten Marktmodelle im Rahmen der Fallstudie

Legende:

Fahrzeugtyp - ICE_D: Diesel, ICE_P: Benzin, BEV: Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-in-Hybrid, REEV: Range-Extender

Größe - K: Kompaktklasse, M: Mittelklasse, O: Oberklasse

Ladeart - L 3,7: Ladesäulen mit 3,7 kW Ladeleistung, W 3,7: Wallbox mit 3,7 kW Ladeleistung

Tarif - P: Pay-Per-Use Tarif, D: Dynamischer Tarif

Subvention - +: Kaufpreisförderung von 3000 GE, ++: Kaufpreisförderung von 4000 GE

Weiterhin unterliegen im Rahmen der Fallstudie einige der in diesen Marktmodellen betrachteten Parametern Unsicherheiten. Dazu zählen der zukünftige Preis des Batteriesystems, die Treibstoff- und Strompreise, die Subventionshöhe für Elektro- und Hybridfahrzeuge (d.h. jeweils bis zu einem Marktanteil von 30%) sowie der Treibstoff- und Stromverbrauch der Fahrzeuge. Abbildung 5.8 stellt die im Rahmen der Fallstudie verwendeten Prognosen der einzelnen Parameter im Zeitverlauf dar. Je Parameter sind dabei Zeitreihen für eine positive, neutrale und negative Entwicklung dargestellt. Daraus resultiert die Spannweite der möglichen Entwicklungen der einzelnen Parameter.

Um die unsicheren Parameter in der Marktsimulation berücksichtigen zu können werden diese zu konsistenten Szenarien verdichtet. Dazu wird die sogenannte Szenario-

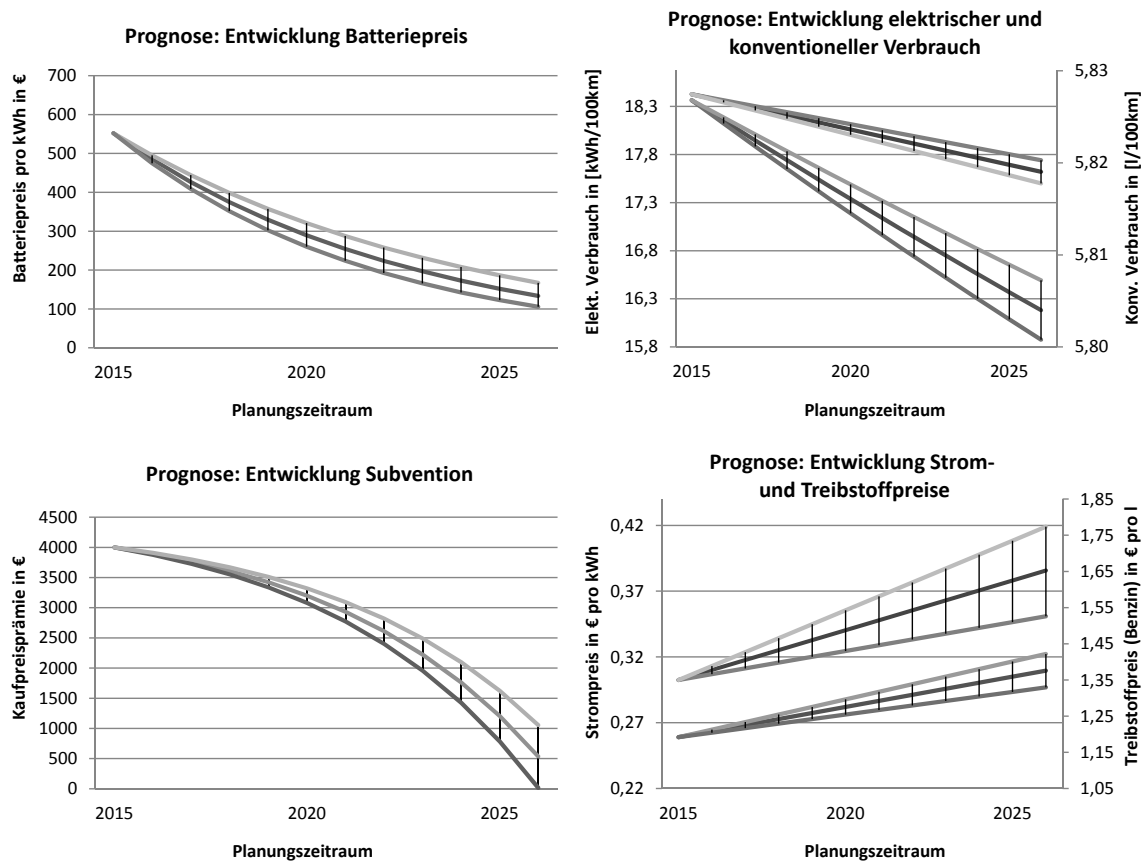


Abbildung 5.8: Annahmen bezüglich der prognostizierten Entwicklung der unsicheren Parameter im Rahmen der Fallstudie

Technik eingesetzt (siehe beispielsweise (von Reibnitz, 1992)). Ergebnis der Szenario-Technik sind schließlich 15 Szenarien, welche sich anhand der potentiellen Vorteilhaftigkeit der Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen klassifizieren lassen. Dazu werden beispielsweise in einem potentiell Pro-EM-Szenario (hier Szenario 1) entsprechend für eine hohe Marktdurchdringung positive Ausprägungen der Parameter kombiniert (d.h. es wird ein stark sinkender Batteriepreis mit einem stark steigender Treibstoffpreis usw. kombiniert). In einem potenziell Contra-EM-Szenario (hier Szenario 15) werden äquivalent dazu Ausprägungen der Parameter kombiniert, die potenziell gegen eine schnelle Marktdurchdringung der Elektromobilität sprechen (d.h. es wird ein leicht sinkender Batteriepreis mit leicht steigenden Treibstoffpreisen usw. kombiniert). Die zwischen diesen beiden Extremszenarien liegenden Szenarien stellen entsprechend moderatere Entwicklungen bzw. Kombinationen der verschiedenen Ausprägungen dar.

<i>Anteil der Kundensegmente mit entsprechender Restriktion [in %]</i>								
Fahrzeugklasse			Parkmöglichkeit		Jährliche Fahrdistanz in km			
Klein- wagen	Mittel- klasse	Ober- klasse	ja	nein	<5000	5000- 10000	10000- 15000	>15000
27	66	7	96	4	35	28	22	15

Tabelle 5.2: Anteil der Kundensegmente mit Restriktionen

Um den Kundenentscheidungsprozess zu analysieren, müssen Kundensegmente abgebildet werden. Im Rahmen der Fallstudie werden 89 *Kundensegmente* mit ca. 19000 Kunden betrachtet. Diese Kundensegmente unterscheiden sich anhand ökonomischer und sozio-technischer Präferenzen der Kunden. Ökonomische Präferenzen stellen dabei Anforderungen hinsichtlich der Fahrzeugklasse, der Parkmöglichkeiten sowie der Mehrpreisbereitschaft für ein entsprechendes Marktmodell dar. Zu den sozio-technischen Präferenzen zählt der Mobilitätsbedarf der Kunden. Dieser wird auf Basis der jährlichen Fahrleistung der Kundensegmente ausgedrückt. Im Kundenentscheidungsprozess werden dann nur diejenigen Marktmodelle einbezogen, welche den Mobilitätsbedarf des entsprechenden Kundensegments erfüllen. Die Daten wurden auf Basis der Studie „Mobilität in Deutschland“ generiert (Follmer et al., 2010). Tabelle 5.2 fasst den Anteil der Kunden mit entsprechenden Restriktionen zusammen. Weiterhin zielen im Rahmen der Fallstudie die Kundensegmente darauf ab, unter Berücksichtigung aller Restriktionen, das Marktmodell mit möglichst geringen Total-Cost-of-Ownership zu selektieren. Die Kaufentscheidungen werden insgesamt über einen Planungszeitraum von zwölf Jahren betrachtet, wobei eine Periode im Modell eine Zeitspanne von einem Jahr repräsentiert.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Analysen präsentiert. Während bestehende Arbeiten wie Plötz et al. (2014) und Kieckhäfer (2013) sich in ihren Fallstudien auf die Marktdurchdringung von alternativen Fahrzeugen fokussieren, wird in dieser Fallstudie das Ergebnis aus verschiedenen Perspektiven der Marktteilnehmer betrachtet. Dazu wird zunächst der Einfluss von Unsicherheiten auf die Marktdurchdringung der Marktmodelle analysiert und das daraus resultierende Risiko für die Marktteilnehmer abgeleitet (siehe Abschnitt 5.3.2). Anschließend wird in Abschnitt 5.3.3 aufgezeigt, in welcher Form zusätzliche Dienstleistungen die Marktdurchdringung beeinflussen können. Schließlich werden in Abschnitt 5.3.4 Auswirkungen von Änderungen des Produktportfolios des Batterieherstellers untersucht. Tabelle 5.3 fasst die in den Sensitivitätsanalysen untersuchten Forschungsfragen inklusive der veränderlichen Größen zusammen.

Abschnitt	Forschungsfrage	Veränderliche Größe
5.3.2	Welchen Einfluss haben Unsicherheiten auf die Marktdurchdringung der Marktmodelle der einzelnen Marktteilnehmer?	Szenarien, Aggregationsebene
	Wie beeinflussen kritische Einflussfaktoren das Chance/Risiko-Verhältnis eine gewisse Marktdurchdringung zu erreichen?	Szenarien, Subvention (ja/nein)
5.3.3	Welche Auswirkungen haben zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle auf die Marktdurchdringung?	Dienstleistungen, Szenarien
	Wie beeinflussen zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle das Chance/Risiko-Verhältnis eine gewisse Marktdurchdringung zu erreichen?	Dienstleistungen, Szenarien
5.3.4	Wie beeinflusst eine Variation des Produktportfolios die Marktdurchdringung?	Produktvarianten, Szenarien
	Welchen Einfluss hat eine Vergrößerung eines Produktportfolios auf die Marktanteile?	zusätzliche Produktvarianten (ja/nein), Szenarien

Tabelle 5.3: Übersicht der Forschungsfragen zur Analyse der Marktsimulation

Das Ergebnis der Simulation für die beschriebene Fallstudie umfasst je Marktmodell abhängig vom betrachteten Szenario eine prognostizierte Marktdurchdringung im Zeitverlauf. Die entwickelten Modellelemente sowie das Verhalten der Simulation wurden dabei verschiedenen Techniken der Verifizierung und Validierung unterzogen. So wurden in Anlehnung an Sargent (2013) die Modellstruktur und das -verhalten durch Experten innerhalb des Forschungsprojektes Smart EM auf Plausibilität überprüft (engl. face validity), das Verhalten der Simulation und die Ergebnisse unter extremen Parameterwerten getestet (engl. extrem condition test), Auswirkungen von Parameteränderungen in Sensitivitätsanalysen untersucht (engl. parameter variability-sensitivity analysis) und die Korrektheit des entwickelten Quellcodes überprüft (engl. structured walkthrough).

5.3.2 Einfluss von Unsicherheiten

In diesem Abschnitt wird demonstriert, dass die entwickelte Marktsimulation den Entscheidungsträger unter Berücksichtigung von unsicheren Einflussfaktoren bei der Planung effektiv unterstützt. Dazu wird zunächst der Einfluss der Unsicherheiten auf die Marktdurchdringung der einzelnen Marktmodelle im Planungszeitverlauf untersucht. Zudem erlaubt die entwickelte Methodik die Ergebnisse auf unterschiedlichen

Aggregationsebenen zu betrachten. Dadurch können Auswirkungen von Unsicherheiten in Abhängigkeit der einzelnen Bestandteile der Marktmodelle aufgezeigt werden. Anschließend wird in einer zweiten Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Subvention von Elektro- und Hybridfahrzeugen demonstriert, welche Auswirkungen eine Variation von kritischen Einflussfaktoren unter Unsicherheiten hat.

Einfluss von Unsicherheiten auf die Marktdurchdringung der Marktmodelle (in Abhängigkeit verschiedener Aggregationsebenen)

In Abbildung 5.9 sind zunächst die ermittelten Marktdurchdringungen je Marktmodell für das potenziell neutrale EM-Szenario im Zeitverlauf visualisiert. Die Abbildung veranschaulicht die durch die Marktsimulation ermittelten Ergebnisse, welche im Weiteren als Referenzwert dienen und zur Einordnung der Ergebnisse der weiteren Analysen verwendet werden.

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass im betrachteten Szenario Marktmodelle mit konventionellen Antrieben im Zeitverlauf zunehmend stärker an Marktanteilen verlieren. Die Ursachen hierfür finden sich in der Entwicklung der unsicheren Parameter wieder. So begünstigen u.a. ein steigender Benzinpreis, ein leicht steigender Strompreis sowie ein sinkender Batteriepreis aus Kundensicht einen im Zeitverlauf sinkenden Total-Cost-of-Ownership bei Marktmodellen mit Elektro- oder Hybridfahrzeugen. Dadurch entscheiden sich Kunden insbesondere ab Mitte des Planungszeitraums zunehmend für derartige Marktmodelle.

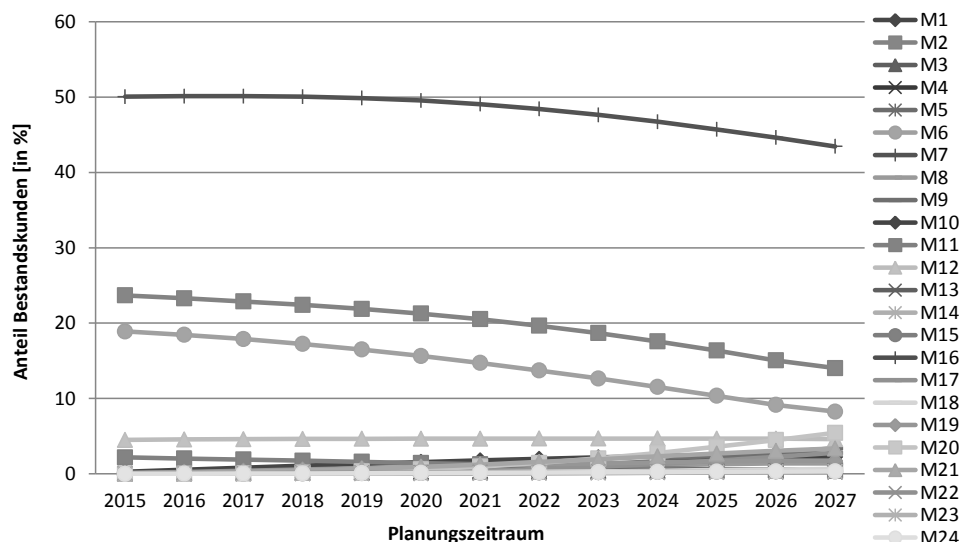


Abbildung 5.9: Entwicklung der Bestandskunden je Marktmodell im Planungszeitverlauf für das potenziell neutrale EM-Szenario

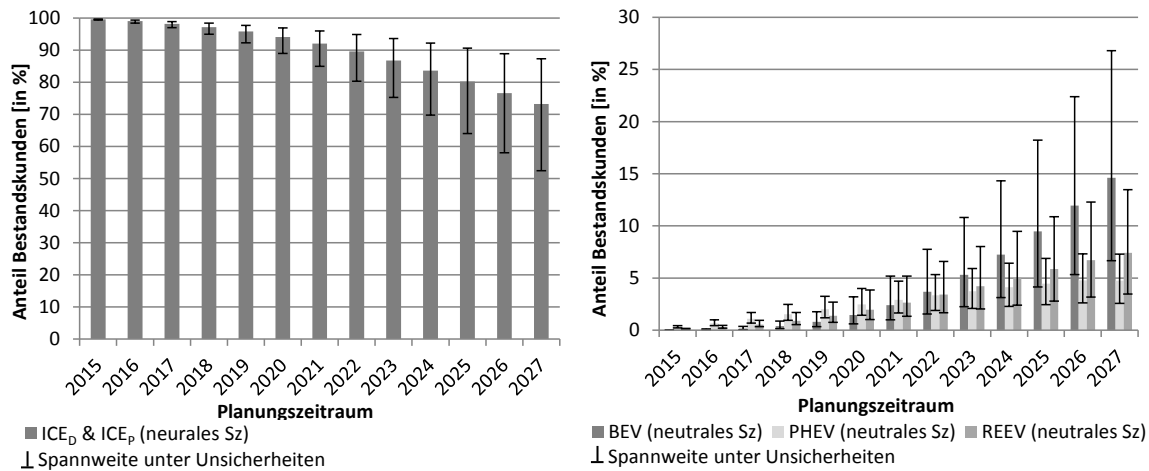


Abbildung 5.10: Einfluss von Unsicherheiten auf die Marktdurchdringung von Antriebsformen

Um den Einfluss von Unsicherheiten tiefergehend zu analysieren, werden die Ergebnisse im Folgenden auf einem höheren Aggregationsgrad betrachtet. Dazu sind in Abbildung 5.10 die Anteile der Bestandskunden aggregiert für unterschiedliche Antriebe im Zeitverlauf für das neutrale Szenario dargestellt. Die Whiskers repräsentieren die Spannweite der Schwankungen der jeweiligen Anteile, welche durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten auftreten. Während im linken Diagramm die Marktdurchdringung für konventionelle Antriebe präsentiert wird, ist diese im rechten Diagramm für Elektro- und Hybridfahrzeuge dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die konventionellen Antriebe im Laufe des Planungszeitraums von den Elektro- und Hybridfahrzeugen kannibalisiert werden. Der zunehmende Grad an Unsicherheiten der unsicheren Parameter, spiegelt sich auch im zunehmenden Grad der Unsicherheit bei der Marktdurchdringung der Antriebe wieder, wobei dieser je Antriebstyp variiert. Reine Elektrofahrzeuge weisen dabei verglichen mit Hybridfahrzeugen einen höheren Grad an Nachfrageunsicherheit auf. Dies begründet sich im über alle Szenarien schwankenden Batteriepreis. Dieser nimmt bei reinen Elektrofahrzeugen einen größeren Anteil an den Total-Cost-of-Ownership ein (verglichen mit Hybridfahrzeugen), wodurch letztlich die Kaufentscheidungen stärker in Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios variieren.

Eine weitere Aggregationsebene stellen die Ergebnisse für den Batteriehersteller dar. Dazu sind in Abbildung 5.11 die prognostizierten Anteile an Bestandskunden für die entsprechenden Batteriesysteme im Zeitverlauf aufgeführt. Der oben herausgestellte Effekt, dass sich der Grad an Unsicherheit in Abhängigkeit der angebotenen Produktvarianten signifikant unterscheidet, wird auf dieser Aggregationsebene noch

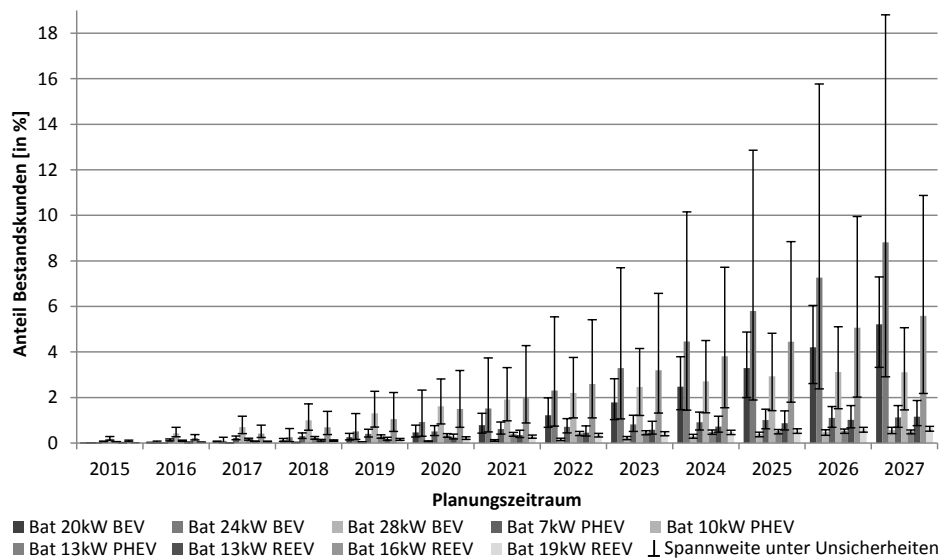


Abbildung 5.11: Einfluss von Unsicherheiten auf die Anzahl an Bestandskunden für verschiedene Batteriesysteme

deutlicher. So weisen gerade die Batteriesysteme der Kompakt- und Mittelklasse im Vergleich zu Batteriesystemen der Oberklasse höhere Unsicherheiten auf. Auch hier liegt der Grund am Anteil der Batteriekosten an den Total-Cost-of-Ownership. So ist dieser Anteil in der Kompakt- und Mittelklasse deutlich größer als in der Oberklasse, weshalb Kunden dort sensibler auf Batteriepreisschwankungen reagieren. Daraus resultiert für die Kompakt- und Mittelklasse in den potenziellen Pro-EM Szenarien eine höhere Chance zusätzliche Kunden für Elektro- oder Hybridfahrzeuge zu erreichen sowie in potenziellen Contra-EM Szenarien ein höheres Risiko Kunden für Elektro- oder Hybridfahrzeuge zu verlieren.

Risiken der Variation von kritischen Einflussfaktoren unter Unsicherheiten

Bei der Analyse zum Einfluss von Unsicherheiten hat sich weiterhin herausgestellt, dass einige unsichere Einflussfaktoren (beispielsweise eine Subvention in Form einer Kaufpreisprämie für Elektro- und Hybridfahrzeuge) den Grad der Unsicherheit in größerem Maße beeinflussen als Andere (beispielsweise Strompreis). Die Ursache liegt darin, dass einige Einflussfaktoren in Abhängigkeit der Kundenpräferenzen auf den Entscheidungsprozess wirken. So wirken sich Schwankungen bezüglich einer Subvention für alle Kundensegmente aus, während eine Schwankung des Strompreises Kundensegmente mit einer höheren jährlichen Fahrleistung stärker beeinflusst. Einflussfaktoren mit entscheidenden Auswirkungen auf die Ergebnisse werden als kritische Einflussfaktoren bezeichnet.

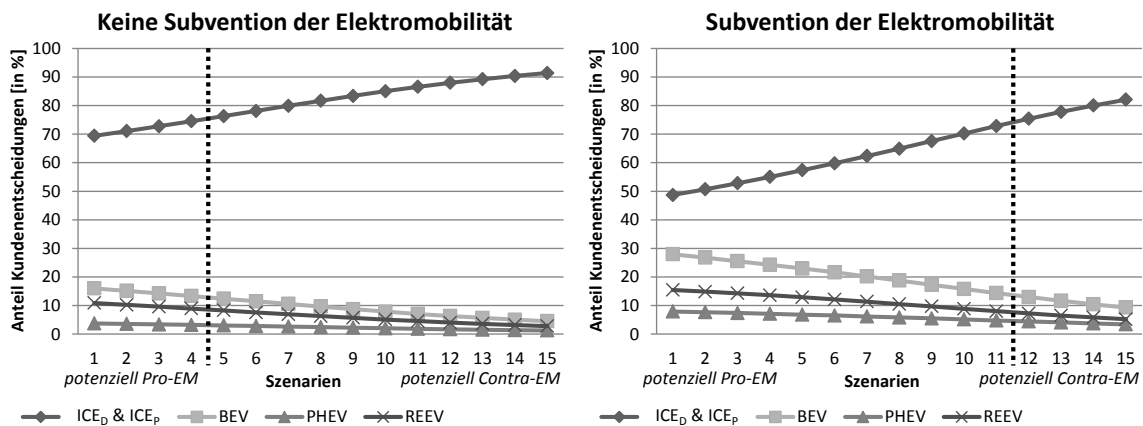


Abbildung 5.12: Einfluss von kritischen Einflussfaktoren auf das Risiko ein Marktpotential nicht zu erreichen

Im Folgenden werden Risiken einer Variation derartiger kritischer Einflussfaktoren am Beispiel einer Subvention in Form von Kaufpreisprämien für Elektro- und Hybridfahrzeuge unter Unsicherheiten untersucht. Dazu wird der Fall einer Subvention von Elektro- und Hybridfahrzeugen mit dem keiner Subvention verglichen. In Abbildung 5.12 ist der Anteil der Kundenentscheidungen für entsprechende Fahrzeugtypen aggregiert über den betrachteten Planungszeitraum je Szenario für den Fall keiner Subvention (linke Grafik) und einer Subvention von Elektro- und Hybridfahrzeugen (rechte Grafik) dargestellt. Die gestrichelte Linie kennzeichnet jeweils das Risiko einen vorher angestrebten Marktanteil nicht zu erreichen (d.h. hier einen Anteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen von mindestens 25%). Im Fall einer Subvention ist dieses Risiko im Vergleich zum Fall keiner Subvention signifikant geringer, da die Total-Cost-of-Ownership von Elektro- und Hybridfahrzeuge für die Kundensegmente durch eine Subvention reduziert werden, welches schließlich vermehrt zu einer Entscheidung für ein Elektro- oder Hybridfahrzeug führt.

Außerdem wird deutlich, dass potenziell Pro-EM Szenarien stärker von einer Förderprämie profitieren als potenziell Contra-EM Szenarien. Hieraus lässt sich ableiten, dass unter schlechten Umfeldbedingungen selbst eine Subvention nur für wenige Kundensegmente zu einer Entscheidung für ein Elektro- oder Hybridfahrzeug führt. Insgesamt geht aus dem Ergebnis im Rahmen dieser Fallstudie hervor, dass Subventionen die Chancen eines positiven Markthochlaufs für Elektro- und Hybridfahrzeuge deutlich verbessern. Gleichzeitig resultiert daraus ein reduziertes Risiko eine angestrebte Marktdurchdringung für diese Fahrzeugarten nicht zu erreichen. Somit verbessert sich im Rahmen der Fallstudie das Chance-Risiko-Verhältnis durch eine Subvention von Elektro- und Hybridfahrzeugen.

5.3.3 Mehrwert von zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen

Die entwickelte Marktsimulation erlaubt einem Entscheidungsträger das als Angebot formulierte Produktportfolio eines Marktteilnehmers durch zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle zu ergänzen. In diesem Abschnitt wird der Mehrwert von Dienstleistungen und Erlösmodellen am Beispiel von dynamischen Tarifen für das Laden von Elektro- und Hybridfahrzeugen dargelegt. Dazu wird die Anzahl der in der Fallstudie betrachteten Marktmodelle (siehe Tabelle 5.1) entsprechend verändert (d.h. die Marktmodelle M_{16} - M_{24} werden den Kunden im Fall keiner zusätzlichen Dienstleistung nicht offeriert). Beim dynamischen Tarif variiert der Strompreis in Abhängigkeit der Tageszeit, wobei die Annahme getroffen wird, dass der Mittelwert des Strompreises dem Strompreis des Pay-Per-Use-Tarifes entspricht. Die Ladezeiten der einzelnen Kundensegmente werden dabei im Voraus der Marktsimulation auf Basis von Fahrprofilen der Kundensegmente in einer Verkehrssimulation ermittelt.

Abbildung 5.13 stellt die sich aus dem Angebot von zusätzlichen Dienstleistungen ergebenden Änderungen bezüglich der Marktdurchdringung je Fahrzeugtyp für das neutrale EM-Szenario dar. Zunächst kann dabei festgestellt werden, dass zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle in Form von dynamischen Tarifen im Laufe des Planungszeitraums zu einer Verringerung der Marktanteile von konventionellen Fahrzeugen führen (siehe linkes Diagramm), da Kundenentscheidungen zunehmend zugunsten von Elektro- und Hybridfahrzeugen ausfallen (siehe rechtes Diagramm). Die Ursache findet sich in verringerten Verbrauchskosten für Elektro- und Hybrid-

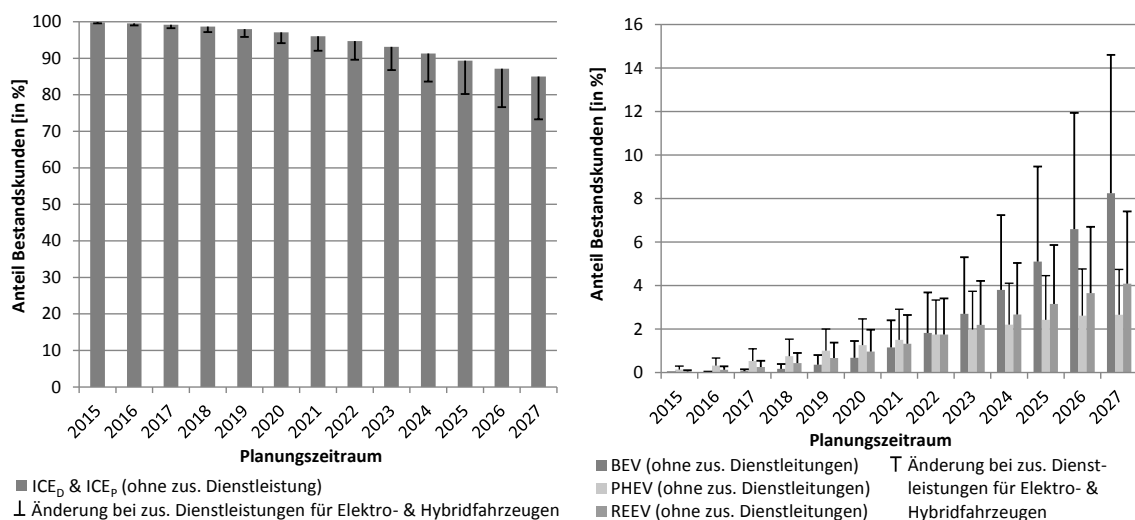


Abbildung 5.13: Änderung der Marktdurchdringung durch die Berücksichtigung zusätzlicher Dienstleistungen und Erlösmodelle im neutralen Szenario

fahrzeuge wieder, wovon insbesondere Kundensegmente mit höheren jährlichen Fahrleistungen profitieren. Zu Beginn des Planungszeitraums steigen die Bestandszahlen von Hybridfahrzeugen an, da diese im Vergleich zu BEV's Batteriesysteme mit geringerer Batteriekapazität besitzen und die reduzierten Verbrauchskosten für einige Kundensegmente dazu führen, dass Hybridfahrzeuge die Variante mit den geringsten Total-Cost-of-Ownership darstellen (d.h. zu Beginn des Planungszeitraums ist bei BEV's der Anteil der Batteriekosten an den Gesamtkosten zu groß). Mit Fortschreiten des Planungszeitraums profitieren aufgrund der Annahme sinkender Batteriekosten auch BEV's stärker von diesem Effekt, sodass sich zunehmend mehr Kundensegmente für ein BEV entscheiden und die durch zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle reduzierten Verbrauchskosten deren Marktdurchdringung positiv beeinflusst.

Um die Forschungsfrage hinsichtlich der Auswirkungen von zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen in Kombination mit Unsicherheiten zu beantworten, ist in Tabelle 5.4 für Elektro- und Hybridfahrzeuge die Standardabweichung der Anteile der Kaufentscheidungen je Periode über alle Szenarien als Indikator für den Grad an Unsicherheit dargestellt. Dabei erfolgt eine Fallunterscheidung zwischen der Betrachtung von zusätzlichen Dienstleistungen und keinen zusätzlichen Dienstleistungen. Aus den Ergebnissen geht zunächst hervor, dass unabhängig davon, ob zusätzliche Dienstleistungen angeboten werden oder nicht, der Grad an Unsicherheit bezüglich der Anteile für Elektro- und Hybridfahrzeuge im Planungszeitverlauf ansteigt. Im Fall von zusätzlichen Dienstleistungen nehmen die Unsicherheiten im Planungszeitverlauf jedoch stärker zu. Dieser Effekt begründet sich darin, dass Elektro- und

betrachtete Fahrzeugtypen	Dienstleistungen	Planungszeitraum														
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027		
nur BEV, PHEV, REEV	x	0,2	0,5	1,0	1,7	2,7	4,1	5,6	7,4	9,3	11,3	13,4	15,5	17,6		
	o	0,1	0,2	0,5	0,9	1,5	2,3	3,4	4,6	6,1	7,8	9,5	11,4	13,2		
	Δ	0,1	0,2	0,5	0,8	1,3	1,8	2,3	2,7	3,2	3,6	3,9	4,2	4,4		

Tabelle 5.4: Grad der Prognoseunsicherheit (in Standardabweichung des Anteils der Kaufentscheidungen) für Elektro- und Hybridfahrzeuge mit und ohne Dienstleistungen und Erlösmodelle

Legende:

Dienstleistungen: x - inklusive zusätzlicher Dienstleistung für BEV, PHEV und REEV, o - ohne zusätzliche Dienstleistung für BEV, PHEV und REEV, Δ - Differenz zwischen der Betrachtung mit Dienstleistungen und ohne Dienstleistungen

Hybridfahrzeuge in potenziell Pro-EM-Szenarien im Vergleich zu potenziell Contra-EM-Szenarien überproportional von den zusätzlichen Dienstleistungen profitieren. So reduziert aus Kundensicht ein dynamischer Tarif unabhängig vom Szenario die Total-Cost-of-Ownership für Elektro- oder Hybridfahrzeuge. Während in potenziell Pro-EM-Szenarien diese Reduzierung dazu führt, dass für viele Kundensegmente nun Elektro- oder Hybridfahrzeuge die Alternative mit den geringsten Total-Cost-of-Ownership darstellen, führt eine Reduzierung in den potenziell Contra-EM-Szenarien zu keiner Änderung der Kaufentscheidung.

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass zusätzlich angebotene Dienstleistungen und Erlösmodelle einerseits die Chance auf höhere Marktanteile von Elektro- und Hybridfahrzeugen bieten. Andererseits kann sich allerdings auch der Grad der Unsicherheit bei der Prognose der Marktdurchdringung erhöhen. Daher wird im Folgenden der Einfluss von zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen auf das Chance/Risiko-Verhältnis eine angestrebte Marktdurchdringung zu erreichen analysiert.

In den Diagrammen in Abbildung 5.14 ist der Anteil an Kundenentscheidungen für einen entsprechenden Fahrzeugtyp aggregiert über den betrachteten Planungszeitraum je Szenario dargestellt. Die gestrichelte Linie kennzeichnet jeweils das Risiko einen angestrebten Marktanteil (d.h. hier einen Anteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen von mindestens 25 %) nicht zu erzielen. Im Fall von zusätzlich angebotenen Dienstleistungen (siehe linkes Diagramm) erhöht sich insbesondere in den potenziell Pro-EM-Szenarien der Marktanteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen verglichen mit dem Fall, dass keine zusätzlichen Dienstleistungen angeboten werden (siehe rechtes Diagramm). Die Ursache liegt darin, dass die in potenziell Contra-EM-Szenarien

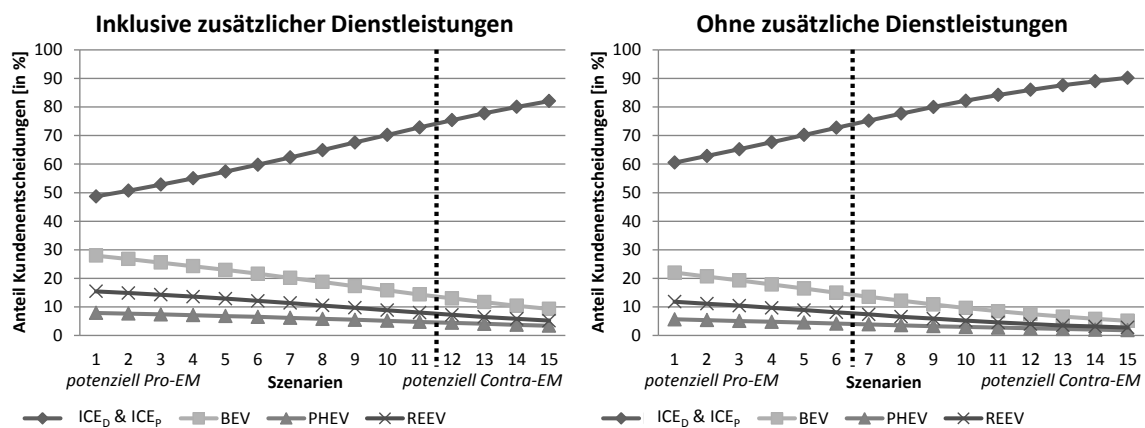


Abbildung 5.14: Einfluss von zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen auf das Chance/Risiko-Verhältnis

durch Dienstleistungen erzielte Reduzierung der Total-Cost-of-Ownership für viele Kundensegmente nicht ausreicht um den Kundenentscheidungsprozess zu beeinflussen. Weiterhin wird in den Ergebnissen deutlich, dass zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle im Rahmen der Fallstudie die Chancen eines positiven Markthochlaufs von Elektro- und Hybridfahrzeugen deutlich verbessern und umgekehrt das Risiko einen angestrebten Marktanteil nicht zu erreichen signifikant senken können. Daher führen zusätzliche Dienstleistungen aus Sicht der Produkt- und Portfoliopolitik trotz eines gestiegenen Grads an Unsicherheit zu einem besseren Chance/Risiko-Verhältnis einen angestrebten Marktanteil für Elektro- und Hybridfahrzeuge zu erzielen.

5.3.4 Auswirkungen einer Modifikation eines Produktportfolios

In den bisher durchgeführten Analysen sind die Auswirkungen von Unsicherheiten und zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen betrachtet worden. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese signifikanten Einfluss auf die Marktdurchdringung der einzelnen Marktmodelle haben. Aus Perspektive eines Entscheidungsträgers eines Batterieherstellers ist dabei deutlich geworden, dass veränderte Umfeldsituationen die prognostizierte Marktdurchdringung der Produktvarianten des angebotenen Produktportfolios beeinflussen. Der Entscheidungsträger ist in den Analysen jedoch bisher aus einer passiven Sichtweise heraus betrachtet worden. Daher sollen in diesem Abschnitt Freiheitsgrade bezüglich der Veränderung eines Produktportfolios betrachtet werden. So wird zunächst die Forschungsfrage nach möglichen Auswirkungen einer Variation des Produktportfolios untersucht. Die Größe des Produktportfolios bleibt dabei zunächst konstant. Im zweiten Schritt wird neben den einzelnen Produktvarianten auch die Größe (d.h. die Anzahl der Produktvarianten) variiert und deren Implikationen auf die Marktdurchdringung dargelegt. Im Rahmen dieser Fallstudie werden die Analysen am Beispiel der Variation der Batteriekapazität durchgeführt, da diese aus Kundensicht die Total-Cost-of-Ownership eines Marktmodells sowie die Erfüllbarkeit des Mobilitätsbedarfs maßgeblich beeinflusst.

In Abbildung 5.15 sind die Ergebnisse einer Variation der Batteriekapazität innerhalb der Elektromobilitäts-Marktmodelle für das Pro-EM, das neutrale sowie das Contra-EM-Szenario dargestellt. Dies bedeutet, dass die Batteriekapazität der angebotenen Elektro- und Hybridfahrzeuge im Vergleich zu den in der Fallstudie definierten Marktmodellen (vgl. Tabelle 5.1 in Abschnitt 5.3.1) um einen prozentualen Faktor erhöht bzw. verringert wird. In den Abbildungen ist jeweils der Anteil der Kundenentscheidungen für einen Fahrzeugtyp über den gesamten Planungszeitraum in Abhängigkeit der Batteriekapazität dargestellt. In allen Szenarien wird deutlich, dass in der betrachteten Fallstudie Elektro- und Hybridfahrzeuge mit kleineren Batteriekapazitäten stärker nachgefragt werden als entsprechende Fahrzeuge mit größeren

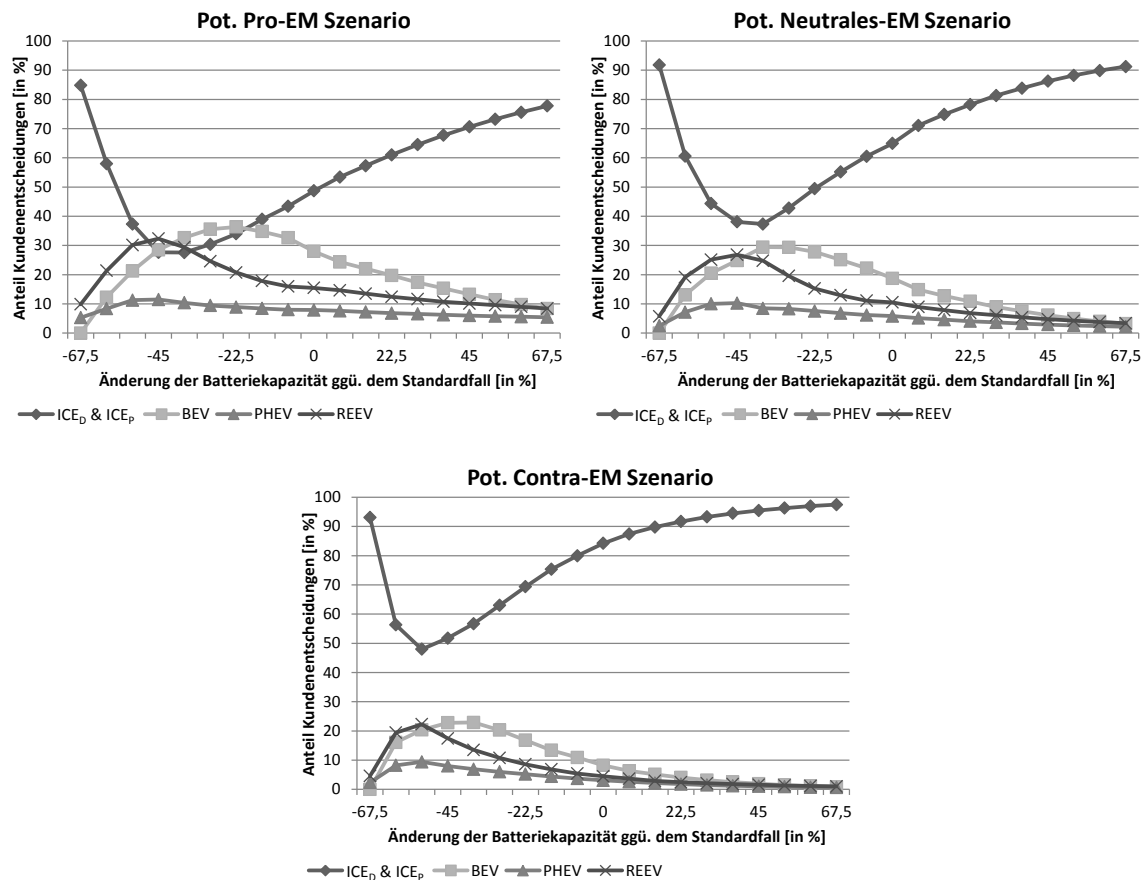


Abbildung 5.15: Auswirkungen einer Variation der Batteriekapazität auf den Anteil der Kundenentscheidungen je Fahrzeugtyp

Batteriekapazitäten. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Total-Cost-of-Ownership für abnehmende Batteriekapazitäten sinken, gleichzeitig jedoch die Erfüllbarkeit der Mobilitätsbedarfe der betrachteten Kundensegmente nicht beeinträchtigt wird. Erst bei sehr klein dimensionierten Batteriekapazitäten sinkt der Anteil der Kunden, welche sich für Elektro- und Hybridfahrzeuge entscheiden deutlich. Dies liegt daran, dass Kunden ihren Mobilitätsbedarf mit Elektrofahrzeugen nicht mehr erfüllen können und bei Hybridfahrzeugen der Anteil der zurückgelegten Kilometer mittels Elektroantrieb sinkt, wodurch die Verbrauchskosteneinsparungen sinken und schließlich die zusätzlichen Anschaffungskosten für ein Hybridfahrzeug (im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug) nicht mehr gedeckt werden.

Die Schiefe der Verteilung der Anteile von Kundenentscheidungen für Elektro- und Hybridfahrzeuge ist in allen Szenarien positiv und begründet sich darin, dass unterdi-

mensionierte Batteriesysteme aufgrund der Nichterfüllbarkeit des Mobilitätsbedarfs zu einer größeren Reduzierung des Elektromobilitätsanteils führt als überdimensionierte Batteriesysteme. Bei einem Vergleich der Ergebnisse der drei Szenarien wird deutlich, dass die Verteilung der Anteile der Elektro- und Hybridfahrzeuge im potenziellen Pro-EM-Szenario rechtsverschoben und im potenziellen Contra-EM-Szenario linksverschoben sind (verglichen mit dem neutralen Szenario). Dieses bedeutet, dass im potenziellen Pro-EM-Szenario die maximale Marktdurchdringung an Elektro- und Hybridfahrzeugen mit den größten Batteriesystemen resultiert. Die Ursache findet sich darin, dass in zunehmend schlechteren Szenarien größere Batteriesysteme aus Kundensicht aufgrund steigender Total-Cost-of-Ownership unattraktiver werden.

In der bisherigen Analyse ist die Batteriekapazität der in den Marktmodellen angebotenen Elektro- und Hybridfahrzeuge variiert worden. Die Größe des Produktport-

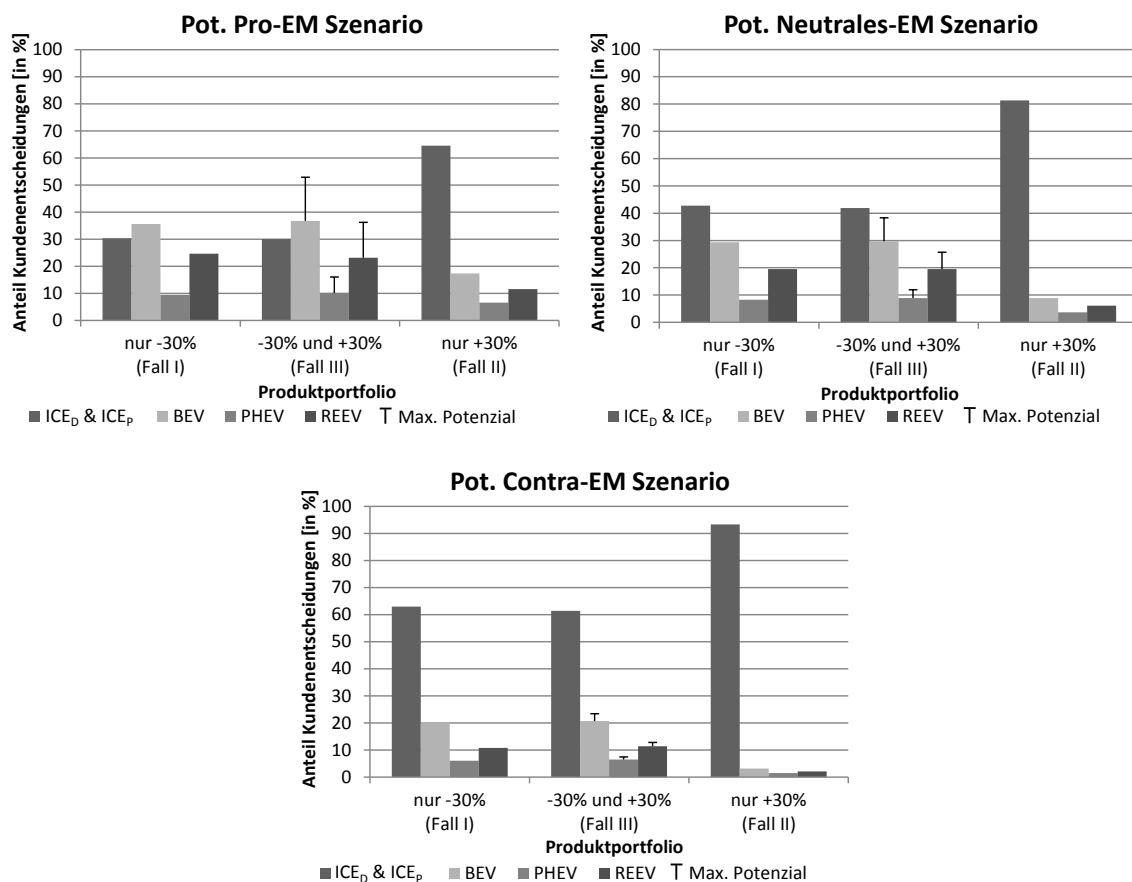


Abbildung 5.16: Auswirkungen einer Erweiterung eines Produktportfolios auf den Anteil der Kundenentscheidungen je Antriebstyp am Beispiel der Batteriekapazität

folios des Batterieherstellers wurde dabei jedoch konstant gehalten und umfasst in jedem Testfall neun Produktvarianten. Im Folgenden werden die Auswirkungen einer Erweiterung des Produktportfolios analysiert. Die Ergebnisse einer solchen Erweiterung sind in Abbildung 5.16 aggregiert über den Planungszeitraum je Fahrzeugtyp für drei Szenarien dargestellt. Dazu wird der prognostizierte Anteil der Kundenentscheidungen für die Fälle, dass nur die in Tabelle 5.1 spezifizierten Marktmodelle mit einer um 30% reduzierten Batteriekapazität (Fall I), einer um 30% erhöhten Batteriekapazität (Fall II) und ein erweitertes Produktportfolio mit Batteriesystemen mit 30% reduzierter Batteriekapazität sowie zusätzlich 30% erhöhter Batteriekapazität (Fall III) angeboten werden. Die Ergebnisse zeigen auf, dass durch eine Portfolioerweiterung der Anteil der Kundenentscheidungen für Elektro- und Hybridfahrzeuge in allen Szenarien leicht gesteigert werden kann. Dabei ist diese Steigerung im potenziell Contra-EM Szenario mit 1,64%-Punkten, im Vergleich zum potenziell neutralen-EM Szenario mit 0,86%-Punkten und potenziell Pro-EM Szenario mit 0,31%-Punkten, am größten. Die Ursache liegt darin, dass es im potenziell Pro-EM-Szenario zu einer Kannibalisierung von REEV's durch BEV's kommt, wodurch die zusätzlich angebotenen Marktmodelle mit einer um 30% erhöhten Batteriekapazität mehr Kunden ihren Mobilitätsbedarf mit BEV's erfüllen können. In potenziell Contra-EM-Szenarien tritt dieser Effekt nicht auf, da BEV's mit größer dimensionierten Batteriesystemen aus Kundensicht unattraktivere Total-Cost-of-Ownership aufweisen und im Entscheidungsprozess nicht berücksichtigt werden.

Das maximal theoretische Potenzial dieser Portfolioerweiterung, welches sich durch Addition der Anteile an Kundenentscheidungen der Fälle I und II ergibt, wird jedoch in keinem Szenario erreicht. Dies liegt daran, dass ein Großteil der Kunden, die sich im Fall von größeren Batteriekapazitäten (Fall II) für ein Hybrid- oder Elektrofahrzeug entscheiden, sich ebenfalls im Fall einer reduzierten Batteriekapazität (Fall I) für einen solchen Fahrzeugtyp entscheiden.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine domänenunabhängige Marktsimulation zur Prognose der Marktdurchdringung von innovativen Produktvarianten und Dienstleistungen unter Berücksichtigung von Erlösmodellen präsentiert. Dazu wurde zunächst der Kundenentscheidungsprozess für innovative Marktmodelle formalisiert und schließlich in einer Modellstruktur sowie dazugehörigem Modellverhalten prototypisch umgesetzt. Modellelemente zur Abbildung der Marktmodelle, Kundensegmente, deren Interaktionen sowie Modellelemente zur Abbildung von Unsicherheiten und des Planungszeitraums bilden dabei die Basis für die Domänenunabhängigkeit und bieten eine hohe Erweiterbarkeit. Die entwickelte Marktsimulation wurde als diskrete er-

eignisorientierte Simulation umgesetzt, welche agentenbasierte Konzepte integriert, wodurch das Verhalten von verschiedenen Marktteilnehmern im Modell betrachtet werden kann.

Anschließend wurde die Anwendbarkeit der Marktsimulation anhand einer Fallstudie der Elektromobilität demonstriert. So wurde der Einfluss von unsicheren Einflussfaktoren, Erweiterungen des Angebotes durch zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle sowie der Variation eines Produktportfolios am Beispiel eines Batterieherstellers herausgestellt. Im Rahmen der Fallstudie wurde deutlich, dass die entwickelte Marktsimulation zur Analyse des Chance-Risiko-Verhältnisses eingesetzt werden kann und dem Entscheidungsträger somit zur Entscheidungsunterstützung dient.

Eine Analyse zur Variation des Produktportfolios hat das Potenzial einer Steigerung der prognostizierten Marktanteile durch eine Erweiterung des Angebotes aufgezeigt. Somit dient die entwickelte Marktsimulation aus Sicht der Produkt- und Portfoliopolitik zur Planung eines Produktportfolios. Es schließt sich jedoch die Frage an, ob das zusätzliche Marktpotenzial den Kunden durch eine Supply Chain-Strategie unter Gesichtspunkten der Kostenbetrachtung und des Supply Chain-Risikos bereitgestellt werden kann. Zur Beantwortung dieser Fragestellung, wird im folgenden Kapitel ein Planungsansatz zur Identifizierung von effizienten Supply Chain-Strategien unter Unsicherheiten vorgestellt.

6 Planung einer Supply Chain-Strategie

Die im vorangegangenen Kapitel entwickelte Marktsimulation dient zur Ermittlung der prognostizierten Marktdurchdringung von innovativen Produktvarianten eines Produktportfolios. Somit lassen sich aus diesen Ergebnissen für die entsprechenden Produktvarianten deren Nachfrage in Abhängigkeit zum betrachteten Planungszeitpunkt und Szenario ableiten. Daraus resultiert für eine Supply Chain das maximal zu erzielende Umsatzpotential, welches bei vollständiger Erfüllung der Nachfrage erreicht wird. Offen ist dabei jedoch die Frage hinsichtlich der Gestaltung der Produktions- und Logistikaktivitäten, sodass die angebotenen Produktvarianten kosteneffizient hergestellt und den Kunden bereitgestellt werden können.

Daher wird in diesem Kapitel ein Ansatz zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien entwickelt, welcher den Gewinn vor Steuern und Zinsen (EBIT) der Supply Chain unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers maximiert. Aufgrund des innovativen Charakters der Produktvarianten und den damit verbundenen Unsicherheiten wird dabei das Konzept des Postponements berücksichtigt. Dazu werden in diesem Kapitel zunächst die Handlungsalternativen eines Entscheidungsträgers in Abschnitt 6.1 vorgestellt. Anschließend wird ein stochastisches Optimierungsmodell (SMIP) zur Identifizierung von Postponement-Strategien unter Unsicherheiten entwickelt, welches in Abschnitt 6.2 präsentiert wird. Zur Lösung des Modells werden exakte und näherungsweise Lösungsverfahren eingesetzt und in einer Analyse hinsichtlich der Laufzeit- und Lösungsqualität miteinander verglichen (siehe Abschnitt 6.3). Zuletzt wird in Abschnitt 6.4 der ökonomische Mehrwert des entwickelten Ansatzes im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse anhand einer Fallstudie demonstriert.

6.1 Freiheitsgrade bei der Gestaltung von gewinnmaximalen und risikoaversen Postponement-Strategien

Die Gestaltung einer Supply Chain-Strategie sollte im Einklang mit dem angebotenen Produktportfolio erfolgen, um Produktions- und Logistikaktivitäten gemäß der Eigenschaften der Produktvarianten möglichst effizient durchführen zu können (vgl. Abschnitt 2.4.3). Ziel ist dabei im Rahmen dieser Arbeit die simultane Maximierung des EBIT sowie die Minimierung des Risikos der Supply Chain. Um diese Ziele zu erreichen, können Konzepte des Postponements angewendet werden, um die durch den innovativen Charakter der Produktvarianten existierenden Nachfrageunsicherheiten

besser zu antizipieren. Aus dem damit verbundenen Planungsproblem ergeben sich Freiheitsgrade, welche auf verschiedenen Entscheidungsebenen angeordnet sind. Abbildung 6.1 stellt die zu treffenden Entscheidungen in einem schematischen Überblick dar.

Im Rahmen der Strategieplanung sind für eine Supply Chain zunächst Entscheidungen bezüglich der grundlegenden Ausrichtung einer Strategie zu treffen, woraus die Anordnung von Produktions- und Logistikaktivitäten hervorgeht. Den ersten Freiheitsgrad stellt dabei die Art der grundsätzlichen Strategie dar, wobei der Typ der Postponement-Strategie (d.h. Full Speculation, Form Postponement, Logistics Postponement oder Full Postponement) zu spezifizieren ist (vgl. Abschnitt 2.4.3). Einen weiteren Freiheitsgrad bietet der Grad von Postponement. Dabei ist festzulegen, welche Produktions- und Logistikaktivitäten in welchem Umfang zeitlich verzögert bzw. geographisch verschoben werden. Den letzten Freiheitsgrad im Rahmen der Strategieplanung bilden Entscheidungen über eine mögliche Resequenzierung von Produktions- und Logistikaktivitäten. Der Grundgedanke ist dabei die Reihenfolge

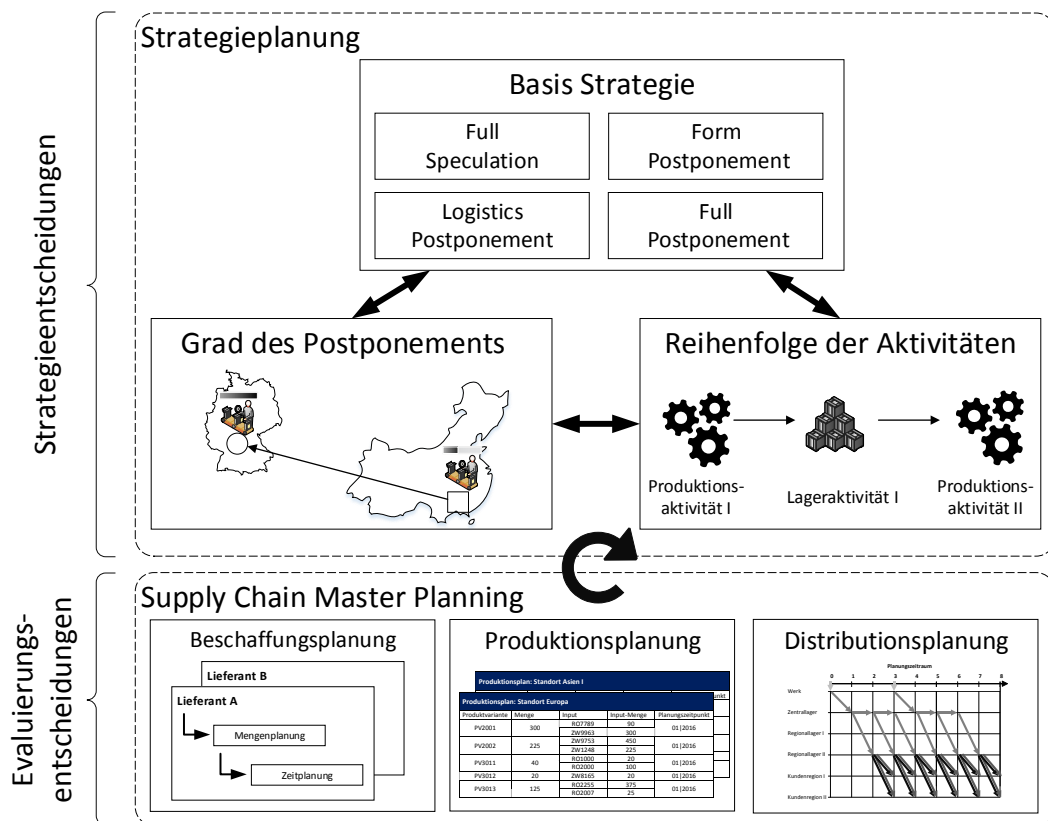


Abbildung 6.1: Entscheidungsebenen der Freiheitsgrade bei der Planung einer Supply Chain-Strategie

dieser Aktivitäten derart zu modifizieren, sodass der Kundenentkopplungspunkt möglichst weit in Richtung der Kunden verschoben wird.

Mit diesen Strategieentscheidungen sind Auswirkungen auf die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsplanung verbunden. So kann beispielsweise ein Verschieben von Produktionsaktivitäten zu einem signifikanten Kostenanstieg bei den Produktionskosten führen. Darüber hinaus bestehen zwischen verschiedenen Kostenfaktoren Wechselwirkungen, welche je nach gewählter Strategie das Ergebnis unterschiedlich stark beeinflussen können. Um die Auswirkungen der Strategieentscheidungen zu evaluieren, müssen die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsplanung integriert berücksichtigt werden. Damit verbunden müssen ein Beschaffungsproblem mit Entscheidungen bezüglich der zeitlichen und örtlichen Planung der Beschaffungsmenge von Materialien, ein Produktionsproblem mit der Planung von Produktionsmengen (inklusive Entscheidungen von Lagermengen) und ein Distributionsproblem zur Planung von Transportmengen gelöst werden.

Aufgrund bestehender Unsicherheiten im Planungsproblem (vgl. Abschnitt 2.4.2) müssen diese Entscheidungen unter Einbezug von Unsicherheiten evaluiert werden. Für das Ziel der Gewinnmaximierung wird dabei der erwartete Gewinn vor Steuern und Zinsen über alle Szenarien maximiert. Die Erreichung dieses Ziels wird dabei in Abhängigkeit der getroffenen Entscheidungen beeinflusst, wobei Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren bestehen. So können sich Entscheidungen auf den Absatz der Produktvarianten und damit den Umsatz der Supply Chain, den fixen und variablen Kosten für das Bereitstellen bzw. Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten sowie den Strafkosten für nicht befriedigte Nachfrage auswirken. Das Erreichen des zweiten Teilziels, die Minimierung des Risikos der Supply Chain, wird ebenfalls von den getroffenen Entscheidungen beeinflusst. Im Fall von Nachfrageunsicherheiten kann die Nachfrage einerseits überschätzt werden, was dann in großen Lagerbeständen und damit verbundenen Lagerhaltungskosten resultiert. Andererseits besteht das Risiko die Nachfrage zu unterschätzen, was wiederum Fehlmenngen und Strafkosten für nicht befriedigte Nachfrage impliziert. Um diesen Risiken zu begegnen, können in Abhängigkeit der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers verschiedene Strategien gewählt werden. Während risikoneutrale Entscheidungsträger Strategien favorisieren, welche ausschließlich auf eine Maximierung des EBIT ausgelegt sind, tendieren risikoaverse Entscheidungsträger zu Strategien, welche auf Kosten von (geringen) Gewinneinbußen zu niedrigeren Risiken führen. Dies resultiert in einen Zielkonflikt zwischen Gewinnmaximierung und Risikominimierung. Um diesen Zielkonflikt aufzulösen wird im Folgenden ein stochastisches Optimierungsmodell vorgestellt. Dabei wird eine generische Modellformulierung entwickelt, welche eine domänenübergreifende Adaption der Methodik erlaubt. Das grundlegende Modell wird auch in Weskamp et al. (2016) präsentiert.

6.2 Stochastisches Optimierungsmodell zur Identifizierung von Postponement-Strategien

Ziel ist es, einen Entscheidungsträger bei der Planung einer Supply Chain-Strategie durch eine geeignete Methodik zu unterstützen. Aufgrund der Betrachtung von innovativen Produkten und den daraus resultierenden Nachfrageunsicherheiten, wird das Konzept des Postponements berücksichtigt. Für das zu entwickelnde Optimierungsmodell bedeutet dies, dass die Eigenschaften des Postponements (d.h. insbesondere das Verzögern und Verschieben von Produktions- und Logistikaktivitäten) im Modell abzubilden sind.

Die stochastische Optimierung bietet die Möglichkeit Unsicherheiten in Form von in Szenarien zusammengefassten unsicheren Parametern zu berücksichtigen und wird heute in vielen Anwendungsbereichen erfolgreich eingesetzt (vgl. Wallace und Ziemba (2005)). Um den von Postponement-Strategien typischen Charakter des Verzögerns von Entscheidungen im Modell abzubilden, wird in dieser Arbeit ein zweistufiges stochastisches Optimierungsmodell mit Kompensation zur Entscheidungsunterstützung entwickelt (vgl. Abschnitt 3.1). Die zu modellierenden Entscheidungsvariablen müssen dabei in zwei Arten aufgeteilt werden: Entscheidungsvariablen der ersten Stufe sind unter unvollständiger Information zu treffen und gelten somit für alle Szenarien. Im Gegensatz dazu werden Entscheidungsvariablen der zweiten Stufe erst dann getroffen, wenn sich die unsicheren Parameter realisiert haben.

Im entwickelten zweistufigen stochastischen Optimierungsmodell repräsentieren Entscheidungen hinsichtlich der Realisierung von Produktions- und Logistikaktivitäten die Supply Chain-Strategie. Ein Rekonfigurieren dieser Entscheidungen ist oftmals mit hohen Kosten verbunden, weshalb diese Entscheidungen zu Beginn des Planungszeitraums getroffen werden müssen und anschließend im Zeitverlauf nicht mehr geändert werden können. Die dazugehörigen Entscheidungsvariablen sind daher der ersten Stufe des stochastischen Modells zugeordnet und gelten für alle Szenarien, sodass für diese eine robuste Lösung hinsichtlich der Unsicherheiten identifiziert wird. Weiterhin sind Entscheidungen über Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsmengen zu treffen. Diese werden im Modell hinsichtlich der zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung zur Verfügung stehenden Informationsbasis unterteilt. Dazu werden die Standorte des Wertschöpfungsnetzwerks gemäß ihrer Position im Netzwerk betrachtet. Standorte, welche weiter vom Kunden entfernt sind, treffen diese Entscheidungen unter unvollständigen Informationen, weshalb deren Entscheidungen für Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsmengen als Entscheidungsvariablen der ersten Stufe abgebildet sind. Dagegen werden Standorte, die in Kundennähe liegen, als Entscheidungsvariablen der zweiten Stufe modelliert. Somit erfolgt die Entscheidungsfindung für diese Standorte unter vollständigen Informationen.

Im Folgenden wird das entwickelte SMIP vorgestellt. Dazu wird zunächst eine allgemeine Notation des mathematischen Modells sowie die verwendeten Mengen innerhalb des Optimierungsmodells in der folgenden Tabelle vorgestellt. Anschließend folgen die Definition der Entscheidungsvariablen, Parameter sowie die Formulierung der Zielfunktion und Restriktionen.

Mengen

P	Menge aller Produkte (d.h. Rohmaterialien, Zwischenprodukt und Produktvarianten werden zusammengefasst)
L	Menge aller Produktionsaktivitäten
$TF_{lp} \subseteq P$	Menge der Produkte, welche mit der Produktionsaktivität $l \in L$ zu Produkt $p \in P$ transformiert werden können
$TL_p \subseteq L$	Menge der Produktionsaktivitäten, die auf Basis eines Produktes $p \in P$ durchgeführt werden können
N	Menge aller Standorte des Wertschöpfungsnetzwerks (d.h. Produktions- und Lagerstandorte sowie Kundenregionen)
$N^{Fac} \subseteq N$	Menge der Standorte, welche Entscheidungen unter Unsicherheiten treffen
$N^{Inter} \subseteq N$	Menge der Standorte, welche Entscheidungen unter vollständigen Informationen treffen
$N^C \subseteq N$	Menge der Kundenregionen
$N^{Fac} \cup N^{Inter} \cup N^C = N$	Zu den Standorten zählen die Menge der Produktions- und Lagerstandorte sowie die Kundenregionen
$N^{Fac} \cap N^{Inter} \cap N^C = \emptyset$	Ein Standort ist entweder ein Produktionsstandort, ein Lagerstandort oder eine Kundenregion
$A \subseteq N \times N$	Menge aller potentiellen Transportverbindungen zwischen den Standorten
Ω	Menge aller Szenarien

Tabelle 6.1: Mengen des Optimierungsmodells

Die Entscheidungsvariablen sind wie oben beschrieben einer der beiden Stufen im stochastischen Modell zugeordnet. Entscheidungen über die Anordnung von Produktions- und Logistikaktivitäten sind dabei als Binärvariablen im Modell abgebildet und geben Aufschluss über die gewählte Strategie der Supply Chain. So liegt beispielsweise

se eine Full Speculation-Strategie dann vor, wenn sämtliche Produktionsaktivitäten auf der ersten Wertschöpfungsstufe durchgeführt werden und die Produktvarianten anschließend über ein dezentrales Distributionssystem an die Kundenregionen verteilt werden.

Um die mit diesen Strategieentscheidungen verbundenen Umsatz- und Kostenänderungen zu evaluieren, müssen zusätzlich Entscheidungen über die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsmengen je Standort bzw. Transportverbindung getroffen werden (vgl. Abschnitt 6.1). Diese werden als kontinuierliche Entscheidungsvariablen im Modell abgebildet. Weiterhin wird zur Ermittlung der Strafkosten eine Variable zur Erhebung von möglichen Fehlmengen abgebildet. Diese gibt Aufschluss über die nicht befriedigte Nachfrage in den einzelnen Kundenregionen.

Bei der Entscheidungsfindung soll weiterhin die Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers berücksichtigt werden, sodass die Vorteilhaftigkeit von Postponement-Strategien in deren Abhängigkeit ermittelt werden kann. Dazu gilt es, ein geeignetes Risikomaß in das Modell zu integrieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Conditional Value at Risk (CVaR) als geeignete Kennzahl identifiziert, da dieser im Vergleich zu anderen Risikomaßen ein Downside-Risikomaß ist und somit nur negative Ausreißer der Verteilung vermeidet. Zudem ist der CVaR linearisierbar, welches im Vergleich zu nicht-linearisierbaren Risikomaßen einen deutlichen Komplexitätsanstieg des stochastischen Modells verhindert. Die Integration des CVaR in das Modell wird in Anlehnung an Fábíán (2008) vorgenommen. Dazu werden Entscheidungsvariablen zur Ermittlung des EBIT je Szenario, des Value at Risk (VaR), des CVaRs sowie eine Hilfsvariable für die Berechnung eingeführt. In Tabelle 6.2 sind alle Entscheidungsvariablen sowie deren Beschreibung aufgeführt.

Entscheidungsvariablen

$y_{il}^\pi \in 0; 1$	$\begin{cases} 1 & \text{falls Produktionsaktivität } l \in L \text{ in Standort } i \in N \setminus N^C \\ & \text{implementiert wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
$y_i^t \in 0; 1$	$\begin{cases} 1 & \text{falls eine Lagerhaltung (Lageraktivitäten) in Lagerstandort} \\ & i \in N \setminus N^C \text{ durchgeführt werden kann} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
$y_{ij}^\tau \in 0; 1$	$\begin{cases} 1 & \text{falls Transportverbindung } (i, j) \in A \text{ implementiert wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
$z_{pijtw} \in \mathbb{R}_0^+$	Menge an Produkten $p \in P$, die über Transportverbindung $(i, j) \in A$ in Szenario $\omega \in \Omega$ transportiert werden, wobei der Transport zu Zeitpunkt $t \in \{1, \dots, T\}$ startet; Entscheidung der ersten Stufe, falls $i \in N^{Fac}$, sonst Entscheidung der zweiten Stufe

Entscheidungsvariablen (Fortsetzung)

$x_{pp'ilt\omega} \in \mathbb{R}_0^+$	Menge an Produkten $p \in P$, die in Produkt $p' \in P$ in Standort $i \in N \setminus N^C$ zum Zeitpunkt $t \in \{1, \dots, T\}$ in Szenario $\omega \in \Omega$ durch Produktionsaktivität $l \in TL_p$ transformiert werden; Entscheidung der ersten Stufe, falls $i \in N^{Fac}$, sonst Entscheidung der zweiten Stufe
$v_{pit\omega} \in \mathbb{R}_0^+$	Menge an Produkten $p \in P$, die in Standort $i \in N \setminus N^C$ zum Zeitpunkt $t \in \{0, \dots, T\}$ in Szenario $\omega \in \Omega$ gelagert werden; Entscheidung der ersten Stufe, falls $i \in N^{Fac}$, sonst Entscheidung der zweiten Stufe
$sl_{pit\omega} \in \mathbb{R}_0^+$	Fehlmenge an Produkten $p \in P$, die nicht an die Kundenregion $i \in N^C$ zum Zeitpunkt $t \in \{1, \dots, T\}$ in Szenario $\omega \in \Omega$ geliefert wird; Entscheidung der zweiten Stufe
$\theta_\omega \in \mathbb{R}$	Gewinn vor Steuer und Zinsen (EBIT), welcher in Szenario $\omega \in \Omega$ erzielt wird; Entscheidung der zweiten Stufe
$VaR \in \mathbb{R}$	Value at Risk; Entscheidung der ersten Stufe
$CVaR \in \mathbb{R}$	Conditional Value at Risk; Entscheidung der ersten Stufe
$y_\omega^0 \in \mathbb{R}_0^+$	Hilfsvariable, um den Conditional Value at Risk zu berechnen; Entscheidung der zweiten Stufe

Tabelle 6.2: Entscheidungsvariablen des Optimierungsmodells

Neben den Entscheidungsvariablen werden exogene Parameter im Modell berücksichtigt. Dazu zählen zunächst die Definition des Planungszeitraums, sämtliche Kostenfaktoren für das Durchführen von Produktions- und Logistikaktivitäten sowie die Absatzpreise der einzelnen Produktvarianten in den jeweiligen Kundenregionen. Außerdem werden Kapazitätsgrenzen innerhalb der Produktion und Logistik berücksichtigt. So weist jede Produktionsaktivität eines Standorts eine maximale Kapazität auf, wobei das Durchführen von Produktionsaktivitäten pro hergestellter Einheit eines Produktes eine gewisse Kapazität verbraucht. Kapazitätsgrenzen gelten weiterhin beim Transport der Produkte (d.h. auf den einzelnen Transportverbindungen), bei der Lagerhaltung sowie bei der maximalen Menge an Materialien, die zu einem spezifischen Zeitpunkt von einem Lieferanten bezogen werden kann. Weiterhin bilden Parameter den initialen Bestand an Produkten und den Produktionskoeffizient ab. Der Produktionskoeffizient definiert die Anzahl benötigter Vorprodukte für die Produktion eines Erzeugnisses.

Die Nachfrage der Kundenregionen nach Produktvarianten stellt einen unsicheren Parameter dar, welcher im Zeitverlauf variieren kann. Die Unsicherheit wird dabei über Szenarien abgebildet, wobei jedes Szenario eine Eintrittswahrscheinlichkeit aufweist.

Um die aus den Unsicherheiten resultierenden Risiken entsprechend der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers zu berücksichtigen, ist die Risikobereitschaft sowie ein Konfidenzlevel des CVaRs in einem weiteren Parameter abgebildet. Tabelle 6.3 fasst alle Parameter und deren Beschreibung zusammen.

Parameter

T	Anzahl betrachteter diskreter Zeitpunkte
e_{pit}	Absatzpreis je Einheit von Produkt $p \in P$ in Kundenregion $i \in N^C$ zum Zeitpunkt $t \in 1..T$
c_{pij}^S	Transportkostensatz je Einheit von Produkt $p \in P$ über Transportverbindung $(i, j) \in A$
c_{pilt}^P	Produktionskostensatz je produzierter Einheit von Produkt $p \in P$ mit Produktionsaktivität $l \in TL_p$ in Standort $i \in N \setminus N^C$ zum Zeitpunkt $t \in 1..T$
c_{pi}^I	Lagerkostensatz je Einheit von Produkt $p \in P$ in Standort $i \in N \setminus N^C$
c_{il}^π	Fixe Kosten für das Bereitstellen von Produktionsaktivität $l \in L$ in Standort $i \in N \setminus N^C$
c_i^l	Fixe Kosten für Lageraktivitäten in Standort $i \in N \setminus N^C$
c_{ij}^τ	Fixe Kosten für das Ermöglichen von Transportaktivitäten auf Transportverbindung $(i, j) \in A$
c_{pi}^{Pe}	Strafkostensatz je nicht ausgelieferter Einheit von Produkt $p \in P$ in Kundenregion $i \in N^C$
d_{ij}	Transportdauer (Anzahl Perioden) auf Transportverbindung $(i, j) \in A$
U_{il}^P	Maximale Produktionskapazität (Durchsatz) für Produktionsaktivität $l \in L$ in Standort $i \in N \setminus N^C$
U_{ij}^S	Maximale Transportkapazität auf Transportverbindung $(i, j) \in A$
U_i^I	Maximale Lagerkapazität in Standort $i \in N \setminus N^C$
u_p^P	Benötigte Produktionskapazität für eine Einheit von Produkt $p \in P$
u_p^I	Benötigte Lager- bzw. Transportkapazität für eine Einheit von Produkt $p \in P$
Inv_{pi}	Initialer Lagerbestand von Produkt $p \in P$ in Standort $i \in N \setminus N^C$
$k_{pp'}$	Anzahl von Rohmaterialien bzw. Zwischenprodukten $p' \in P$ die zur Produktion von einer Einheit von Produkt $p \in P$ benötigt werden.
$Dem_{pit\omega}$	Nachfrage nach Produkt $p \in P$ in Kundenregion $i \in N^C$ zum Zeitpunkt $t \in \{1, \dots, T\}$ in Szenario $\omega \in \Omega$

Parameter (Fortsetzung)

Sup_{pit}	Maximale Menge an Materialien und Produkten $p \in P$, die von Standort $i \in N^{Fac}$ zum Zeitpunkt $t \in \{1, \dots, T\}$ bezogen werden kann
α	Konfidenzlevel des Conditional-value-at-risk, mit $0 \leq \alpha \leq 1$
ϵ	Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers (in Geldeinheiten)
π_ω	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios $\omega \in \Omega$, mit $\sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega = 1$; $0 \leq \pi_\omega \leq 1 \quad \forall \omega \in \Omega$

Tabelle 6.3: Parameter des Optimierungsmodells

Die Zielfunktion 6.1 maximiert den erwarteten Gewinn vor Steuern und Zinsen (EBIT) über alle Szenarien und berücksichtigt dabei die durch den Absatz von Produktvarianten generierten Erlöse sowie fixe und variable Kosten für das Bereitstellen und Durchführen von Produktions- sowie Logistikaktivitäten. Die Berechnung des EBIT pro Szenario erfolgt dabei in den Restriktionen des Optimierungsmodells.

Zielfunktion

$$Max \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega \theta_\omega \quad (6.1)$$

In den Restriktionen (6.2) ist zunächst die Berechnung des EBIT je Szenario abgebildet. Dazu werden die erzielten Erlöse und die anfallenden Kosten über den gesamten Planungszeitraum miteinander verrechnet. Zu den fixen Kosten zählen dabei Kosten für das Bereitstellen von Produktions- und Lageraktivitäten in den Standorten sowie Kosten für das Bereitstellen von Transportaktivitäten zwischen zwei Standorten. Darüber hinaus fließen variable Produktionskosten, Transportkosten, Lagerhaltungskosten und Strafkosten für Fehlmengen in die Berechnung ein.

Restriktion zur Berechnung des EBIT je Szenario

$$\begin{aligned} \theta_\omega = & \sum_{\substack{t=1..T:t \leq T-d_{ij} \\ p \in P \\ (i,j) \in A:j \in N^C}} e_{pjt} z_{pijtw} - \sum_{\substack{t=1..T \\ p \in P \\ i \in N^C}} c_{pi}^{Pe} s_{litw} - \sum_{\substack{t=1..T \\ p \in P \\ i \in N \setminus N^C \\ l \in TL_p \\ p' \in TF_{lp}}} c_{pilt}^P x_{pp'iltw} - \sum_{\substack{t=1..T \\ p \in P \\ i \in N \setminus N^C}} c_{pi}^I v_{pitw} \\ & - \sum_{\substack{t=1..T:t \leq T-d_{ij} \\ p \in P \\ (i,j) \in A}} c_{pij}^S z_{pijtw} - \sum_{\substack{i \in N \setminus N^C \\ l \in L}} c_{il}^\pi y_{il}^\pi - \sum_{i \in N \setminus N^C} c_i^t y_i^t - \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^\tau y_{ij}^\tau \quad \forall \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (6.2)$$

Weiterhin ist in den Restriktionen (6.3) die Lagerhaltungs- und Materialflussbedingung abgebildet. Diese sorgt für die Bilanzierung des Materialflusses von den Lieferanten bis zu den Kundenregionen. Dabei werden die Transformationen sowie die Lagerhaltung in den einzelnen Knoten des Wertschöpfungsnetzwerks berücksichtigt. Diese Restriktionen stellen damit sicher, dass die Lagermenge zu einem spezifischen Zeitpunkt in einem Standort mindestens so groß ist wie die Lagermenge in diesem Standort zum vorangegangenen Zeitpunkt, zuzüglich der produzierten und gelieferten Menge desselben Produktes, abzüglich der von diesem Standort versendeten Produkte und den weiterverarbeiteten Produkten.

Restriktionen zur Bilanzierung des Materialflusses und der Lagerhaltung

$$\begin{aligned}
 -Sup_{pit} \leq v_{pi(t-1)\omega} + \sum_{(j,i) \in A: (t-d_{ji} \geq 1)} z_{pji(t-d_{ji})\omega} + \sum_{\substack{l \in TL_{p'} \\ p' \in P: p \in TF_{lp'}}} x_{p'pilt\omega} - v_{pit\omega} \\
 - \sum_{(i,j) \in A} z_{pij t\omega} - \sum_{\substack{l \in TL_p \\ p' \in TF_{lp}}} k_{pp'} x_{pp'ilt\omega} \leq 0 \quad \forall p \in P, i \in N \setminus N^C, t = 1..T, \omega \in \Omega
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Weiterhin wird in diesen Restriktionen die von Lieferanten maximal zu beziehende Menge an Rohmaterialien definiert. Die tatsächliche Liefermenge eines Materials bildet dabei einen Freiheitsgrad des Modells.

Die Kapazitätsgrenzen der Produktion, des Transports und der Lagerhaltung sind in den Restriktionen (6.4), (6.5) und (6.6) modelliert. Produktionskapazitäten müssen dabei je Standort, pro Zeitpunkt und Szenario eingehalten werden. Dabei gilt es, alle in einem Standort durchgeführten Produktionsaktivitäten inklusive des jeweiligen Kapazitätsverbrauchs zu berücksichtigen (6.4). Werden Produkte ausgehend von einem Standort über eine Transportverbindung zu einem anderen Standort transportiert, so müssen vorhandene Kapazitätsgrenzen auf diesen Verbindungen eingehalten werden. Die maximale Kapazität bezieht sich dabei auf die Gesamtmenge aller Produkte, die zu einem Zeitpunkt zwischen den Standorten transportiert wird (6.5). Auch die maximalen Kapazitäten der Lagerstandorte dürfen nicht überschritten werden (6.6). Für die genannten Kapazitäten gilt, dass diese nur dann verfügbar sind, sofern die entsprechenden Produktions- und Logistikaktivitäten vorher bereitgestellt worden sind.

Restriktionen zur Einhaltung von Kapazitäten

$$\sum_{\substack{p \in P: l \in TL_p \\ p' \in TF_{lp}}} u_p^P x_{pp'ilt\omega} \leq U_i^P y_{il}^\pi \quad \forall i \in N \setminus N^C, l \in L, t = 1..T, \omega \in \Omega \quad (6.4)$$

$$\sum_{p \in P} u_p^I z_{pijt\omega} \leq U_{ij}^S y_{ij}^\tau \quad \forall (i, j) \in A, t = 1..T, \omega \in \Omega \quad (6.5)$$

$$\sum_{p \in P} u_p^I v_{pit\omega} \leq U_i^I y_i^t \quad \forall i \in N \setminus N^C, t = 1..T, \omega \in \Omega \quad (6.6)$$

Sofern in den Lagerstandorten bereits zum Planungszeitpunkt ein initialer Bestand an Produkten vorhanden ist, kann dieser über die Restriktionen (6.7) modelliert werden.

Restriktionen zur Initialisierung des Lagerbestandes

$$v_{pi0\omega} = Inv_{pi} \quad \forall p \in P, i \in N \setminus N^C, \omega \in \Omega \quad (6.7)$$

Die nächsten Restriktionen (6.8) bilden die Nachfragebedingung ab. Dabei darf die Anzahl der zu den verschiedenen Kundenregionen transportierten Produkte die maximale Nachfrage der jeweiligen Kundenregion nicht überschreiten. Ein Unterschreiten der Nachfrage ist dagegen möglich, wird jedoch mit Strafkosten für Fehlmengen belegt. Diese Restriktionen stellen gleichzeitig die Kalkulation der Fehlmengen sicher. Da die Nachfrage Unsicherheiten unterliegt gelten diese Restriktionen für alle Szenarien.

Restriktionen zur Abbildung der Nachfrage

$$Dem_{pj\omega} = \sum_{(i,j) \in A: (t-d_{ij} \geq 1)} z_{pij(t-d_{ij})\omega} + sl_{pj\omega} \quad \forall p \in P, j \in N^C, t = 1..T, \omega \in \Omega \quad (6.8)$$

Um auf die betrachteten Unsicherheiten in Abhängigkeit der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers reagieren zu können, ist eine Risikokennzahl ins Modell zu

integrieren. Dazu wird in Anlehnung an Fábíán (2008) der Value-at-Risk und der Conditional-Value-at-Risk in den Restriktionen (6.9) und (6.10) berechnet. α definiert dabei das Konfidenzlevel und der α -CVaR den erwarteten EBIT in den schlechtesten $\alpha\%$ -Fällen. Darüber hinaus ist in Restriktion (6.11) die Präferenz der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers in einer ϵ -Constraint abgebildet. Diese Restriktion stellt sicher, dass das vom Entscheidungsträger definierte Höchstmaß an Risikobereitschaft nicht unterschritten wird. Da der CVaR in einer monetären Größe gemessen wird, bedeutet dies, dass der EBIT in den $\alpha\%$ schlechtesten Szenarien mindestens den durch einen Entscheidungsträger definierten Wert erreichen muss.

Restriktionen zur Abbildung der Risikobereitschaft

$$VaR - y_{\omega}^0 \leq \theta_{\omega} \quad \forall \omega \in \Omega \quad (6.9)$$

$$CVaR = VaR - \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} y_{\omega}^0 \quad (6.10)$$

$$CVaR \geq \epsilon \quad (6.11)$$

Zuletzt sind in den folgenden Restriktionen die nicht-antizipierenden Bedingungen abgebildet. Diese stellen sicher, dass Entscheidungen unter Unsicherheiten hinsichtlich der Produktions-, Lager- und Transportmenge für alle Szenarien gelten müssen.

Nichtantizipierende Restriktionen

$$x_{pp'ilt1} = x_{pp'ilt\omega} \quad \forall p \in P, l \in L, p' \in TF_{lp}, i \in N^{Fac}, t = 1..T, \omega \in \Omega \setminus \{1\} \quad (6.12)$$

$$z_{pijt1} = z_{pijt\omega} \quad \forall p \in P, (i, j) \in A : i \in N^{Fac}, t = 1..T, \omega \in \Omega \setminus \{1\} \quad (6.13)$$

$$v_{pit1} = v_{pit\omega} \quad \forall p \in P, i \in N^{Fac}, t = 1..T, \omega \in \Omega \setminus \{1\} \quad (6.14)$$

6.3 Lösen des stochastischen Optimierungsmodells

Zum Lösen des oben beschriebenen SMIPs können exakte und approximative Verfahren eingesetzt werden. Im folgenden Abschnitt werden die im Rahmen dieser Arbeit adaptierten Verfahren vorgestellt. Anschließend werden die Lösungsverfahren in Abschnitt 6.3.2 hinsichtlich der Lösungszeit und -qualität evaluiert.

6.3.1 Lösungsverfahren

Als erstes Lösungsverfahren wird ein Standard-MIP-Solver verwendet. Dazu wird in dieser Arbeit der kommerzielle MIP-Solver IBM CPLEX 12.4 verwendet (vgl. (IBM CPLEX, 2016)). Das stochastische Modell wird dazu zunächst in ein deterministisches Äquivalent transformiert. Das daraus resultierende deterministische Optimierungsmodell wird anschließend mit Standard-Lösungsverfahren für MIPs gelöst (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Das zweite angewendete Lösungsverfahren, Parallel-Nested-Benders (PNB), ist ein Verfahren, welches auf Benders Dekomposition basiert (vgl. (Benders, 1962)). PNB nutzt dabei die spezielle Blockstruktur des stochastischen Optimierungsmodells aus und stellt eine effiziente parallelisierte Implementierung der L-Shaped-Methode dar. Im Rahmen der Analysen wird in dieser Arbeit eine Implementierung von Wolf und Koberstein (2013) verwendet. Diese beinhaltet einige zusätzliche Techniken, wie das sogenannte Cut Consolidation oder Dynamic Sequencing Protocol, wodurch die Lösungszeit verbessert und der Speicherbedarf gesenkt werden kann.

Weiterhin existieren in der Literatur approximative Verfahren zur Lösung von stochastischen Optimierungsmodellen. Dazu zählt die sogenannte Sample Average Approximation (SAA), welche für ein zweistufiges stochastisches Optimierungsmodell näherungsweise Lösungen identifiziert (vgl. (Birge und Louveaux, 2011, S. 389 ff.)). In Algorithmus 1 ist der Pseudocode des Verfahrens in Anlehnung an Linderoth et al. (2006) skizziert. Der Algorithmus löst dabei das stochastische Optimierungsmodell, indem zunächst das ursprüngliche Problem in Teilprobleme (sogenannte SAA-Probleme) aufgeteilt wird. Jedes SAA-Problem beinhaltet dabei eine Teilmenge an Szenarien des originalen Problems und wird iterativ mit PNB oder CPLEX gelöst. Die Lösung für die Entscheidungen der ersten Stufe x sowie der Zielfunktionswert z werden pro Iteration gespeichert. Für jede dieser Lösungen wird anschließend mehrfach ein Problem mit einem größeren Szenarienumfang gelöst, wodurch die Entscheidungen der ersten Stufe x evaluiert werden und so der Zielfunktionswert z' bestimmt wird. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis ein Abbruchkriterium (d.h. hier die Anzahl an Evaluierungsdurchläufen) erreicht ist. Schließlich werden auf Basis von z und z' die Konfidenzintervalle für die obere und untere Schranke der Lösung berechnet, welche Aufschluss über die Lösungsqualität von x geben.

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Optimierungsmodell mithilfe des Open-Source-Frameworks FlopC++ umgesetzt. Dieses stellt eine algebraische Modellierungssprache für lineare Optimierungsprobleme dar, ist Bestandteil des Computational Infrastructure for Operations Research (COIN-OR) Projektes und wurde im Rahmen einer C++ Bibliothek realisiert. Um die betrachteten Unsicherheiten adäquat abzubilden, ist ein stochastisches Optimierungsmodell notwendig. Daher wird auf eine stochastische Erweiterung der FlopC++ Bibliothek zurückgegriffen. Diese bietet

Algorithmus 1 : Pseudocode des Sample-Average-Approximation-Algorithmus in Anlehnung an Linderoth et al. (2006)

Eingabe: Probleminstanz, Parameter

Ausgabe: Wert und Varianz für untere/obere Schranke des Zielfunktionswertes

Initialisierung: Setze Stichprobenumfang (N), Evaluierungsumfang (E),
Anzahl Evaluierungen (J) und Anzahl Iterationen (I);

for $i \leftarrow 1$ **to** I **do**

 Latin-Hypercube-Sampling um einen Szenariobaum mit N Szenarien zu erstellen (SAA-Problem);

 Löse das SAA-Problem mit PNB/CPLEX;

 Speichere Stufe-1-Entscheidung x und den Zielfunktionswert z des SAA-Problems;

for $j \leftarrow 1$ **to** J **do**

 Latin-Hypercube-Sampling um einen Szenariobaum mit E Szenarien zu erstellen (EV-Problem);

 Löse EV-Problem mit fixierten Stufe-1-Entscheidungen x mit PNB/CPLEX;

 Speichere Stufe-2-Entscheidung x' und den Zielfunktionswert z' des EV-Problems;

end

end

Berechne Konfidenzintervalle für untere und obere Schranke;

die Möglichkeit mehrstufige stochastische Optimierungsmodelle zu formulieren (Wolf et al., 2011).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analysen präsentiert. Sämtliche Analysen wurden dabei auf einem Windows PC (Intel Core i7-3770 CPU, 3.40 GHz, 32 GB RAM, Windows 8.1 Professional) durchgeführt.

6.3.2 Laufzeitanalyse und Qualität der Lösungsverfahren

Um die Anwendbarkeit des Modells für einen Entscheidungsträger zu demonstrieren, werden die Lösungsverfahren anhand der Laufzeit- und Lösungsqualität miteinander verglichen. Realitätsnahe Probleminstanzen in verschiedenen Domänen zu lösen ist dabei im Bereich des Supply Chain Managements eine wichtige Anforderung (Brandenburg et al., 2014). Daher werden im Folgenden Probleminstanzen mit variierender Größe miteinander verglichen. Die Probleminstanzen unterscheiden sich dabei anhand der Anzahl an betrachteten Standorte, der Produkte und Produktionsaktivitäten des Wertschöpfungsnetzwerks sowie anhand der Anzahl der Szenarien. Da die Anzahl der betrachteten Szenarien signifikanten Einfluss auf die Modellgröße hat,

Id	#Standorte			#Produkte	#Produktions- aktivitäten	#Perioden	#Szenarien
	Prod.	Lager	Kundenreg.				
I1	4	4	2	6	3	12	[1-125]
I2	8	8	10	14	4	12	[1-125]
I3	10	10	20	48	7	12	[1-125]

Tabelle 6.4: Übersicht über die Größe der Probleminstanzen

wird diese je Instanz zusätzlich variiert. In Tabelle 6.4 sind die betrachteten Problem-
instanzen anhand ihrer Eigenschaften aufgeführt. Dabei werden drei grundlegende
Instanzen (I1, I2 und I3) unterschieden, welche jeweils mit einer unterschiedlichen
Anzahl an Szenarien (d.h. 1, 25, 50, 75, 100 und 125 Szenarien) kombiniert werden,
sodass insgesamt 18 Instanzen resultieren. Im Folgenden werden die Ergebnisse der
Analyse präsentiert. Um statistische Ausreißer bei den Ergebnissen zu vermeiden,
werden Durchschnittswerte über fünf Durchläufe berechnet.

In Abbildung 6.2 ist der Laufzeitvergleich der drei Lösungsverfahren, d.h. das Lö-
sen mittels Transformation in ein deterministisches Äquivalent und Verwenden des
Standard-MIP-Solvers IBM CPLEX (MIP), des Parallel Nested Benders (PNB) und
der Sample Average Approximation (SAA) für die Instanz I1 in Abhängigkeit der
Anzahl an Szenarien dargestellt. Während die Lösungen des MIPs und des PNBs
jeweils eine optimale Lösung darstellen, liefert das SAA-Verfahren eine näherungs-
weise Lösung, welche aus unterer und oberer Schranke besteht. Aus diesen Schranken
lässt sich der relative GAP der Lösung berechnen, welcher als Qualitätskriterium der
Lösung herangezogen wird. Um die Vergleichbarkeit der Lösungsverfahren sicherzu-
stellen, wurde das SAA-Verfahren derart parametrisiert²³, dass der relative GAP der
Lösung einen maximalen Schwellwert von 1,5% nicht überschreitet.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Effizienz des Lösungsverfahrens signifi-
kant von der Anzahl an Szenarien abhängt. So kann die Probleminstanz I1 für wenige
Szenarien (d.h. bis ca. 50 Szenarien) am schnellsten mittels MIP gelöst werden. Wird
die Anzahl an Szenarien jedoch linear erhöht, so steigt auch die Modellgröße linear
an, was dann in exponentiell wachsenden Lösungszeiten des MIPs mündet. Mittels
PNB können die Probleminstanzen mit mehr als 50 Szenarien schneller gelöst wer-
den, wobei die Vorteilhaftigkeit des Verfahrens mit zunehmender Anzahl an Szenarien
wächst. So kann die Laufzeit im Fall von 125 Szenarien um ca. 87% gesenkt werden.
Das SAA-Verfahren identifiziert im Fall von vielen Szenarien in einer noch deut-

²³Der Stichprobenumfang beträgt hier 12, der Evaluierungsumfang entspricht allen Szenarien,
die Anzahl der Evaluierungen beträgt 1 und es werden 10 Iterationen durchgeführt.

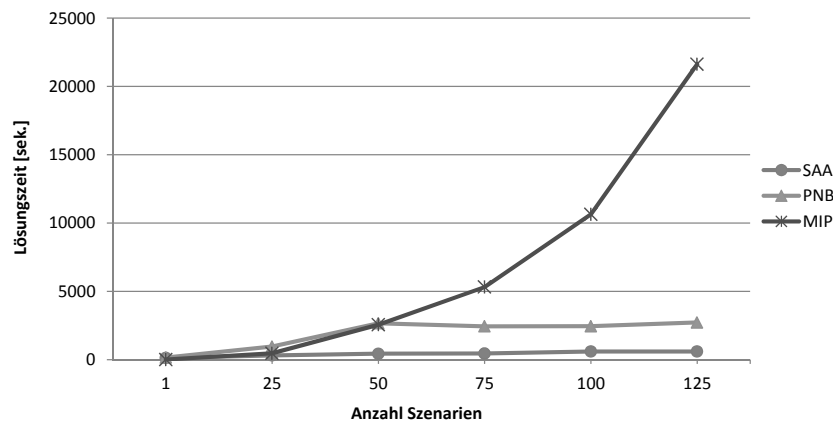


Abbildung 6.2: Lösungszeitvergleich in Abhängigkeit einer steigenden Anzahl an Szenarien

lich kürzeren Laufzeit eine Lösung. So kann diese bei 125 Szenarien im Vergleich zum PNB nochmal um 78% reduziert werden. Diese Laufzeitreduzierung geht jedoch mit Einbußen der Lösungsqualität einher. Daher ist das SAA-Verfahren besonders im Kontext von Sensitivitätsanalysen für praxisnahe Instanzen mit vielen Szenarien sinnvoll.

Diese Ergebnisse lassen sich auch für die größeren Instanzen I2 und I3 reproduzieren. Dazu ist in Abbildung 6.3 das Lösungszeitverhältnis der einzelnen Lösungsverfahren je Instanz dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass auch für Instanzen mit einer größeren Anzahl an Elementen (d.h. Produkte, Standorte, Aktivitäten)

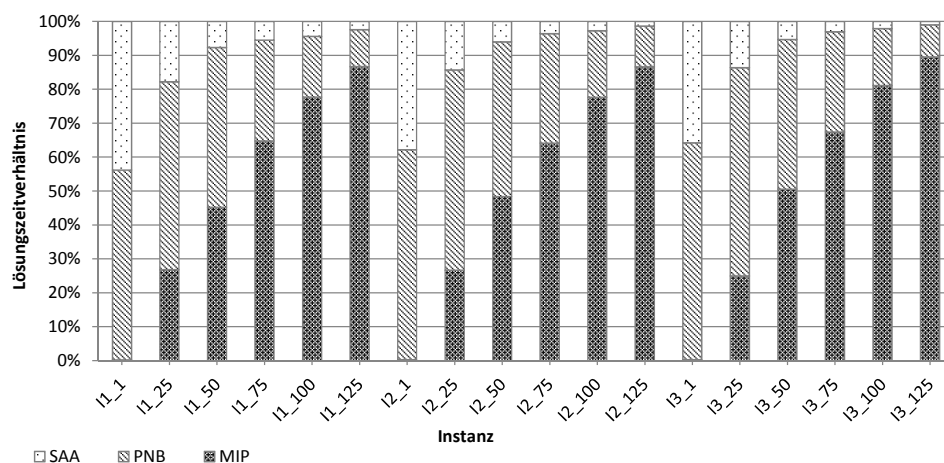


Abbildung 6.3: Lösungszeitvergleich bei steigender Problemkomplexität

für wenige Szenarien das MIP die effizienteste Lösung darstellt. Im Vergleich zur Problem Instanz I1 ist die absolute und relative Differenz der Lösungszeit zwischen MIP und den anderen Verfahren sogar noch größer. Werden dagegen die Problem Instanzen I2 und I3 mit einer großen Anzahl an Szenarien betrachtet, so sind die Lösungsverfahren PNB und SAA effizienter. Im Vergleich zur Instanz I1 nimmt die absolute und relative Differenz der Lösungszeiten zwischen PNB/SAA und dem MIP sogar noch leicht zu.

Wie oben beschrieben, liefert das SAA im Vergleich zum MIP und PNB nur näherungsweise Lösungen, wobei die Lösungsqualität von der Parametrisierung des Algorithmus abhängt. Um die Lösungsqualität in Abhängigkeit der Parametrisierung zu evaluieren, wird im Folgenden die Problem Instanz I1 mit 1000 Szenarien betrachtet. In Tabelle 6.5 sind zunächst die Lösungszeiten und der identifizierte Zielfunktionswert für die drei Lösungsverfahren präsentiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das MIP innerhalb von 8 Stunden keine gültige Lösung für diese Problemgröße identifizieren kann. PNB liefert dagegen einen Referenzwert für die optimale Lösung, benötigt im Vergleich zur oben durchgeführten Analyse mit 125 Szenarien jedoch deutlich länger. SAA liefert auch hier die effizienteste Lösungszeit bei adäquater Lösungsqualität.

Lösungsverfahren	MIP	PNB	SAA (Stichprobe=24, Iterationen=10, GAP < 1.5%)
Lösungszeit [sek.]	> 28800	3222,98	1530,25
Zielfunktionswert [GE]	-	792653	Intervall: [791585 ± 0; 802097 ± 2988]

Tabelle 6.5: Lösungszeit- und Qualitätsvergleich für die Lösungsverfahren

Besonders der Stichprobenumfang des SAA-Verfahrens beeinflusst dabei die Lösungsqualität signifikant. Daher sind die Auswirkungen einer variierenden Stichprobe auf die Lösungszeit und -qualität in Abbildung 6.4 dargestellt. Alle anderen Parameter des SAA-Verfahrens bleiben im Vergleich zur oben beschriebenen Analyse unverändert.

Aus diesem Ergebnis geht hervor, dass die Differenz zwischen unterer und oberer Schranke der Lösung bei geeigneter Wahl des Stichprobenumfangs sehr gering sein kann. Ist der Stichprobenumfang dagegen zu niedrig angesetzt, führt dies zwar einerseits zu sehr geringen Lösungszeiten, andererseits jedoch zu einem hohen relativen GAP, welches eine schlechte Lösungsqualität impliziert. Ab einem Stichprobenumfang von 5 können bei dieser Problem Instanz Lösungen mit akzeptablem relativen GAP identifiziert werden und ab einem Stichprobenumfang von 15 Szenarien werden sogar Lösungen mit sehr geringen relativen GAP identifiziert. Wird der Stichpro-

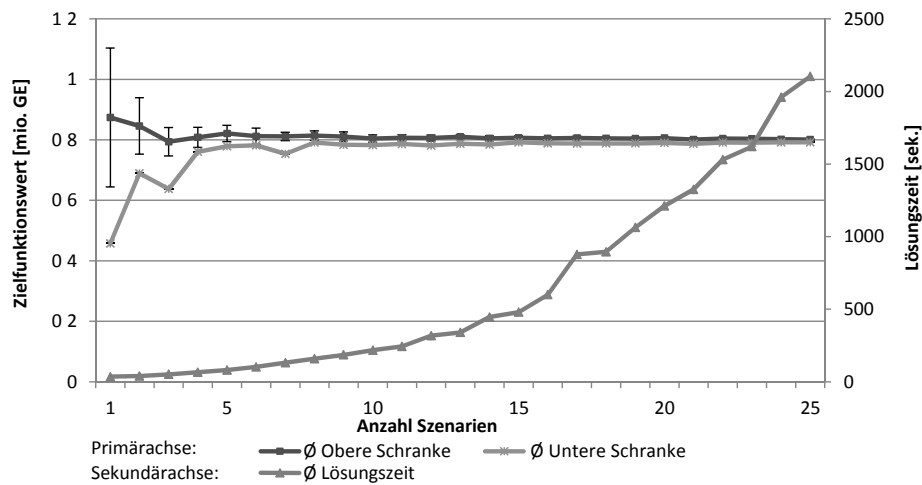


Abbildung 6.4: Qualitäts- und Lösungszeitvergleich für SAA

benumfang jedoch weiter erhöht, verbessert sich zwar einerseits die Lösungsqualität noch etwas, andererseits steigt auch die Lösungszeit signifikant an. Daher bietet sich insgesamt für diese Problemistanz ein Stichprobenumfang von ca. 15 Szenarien an.

6.4 Ökonomische Analyse des stochastischen Optimierungsmodells

In diesem Abschnitt wird der ökonomische Mehrwert des entwickelten SMIPs anhand einer Fallstudie aus der Textilindustrie (vgl. (Dapiran, 1992)) evaluiert. Zunächst werden die Eigenschaften und die Struktur der betrachteten Problemistanzen in Abschnitt 6.4.1 vorgestellt. Anschließend werden in Sensitivitätsanalysen Auswirkungen bezüglich der Nachfragestruktur auf die Supply Chain-Strategie in Abschnitt 6.4.2 untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung von Nachfrageunsicherheiten und dem Einfluss unterschiedlicher Korrelationen der Nachfrage, da diesen Faktoren in der Literatur ein signifikanter Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit von Postponement-Strategien zugewiesen wird (vgl. bspw. (Pagh und Cooper, 1998) und (Silver und Minner, 2005)). Abschließend erfolgt in Abschnitt 6.4.3 die Betrachtung der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers. Dabei wird der Einfluss der Risikobereitschaft auf eine optimale Supply Chain-Strategie herausgestellt.

6.4.1 Fallstudie und Untersuchungsaufbau

Ziel der Fallstudie ist es, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren aufzuzeigen und den Nutzen des SMIPs zur Entscheidungsunterstützung bei der Identifizierung von optimalen Supply Chain-Strategien darzulegen. Weiterhin soll

durch die Fallstudie demonstriert werden, dass mit Hilfe des Modells bestehende Zielkonflikte bei der Entscheidungsfindung (d.h. zwischen Gewinnmaximierung und Risikominimierung) aufgelöst werden können, indem gemäß der Präferenzen des Entscheidungsträgers optimale Lösungen identifiziert werden. Dazu wird auf die genannte Fallstudie der Textilindustrie zurückgegriffen (vgl. (Dapiran, 1992)), da diese ein viel zitiertes Beispiel in der Literatur ist, auf welches im Rahmen von Analysen von Postponement-Strategien häufig verwiesen wird (siehe bspw. (Lee und Tang, 1997), (Yang und Burns, 2003), (Tang, 2011) und (Guericke et al., 2012)). Die auf Basis dieser Fallstudie generierten Problem instanzen werden im Folgenden beschrieben.

Die Fallstudie betrachtet eine globale Supply Chain, in der Markenkleidung für Endverbraucher hergestellt wird. Dabei beschafft die Supply Chain zunächst Rohmaterialien (d.h. Garn), welche anschließend in einem mehrstufigen Produktionsprozess gefärbt und genäht werden, sodass schließlich ein Pullover das Endprodukt darstellt. Dabei benötigen alle Produktionsaktivitäten genau eine Einheit eines Vorprodukts um eine Einheit eines Produkts herzustellen. Alle Produktionsaktivitäten, die auf Basis eines Rohmaterials oder Zwischenproduktes durchgeführt werden können, sind in der linken Abbildung 6.5 dargestellt. Die Reihenfolge der Produktionsaktivitäten ist dabei austauschbar, sodass die Reihenfolge der Aktivitäten einen Freiheitsgrad für den Entscheidungsträger darstellt.

Die rechte Abbildung 6.5 stellt das Wertschöpfungsnetzwerk der Fallstudie graphisch dar. Die Produktions- und Lagerstandorte sind dabei verschiedenen Wertschöpfungsstufen zugeordnet, wobei die erste Wertschöpfungsstufe einen Standort in Übersee (bspw. in Asien) und die folgenden Wertschöpfungsstufen Standorte in Europa repräsentieren. Daraus ergeben sich lange Transportzeiten zwischen dem Standort

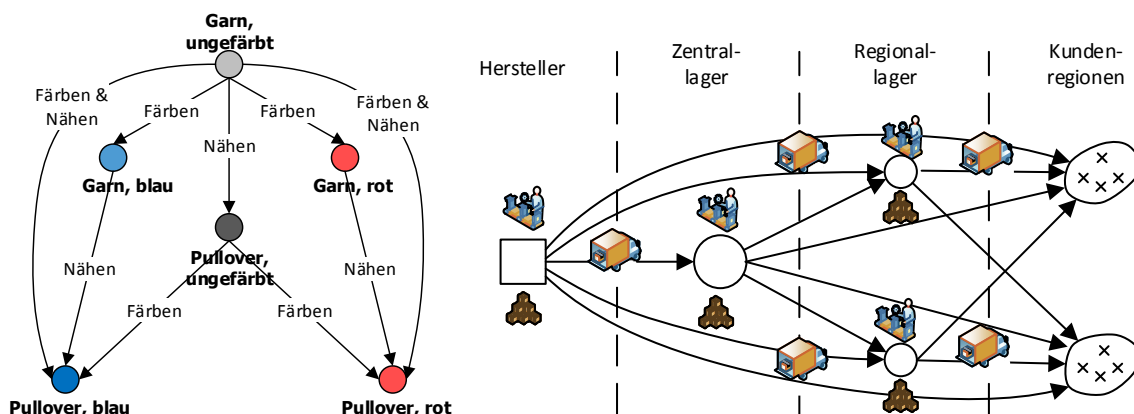


Abbildung 6.5: Zulässige Produktionsaktivitäten und betrachtete Supply Chain der Fallstudie

auf der ersten Wertschöpfungsstufe und allen anderen Standorten inklusive der Kundenregionen.

Im Rahmen des Wertschöpfungsnetzwerks gilt es die Produktions- und Logistikaktivitäten zu planen, sodass verschiedene Supply Chain-Strategien gegeneinander evaluiert werden können. Dazu müssen Annahmen über die Kostenstrukturen des Wertschöpfungsnetzwerks getroffen werden. Diese werden auf Basis der Literatur im Bereich Postponement getätigt (vgl. (Dapiran, 1992), (Lee et al., 1993), (Yang und Burns, 2003) und (Guericke et al., 2012)) und sind zusammenfassend in Abbildung 6.6 dargestellt. So wird angenommen, dass fixe und variable Produktionskosten an Standorten in Richtung der Kunden ansteigen. Weiterhin führen Verbundeffekte dazu, dass das Durchführen von sämtlichen Aktivitäten an einem Standort kostengünstiger ist, als die Aktivitäten auf verschiedene Standorte aufzuteilen. Fixe und variable Kostensätze für das Durchführen von Lageraktivitäten sind insgesamt deutlich niedriger angesetzt als die entsprechenden Kostensätze für Produktionsaktivitäten und hängen von der Kapazität des jeweiligen Lagerstandortes ab. So weisen Lagerstandorte mit kleineren Kapazitäten einen höheren variablen Lagerkostensatz auf als Lagerstandorte mit großen Kapazitäten. Da Lagerkapazitäten in Abhängigkeit des Fertigstellungsgrades der Produkte verbraucht werden (d.h. Endprodukte verbrauchen bspw. mehr Kapazität als Rohmaterialien), steigen die variablen Lagerkostensätze mit zunehmenden Fertigstellungsgrad der Produkte. Die Höhe der fixen und variablen Transportkostensätze definiert sich anhand der Distanz der Transportverbindung. Wie bei den Lagerkostensätzen steigen auch die variablen Transportkostensätze in Abhängigkeit des Fertigstellungsgrades der Produkte an.

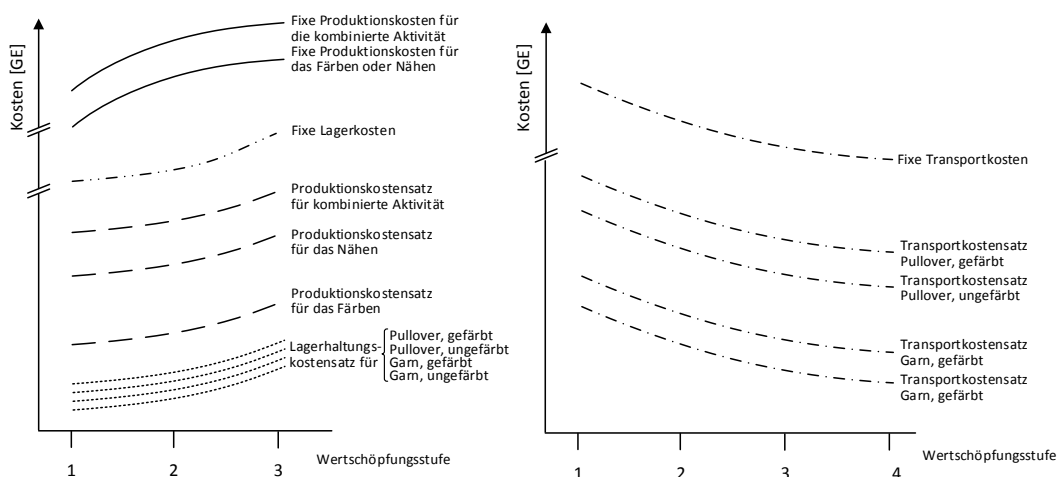


Abbildung 6.6: Annahmen der Kostenstruktur für die Fallstudie

Da sich Modetrends in der Textilindustrie sehr schnell ändern, sind Produktlebenszyklen für Kleidungsstücke entsprechend kurz. Der Zeitraum, über den die Produkte abgesetzt werden, hängt von saisonbedingten Faktoren ab, sodass häufig ein Planungszeitraum von mehreren Monaten betrachtet wird (Christopher, 2005). Daher wird auch in dieser Fallstudie das Planungsproblem über einen Planungszeitraum von einem Jahr betrachtet, wobei der Planungszeitraum in 12 diskreten Perioden unterteilt wird. So repräsentiert jede Periode einen Monat.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse von Sensitivitätsanalysen präsentiert. Dabei wird anhand der Fallstudie gezeigt, dass das entwickelte stochastische Optimierungsmodell effektiv zur Entscheidungsunterstützung bei der Identifizierung von gewinnmaximalen Postponement-Strategien in Abhängigkeit der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers eingesetzt werden kann. Dazu werden Wechselwirkungen von Einflussfaktoren auf optimale Handlungsentscheidungen herausgestellt und die durch unterschiedliche Postponement-Strategien resultierenden Erlös- und Kostenänderungen untersucht. Tabelle 6.6 fasst die im Rahmen der Sensitivitätsanalysen untersuchten Forschungsfragen inklusive der veränderlichen Größen zusammen.

Abschnitt	Forschungsfrage	Veränderliche Größe
6.4.2	Welchen Einfluss haben Nachfrageunsicherheiten auf Supply Chain-Strategien?	Supply Chain-Strategien, Grad an Nachfrageunsicherheit
	Wie beeinflussen unterschiedliche Nachfragekorrelationen die Vorteilhaftigkeit von Supply Chain-Strategien?	Supply Chain-Strategien, Grad der Nachfragekorrelation
6.4.3	Welchen Einfluss hat die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers auf Supply Chain-Strategien?	Risikobereitschaft, Grad an Nachfrageunsicherheit, Grad der Nachfragekorrelation

Tabelle 6.6: Übersicht der Forschungsfragen zur Analyse des Optimierungsmodells

6.4.2 Einfluss von variierenden Nachfrageunsicherheiten und Nachfragekorrelationen

Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, liefern Unsicherheiten bezüglich der Nachfrage eine wesentliche Motivation für das Anwenden von Postponement-Strategien. In Abhängigkeit des Grads an Nachfrageunsicherheiten können sich dabei unterschiedliche Postponement-Strategien eignen. Auch die Struktur der Nachfrage, dass heißt eine Korrelation zwischen der Nachfrage von verschiedenen Produkten kann die Vorteilhaftigkeit einer Postponement-Strategie möglicherweise beeinflussen (Silver und

Minner, 2005). Im Rahmen der folgenden Sensitivitätsanalyse wird daher der Einfluss von unterschiedlich starken Nachfrageunsicherheiten und verschiedenen Nachfragekorrelationen auf die Identifizierung einer gewinnmaximalen Supply Chain-Strategie quantitativ mit Hilfe des entwickelten SMIPs untersucht.

Erstellung der Nachfrageunsicherheiten und -korrelationen

Zur Durchführung dieser Sensitivitätsanalyse werden Daten für die Nachfrage in Abhängigkeit des Grads an Nachfrageunsicherheit sowie der Art der Korrelationen benötigt. Im Folgenden wird das Vorgehen zur Erstellung dieser Daten beschrieben. Im entwickelten stochastischen Optimierungsmodell wird die unsichere Nachfrage durch Szenarien abgebildet. Jedes Szenario enthält dabei Nachfragewerte für die betrachteten Produktvarianten in den einzelnen Kundenregionen und wird mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit belegt. Weiterhin wird zur Abbildung der Marktdurchdringung der Produktvarianten über deren Produktlebenszyklen die Nachfrage saisonal über den Planungszeitraum verteilt. Die Generierung der konkreten Nachfragewerte wird durch zwei Parameter gesteuert:

- **Grad der Nachfrageunsicherheit (σ/μ):** Der Grad der Nachfrageunsicherheit repräsentiert die Stärke der Nachfrageschwankungen über die einzelnen Szenarien. Der Koeffizient (σ/μ) definiert dabei die Variation der Nachfrage für eine Kombination aus Produktvariante und Kundenregion. Für jede Kombination an Produktvariante und Kundenregion werden auf Basis dieses Koeffizienten gemäß einer zu definierenden Verteilung eine Menge an Nachfragewerten generiert. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse wird dabei eine Normalverteilung verwendet und es werden 25 Werte je Kombination generiert. Dabei werden Probleminstanzen mit unterschiedlich ausgeprägten Nachfrageunsicherheiten entsprechend der Koeffizienten 0,0% (d.h. keine Unsicherheit), 2,5% (niedrig), 5,0% (mittel), 10,0% (hoch) und 20,0% (sehr hoch) erstellt.
- **Grad der Nachfragekorrelation (ρ):** Der Grad der Nachfragekorrelation definiert einen Parameter zur Abbildung der Nachfragekorrelation zwischen verschiedenen Produktvarianten und unterschiedlichen Kundenregionen. Dabei gilt $-1 \leq \rho \leq 1$. Der Koeffizient (ρ) gibt damit das Nachfrageverhältnis von verschiedenen Kombinationen an Produktvarianten und Kundenregionen an. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden die positive (d.h. $\rho = +1$) sowie die negative (d.h. $\rho = -1$) Korrelation betrachtet.

Auf Basis dieser beiden Koeffizienten werden die Nachfrageszenarien erstellt. Abbildung 6.7 verdeutlicht schematisch den Zusammenhang zwischen dem Grad der Nachfrageunsicherheit und dem Grad der Nachfragekorrelation. Die finalen Nachfrageszenarien lassen sich bezüglich der Unsicherheiten demnach anhand des oben definierten

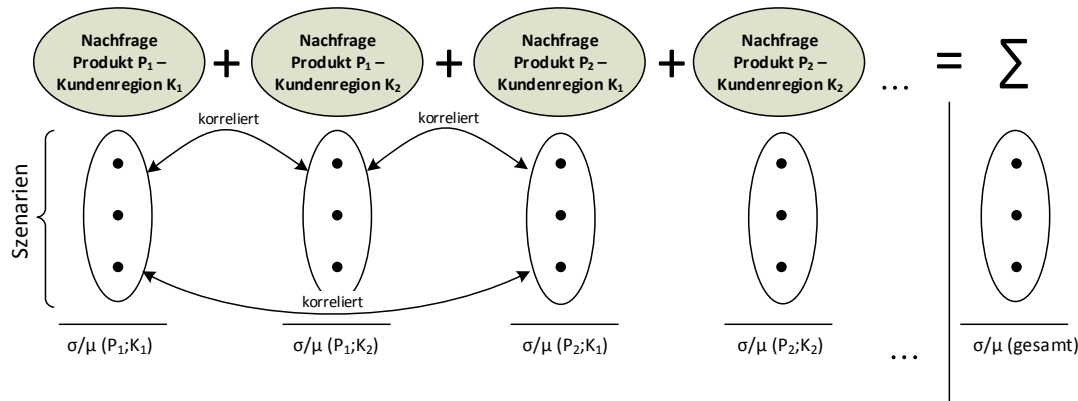


Abbildung 6.7: Schematische Übersicht zur Generierung von Nachfrageszenarien

Grads an Nachfrageunsicherheit je Kombination einer Produktvariante sowie Kundenregion messen. Zusätzlich unterscheiden sich die Nachfrageszenarien an dem Grad der Nachfrageunsicherheiten für den Gesamtmarkt (d.h. die Variation der Nachfrage aller Kombinationen an Produkten und Kundenregionen über die Szenarien). Bei positiver Nachfragekorrelation wird eine steigende Nachfrage für eine Produktvariante P_n in der Kundenregion K_m mit einer steigenden Nachfrage dieser Produktvariante in einer Kundenregion K'_m kombiniert, welches in identischen Koeffizienten für den Grad der Nachfrageunsicherheit resultiert (d.h. $\sigma/\mu(P_n, K_m) = \sigma/\mu(\text{gesamt})$). Dagegen unterscheiden sich die Koeffizienten im Fall einer negativer Nachfragekorrelationen (d.h. $\sigma/\mu(P_n, K_m) \geq \sigma/\mu(\text{gesamt})$), da hier eine steigende Nachfrage für eine Produktvariante P_n in der Kundenregion K_m mit sinkender Nachfrage für dieselbe Produktvariante in Kundenregion K'_m kombiniert wird.

Auswertung der Sensitivitätsanalyse

Zunächst wird untersucht, welchen Einfluss der Grad der Nachfrageunsicherheit sowie der Grad der Nachfragekorrelation auf die optimale Supply Chain-Strategie haben. Dazu werden die Koeffizienten σ/μ und ϱ wie oben beschrieben variiert. Weiterhin wird untersucht, inwiefern sich zusätzliche Freiheitsgrade bezüglich der Umsetzung von Postponement-Strategien auf die Identifizierung von optimalen Handlungsempfehlungen auswirken. Bei diesen Analysen wird zunächst ein risikoneutraler Entscheidungsträger unterstellt. Das heißt, dass diejenige Strategie identifiziert wird, welche den Erwartungswert des EBIT über alle Szenarien maximiert.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 6.7 dargestellt. Zur Visualisierung der identifizierten Strategien wird in der Tabelle je Testfall eine Zeichenfolge verwendet. Diese repräsentiert die an einem Standort bereitgestellten Produktionsaktivitäten. Buchstaben repräsentieren dabei die jeweiligen Produktionsaktivitäten, wäh-

		Grad an Nachfrageunsicherheit				
Strategie	ϱ	keine	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Nur Full Speculation erlaubt	+1	$FN k _k^k$	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
	-1	$FN k _k^k$	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
Postponement erlaubt	+1	$FN k _k^k$	\rightarrow	$F k _N^N$	$k FN _k^k$	\rightarrow
	-1	$FN k _k^k$	\rightarrow	$N F _k^k$	\rightarrow	\rightarrow

Tabelle 6.7: Ergebnisse bezüglich einer optimalen Supply Chain-Strategie unter Variation des Grads der Nachfrageunsicherheit und der Nachfragekorrelation

rend senkrechte Striche die Grenzen zwischen den Wertschöpfungsstufen darstellen. Die Zeichenfolge gibt somit Aufschluss über die Art der umgesetzten Supply Chain-Strategie. Beispielsweise wird im Fall eines mittleren Grades an Nachfrageunsicherheiten und einer positiven Nachfragekorrelation - sofern Postponement erlaubt ist - die Produktionsaktivität Färben (F) im Standort auf der ersten Wertschöpfungsstufe, keine Produktionsaktivität (k) im Standort auf der zweiten Wertschöpfungsstufe und die Produktionsaktivität Nähen in beiden Standorten der dritten Wertschöpfungsstufe durchgeführt. Pfeile repräsentieren in dieser Darstellung eine im Vergleich zum Fall mit geringeren Nachfrageunsicherheiten unveränderte Lösung hinsichtlich der optimalen Supply Chain-Strategie.

Als Referenzlösung wird zunächst der Fall betrachtet, dass Postponement-Strategien ausgeschlossen sind (d.h. nur die Strategie Full Speculation ist erlaubt). In diesem Fall werden unabhängig vom Grad der Nachfrageunsicherheit und der Nachfragekorrelation beide Produktionsaktivitäten jeweils im Standort der ersten Wertschöpfungsstufe durchgeführt, da das Verschieben von Produktions- und Logistikaktivitäten per Definition keinen Freiheitsgrad darstellt. In diesem Fall werden sämtliche Produktvarianten auf der ersten Wertschöpfungsstufe gefertigt und anschließend mittels dezentraler Distributionsstrategie über die Regionallager an die Kunden verteilt. Stellen Postponement-Strategien dagegen einen zusätzlichen Freiheitsgrad dar, so kann unter den getroffenen Kostenannahmen festgestellt werden, dass Konzepte des Postponements mit zunehmenden Grad an Nachfrageunsicherheiten immer vorteilhafter werden. Die initiale Parametrisierung stellt dabei sicher, dass die Effekte des Verschiebens von Aktivitäten auf die Unsicherheiten und nicht auf die Kostenstruktur der Supply Chain zurückzuführen sind. Dies wird dadurch sichtbar, dass im deterministischen Fall (d.h. es liegen keine Nachfrageunsicherheiten vor) eine Full Speculation-Strategie die optimale Lösung darstellt, obwohl Postponement möglich

wäre (siehe Tabelle 6.7). Weiterhin wird deutlich, dass der Grad an Postponement mit wachsenden Unsicherheiten zunimmt, da vermehrt Produktions- und Logistikaktivitäten in Richtung der Kunden verschoben werden.

Die Ursachen für das Verschieben von Produktions- und Logistikaktivitäten kann anhand von Kausalketten erklärt werden. So wird beispielsweise im Fall eines mittleren Grads an Nachfrageunsicherheit und einer positiven Nachfragekorrelation Form Postponement als optimale Handlungsempfehlung identifiziert, da hierdurch im Vergleich zu einer Full Speculation-Strategie, generische Zwischenprodukte statt Endprodukte gelagert werden, wodurch Lagerbestände sowie Lagerkosten gesenkt werden können. Damit verbunden verringert sich die Distanz, in denen Produkte im finalen Zustand transportiert werden, was gemäß getroffener Kostenannahmen (siehe Abschnitt 6.4.1) eine weitere Kostenreduzierung ermöglicht. Weiterhin führt das Verschieben der Produktionsaktivitäten dazu, dass unter bestehenden Unsicherheiten die Nachfrage zielgerichteter erfüllt werden kann, welches die Erlöse erhöht sowie die Strafkosten senkt und gleichzeitig zu einem besseren Servicegrad in den Kundenregionen führt. Andererseits finden einige Produktionsaktivitäten nun auf der Wertschöpfungsstufe der Regionallager statt, sodass die Produktionskosten steigen, da Verbundeffekte verloren gehen und Synergieeffekte nicht mehr genutzt werden können.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse hinsichtlich eines variierenden Grads an Nachfragekorrelation, kann festgestellt werden, dass sich mit zunehmenden Nachfrageunsicherheiten Änderungen bezüglich der optimalen Strategie ergeben. So wird bei einer positiven Nachfragekorrelation zunächst eine Form Postponement-Strategie als Handlungsempfehlung identifiziert, welche bei zunehmenden Unsicherheiten schließlich in eine Full Postponement-Strategie geändert wird. Die Ursache für diesen Effekt findet sich in den Strukturen der Nachfrageunsicherheit wieder. Eine positive Nachfragekorrelation bedeutet eine große Nachfrageschwankung auf Gesamtmarktnachfrage. Dies führt neben einer Unsicherheit bei den kundenindividuellen Produktvarianten auch zu Unsicherheiten bei den Zwischenprodukten. Daher lohnt sich zunächst ein Verschieben von kostenintensiven Produktionsaktivitäten, wodurch Fehlmengen und hohe Lagerbestände auf Ebene der Produktvarianten vermieden werden. Nehmen die Unsicherheiten weiter zu werden schließlich alle Produktionsaktivitäten verschoben und eine Distribution ausgehend von einer zentralen Lagerhaltung durchgeführt. Durch diese Strategieänderung wird bei hohen Nachfrageunsicherheiten eine bessere Flexibilität geschaffen.

Im Fall einer negativen Nachfragekorrelation werden ab einem mittleren Grad an Nachfrageunsicherheiten die Produktionsaktivitäten zur Individualisierung der Produktvarianten verschoben (d.h. hier die Produktionsaktivität zum Färben). Dieser Effekt liegt an einer geringeren Nachfrageunsicherheit hinsichtlich der Nachfrage des

Gesamtmarktes, welche aus der negativen Nachfragekorrelation resultiert. Dadurch ist die Nachfrage nach unspezifischen Zwischenprodukten relativ konstant, sodass es nicht lohnenswert ist, die Produktionsaktivitäten zur Herstellung dieser Zwischenprodukte zu verzögern.

Um die Auswirkungen des Verschiebens von Produktions- und Logistikaktivitäten tiefergehend zu analysieren, werden im Folgenden der EBIT sowie Kostenkennzahlen in Abhängigkeit der optimalen Strategie und eines variierenden Grads an Nachfrageunsicherheiten sowie Nachfragekorrelationen betrachtet. In Abbildung 6.8 ist dabei zunächst der EBIT für verschiedene Strategien in Abhängigkeit des Grads der Nachfrageunsicherheit und der Nachfragekorrelation dargestellt. Wird mit zunehmenden Unsicherheiten an einer Full Speculation-Strategie festgehalten, sinkt der EBIT sukzessive. Durch das Umsetzen von Postponement-Strategien kann dieser Effekt gemindert werden, sodass ein Einsparungspotential durch eine solche Strategieänderung realisiert wird. Die Ursache liegt darin, dass beim Durchführen von Postponement-Strategien gegenüber von Full Speculation-Strategien die Nachfrage besser antizipiert werden kann, da Aktivitäten zeitlich später durchgeführt werden können. Dadurch können Fehlmengen und Lagerbestände reduziert werden.

Weiterhin verdeutlichen die Ergebnisse, dass unter Nachfrageunsicherheiten im Fall einer negativen Nachfragekorrelation das Einsparungspotential von Postponement-Strategien größer ist, als bei einer positiven Nachfragekorrelation. Die Ursache hierfür stellt die im Fall einer negativen Nachfragekorrelation relativ konstant bleibende Gesamtmarktnachfrage dar. Durch das Verschieben von Produktionsaktivitäten zur Individualisierung von Produktvarianten kann diese sehr gut antizipiert werden.

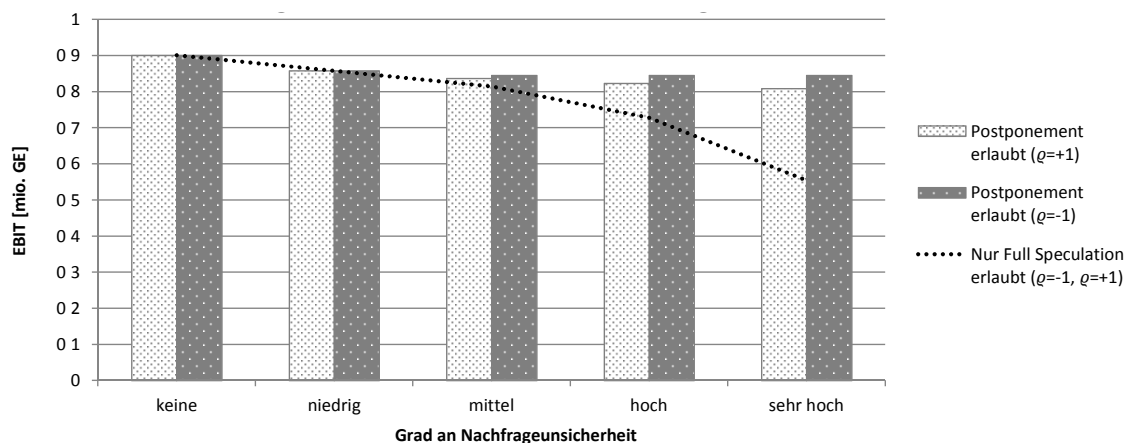


Abbildung 6.8: Entwicklung der Kennzahl des EBIT für optimale Strategien in Abhängigkeit der Nachfrageunsicherheit und Nachfragekorrelation

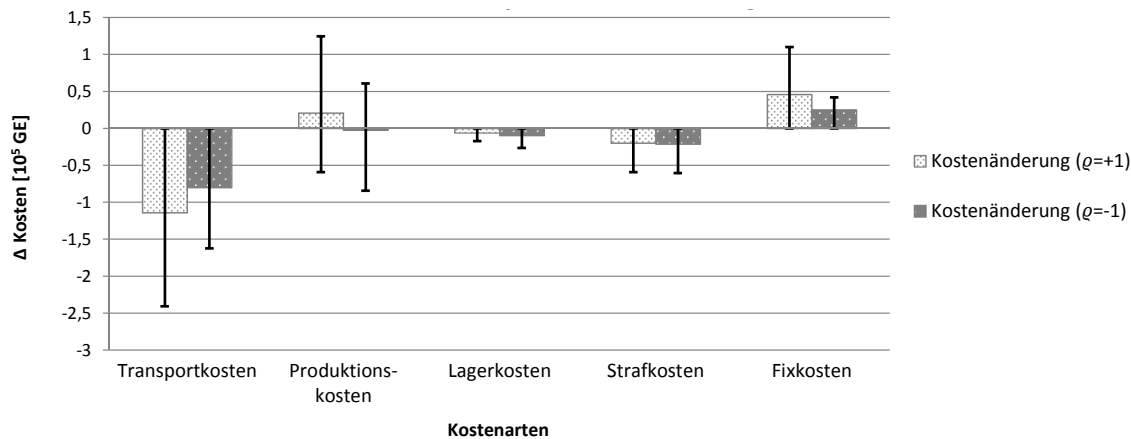


Abbildung 6.9: Kostenvergleich zwischen Full Speculation- und Full Postponement-Strategien

Um die Ursachen des zuvor beschriebenen Einsparungspotenzials zu erklären werden Kostenkennzahlen ermittelt. Dazu zählen variable Produktions-, Transport-, Lager- und Strafkosten sowie fixe Kosten für das Bereitstellen von Produktions-, Transport- und Lageraktivitäten. Abbildung 6.9 stellt die absolute Differenz dieser Kostenarten für die beiden Fälle dar, dass Postponement-Strategien erlaubt sind und dass nur Full Speculation möglich ist. Die zwischen den unterschiedlichen Strategien bestehenden Kostendifferenzen (d.h. das Kosteneinsparungspotential bzw. der Kostenmehraufwand, welcher aufgrund von Postponement-Strategien entsteht) werden aggregiert über alle Grade an Nachfrageunsicherheiten und anhand der unterschiedlichen Koeffizienten der Nachfragekorrelation dargestellt. Um die Spannweite der Auswirkungen von Nachfrageunsicherheiten in der Abbildung darzustellen, werden sogenannte Whiskers verwendet. Diese stellen das Intervall von Kostendifferenzen über alle Grade von Nachfrageunsicherheiten dar. So wird im Fall einer positiven Nachfragekorrelation durch eine Postponement-Strategie im Vergleich zu einer Full Speculation-Strategie eine über alle Grade an Nachfrageunsicherheiten durchschnittliche Transportkosteneinsparung von 114.000 GE erreicht. Während im Fall einer deterministischen Nachfrage kein Einsparungspotential bei den Transportkosten besteht (0 GE), ist das Einsparungspotential im Fall von mittleren Nachfrageunsicherheiten mit 240.000 GE maximal.

Insgesamt wird durch die Ergebnisse dieser Analyse sichtbar, dass durch das Anwenden von Postponement-Strategien über alle betrachteten Testfälle ein Einsparungspotential bei den variablen Transport- und Lagerkosten erzielt werden kann. Der Grund hierfür findet sich darin, dass Zwischenprodukte anstatt Endprodukte über längere Distanzen transportiert und in den Lagerstandorten bevorratet werden.

Im Gegensatz dazu müssen Produktionskostenänderungen differenzierter betrachtet werden. So führen Postponement-Strategien im Fall von geringen Nachfrageunsicherheiten aufgrund der verschobenen Produktionsaktivitäten und dem damit einhergehenden Verlust von Verbundeffekten zu höheren variablen Produktionskosten. Bei zunehmenden Unsicherheiten schwächt sich dieser Effekt ab, da im Fall einer Full Speculation-Strategie zur besseren Antizipation der Unsicherheiten mehr Produkte bevorratet und somit auch produziert werden müssen. Liegen schließlich große Nachfrageunsicherheiten vor, können bei den variablen Produktionskosten sowohl bei nicht korrelierter als auch bei korrelierter Nachfrage sogar Kosteneinsparungen erzielt werden, da im Vergleich zu einer Full Speculation-Strategie deutlich weniger Produkte bevorratet und damit auch nicht hergestellt werden müssen. Dies betrifft insbesondere produzierte Produktvarianten, welche über den Planungszeitraum hinaus nicht abgesetzt werden und somit Restbestände darstellen. Trotz der höheren Lagerbestände im Fall einer Full Speculation-Strategie kommt es bei zunehmenden Unsicherheiten zu Fehlmengen, wodurch Strafkosten verursacht werden. Aufgrund der durch Postponement-Strategien erzielten Einsparungen bei den Strafkosten können gleichzeitig auch höhere Erlöse generiert werden. Zuletzt geht aus den Ergebnissen hervor, dass Postponement-Strategien im Durchschnitt zu einem Kostenanstieg bei den Fixkosten führt. Die Ursache liegt im Anstieg der fixen Produktionskosten, welche mit zunehmenden Unsicherheiten steigen, da dann mehr Produktionsaktivitäten verschoben werden. Im Fall einer negativen Nachfragekorrelation sind die Mehrkosten etwas geringer, da insgesamt weniger Produktionsaktivitäten verschoben werden. Wird Logistic Postponement angewendet, fällt der Effekt des Kostenanstiegs bei Fixkosten etwas geringer aus, da insgesamt weniger Lagerstandorte und Transportverbindungen verwendet werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, dass die Vorteilhaftigkeit von Postponement-Strategien signifikant vom Grad der Nachfrageunsicherheit und Nachfragekorrelation abhängt. Bei entsprechenden Bedingungen (d.h. hohen Nachfrageunsicherheiten) führt das Verschieben von Produktions- und Logistikaktivitäten innerhalb der Testinstanzen zu deutlichen Kosteneinsparungen. Besonders im Fall einer negativen Nachfragekorrelation und hohen Nachfrageunsicherheiten ist das Einsparungspotential gegenüber Full Speculation-Strategien erheblich.

Weiterhin wird deutlich, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Kostenarten und den Einflussfaktoren bestehen. Die Vorteilhaftigkeit hängt dabei maßgeblich von der umgesetzten Strategie ab. Andererseits können kleine Änderungen an der Strategie der Supply Chain zu erheblichen Kostenänderungen führen. Dadurch wird deutlich, dass die optimale Supply Chain-Strategie sorgfältig geplant werden muss. Insgesamt dient dem Entscheidungsträger das entwickelte stochastische Optimierungsmodell zur Identifizierung dieser Strategien.

6.4.3 Einfluss einer variierenden Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers

Postponement wird in der theoretischen Literatur oftmals als Konzept zur Vermeidung von Risiken diskutiert (vgl. bspw. (Boone et al., 2007)). Wie in der Literaturrecherche dieser Arbeit dargelegt, erfolgt in den quantitativen Modellen zur Entscheidungsunterstützung bisher keine explizite Risikobetrachtung in Kombination mit der Evaluation von unterschiedlichen Postponement-Strategien (siehe Abschnitt 4.3.1). Daher werden im Folgenden die Auswirkungen der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers auf die Identifizierung einer optimalen Supply Chain-Strategie untersucht.

Ziel ist es, den EBIT der Supply Chain bei gleichzeitiger Minimierung des Risikos zu maximieren. Die beiden Ziele stehen jedoch im Zielkonflikt zueinander. Das heißt, dass Strategien, welche tendenziell hohe Gewinne versprechen auch mit höheren Risiken behaftet sind. Um diesen Zielkonflikt im Folgenden quantitativ zu untersuchen, werden die nicht dominierten Strategien unter variierenden Graden an Nachfrageunsicherheiten und Nachfragekorrelationen identifiziert. Als Risikomaß dient der CVaR, wobei ein hoher Wert einen risikoaversen Entscheidungsträger repräsentiert und ein niedriger Wert entsprechend einen risikoneutralen Entscheidungsträger. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse vorgestellt.

In Tabelle 6.8 sind die durch das Modell identifizierten optimalen Strategien in Abhängigkeit einer variierenden Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers sowie unterschiedlichen Graden an Nachfrageunsicherheiten und Nachfragekorrelationen dargestellt. Zur Repräsentation einer Strategie wird wie in Abschnitt 6.4.2 eine Zeichenfolge verwendet. Pfeile in der Tabelle repräsentieren keine Strategieänderung im Vergleich zu einem risikoneutralen Entscheidungsträger.

Strategie	ϱ	Risikobereitschaft	Grad an Nachfrageunsicherheit				
			keine	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Postponement erlaubt	+1	risikoneutral	$FN k _k^k$	$FN k _k^k$	$F k _N^N$	$k FN _k^k$	$k FN _k^k$
		risikoavers	↓	$F k _k^N$	$k FN _k^k$	↓	↓
	-1	risikoneutral	$FN k _k^k$	$FN k _k^k$	$N F _k^k$	$N F _k^k$	$N F _k^k$
		risikoavers	↓	$F k _N^N$	↓	↓	↓

Tabelle 6.8: Optimale Strategie bei variierender Nachfrageunsicherheit, Nachfragekorrelation und unterschiedlicher Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich im Fall einer deterministischen Nachfrage (d.h. keine Nachfrageunsicherheiten) weder bei einer positiven noch negativen Nachfragekorrelation Änderungen hinsichtlich der optimalen Strategie zwischen einem risikoneutralen und risikoaversen Entscheidungsträger ergeben. Die Ursache liegt dabei an der perfekt zu antizipierenden Nachfrage. Dagegen ändert sich die optimale Strategie im Fall von niedrigen und mittleren Nachfrageunsicherheiten. Dabei werden Postponement-Strategien von risikoaversen Entscheidungsträgern bevorzugt bzw. Postponement zu einem höheren Grad angewendet. Dieser Effekt ist unabhängig vom Grad der Nachfragekorrelation sichtbar. Im Fall von großen Nachfrageunsicherheiten können keine Änderungen der Strategie festgestellt werden, da bereits Full Postponement bei einem risikoneutralen Entscheidungsträger die beste Lösung darstellt. Allgemein geht aus den Ergebnissen hervor, dass Postponement-Strategien insbesondere bei einer zunehmenden Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers, bei entsprechenden Rahmenbedingungen (siehe Kostenannahmen), zu besseren Ergebnissen führen. Die Ursachen dieser Effekte werden im Folgenden näher erläutert.

Abbildung 6.10 stellt zunächst den erzielten EBIT der Supply Chain mit der optimalen Strategie für unterschiedliche Nachfrageunsicherheiten und Nachfragekorrelationen dar. Mittels Balkendiagramm ist dabei der EBIT für einen risikoneutralen Entscheidungsträger visualisiert. Weiterhin werden in der Abbildung Whiskers verwendet, um die Spannweite von Gewinnänderungen für einen zunehmend risikoaversen Entscheidungsträger zu repräsentieren. So führt beispielsweise die für einen risikoneutralen Entscheidungsträger identifizierte Strategie für den Fall einer positiven Nachfragekorrelation und sehr hohen Nachfrageunsicherheiten zu einem um ca.

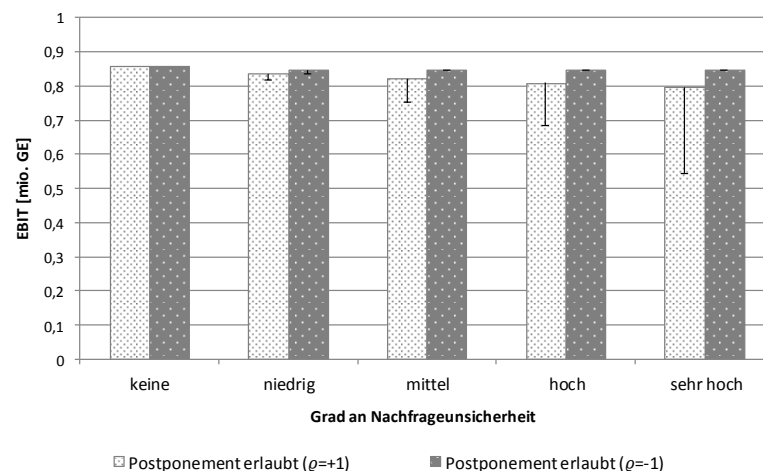


Abbildung 6.10: Einfluss der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers auf die Kennzahl des EBIT in Abhängigkeit zur angewendeten Strategie

0,25 Mio. GE geringeren EBIT als die optimale Strategie für einen risikoaversen Entscheidungsträger.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass im Fall einer positiven Nachfragekorrelation der EBIT in Abhängigkeit der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers starken Schwankungen unterliegt. Zwar werden je nach Risikobereitschaft unterschiedliche Strategien identifiziert, trotzdem können dadurch Verschlechterungen des EBIT nicht verhindert werden. Die Ursache liegt dabei in den großen Schwankungen der Gesamtnachfrage, welche innerhalb der einzelnen Szenarien zu komplett unterschiedlichen Werten des EBIT führen (d.h. Szenarien mit geringer Nachfrage resultieren in einem kleinen EBIT, während Szenarien mit hoher Nachfrage zu einem hohen EBIT führen). Wird das Risiko in diesen Fällen minimiert (d.h. die EBITs der Szenarien möglichst angepasst), kann festgestellt werden, dass der Grad an Postponement erhöht wird. Mit einer solchen Strategieänderung sind zwar einige zusätzliche Kosten (wie variable und fixe Produktionskosten) verbunden, gleichzeitig nähern sich jedoch auch die einzelnen EBITs der Szenarien an, da die Nachfrage besser antizipiert werden kann.

Im Gegensatz dazu führen Postponement-Strategien im Fall einer negativen Nachfragekorrelation unabhängig von der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers zu relativ robusten Ergebnissen. Dieses spiegelt sich in den kleinen Intervallen der optimalen Lösungen dar und impliziert, dass Postponement-Strategien für risikoneutrale und risikoaverse Entscheidungsträger zu ähnlichen Ergebnissen führen. Dieser Effekt ist durch die relativ konstante Gesamtmarktnachfrage zu erklären, sodass die einzelnen EBITs der Szenarien bereits sehr ähnlich sind. Daher kann auf eine negative Nachfragekorrelation verbunden mit Nachfrageunsicherheiten effizient mit Postponement-Strategien reagiert werden.

Um dem Entscheidungsträger in Abhängigkeiten seiner Präferenzen hinsichtlich der Risikobereitschaft eine möglichst gute Entscheidungsgrundlage zu bieten, werden weiterhin Paretofronten beispielhaft anhand einer Probleminstanz (d.h. für den Fall mittlerer Nachfrageunsicherheiten und einer positiven Nachfragekorrelation) analysiert. Dabei werden dominierende Lösungen bestehend aus gewinnmaximierenden und risikominimierenden Strategien identifiziert. In Abbildung 6.11 sind dazu der EBIT und das Risiko (d.h. der CVaR) sowie die optimale Strategie dargestellt. Dabei wird deutlich, dass für einen risikoneutralen Entscheidungsträger in der betrachteten Probleminstanz eine Form Postponement-Strategie die Lösung mit dem größten EBIT darstellt. Wird der Entscheidungsträger zunehmend risikoavers, so nimmt der erzielte EBIT ab. Die Ursache dafür stellen steigende Strafkosten dar, welche in Szenarien mit hoher Nachfrage auftreten. Dadurch wird erreicht, dass die einzelnen EBITs der Szenarien ähnlicher werden und das Risiko reduziert wird. Wird schließlich die Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers weiter erhöht, findet ei-

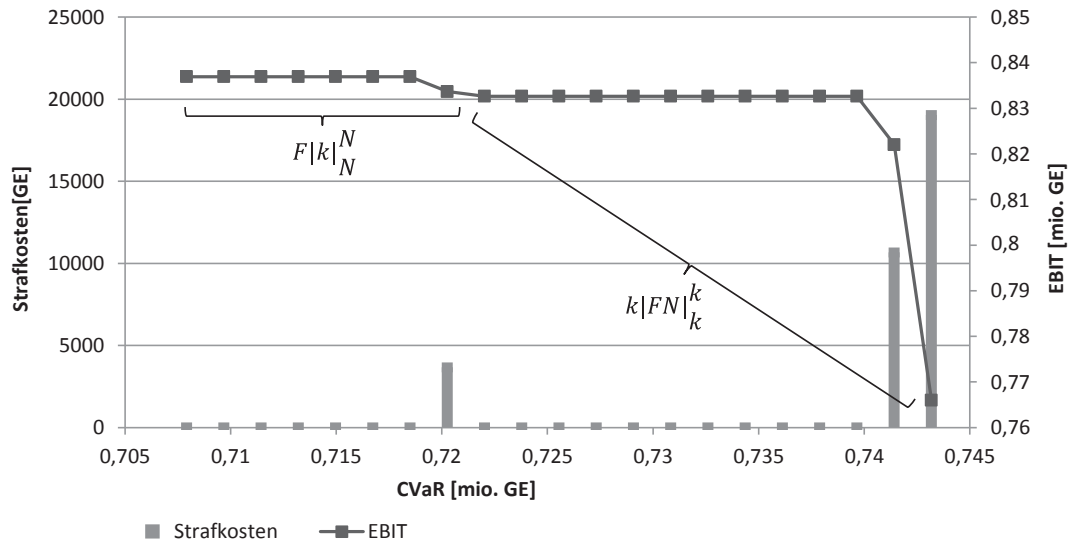


Abbildung 6.11: Paretofront am Beispiel der Instanz mit mittlerer Nachfrageunsicherheit und einer positiven Nachfragekorrelation (Postponement erlaubt)

ne Strategieänderung zu Full Postponement statt, wodurch Strafkosten vermieden werden. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass Postponement-Strategien das Risiko einer Supply Chain auf Kosten von leichten Gewinnminderungen signifikant reduzieren können.

In Abbildung 6.12 sind die Paretofronten für die oben betrachtete Problem Instanz für den Fall, dass Postponement erlaubt bzw. nicht erlaubt ist, gegenübergestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Postponement-Strategie für die betrachtete Problem Instanz unabhängig von der Risikobereitschaft die dominierende Strategie darstellt und zu höheren EBITs führt. Der Grund findet sich in der höheren Flexibilität, welche durch Postponement-Strategien erzielt wird, wodurch Fehlmengen vermieden werden können.

Insgesamt hat diese Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass die optimalen Lösungen stark von den Präferenzen des Entscheidungsträgers abhängen. Diese Ergebnisse heben die Notwendigkeit eines Optimierungsmodells hervor, um dem Entscheidungsträger bei der Planung zu unterstützen. Weiterhin wurde deutlich, dass Postponement-Strategien insbesondere für risikoaverse Entscheidungsträger ein adäquates Konzept zur Risikoreduzierung darstellen. Risikoaverse Lösungen gehen dabei zwar mit leichten Gewinneinbußen einher, bieten auf der anderen Seite aber deutlich robustere Ergebnisse und senken so das Risiko von Fehlmengen und hohen Lagerbeständen.

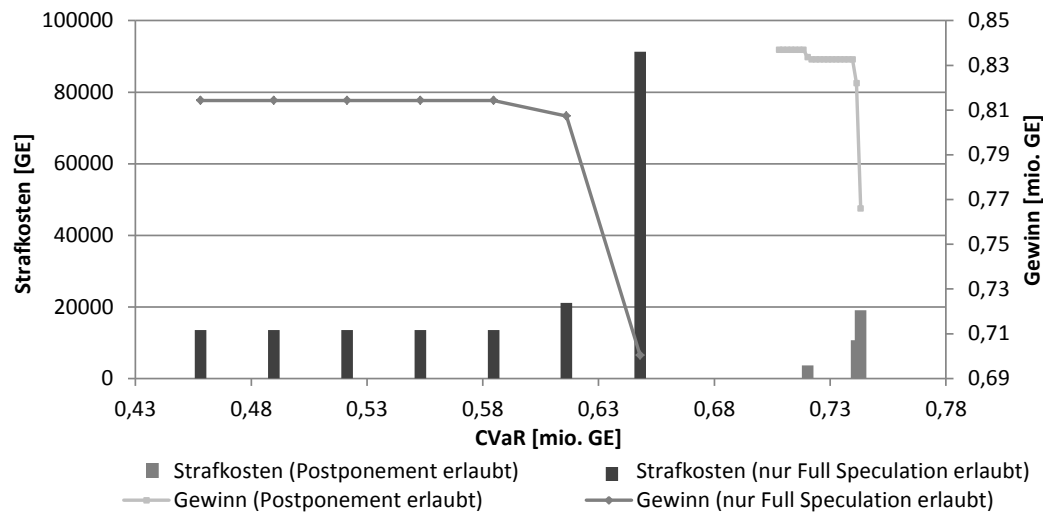


Abbildung 6.12: Vergleich der Paretofronten für Full Speculation- und Full Postponement-Strategien

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein stochastisches Optimierungsmodell zur Identifizierung von gewinnmaximalen Supply Chain-Strategien unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers präsentiert. Mithilfe des Modells können verschiedene Arten von Postponement unter Unsicherheiten evaluiert werden. Der Grad an Postponement und eine mögliche Resequenzierung von Produktions- und Logistikaktivitäten bilden dabei Freiheitsgrade des Optimierungsmodells und erweitern dadurch den Stand der Forschung.

In der Literatur wird Postponement häufig als Konzept zur Risikoreduzierung diskutiert. In den quantitativen Modellen wird die Risikobereitschaft dagegen bisher unter Berücksichtigung von verschiedenen Postponement-Strategien nicht betrachtet. Das entwickelte stochastische Optimierungsmodell beinhaltet Komponenten zur Abbildung der Risikobereitschaft und schließt somit diese Forschungslücke.

Weiterhin wurden exakte und approximative Lösungstechniken adaptiert und in einer Analyse zur Laufzeit- und Lösungsqualität miteinander verglichen. Dabei wurden ein Standard MIP-Solver (MIP), ein Parallel Nested Benders-Ansatz (PNB) sowie ein Sample Average Approximation-Verfahren (SAA) evaluiert. In den Ergebnissen wurde deutlich, dass die Lösungstechnik besonders im Einklang mit der Detailtiefe der abgebildeten Unsicherheiten verwendet werden sollte.

Schließlich wurde die Anwendbarkeit des generischen Optimierungsmodells anhand einer Fallstudie demonstriert. Es wurde der Einfluss von Parameteränderungen auf

die optimale Postponement-Strategie, den Grad von Postponement sowie der Resequenzierung von Produktions- und Logistikaktivitäten gezeigt. Besonders die Wechselwirkungen von verschiedenen Parameterkombinationen und deren sensitiver Einfluss auf optimale Strategien wurden herausgestellt. Auch der Zielkonflikt zwischen gewinnmaximalen und risikoaversen Strategien konnte durch das entwickelte Modell betrachtet werden. Postponement-Strategien sind dabei unter Unsicherheiten ein adäquates Konzept, um das Supply Chain-Risiko zu reduzieren.

7 Integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie

Die in Kapitel 5 und Kapitel 6 beschriebenen Konzepte zur Ermittlung der Marktdurchdringung von innovativen Produkten sowie zur Identifizierung von gewinnmaximierenden Supply Chain-Strategien unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers liefern bisher ausschließlich Planungslösungen für ihre jeweiligen Teilprobleme. So können mit Hilfe der Marktsimulation unter Berücksichtigung des Marktumfelds Prognosen zur zukünftigen Marktdurchdringung für Produktvarianten eines Produktportfolios erstellt werden. Anschließend kann für ein vorher definiertes Produktportfolio im Rahmen der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie eine Planungslösung für die Anordnung von Produktions- und Logistikaktivitäten identifiziert werden. Da die beiden Planungsebenen jedoch nicht miteinander verbunden sind, können Wechselwirkungen (vgl. Abschnitt 2.2) zwischen den angebotenen Produktvarianten und der Supply Chain-Strategie bisher nicht berücksichtigt werden.

Daher wird in diesem Kapitel ein konzeptionelles Vorgehen entwickelt, welches die Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie derart aufeinander abstimmt, sodass eine ganzheitliche Lösung identifiziert werden kann. Dazu erfolgt unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade für die Gestaltung der Produktions- und Logistikaktivitäten, die Auswahl derjenigen Produktvarianten, welche darauf abzielen den Gewinn vor Steuern (EBIT) möglichst zu maximieren und das Risiko der Supply Chain zu reduzieren. Dabei beeinflusst ein Produktportfolio das maximale Absatzpotenzial und damit den erwarteten Erlös einer Supply Chain sowie in Abhängigkeit der identifizierten Strategie deren Kosten.

Das im Rahmen des vorliegenden Kapitels zu entwickelnde Instrumentarium für ein solches integriertes Planungsverfahren adressiert dabei das in Abschnitt 4.5 beschriebene dritte Teilziel dieser Arbeit. In Abschnitt 7.1 wird zunächst eine Übersicht über die Architekturspezifikation des Instrumentariums gegeben. Es wird erläutert, wie die beiden Planungsebenen miteinander verknüpft werden und welche zusätzlichen Schnittstellenspezifikationen dazu notwendig sind. Eine Konkretisierung dieser Schnittstellenspezifikationen erfolgt anschließend in Abschnitt 7.2. Zuletzt werden in Abschnitt 7.3 Ergebnisse einer Analyse zum entwickelten Instrumentarium präsentiert. Darin wird der theoretische Mehrwert der integrierten Planung sowie die domänenübergreifende Anwendbarkeit anhand von Fallstudien demonstriert.

7.1 Architekturspezifikation

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine Grundüberlegung zur Spezifikation einer Architektur für ein Instrumentarium zur integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie. Dazu werden zunächst auf Basis der Problembeschreibung (vgl. Abschnitt 2.2) die zu lösenden Herausforderungen diskutiert. Anschließend erfolgt aus diesen Grundüberlegungen die Ableitung einer Architekturspezifikation für ein solches Instrumentarium.

Grundüberlegung zur Architekturspezifikation

Wie zuvor beschrieben eignen sich die Marktsimulation und das stochastische Optimierungsmodell zur Identifizierung von Planungslösungen in ihren jeweiligen Teilproblemen. Für eine integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie ist es notwendig die beiden Methodiken miteinander zu kombinieren.

Um im ersten Schritt eine sequentielle Planung automatisiert durchführen zu können, ist eine geeignete Schnittstelle zwischen der Marktsimulation und der Optimierung zu identifizieren. Diese soll den Datenaustausch der beiden Planungsebenen koordinieren, sodass auf Basis der prognostizierten Marktdurchdringung von Produktvarianten eines Produktportfolios die Identifizierung einer gewinnmaximierenden Supply Chain-Strategie unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers erfolgen kann.

Eine solche sequentielle Planung reicht dabei jedoch nicht aus, um ein Produktportfolio im Einklang mit einer Supply Chain-Strategie zu identifizieren. Vielmehr führt eine sequentielle Planung dazu, dass Entscheidungen bezüglich der angebotenen Produktvarianten eines Produktportfolios nicht auf Basis von Kostenkennzahlen getroffen werden, da sich Kostenkennzahlen erst aus dem nachfolgendem Planungsprozess der Gestaltung einer Supply Chain-Strategie ergeben. So besteht bei der Gestaltung eines Produktportfolios die Gefahr, dass ein möglichst großes Produktportfolio angeboten wird, da die Planung auf Basis von Kennzahlen wie die prognostizierte Marktdurchdringung durchgeführt wird. Für dieses Produktportfolio kann dann zwar im Rahmen der sequentiellen Planung eine möglichst gewinnmaximierende bzw. risikoaverse Supply Chain-Strategie identifiziert werden, verglichen mit anderen Produktportfolios weist diese Lösung möglicherweise jedoch einen geringeren EBIT bzw. ein höheres Risiko auf. Eine Ursache dafür kann beispielsweise der mit einem angebotenen Produktportfolio verbundene Grad an Nachfrageunsicherheit darstellen, welcher wie in Abschnitt 6.4.2 herausgestellt, signifikanten Einfluss auf die Kosten und somit auf die optimale Strategie haben kann.

Aus diesem Sachverhalt geht hervor, dass im zweiten Schritt eine Rückkopplung der beiden Planungsebenen notwendig ist. Diese soll auf Basis der Ergebnisse der Pla-

nung einer Supply Chain-Strategie ein gegebenes Produktportfolio modifizieren. Ziel ist es, Änderungen am Produktportfolio derart vorzunehmen, dass insgesamt ein besserer EBIT bzw. ein geringeres Risiko erzielt wird. Die Freiheitsgrade bilden dabei Entscheidungen bezüglich der angebotenen Produktvarianten sowie zur Supply Chain-Strategie. Zusammenfassend ergeben sich daher folgende Anforderungen bei der Entwicklung eines Instrumentariums zur integrierten Planung:

- Konzeption einer Schnittstelle zwischen Marktsimulation und stochastischem Optimierungsmodell zur sequentiellen Planung
- Konzeption einer Rückkopplung zwischen den Ergebnissen der stochastischen Optimierung und der Marktsimulation

Architekturspezifikation

Auf Basis dieser Grundüberlegungen zur Integration der beiden Planungsebenen wird im Folgenden die entwickelte Architektur für das Instrumentarium präsentiert (siehe Abbildung 7.1). Ausgehend von den Eingabedaten für die Planung eines Produktportfolios und den Daten zur Planung einer Supply Chain-Strategie, findet zu-

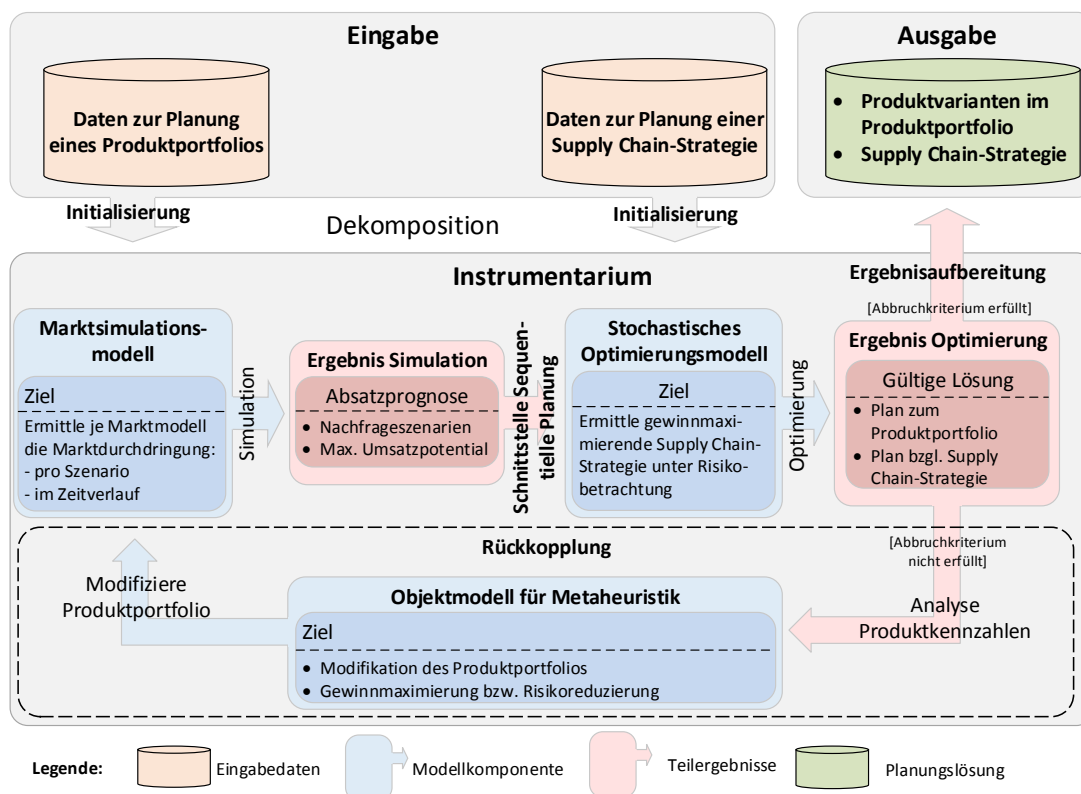


Abbildung 7.1: Architektur des Instrumentariums

nächst eine einmalige Initialisierungsphase statt, in welcher das Marktsimulationsmodell und das stochastische Optimierungsmodell automatisiert erstellt werden. Bezüglich des Marktsimulationsmodells werden dabei die in Abschnitt 5.1 konzipierten Modellelemente zur Abbildung von Marktmodellen, Kundensegmenten, Interaktionen von Marktteilnehmern, Unsicherheiten und des Planungszeitraums auf Basis der durch den Entscheidungsträger bereitgestellten Eingabedaten parametrisiert. Bezüglich des stochastischen Optimierungsmodells werden entsprechend die Mengen, Parameter, Entscheidungsvariablen, die Zielfunktion und Restriktionen initialisiert (vgl. Abschnitt 6.2).

Anschließend findet der Prozess der Marktsimulation für die festgelegten Marktmodelle statt (siehe Abschnitt 5.2). In den Marktmodellen ist dabei neben den konkurrierenden und komplementären Angeboten auch das Produktportfolio mit den betrachteten Produktvarianten der Supply Chain abgebildet. Das Ergebnis stellen Absatzprognosen in Form von Nachfrageszenarien dar, welche gleichzeitig das maximale Absatzpotenzial je Marktmodell definieren. Eine Schnittstelle zur sequentiellen Planung sorgt im nächsten Schritt für den automatisierten Datenaustausch zwischen Marktsimulation und Optimierung. Dazu wird aus den Prognosen der Marktmodelle die Nachfrage für die im Rahmen der Supply Chain betrachteten Produktvarianten abgeleitet. Darauf basierend finden Modellanpassungen am stochastischen Optimierungsmodells statt, sodass im nächsten Schritt die Optimierung der Supply Chain-Strategie für das betrachtete Produktportfolio durchgeführt werden kann (siehe Abschnitt 6.3).

Im Rahmen der Optimierung erfolgt unter Berücksichtigung der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers eine Kosten- und Erlösbetrachtung der einzelnen Strategien. Ziel ist es, die für das Anbieten des Produktportfolios notwendigen Produktions- und Logistikaktivitäten derart zu gestalten, dass der erwartete EBIT über alle Nachfrageszenarien unter Beachtung der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers maximiert wird. Das Ergebnis der Optimierung stellt schließlich den Abschluss des sequentiellen Planungsverfahrens dar und beinhaltet dabei eine für die angebotenen Produktvarianten optimale Supply Chain-Strategie.

Den nächsten Schritt bildet eine Rückkopplung zwischen den Ergebnissen der Optimierung und den Modellelementen der Marktsimulation. Dadurch können auf Basis der ermittelten Ergebnisse der sequentiellen Planung die ursprünglich angebotenen Produktvarianten modifiziert werden. Grundgedanke ist dabei die Überprüfung, ob ein anderes Produktportfolio mit einer gegebenenfalls modifizierten Supply Chain-Strategie zu besseren Lösungen führt. So besteht beispielsweise durch eine Erweiterung eines Produktportfolios Verbesserungspotential darin, dass neue Marktanteile erschlossen werden, wodurch ggf. zusätzliche Erlöse generiert werden können. Andererseits besteht die Gefahr, dass durch eine solche Erweiterung die einzelnen Produktvarianten nur mit zusätzlichen Kosten den Kunden bereitgestellt werden können.

Daher werden auf Basis der Ergebnisse der Optimierung Kennzahlen für die angebotenen Produktvarianten ermittelt, auf deren Grundlage anschließend Entscheidungen bezüglich einer Modifikation des Produktportfolios getroffen werden.

Ein einmaliger Durchlauf dieser Rückkopplung reicht dabei jedoch aufgrund der Marktdynamik und den Wechselwirkungen zwischen den Planungsebenen nicht aus. Vielmehr ist ein iteratives Verfahren notwendig, in welchem das Produktportfolio schrittweise angepasst wird, bis schließlich eine möglichst gewinnmaximierende bzw. risikoaverse Planungslösung bestehend aus Produktportfolio und einer Supply Chain-Strategie identifiziert worden ist.

7.2 Schnittstellenspezifikation

In diesem Abschnitt wird das konzeptionelle Vorgehen der entwickelten Schnittstellen spezifiziert. Dieses umfasst in Abschnitt 7.2.1 zunächst das Konzept einer Schnittstelle zwischen Marktsimulation und stochastischem Optimierungsmodell. Diese dient zum automatisierten Datenaustausch und erlaubt die sequentielle Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie. Danach erfolgt in Abschnitt 7.2.2 die Konzeption einer Rückkopplung zwischen den Ergebnissen der stochastischen Optimierung und den Modellelementen der Marktsimulation. Diese Rückkopplung ermöglicht schließlich die integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie.

7.2.1 Schnittstelle zur sequentiellen Planung

Die Schnittstelle zur sequentiellen Planung ermöglicht den automatisierten Datenaustausch zwischen der entwickelten Marktsimulation und der stochastischen Optimierung und beinhaltet dabei Komponenten, um auf Basis der Ergebnisse der Marktsimulation das Optimierungsmodell zu parametrisieren. Ein Überblick über den Ablauf des Datenaustausches ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Das Vorgehen des Datenaustausches gliedert sich dabei in die Phasen der Initialisierung, des Aktualisierens der Mengen an berücksichtigten Produkten und Produktionsaktivitäten sowie des Aktualisierens des Nachfrageparameters.

In der ersten Phase findet die Initialisierung des Optimierungsmodells statt. Dabei wird das ursprünglich auf Basis der Daten zur Planung einer Supply Chain-Strategie erstellte stochastische Optimierungsmodell geladen. Darauf aufbauend wird die Menge der Produkte und Produktionsaktivitäten sowie der Nachfrageparameter auf Basis der Ergebnisse der Marktsimulation initialisiert.

Weiterhin erfolgt in dieser Phase ein Skalieren des Planungszeitraums für die Planung der Supply Chain-Strategie. Dabei wird eine Teilmenge der Perioden aus der Marktsimulation selektiert, welche dann bei der Gestaltung der Supply Chain-Strategie

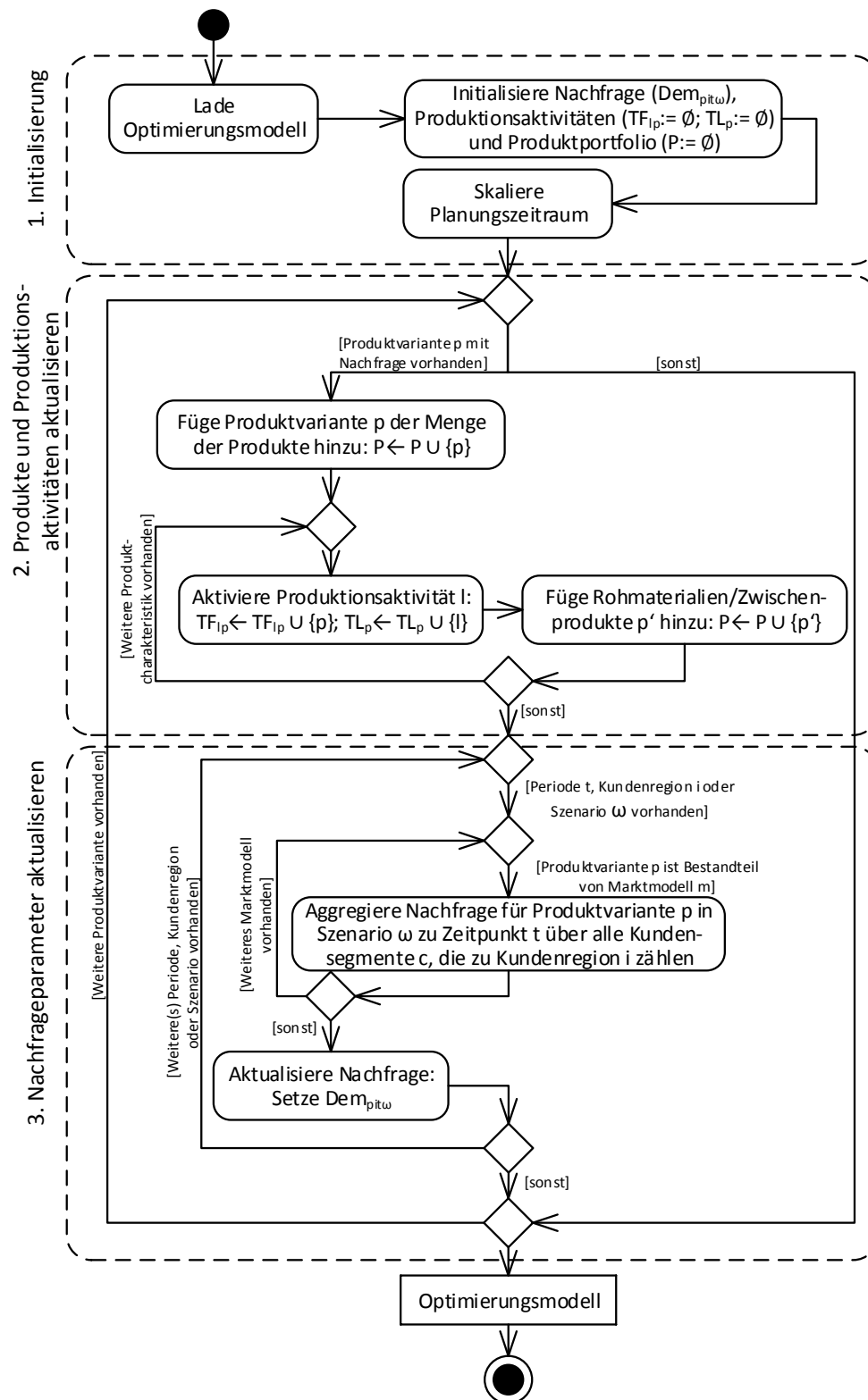


Abbildung 7.2: Übersicht zum Ablauf des Datenaustausches zwischen Marktsimulation und Optimierung

berücksichtigt wird. Dadurch hat ein Entscheidungsträger die Möglichkeit beispielsweise Perioden der frühen Markteinführungsphase explizit aus der Kostenbetrachtung auszuschließen. Zum anderen findet in diesem Prozessschritt ein Daten-Mapping zwischen den Perioden der Marktsimulation und den Perioden der Optimierung statt. Der Grund hierfür besteht darin, dass die entwickelte Marktsimulation Prognosen der Marktdurchdringung für Endkunden erstellt. Im Fall, dass eine Business-to-Business (B2B) Geschäftsbeziehung bei der Planung der betrachteten Supply Chain vorliegt, tritt die Supply Chain selbst als Lieferant für weitere Unternehmen auf. Die weiteren Unternehmen sind dann zwar nicht Bestandteil der Planung der Supply Chain-Strategie, jedoch führt diese Art der Geschäftsbeziehung dazu, dass die Nachfrage bei der betrachteten Supply Chain zeitlich früher anfällt. Wird dagegen eine Business-to-Consumer Geschäftsbeziehung betrachtet, entspricht der Zeitpunkt der Kundennachfrage dem Zeitpunkt zu welchem die Nachfrage bei der Supply Chain anfällt. In der zweiten Phase wird die Menge der Rohmaterialien, Zwischenprodukte und Produktvarianten sowie die Mengen der dafür notwendigen Produktionsaktivitäten des Optimierungsmodells aktualisiert. Dazu werden zunächst diejenigen Produktvarianten (d.h. Endprodukte) identifiziert, welche im Rahmen der Ergebnisse der Marktsimulation im relevanten Planungszeitraum eine Nachfrage generiert haben. Diese Produktvarianten werden anschließend der Menge der Produkte im Optimierungsmodell hinzugefügt. Darauf basierend werden aus den Produktcharakteristiken dieser Produktvarianten die benötigten Produktionsaktivitäten sowie Rohmaterialien und Zwischenprodukte abgeleitet und ebenfalls der Menge der Produkte hinzugefügt. In der letzten Phase erfolgt die Parametrisierung der Nachfragewerte des stochastischen Optimierungsmodells. Dazu wird die Nachfrage je Produktvariante pro Szenario und Planungszeitpunkt über aller zu einer Kundenregion zählenden Kundensegmente aggregiert. Die Zugehörigkeit eines Kundensegmentes zu einer Kundenregion ergibt sich dabei aus den demographischen Eigenschaften des entsprechenden Kundensegments (vgl. Abschnitt 5.1). So können beliebig viele Kundensegmente einer Kundenregion zugeordnet sein. Als Ergebnis dieses Ablaufs resultiert schließlich auf Basis des angebotenen Produktportfolios das um die Produkte, Produktionsaktivitäten und Nachfrageszenarien modifizierte Optimierungsmodell für die Planung der Supply Chain-Strategie.

7.2.2 Rückkopplung zwischen den Planungsebenen

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung des konzeptionellen Vorgehens zur Rückkopplung der beiden Planungsebenen. Dazu wird zunächst eine Grundüberlegung zur Gestaltung dieser Rückkopplung vorgestellt. Daraus geht hervor, dass eine Metaheuristik als Steuerungsmechanismus eingesetzt werden kann. Die Spezifizierung dieser Metaheuristik folgt im Anschluss.

Grundüberlegung zur Gestaltung der Rückkopplung

Das vorliegende Optimierungsproblem der Auswahl von Produktvarianten, die in einem Produktportfolio angeboten werden sollen, beschreibt ein kombinatorisches Optimierungsproblem. Für jede Produktvariante ist dabei eine binäre Entscheidung zu treffen, welche definiert, ob die Produktvariante mit ihren jeweiligen Eigenschaften im Produktportfolio angeboten werden soll.

Entscheidungsvariable

$$a_p \in \{0, 1\} \quad \begin{cases} 1 & \text{falls Produktvariante } p \in P^{End} \text{ im Produktportfolio angeboten} \\ & \text{wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

mit P^{End} : Menge an möglichen Produktvarianten

Diese Entscheidungen haben sowohl Auswirkung auf die im Rahmen der Marktsimulation erstellten Prognosen der Marktdurchdringung für die einzelnen Produktvarianten, als auch auf die Planung der Supply Chain-Strategie. Da eine vollständige Enumeration aller möglichen Kombinationen der Produktvarianten aus Komplexitätsgründen schon bei einer geringen Menge an Produktvarianten nicht mehr möglich ist, wird ein Steuerungsmechanismus benötigt, welcher auf Basis der Ergebnisse der Marktsimulation und Optimierung das Produktportfolio modifiziert.

Grundsätzlich eignet sich das Verfahren der Variable Neighborhood Search (VNS) zur Lösung von kombinatorischen Optimierungsproblemen (Hansen et al., 2010). VNS durchsucht dabei die gesamte Nachbarschaft einer bestehenden Lösung (vgl. Abschnitt 3.1.2). Ein solches Vorgehen ist jedoch bei großen Nachbarschaften beziehungsweise laufzeitintensiven Evaluationsfunktionen sehr aufwändig. Da in der vorliegenden Problemstellung aufgrund eines beliebig gestaltbaren Produktportfolios sowohl eine große Nachbarschaft als auch eine durch die Marktsimulation und stochastischen Optimierung laufzeitintensive Evaluationsfunktion gegeben sind, ist die Anwendbarkeit der VNS auf diese Problemstellung als kritisch zu sehen.

In der Literatur stellt die Reduced Variable Neighborhood Search (RVNS) eine Erweiterung der VNS dar und adressiert mit ihrer Funktionsweise die Herausforderung einer großen Nachbarschaft (vgl. Abschnitt 3.1.2). So evaluiert RVNS im Gegensatz zur VNS weniger Nachbarschaften, indem eine laufzeitintensive lokale Suche vermieden wird. Stattdessen wird eine geringe zufällige Anzahl an Nachbarschaften untersucht, welche jeweils unterschiedlich weit von der aktuellen Lösung entfernt sind (Hansen und Mladenović, 2001). Somit besteht die Hypothese, dass die Metaheuristik RVNS auch im Rahmen des betrachteten Problems in akzeptabler Laufzeit zu guten Ergebnissen führt, weshalb diese als Steuerungsmechanismus zur Koordination der Marktsimulation und Optimierung im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

Funktionsweise der Metaheuristik

Die Metaheuristik RVNS dient als Steuerungsmechanismus zur Koordination des Ablaufs der Marktsimulation und der Optimierung. Im ersten Schritt sind auf Basis der Ergebnisse der Simulation und Optimierung Kennzahlen zu ermitteln, welche dann als Entscheidungsgrundlage bezüglich einer Modifikation des Produktportfolios dienen. Den zweiten Schritt stellt die Durchführung der Modifikation des Produktportfolios dar. Die Funktionsweise der Metaheuristik ist in Algorithmus 2 mittels Pseudocode dargestellt. Als Akzeptanzkriterium für die Übernahme einer Nachbarschaftslösung dient dabei die Metaheuristik Simulated Annealing (vgl. Abschnitt 3.1.2)

Die Eingabe für die Metaheuristik bilden die Daten zur Planung des Produktportfolios und der Supply Chain-Strategie sowie die Parametrisierung der Heuristik (d.h. die maximale Anzahl an generierten Nachbarschaftslösungen pro Iteration k^{max} und die Abkühlungsfunktion $T(r)$ der Simulated Annealing (vgl. Abschnitt 3.1.2)). Auf dieser Basis wird zunächst eine initiale Lösung des Produktportfolios erzeugt, indem die Marktsimulation mit den Daten zur Planung des Produktportfolios durchgeführt wird und anschließend alle Produktvarianten, welche im Verlauf des Planungszeitraums in mindestens einem Szenario eine Nachfrage generieren, dem Produktportfolio hinzugefügt werden. Dieses Produktportfolio wird mittels Schnittstelle an die Optimierung übergeben und schließlich ein stochastisches Optimierungsmodell erstellt. Das Lösen des Optimierungsmodells liefert die initiale Lösung für die Supply Chain-Strategie sowie eine Ergebniskennzahl ($f(a)$) zur Bewertung des EBIT und des Risikos für die Supply Chain.

Im nächsten Schritt startet ein iterativer Prozess zur Verbesserung dieser Startlösung. Dazu wird mittels Nachbarschaftsoperatoren auf Basis der aktuellen Lösung a und der aktuellen Dimension der betrachteten Nachbarschaft k eine neue Nachbarschaftslösung a' generiert²⁴. Die Dimension der betrachteten Nachbarschaft ist hierbei durch die Anzahl der angewendeten Operatoren definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene problemspezifische Nachbarschaftsoperatoren entwickelt, welche im nachfolgenden Abschnitt erläutert werden.

Den letzten Schritt der Metaheuristik bildet die Bewertung der neuen Nachbarschaftslösung (d.h. das modifizierte Produktportfolio) durch die Marktsimulation und Optimierung. Als Akzeptanzkriterien zur Übernahme der modifizierten Lösung dient die Metaheuristik Simulated Annealing. Dabei werden zum einen Lösungen mit besseren Zielfunktionswerten und zum anderen, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der aktuellen Temperatur (vgl. Abschnitt 3.1.2), auch schlechtere Lösungen übernommen. Weiterhin wird über alle Iterationen die beste Lösung a^* gespeichert. Als Abbruchkriterium des Algorithmus fungiert eine definierte Anzahl an Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung bzw. eine Laufzeitbegrenzung.

²⁴In der Literatur wird dieser Schritt auch als „Shake-Schritt“ bezeichnet (Hansen et al., 2010)

Algorithmus 2 : Pseudocode der Reduced Variable Neighborhood Search zur Identifizierung eines effizienten Produktportfolios sowie einer Supply Chain-Strategie (Grundmethodik in Anlehnung an (Hansen et al., 2010))

Eingabe: Planungsdaten des Produktportfolios und der Supply Chain-Strategie, Parameter Metaheuristik ($k^{max}, T(r)$)

Ausgabe: Produktportfolio, Supply Chain-Strategie, EBIT und CVaR

.....
 Initialisiere Maximum an Evaluationen je lokaler Nachbarschaft k^{max} ;
 Bestimme initiales Produktportfolio a durch Marktsimulation und Optimierung;
repeat
 Initialisiere aktuelle Dimension der Evaluation $k := 1$;
 repeat
 Generiere neue Produktportfoliolösung $a' \in N_k(a)$ („Shake-Schritt“);
 Führe Marktsimulation und Optimierung für a' aus;
 Berechne Differenz der Zielfunktionswerte $\Delta z := f(a') - f(a)$;
 if $\Delta z > 0$ **then**
 Akzeptiere bessere Lösung $a := a'$;
 $k := 1$;
 else
 if $rd(0, 1) < \exp(-\frac{\Delta z}{T})$ **then**
 Akzeptiere schlechtere Lösung $a := a'$;
 $k := 1$;
 end
 end
 if $f(a) > f(a^*)$ **then**
 $a^* := a$
 end
 $k := k + 1$;
 until $k = k^{max}$;
 $r := r + 1$;
 Verringere Temperatur $T := T(r)$;
until Abbruchkriterium erfüllt;

Nachbarschaftsoperatoren

Zur Ermittlung von neuen Nachbarschaftslösungen werden Nachbarschaftsoperatoren angewendet, welche auf Basis von angebotenen Produktvarianten eines Produktportfolios (d.h. der aktuellen Lösung) operieren, um diese Auswahl zu modifizieren (d.h. eine neue Nachbarschaftslösung zu erstellen). Dabei können existierende Produktvarianten aus dem Portfolio entfernt oder bisher nicht angebotene Produktvarianten in das Produktportfolio hinzugefügt werden. Insgesamt steht dazu eine Menge an potenziellen Produktvarianten bereit.

Die Notwendigkeit der Entwicklung von Operatoren zum Entfernen von Produktvarianten aus einem Produktportfolio lässt sich zunächst aus der Literatur ableiten. So stellen beispielsweise Jiao et al. (2007) heraus, dass Entscheidungen bezüglich der Größe eines Produktportfolios die Effizienz einer Supply Chain beeinträchtigen können, da viele Produktvarianten die Komplexität des Durchführens von Produktions- und Logistikaktivitäten erhöhen. Dieser Effekt bestätigte sich auch in den bisherigen Analysen zur Marktsimulation und stochastischen Optimierung. So führte eine Erweiterung des Angebots im Rahmen der Marktsimulation einerseits zu einer großen Nachfrage, andererseits jedoch auch zu höheren Nachfrageunsicherheiten, während diese im Rahmen der Optimierung negativen Einfluss auf den EBIT hatten (vgl. Abschnitt 6.4.2).

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse werden unter der Hypothese, dass das Entfernen von Produktvarianten aus einem Produktportfolio einen positiven Einfluss auf den EBIT und das Risiko einer Supply Chain haben können, entsprechende Nachbarschaftsoperatoren entwickelt. Die Nachbarschaftsoperatoren werden dabei auf Basis von unterschiedlichen Kennzahlen ausgeführt, welche Aufschluss über die Vorteilhaftigkeit des Anbietens einer Produktvariante geben. Im Folgenden werden die Nachbarschaftsoperatoren zum Entfernen von Produktvarianten erläutert.

- **Entferne Produktvariante mit kleinstem Absatz:**

Dieser Nachbarschaftsoperator entfernt diejenige Produktvariante, welche im Rahmen der Planung einer Supply Chain-Strategie den kleinsten erwarteten Absatz im gesamten Planungszeitraum und über alle Szenarien aufweist. Der Operator basiert dabei auf dem Grundgedanken, dass überprüft werden soll, ob das Anbieten von absatzschwachen Produktvarianten (d.h. Nischenprodukte) aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Im Fall, dass Kundenentscheidungen anstatt auf die entfernte Produktvariante auf eine andere Produktvariante des betrachteten Unternehmens entfallen, ist das Ergebnis dieses Operators als tendenziell positiv zu bewerten, da die Komplexität der Gestaltung der Supply Chain reduziert wird und trotzdem keine Marktanteile verloren gehen. Verliert das betrachtete Unternehmen dagegen die Kunden an einen Wettbewerber, so ist dies zumindest aus Perspektive der Produkt- und Portfoliopolitik als negativ zu bewerten. In Formel 7.1 ist das Vorgehen zur Ermittlung der Produktvariante mit dem kleinsten erwarteten Absatz abgebildet²⁵.

$$\min_{p \in P^{End}} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} \sum_{\substack{t=1..T: t \leq T-d_{ij} \\ (i,j) \in A: j \in N^C}} z_{pit\omega} \quad (7.1)$$

²⁵Zur Erläuterung der Notation siehe Abschnitt 6.2.

- **Entferne Produktvariante mit kleinster Umsatzrendite:**

Dieser Operator identifiziert die Produktvariante mit der kleinsten erwarteten Umsatzrendite (siehe Formel 7.2) und entfernt diese Produktvariante anschließend aus dem Produktportfolio. Die Umsatzrendite stellt eine Kennzahl zur Bewertung des Unternehmenserfolgs dar und gibt dabei das prozentuale Verhältnis des Gewinns zum erzielten Umsatz an (Schöning, 2016). Die Grundidee dieses Nachbarschaftsoperators ist die Eliminierung von Produktvarianten mit negativer Umsatzrendite, da diese Produktvarianten nicht kostendeckend hergestellt und den Kunden über das Distributionsnetzwerk bereitgestellt werden können. Weiterhin werden auch Produktvarianten mit geringer positiver Umsatzrendite von diesem Operator berücksichtigt. Dabei liegt die Hypothese zugrunde, dass auch ein Entfernen derartiger Produktvarianten zu einem besseren Ergebnis führen kann, indem die Nachfrageunsicherheit sinkt und sich die Nachfrage der entfernten Produktvarianten auf andere Produktvarianten des betrachteten Unternehmens verteilt.

$$\min_{p \in P^{End}} \sum_{\omega \in \Omega} \frac{Umsatz_{p\omega} - Kosten_{p\omega}}{Umsatz_{p\omega}} \quad (7.2)$$

Um die Produktvariante mit der kleinsten erwarteten Umsatzrendite zu ermitteln, werden zunächst für jede Produktvariante die erwarteten Umsatzerlöse sowie Kosten über alle Szenarien ermittelt. Als zeitliche Bezugsgröße dient dabei der gesamte Planungszeitraum. Während sich die Umsatzerlöse direkt aus den Absatzzahlen und dem Verkaufspreis der Produktvarianten ergeben und sich damit eindeutig einer Produktvariante zuordnen lassen, muss auf der Kostenseite eine differenzierte Betrachtung erfolgen. Dazu ist zunächst zwischen Einzelkosten und Gemeinkosten zu unterscheiden. Einzelkosten lassen sich direkt einer Produktvariante, einem Rohmaterial oder einem Zwischenprodukt zuordnen. Dazu zählen hier die variablen Produktions-, Transport- und Lagerhaltungskosten sowie die Strafkosten für nicht befriedigte Nachfrage. Die Gemeinkosten lassen sich nur indirekt über eine Schlüsselgröße den einzelnen Produktvarianten zuordnen (Weber, 2016). Dazu zählen in dieser Arbeit die fixen Kosten für das Bereitstellen von Produktions- und Logistikaktivitäten. Die fixen Produktionskosten werden dabei in Abhängigkeit des Anteils der mit einer Produktionsaktivität hergestellten Menge des Erzeugnisses auf die entsprechenden Produktvarianten verteilt. Die Fixkosten für Logistikaktivitäten, d.h. fixe Kosten für das Bereitstellen von Transport- und Lageraktivitäten, werden in Abhängigkeit des Anteils der transportierten bzw. gelagerten Menge der jeweiligen Produktvariante, des Rohmaterials oder Zwischenproduktes zugeordnet.

Schließlich müssen die ermittelten Kosten von Rohmaterialien und Zwischenprodukten noch den einzelnen Produktvarianten zugeordnet werden. Dies geschieht wiederum über die Schlüsselgröße des Anteils der hergestellten Erzeugnisse.

- **Entferne Produktvariante mit höchsten Strafkosten:**

Wird die Nachfrage nach einer Produktvariante nicht komplett durch die Supply Chain befriedigt, so können sich in Abhängigkeit der betrachteten Domäne Strafkosten ergeben. In Abschnitt 6.4.2 wurde unter gegebenen Nachfrageunsicherheiten herausgestellt, dass durch Fehlmengen verursachte Strafkosten, ein Resultat einer nicht optimal gestalteten Supply Chain-Strategie darstellen können. Treten selbst im Fall von einer gewinnmaximal konfigurierten Strategie derartige Strafkosten auf, so ist dies als Indikator zu deuten, dass die betroffenen Produktvarianten unter den bestehenden Unsicherheiten den Kunden aus Kosten- oder Kapazitätsgründen nicht in der geforderten Menge bereitgestellt werden können. Daher zielt dieser Nachbarschaftsoperator darauf ab, derartige Produktvarianten zu entfernen. Dadurch soll der Grad an Nachfrageunsicherheit reduziert werden, sodass Supply Chain-Strategien identifiziert werden, welche zu insgesamt besseren Lösungen führen. Die Ermittlung der Höhe der erwarteten Strafkosten je Produktvariante erfolgt durch die im Rahmen des stochastischen Optimierungsmodells bestimmten Entscheidungsvariablen sowie dem jeweiligen Strafkostensatz und lässt sich, wie in Formel 7.3 dargestellt, berechnen.

$$\min_{p \in P^{End}} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} \sum_{\substack{t=1..T: t \leq T-d_{ij} \\ i \in N^C}} sl_{pit\omega} c_{pi}^{Pe} \quad (7.3)$$

- **Entferne zufällige Produktvariante:**

Dieser Nachbarschaftsoperator entfernt eine zufällige Produktvariante aus dem aktuell angebotenen Produktportfolio der betrachteten Supply Chain. Aus wirtschaftlicher Betrachtungsweise lässt sich der Mehrwert eines solchen Nachbarschaftsoperators zunächst nur bedingt begründen, da neben Produktvarianten, welche die Performance der Supply Chain negativ beeinflussen, auch solche entfernt werden können, welche in hohem Maße zu einem positiven Ergebnis der Supply Chain beitragen. Vielmehr zielt dieser Nachbarschaftsoperator im Rahmen der lokalen Suche der Metaheuristik darauf ab, eine Diversifikation des Lösungsraums zu ermöglichen. Dadurch dient dieser Nachbarschaftsoperator als Technik zur Exploration des gesamten Lösungsraums (Hansen et al., 2010).

Weiterhin kann es vorteilhaft sein, zusätzliche Produktvarianten in ein bestehendes Produktportfolio hinzuzufügen. Dies begründet sich darin, dass ein bisher angebotenes Produktportfolio die Kundenanforderungen am Markt nicht bzw. nur teilweise abdeckt und stattdessen Wettbewerber ihre Produkte bei den Kunden platzieren. Eine Erweiterung des Produktportfolios bietet in einem solchen Fall die Chance zusätzliche Marktanteile zu gewinnen. Gleichzeitig besteht dabei jedoch das Risiko die zusätzlich angebotenen Produktvarianten nicht gewinnbringend innerhalb einer Supply Chain herstellen zu können.

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Nachbarschaftsoperatoren zur Erweiterung eines Produktportfolios präsentiert. Jeder dieser Nachbarschaftsoperatoren basiert darauf, aus einer Menge an bisher nicht angebotenen Produktvarianten eine zusätzliche Produktvariante auf Basis einer Kennzahl zu selektieren und diese dem aktuellen Produktportfolio hinzuzufügen.

- **Füge unähnliche Produktvariante hinzu (Intensivierung):**

Ziel dieses Nachbarschaftsoperators ist die Erweiterung eines Produktportfolios, indem aus einer Menge an bisher nicht angebotenen Produktvarianten eine im Vergleich zu den bisher angebotenen Produktvarianten möglichst unähnliche Variante in Bezug auf die Produktcharakteristiken selektiert und dem Produktportfolio hinzugefügt wird. Ökonomisch betrachtet bietet dieser Operator dabei die Möglichkeit, neue Marktanteile in bisher nicht adressierten Segmenten zu erzielen. Bei diesem Nachbarschaftsoperator werden aus der Menge an möglichen Produktvarianten nur diejenigen Varianten berücksichtigt, bei denen mindestens eine benachbarte Variante mit der gleichen Produktcharakteristik bereits im Produktportfolio enthalten ist (vgl. Schritt 1 in Abbildung 7.3).

Zur Abbildung der Ähnlichkeit von Variantenspektren stehen in der Literatur verschiedene Kennzahlen zur Verfügung (vgl. Buchholz (2012)). Diese lassen sich auf die vorliegende Problemstellung zur Gestaltung eines Produktportfolios übertragen. In diesem Nachbarschaftsoperator wird die Kennzahl der Ähnlichkeit über die Summe der City-Block-Distanzen²⁶ zwischen einer hinzuzufügenden Produktvariante und allen bereits im Produktportfolio enthaltenen Produktvarianten definiert (vgl. Schritt 2 in Abbildung 7.3). Zur Ermittlung der City-Block-Distanz werden die Ausprägungen der einzelnen Produktcharakteristiken miteinander verglichen. Dabei weisen zwei beliebige Ausprägungen einer Produktcharakteristik mit einer Nominalskala eine Distanz von 1 auf. Im Fall einer Ordinal- und Kardinalskala werden die Distanzen von Produktcharakteristiken anhand der maximalen Distanz zweier Ausprägungen von At-

²⁶Die City-Block-Metrik stellt ein Distanzmodell dar, bei der sich die Distanz zweier Punkte aus der Summe der absoluten Abstände auf den einzelnen Dimensionen ergibt (Backhaus et al., 2016, S. 614)

tributen zwischen 0 und 1 normiert. Dadurch wird die Vergleichbarkeit unter verschiedenen Produktcharakteristiken gewährleistet. Nachdem die Kennzahl der Ähnlichkeit für alle potenziellen Kandidaten an Produktvarianten bestimmt worden ist, wird die Produktvariante mit dem größten Wert (diese entspricht der unähnlichsten Produktvariante) dem aktuellen Produktportfolio hinzugefügt (vgl. Schritt 3 in Abbildung 7.3).

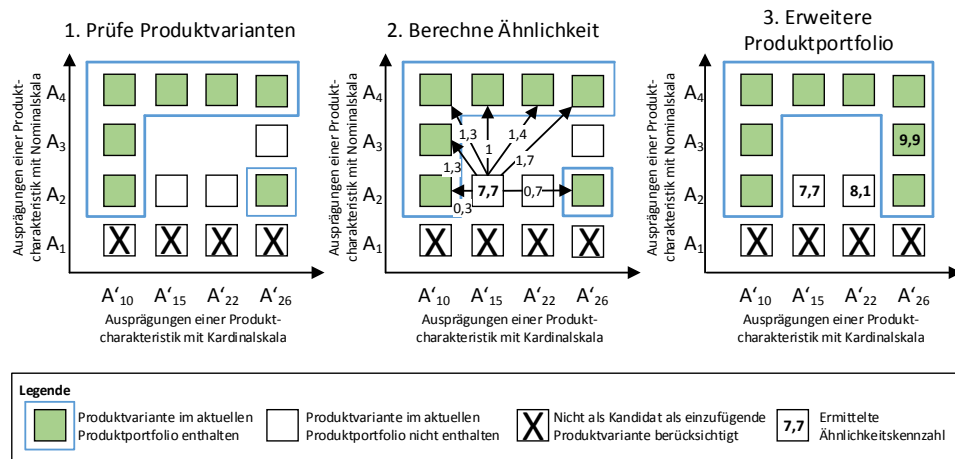


Abbildung 7.3: Ablauf zum Hinzufügen von unähnlichen Produktvarianten

- **Füge unähnliche Produktvariante hinzu (Diversifikation):**

Dieser Nachbarschaftsoperator fügt wie der zuvor beschriebene Operator möglichst unähnliche Produktvarianten dem Produktportfolio hinzu. Dabei unterscheidet sich dieser Nachbarschaftsoperator darin, dass aus einer Menge an möglichen Produktvarianten nur diejenigen berücksichtigt werden, von denen noch keine benachbarten Produktvarianten mit gleichen Ausprägungen an Produktcharakteristiken im Produktportfolio enthalten sind. Damit werden bei diesem Nachbarschaftsoperator nur solche Produktvarianten berücksichtigt, welche im zuvor beschriebenen Nachbarschaftsoperator ausgeschlossen worden sind. Das in Abbildung 7.3 dargestellte Vorgehen zur Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahl zur Auswahl der Produktvariante (d.h. die Schritte 2 und 3) werden auch bei diesem Nachbarschaftsoperator angewendet.

Ziel dieses Nachbarschaftsoperators ist es, Produktvarianten mit neuen Ausprägungen an Produktcharakteristiken ins Produktportfolio aufzunehmen. Dadurch sollen Kundensegmente adressiert werden, welche mit dem aktuellen Produktportfolio noch nicht erreicht wurden. Gleichzeitig geht dabei eine solche Produktportfolioerweiterung mit einem deutlichen Risiko bezüglich der effizienten Gestaltung der Supply Chain-Strategie einher, da ggf. neue Produktionsaktivitäten benötigt werden, wodurch die Produktionskosten ansteigen.

Die Aufteilung von Operatoren zum Hinzufügen von unähnlichen Produktvari-

anten in zwei Nachbarschaftsoperatoren begründet sich darin, dass im Allgemeinen die durch diesen Operator identifizierten Produktvarianten einen größeren Grad an Unähnlichkeit aufweisen, als es bei den identifizierten Produktvarianten des vorangegangenen Operators der Fall ist. Um auch kleinere Änderungen der Nachbarschaft zu ermöglichen, die wie oben beschrieben ökonomisch motiviert sind, ist daher eine Aufteilung in zwei Nachbarschaftsoperatoren zum Hinzufügen von unähnlichen Produktvarianten nötig.

- **Füge ähnliche Produktvariante hinzu:**

Der Grundgedanke von diesem Nachbarschaftsoperator ist es, möglichst ähnliche Produktvarianten dem Produktportfolio hinzuzufügen. Dabei wird die Hypothese verfolgt, dass durch eine solche Erweiterung zwar nur geringe zusätzliche Marktanteile gewonnen werden können, die zusätzliche Produktvariante jedoch (bis zu einem gewissen Grad) den Kunden auch gleichzeitig mit den bestehenden Strategien bezüglich Produktions- und Logistikaktivitäten effizient bereitgestellt werden kann.

Die Funktionsweise dieses Nachbarschaftsoperators orientiert sich dabei am Vorgehen des Nachbarschaftsoperators zum Hinzufügen von unähnlichen Produktvarianten (vgl. Abbildung 7.3). Einziger Unterschied ist hierbei die in Schritt 3 durchgeführte Auswahl der Produktvariante. Während beim Hinzufügen von unähnlichen Produktvarianten der Kandidat mit der größten Summe der City-Block-Distanzen gewählt wird, wird hierbei die Produktvariante mit der kleinsten Summe der City-Block-Distanzen zu den benachbarten Produktvarianten des Produktportfolios (d.h. die Produktvariante mit der kleinsten Kennzahl der Ähnlichkeit) als Kandidat ausgewählt.

- **Füge zufällige Produktvariante hinzu:**

Dieser Nachbarschaftsoperator fügt eine zufällige Produktvariante aus einer Menge an möglichen Produktvarianten dem aktuellen Produktportfolio hinzu. Wie beim Nachbarschaftsoperator zum Entfernen von zufälligen Produktvarianten ist auch bei diesem Nachbarschaftsoperator der wirtschaftliche Mehrwert nur bedingt gegeben, da auch Produktvarianten mit einer schlechten Performance ausgewählt werden können. Vielmehr zielt auch dieser Nachbarschaftsoperator im Rahmen der lokalen Suche der Metaheuristik darauf ab, eine Diversifikation des Lösungsraums zu ermöglichen und so eine Exploration des gesamten Lösungsraums zu ermöglichen.

Mit der Definition dieser Nachbarschaftsoperatoren ist das konzeptionelle Vorgehen des Instrumentariums abgeschlossen. Im folgenden Abschnitt wird der theoretische Mehrwert des entwickelten Instrumentariums in Bezug auf den Mehrwert der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie anhand von Fallstudien demonstriert.

7.3 Ökonomische Analyse des Instrumentariums

In diesem Abschnitt wird das entwickelte Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung bei der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie anhand von Fallstudien evaluiert. Der Fokus liegt darauf, den theoretischen Mehrwert der integrierten Planung gegenüber einem sequentiellen Verfahren zu demonstrieren. Dazu werden die in Kapitel 5 und Kapitel 6 verwendeten Fallstudien aufgegriffen, um anhand dieser Fallstudien die domänenunabhängige Anwendbarkeit des Instrumentariums zu zeigen.

In Abschnitt 7.3.1 erfolgt zunächst die Beschreibung dieser Fallstudien, indem deren Datengrundlage vorgestellt und der Untersuchungsaufbau für Sensitivitätsanalysen präsentiert werden. Anschließend ist in Abschnitt 7.3.2 die Interpretation der Ergebnisse für eine Fallstudie aus dem Bereich der Elektromobilität und in Abschnitt 7.3.3 für eine Fallstudie aus dem Bereich der Textilindustrie dargelegt. Dabei wird im Rahmen der Fallstudie der Elektromobilität der Mehrwert der integrierten Planung einer B2B-Geschäftsbeziehung untersucht und der Einfluss der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers auf das Ergebnis demonstriert. Weiterhin erfolgt anhand der Fallstudie der Textilindustrie eine Analyse zum Mehrwert der integrierten Planung für eine B2C-Geschäftsbeziehung sowie eine Untersuchung des Einflusses von Postponement-Strategien auf die Entscheidungsfindung.

7.3.1 Fallstudien und Untersuchungsaufbau

Im Folgenden werden zunächst die beiden Fallstudien vorgestellt. Die Grundlage für die Fallstudie der Elektromobilität bildet dabei die in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Fallstudie zur Evaluation der Marktsimulation, welche im Folgenden um Daten zur Planung einer Supply Chain-Strategie erweitert wird. Anschließend wird die Fallstudie aus der Textilindustrie (vgl. Abschnitt 6.4.1) um Daten zur Planung des Produktportfolios erweitert. Zuletzt wird der Untersuchungsaufbau vorgestellt sowie die durch die Analyse zu beantwortenden Forschungsfragen spezifiziert.

Fallstudie Elektromobilität

In Abschnitt 5.3.1 wurde eine Fallstudie der Elektromobilität vorgestellt, anhand derer der theoretische Mehrwert der Marktsimulation demonstriert worden ist. Diese Fallstudie enthält die zur Prognose der Marktdurchdringung notwendigen Daten. Damit eine Betrachtung der integrierten Planung erfolgen kann, muss die Fallstudie entsprechend um Daten zur Planung der Supply Chain-Strategie erweitert werden (vgl. Abbildung 7.1 in Abschnitt 7.1). Die dazu notwendigen Erweiterungen der Fallstudie sind im Folgenden beschrieben.

In der Fallstudie wird die globale Supply Chain eines Batterieherstellers betrachtet. In dieser werden ausgehend von Rohmaterialien (bspw. Lithium) Produktionsaktivitäten zur Zellfertigung, zur Fertigung von Batteriemodulen und Batteriepacks sowie zur Montage von Batteriesystemen durchgeführt. Diese Produktionsaktivitäten sind dabei in Anlehnung an Väyrynen und Salminen (2012) spezifiziert. Innerhalb der Supply Chain ist ein geographisches Verschieben dieser Produktionsaktivitäten möglich, wohingegen eine Resequenzierung der Produktionsaktivitäten technisch bedingt nicht realisierbar ist. Batteriesysteme stellen die Endprodukte dar, werden in verschiedenen Produktvarianten angeboten und unterscheiden sich anhand der Produktcharakteristiken Batteriekapazität und Antriebstyp. Abnehmer dieser Batteriesysteme sind Automobilhersteller, wobei die Annahme getroffen wird, dass diese in einem niedrigen Integrationsverhältnis zur Supply Chain des Batterieherstellers stehen. Daraus resultiert bezüglich der Geschäftsbeziehung der Supply Chain eine Business-to-Business (B2B) Geschäftsbeziehung.

In der Fallstudie werden sieben potenzielle Standorte betrachtet, an denen Produktions- und Lageraktivitäten durchgeführt werden können (d.h. zwei in Asien, zwei in Nord- und einer in Mittelamerika sowie zwei in Europa). Automobilhersteller²⁷ bzw. deren Logistikprovider stellen die Kunden der Supply Chain dar. Insgesamt sind diese dabei in drei Kundenregionen angeordnet und finden sich in Nord- und Mittelamerika sowie in Europa wieder. Die bisher in der Marktsimulation betrachteten Kundensegmente (vgl. Abschnitt 5.3.1) sind dabei den drei Kundenregionen zugeordnet, sodass sich die Nachfrage einer Kundenregion aus der Aggregation der Nachfragewerte der dazugehörigen Kundensegmente ergibt (vgl. auch den Prozessschritt zur Anpassung der Nachfrageparameter in Abschnitt 7.2.1).

Darüber hinaus sind Annahmen bezüglich der Kostenstrukturen für die Produktions- und Logistikaktivitäten zu treffen. Die Produktionskostensätze sind dabei aus Chung et al. (2015) abgeleitet und unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Region eines Standorts^{28 29}. Verglichen mit der Fallstudie der Textilindustrie (siehe Abschnitt 6.4.1) sind die Fixkosten für das Bereitstellen von Produktionsaktivitäten sowie Synergieverluste durch das Aufteilen von Produktionsaktivitäten aufgrund des höheren Komplexitätsgrads der Produktion von Batteriesystemen deutlich höher. Weiterhin steigen die variablen Lager- und Transportkostensätze in Abhängigkeit zum Fertigstellungsgrad der Produkte an. Die Höhe der Transportkostensätze korreliert zudem mit der Distanz der Transportverbindung.

²⁷Automobilhersteller werden in der Literatur und Praxis als OEM (englisch für Original Equipment Manufacturer) bezeichnet.

²⁸Beispielsweise ist die Produktion in Asien günstiger als in Europa und Nordamerika.

²⁹Die Produktionskostensätze unterliegen wie die Absatzpreise für Batteriesysteme Unsicherheiten. Um diesen Sachverhalt im Optimierungsmodell (vgl. 6.2) zu berücksichtigen, werden die entsprechenden Parameter um eine Dimension zur Abbildung von Szenarien erweitert.

Zuletzt muss noch der Planungszeitraum festgelegt werden. In der Automobilindustrie haben sich die Produktlebenszyklen in der Vergangenheit stark verkürzt und betragen heute teilweise nur noch 4 Jahre (Diez, 2015, S. 431). Auch bei der Entwicklung der Batterietechnologie werden in den kommenden Jahren technologische Fortschritte erwartet (Scrosati und Garche, 2010), welche ebenfalls auf kurze Produktlebenszyklen bei Batteriesystemen hindeuten. Weiterhin wurde in den Ergebnissen zur Analyse der Marktsimulation am Beispiel der Elektromobilität (vgl. Abschnitt 5.3.2) deutlich, dass ein hinreichend großes Marktpotential für die Fertigung von Batteriesystemen im Rahmen einer Supply Chain erst ab 2020 besteht. Aus den genannten Gründen wird in dieser Fallstudie ein Planungszeitraum von 2020 bis einschließlich 2023 auf monatlicher Basis betrachtet.

Fallstudie Textilindustrie

Die in Abschnitt 6.4.1 vorgestellte Fallstudie der Textilindustrie beinhaltet bisher Daten zur Planung einer Supply Chain-Strategie und wird daher im Folgenden um Daten zur Planung eines Produktportfolios erweitert. In der Fallstudie werden zwei Marktakteure betrachtet. Dazu zählt zum einen die betrachtete Supply Chain eines Textilherstellers für Markenkleidung sowie ein direkter Wettbewerber. Die betrachtete Supply Chain umfasst dabei die in Abschnitt 6.4.1 aufgeführten Eigenschaften und entspricht der Probleminstanz I3 (siehe Abschnitt 6.3.2).

Die angebotenen Produktvarianten klassifizieren sich dabei anhand der Produktcharakteristiken Marke, Typ, Schnitt und Farbe. Insgesamt bietet die betrachtete Supply Chain 48 Produktvarianten und damit auch Marktmodelle an. Die Hälfte dieser Produktvarianten werden in ähnlicher Form auch von einem direkten Wettbewerber angeboten, sodass am Markt insgesamt 72 Marktmodelle offeriert werden.

Zur Analyse des Kundenentscheidungsprozesses werden insgesamt 512 Kundensegmente mit insgesamt 50000 Kunden abgebildet. Die einzelnen Kundensegmente unterscheiden sich dabei bezüglich ihrer Mehrpreisbereitschaft für die entsprechenden Eigenschaften der Produktvarianten. Im Rahmen der Fallstudie zielen die Kundensegmente auf die Maximierung des Nutzens ab, welcher sich aus der Summe der Mehrpreisbereitschaften für die einzelnen Eigenschaften ergibt. Die Kaufentscheidungen werden insgesamt über einen Planungszeitraum von 12 Perioden betrachtet, wobei eine Periode im Modell eine Zeitspanne von einem Monat repräsentiert.

Unsicherheiten bestehen im Rahmen dieser Fallstudie bei der Mehrpreisbereitschaft der Kundensegmente. Diese wurden zufallsgesteuert generiert, wobei 15 konsistente Szenarien erstellt worden sind. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Normalverteilung verwendet. Grundsätzlich können Daten zu den Kundenpräferenzen durch Conjoint-Analysen ermittelt werden (siehe im Bereich der Textilindustrie bspw. (North und De Vos, 2002)).

Zusammenfassung und Abgrenzung der beiden Fallstudien

Zusammenfassend lassen sich die beiden Fallstudien anhand Kriterien der Daten zur Planung eines Produktportfolios und Kriterien der Daten zur Planung einer Supply Chain-Strategie gegeneinander abgrenzen. Die Unterschiede der Fallstudien sind dabei in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Kriterien		Elektromobilität	Textilindustrie
# Marktmodelle		60	72
Kooperationen		ja	nein
Wettbewerbssituation		indirekt	direkt
# Produktvarianten		27	48
Supply Chain Beziehung		B2B	B2C
Post- ponement	Grad Post- ponement	x	x
	Resequenzierung Aktivitäten	-	x
	Fixkosten Produktionsaktivitäten	hoch	mittel

Tabelle 7.1: Unterschiede der Fallstudien

Bezüglich der Daten zur Planung eines Produktportfolios unterscheiden sich die beiden Fallstudien zunächst anhand der betrachteten *Anzahl an Marktmodellen*. So hängt diese von der Menge der betrachteten Produktcharakteristiken deren Ausprägungen sowie dem zusätzlichen Angebot von Wettbewerbern und kooperierenden Unternehmen ab. Während in der Fallstudie der Elektromobilität *Kooperationen* zwischen der betrachteten Supply Chain und anderen Unternehmen bei der Gestaltung der Marktmodelle betrachtet werden (beispielsweise durch die Ergänzung des Angebotes um zusätzliche Dienstleistungen), bestehen in der Fallstudie der Textilindustrie keine Kooperationen. Ein weiterer Unterschied liegt in der *Wettbewerbssituation*. Während in der Domäne der Elektromobilität indirekte Wettbewerber des Batterieherstellers betrachtet werden, welche in Form von Anbietern von konventionellen Fahrzeugen auftreten, existiert in der Fallstudie der Textilindustrie ein direkter Wettbewerber in Form eines alternativen Anbieters von Textilien.

Darüber hinaus unterscheiden sich die Fallstudien bezüglich der Daten zur Planung einer Supply Chain-Strategie. So wird in der Fallstudie der Textilindustrie eine größere *Anzahl an Produktvarianten* betrachtet, was zu größeren Freiheitsgraden bei

der Gestaltung des Produktportfolios führt. Weiterhin bestehen Unterschiede bezüglich der Art der *Supply Chain-Beziehung*. Die Fallstudie der Elektromobilität betrachtet aus Sicht eines Batterieherstellers eine Business-to-Business Geschäftsbeziehung. Abnehmer der hergestellten Produktvarianten sind dabei Automobilhersteller bzw. deren Logistikprovider. Dagegen wird in der Fallstudie der Textilindustrie eine Business-to-Consumer Geschäftsbeziehung betrachtet. Hieraus ergeben sich Unterschiede bei der Transformation der Nachfrage zwischen Marktsimulation und Optimierung (vgl. Abschnitt 7.2.1). Weiterhin wird in beiden Fallstudien das Verzögern und Verschieben von Produktions- und Logistikaktivitäten betrachtet (d.h. der *Grad von Postponement* stellt einen Freiheitsgrad dar), wohingegen eine *Resequenzierung von Produktionsaktivitäten* nur in der Fallstudie der Textilindustrie technologisch möglich ist. Zuletzt unterscheiden sich die Fallstudien hinsichtlich der anfallenden *Fixkosten für das Bereitstellen von Produktionsaktivitäten*. Diese sind aufgrund der höheren Produktionskomplexität in der Fallstudie der Elektromobilität deutlich höher.

Untersuchungsaufbau

Die beschriebenen Fallstudien werden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen verwendet, um den theoretischen Mehrwert des Instrumentariums zur integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie zu demonstrieren. Weiterhin soll durch die zwei Fallstudien die domänenunabhängige Anwendbarkeit des Instrumentariums gezeigt werden. Tabelle 7.2 fasst die betrachteten Forschungsfragen inklusive der veränderlichen Parameter innerhalb der Sensitivitätsanalysen zusammen.

Abschnitt	Forschungsfrage	Veränderliche Größe
7.3.2	Welchen ökonomischen Mehrwert liefert das entwickelte Instrumentarium in Bezug auf die Fallstudie der Elektromobilität?	-
	Welchen Einfluss hat die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers auf die Ergebnisse?	Risikobereitschaft
7.3.3	Welchen ökonomischen Mehrwert liefert das entwickelte Instrumentarium in Bezug auf die Fallstudie der Textilindustrie?	-
	Welchen Einfluss haben Freiheitsgrade bezüglich der Umsetzung von Postponement-Strategien?	Supply Chain-Strategien

Tabelle 7.2: Übersicht der Forschungsfragen zur Analyse des Instrumentariums zur integrierten Planung

7.3.2 Mehrwert der integrierten Planung und Einfluss der Risikobereitschaft am Beispiel einer Fallstudie der Elektromobilität

Im folgenden Abschnitt wird die Anwendbarkeit des entwickelten Instrumentariums zur Entscheidungsunterstützung anhand der Fallstudie der Elektromobilität evaluiert. Ziel ist es, die Auswirkungen von Änderungen eines Produktportfolios auf das Unternehmensergebnis (d.h. den EBIT) herauszustellen und diese auf Basis der Eigenschaften der Fallstudie zu erklären. Darüber hinaus wurde in Abschnitt 6.4.3 der Einfluss der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers auf die Vorteilhaftigkeit von Supply Chain-Strategien herausgestellt. Auf Basis dieser Ergebnisse ist zu erwarten, dass die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers auch in Abhängigkeit des identifizierten Produktportfolios Einfluss auf die Identifizierung von Supply Chain-Strategien hat. Diese Hypothese wird im zweiten Teil der Analyse untersucht.

In Abbildung 7.4 sind zunächst die Ergebnisse der integrierten Planung im Lösungszeitverlauf dargestellt. In Abhängigkeit der Lösungszeit wird dabei die zu einem Zeitpunkt gefundene beste Lösung bestehend aus der Anzahl der im Produktportfolio enthaltenen Produktvarianten sowie dem erzielten EBIT dargestellt. Ausgangspunkt bildet eine Lösung mit denjenigen 24 Produktvarianten im Produktportfolio, welche unter Berücksichtigung aller möglichen Produktvarianten über den betrachteten Planungszeitraum in mindestens einem Szenario eine Nachfrage generieren. Darauf aufbauend werden die Marktsimulation und die stochastische Optimierung (gesteuert durch die Metaheuristik) iterativ ausgeführt. Als Abbruchkriterium dient eine Laufzeitbegrenzung von 12 Stunden bzw. eine Terminierung nach 150 Iterationen ohne Verbesserung der Lösung.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass eine gegenüber der Startlösung durchgeführte Änderung des Produktportfolios zu einer Steigerung des EBIT um ca. 2,8% führt. Diese lässt sich dadurch erklären, dass ein schlankeres Produktportfolio die Unsicherheiten bezüglich der Absatzmengen reduziert, sodass Lagerbestände und damit Lagerkosten gesenkt werden können. Diese Einsparungen wachsen zudem an, da weiterhin Restmengen reduziert werden, wodurch Produktions-, Transport- und Lagerkosten gesenkt werden können. Gleichzeitig entfällt dabei zum einen ein Teil der Nachfrage auf andere im Produktportfolio angebotene Produktvarianten, während zum anderen ein geringer Teil der Nachfrage auf Produktvarianten von Wettbewerbern entfällt (d.h. hier auf Marktmodelle mit ICEs). Diese zweite Form der Nachfrageänderung geht dabei mit Minderungen der Erlöse des Batterieherstellers einher. Insgesamt kompensiert das Einsparungspotential bei den Kosten jedoch diesen Effekt, sodass eine Reduzierung des Produktportfolios aus Sicht einer Maximierung des EBIT vorteilhaft ist. Die Ursache dafür liegt darin, dass unabhängig von dem betrachteten Produktportfolio eine Full Speculation-Strategie als vorteilhaft identifiziert wird. Dies liegt an relativ hohen Kosten für das Verschieben von Produktions-

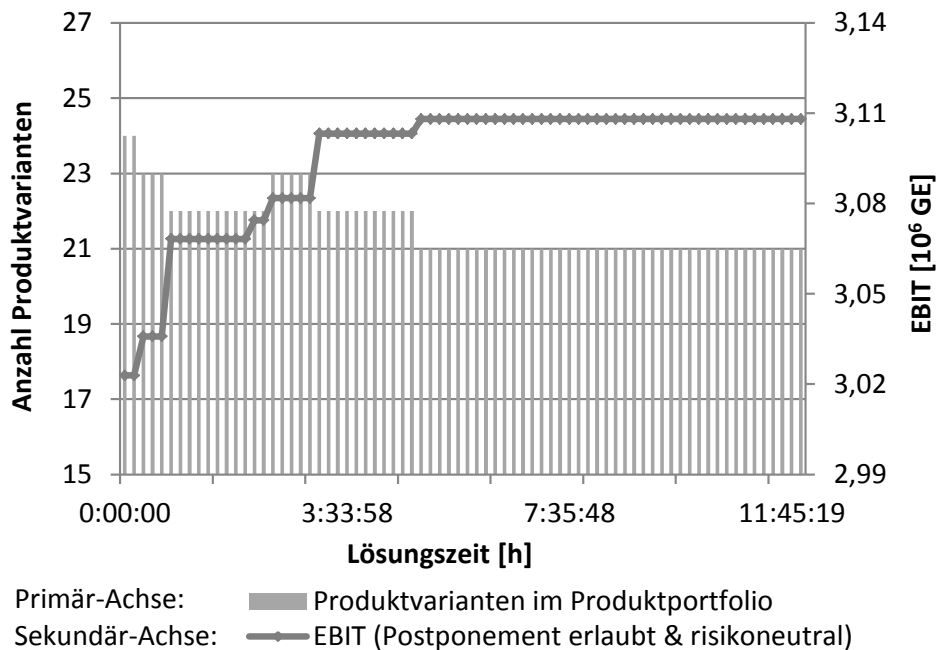


Abbildung 7.4: Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Elektromobilität) im Fall eines risikoneutralen Entscheidungsträgers und der potenziellen Anwendbarkeit von Postponement-Strategien

aktivitäten und birgt somit ein hohes Risiko für Restmengen an Produktvarianten in den Lagerstandorten.

Weiterhin haben sich derartige Änderungen des Produktportfolios als vorteilhaft herausgestellt, bei denen ein Tausch zweier Produktvarianten durchgeführt wurde. Eine Ursache findet sich darin, dass im Rahmen der Fallstudie größer dimensionierte Batteriesysteme eine höhere Marge aufweisen als kleiner dimensionierte Batteriesysteme. Dies führt dazu, dass für Fahrzeuge der Oberklasse anstatt Batteriesysteme mit geringer und mittlerer Kapazität Batteriesysteme mit geringer und hoher Kapazität angeboten werden. Dabei besteht ein Zielkonflikt zwischen der potenziell höheren Marge und dem möglichen Verlust von Marktanteilen, da die Fahrzeuge aus Kundensicht in höheren Kosten resultieren, was ab einem gewissen Grenzwert mit Absatz- und Erlösminderungen einhergeht.

Zuletzt hat sich bei den Ergebnissen gezeigt, dass im Verlauf der Lösungszeit ein Hinzufügen von Produktvarianten zu besseren Lösungen führen kann. Die Ursache liegt in der Kompensation des zuvor beschriebenen Effekts des Verlustes von Marktanteilen, wodurch zusätzliche Erlöse generiert werden können. Die hinzugefügten Produktvarianten erhöhen dabei zwar in geringem Umfang die Nachfrageunsicherheit

und führen zu Nachfrageminderungen bei anderen angebotenen Produktvarianten, insgesamt ist der Effekt der zusätzlichen Erlöse jedoch größer.

Im bisherigen Teil der Analyse ist ein risikoneutraler Entscheidungsträger unterstellt worden. Über alle Iterationen der Metaheuristik bildet dabei wie oben beschrieben eine Full Speculation-Strategie die Lösung. In Abschnitt 6.4.3 wurde bereits herausgestellt, dass ein risikoaverses Entscheidungsverhalten Postponement-Strategien begünstigt. Daher wird im Folgenden das Potential einer Änderung eines Produktportfolios unter der Zielstellung der Risikominimierung untersucht.

Abbildung 7.5 stellt in Abhängigkeit der Lösungszeit die Entwicklung des EBIT für die jeweils gefundene beste Lösung des integrierten Planungsverfahrens für einen risikoaversen Entscheidungsträger dar. Ziel ist dabei die Minimierung des Risikos (d.h. die Maximierung des CVaRs).

Mit fortschreitender Laufzeit des Verfahrens werden einerseits zunehmend risikoaversere Lösungen identifiziert, die andererseits über die gesamte Laufzeit des Verfahrens jedoch auch in einen um ca. 0,8% reduzierten EBIT münden. Die Ursache liegt darin, dass durch das Entfernen einiger Produktvarianten der Grad an Unsicherheiten und damit auch das Risiko der Supply Chain bezüglich hoher Lagerbestände und Restmengen reduziert wird (d.h. der CVaR steigt).

Insgesamt stellt dabei eine Form Postponement-Strategie die jeweils vorteilhafte Lösung dar. Dadurch steigen einerseits zwar die Produktionskosten, andererseits kann die Nachfrage jedoch besser antizipiert werden, sodass Lagerbestände in den potenziell schlechten Szenarien deutlich reduziert werden können. Insgesamt resultiert die Strategie dabei verglichen mit den Ergebnissen eines risikoneutralen Entscheidungsträgers in einem deutlich niedrigeren EBIT.

Abschließend werden die Ergebnisse unter dem Kriterium der Business-to-Business Geschäftsbeziehung der Supply Chain des Batterieherstellers diskutiert. Die Supply Chain des Batterieherstellers stellt in dieser Fallstudie einen Zulieferer der Stufe 1 für einen Automobilhersteller (OEM) dar. Aus heutiger Sicht zeichnen sich Lieferantenbeziehungen in der Automobilindustrie durch eine schwache Verhandlungsposition der Zulieferer aus (Baum und Delfmann, 2010, S. 42), wodurch die Realisierbarkeit der dargestellten Produktportfolioänderungen zunächst kritisch einzuschätzen ist.

Das Potential einer solchen Produktportfolioänderung wird jedoch bei detaillierter Betrachtung der Beschaffungslogistik eines OEMs deutlich. Lieferabrufsysteme dienen dabei zur Abwicklung der Materialdisposition und -anlieferung zwischen OEMs und den Zulieferern, wobei mit jedem Zulieferer ein individueller Rahmenvertrag abgeschlossen wird, in welchem die Mengen- sowie Terminrestriktionen der Lieferungen sowie weitere Lieferparameter vertraglich vereinbart werden (Klug, 2010, S. 290 f.). Die strategische Planung in der Automobilindustrie wird auf Basis von Absatzprognosen durchgeführt, woraus auch Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen

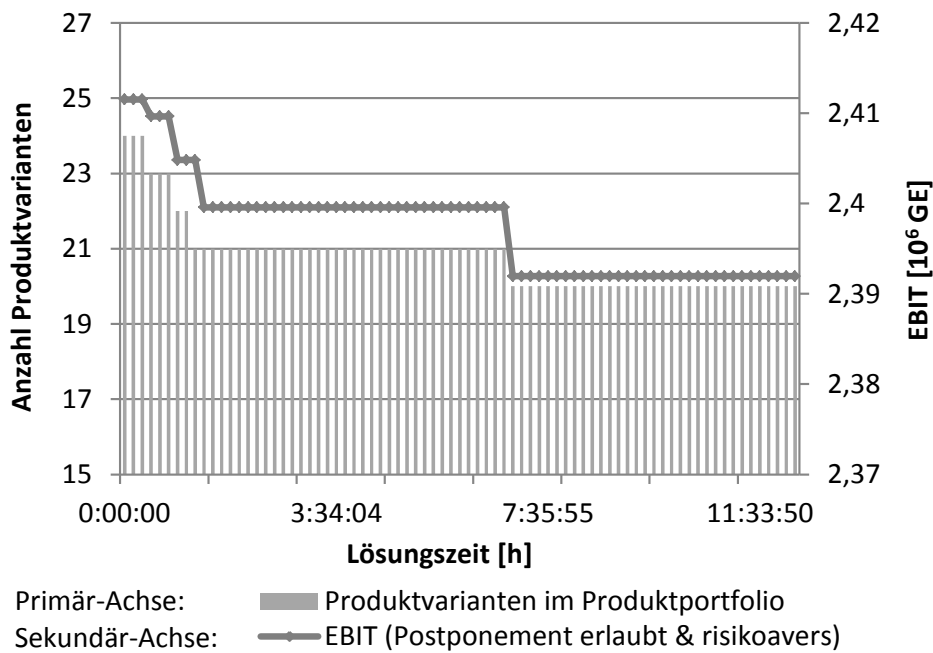


Abbildung 7.5: Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Elektromobilität) im Fall eines risikoaversen Entscheidungsträgers und der potenziellen Anwendbarkeit von Postponement-Strategien

Abbruchmengen bei den Zulieferern resultieren (vgl. beispielsweise (Weckbach, 2011, S. 109)). Daher enthalten auch die Rahmenverträge maximale Schwankungsbreiten bezüglich der Abbruchmengen (Klug, 2010, S. 291), welche dann bei der Planung der Produktion und Logistik berücksichtigt werden sollten. Die Ergebnisse des entwickelten Instrumentariums zur Entscheidungsunterstützung bei der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie können dabei als Grundlage für Verhandlungen der oben genannten Rahmenverträge gesehen werden.

Zudem ist in Zukunft mit der Umstellung auf elektrische Antriebsformen mit einer Neuordnung von Wertschöpfungsanteilen bei der Herstellung von Fahrzeugen zu rechnen (Kasperk und Drauz, 2013). Da Batteriesysteme einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten der Fahrzeuge bilden, nehmen diese einen entsprechenden Wertschöpfungsanteil ein. Dadurch ist zu erwarten, dass die Verhandlungsposition von Batterieherstellern als Zulieferer in Zukunft gestärkt wird und somit Änderungen am Produktportfolio eines Batterieherstellers einfacher durchgesetzt werden können, wodurch die potentielle Anwendbarkeit des Instrumentariums in der Domäne steigen würde.

7.3.3 Mehrwert der integrierten Planung und Einfluss von Konzepten des Postponements am Beispiel einer Fallstudie aus der Textilindustrie

In diesem Abschnitt wird die Anwendbarkeit des entwickelten Instrumentariums anhand einer weiteren Fallstudie evaluiert und dadurch die domänenübergreifende Anwendbarkeit demonstriert. Dazu wird die Fallstudie der Textilindustrie verwendet. Wie in Abschnitt 7.3.2 werden auch hier zunächst die Auswirkungen von Änderungen des Produktportfolios auf das Unternehmensergebnis herausgestellt. Da sich in den bisherigen Analysen der Fallstudie der Mehrwert von Konzepten des Postponements gezeigt hat (vgl. Abschnitt 6.4.3 und Abschnitt 6.4.3), wird zusätzlich evaluiert, inwiefern ein potenzieller Freiheitsgrad bezüglich Postponement-Entscheidungen die Gestaltung eines Produktportfolios unter den Gesichtspunkten der Gewinnmaximierung beeinflusst.

In Abbildung 7.6 sind zunächst die Ergebnisse der integrierten Planung im Lösungszeitverlauf des Instrumentariums für den Fall dargestellt, dass Konzepte des Postponements einen Freiheitsgrad bieten. In Abhängigkeit der Lösungszeit wird dabei die zu diesem Zeitpunkt gefundene beste Lösung bestehend aus der Anzahl der im Produktportfolio enthaltenen Produktvarianten sowie dem daraus resultierenden EBIT dargestellt. Ausgangspunkt bildet eine Lösung mit denjenigen 48 Produktvarianten im Produktportfolio, welche unter Berücksichtigung aller möglichen Produktvarianten über den betrachteten Planungszeitpunkt in mindestens einem Szenario eine Nachfrage generieren. Darauf aufbauend steuert die Metaheuristik die iterative Ausführung der Marktsimulation und der stochastischen Optimierung. Als Abbruchkriterium dient eine Laufzeitbegrenzung von 12 Stunden bzw. eine Terminierung nach 150 Iterationen ohne Verbesserung der Lösung.

Die Ergebnisse verdeutlichen zunächst, dass das Potential einer Verbesserung des Produktportfolios in diesem Fall sehr gering ist. Lediglich das Entfernen von drei Produktvarianten führt zu einer Verbesserung des EBIT. Ursache hierfür ist, dass aufgrund der bestehenden Unsicherheiten eine Full Postponement-Strategie die optimale Lösung darstellt. Dadurch können die Nachfrageunsicherheiten zu Lasten gestiegener fixer und variabler Produktionskosten gut antizipiert werden. Eine Reduzierung des Angebots lohnt sich dabei in den ersten Iterationen der Metaheuristik nicht, da ein Entfernen von Produktvarianten mit Absatzeinbußen einhergehen würden und diese den EBIT aufgrund der verwendeten Full Postponement-Strategie reduzieren würden.

Die über die Lösungszeit erzielte Verbesserung des EBIT begründet sich im Entfernen von drei Produktvarianten, wodurch die Nachfrageunsicherheiten für einige Kundenregionen deutlich reduziert werden kann. Aufgrund des direkten Wettbewerbes sind mit dieser Aktion zunächst Absatzeinbußen zu verzeichnen. Diese können jedoch mit einer moderateren Postponement-Strategie kompensiert werden. Das Einsparungspo-

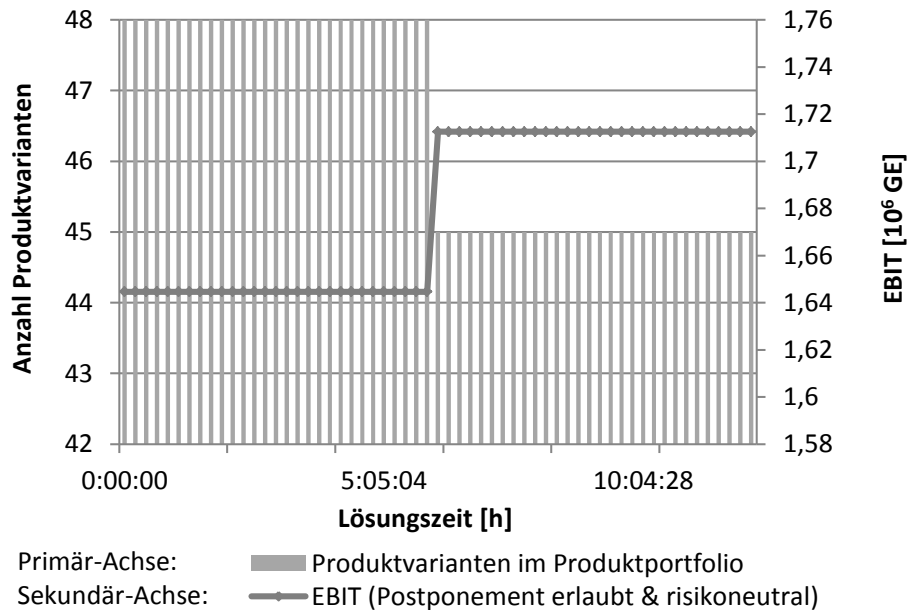


Abbildung 7.6: Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Textilindustrie) im Fall eines risikoneutralen Entscheidungsträgers und der potenziellen Anwendbarkeit von Postponement-Strategien

tential bei den fixen und variablen Produktionskosten ist dabei größer als die durch Absatzeinbußen resultierenden Erlösminderungen.

Um die Vorteilhaftigkeit von Konzepten des Postponements in Bezug auf die Größe eines Produktportfolios zu demonstrieren, stellen in der folgenden Analyse Postponement-Entscheidungen keinen Freiheitsgrad bei der Gestaltung der Supply Chain-Strategie dar (d.h. eine Full Speculation-Strategie ist vorgegeben). Die Ergebnisse dieser Analyse in Bezug auf das Produktportfolio und den EBIT sind in Abbildung 7.7 dargestellt.

Im Vergleich zu den in der vorangegangenen Analyse präsentierten Ergebnissen wird deutlich, dass im Lösungszeitverlauf eine Reduzierung des Produktportfolios aus Gesichtspunkten der Maximierung des EBIT vorteilhaft ist. Die Ursache liegt in hohen Lagerbeständen bzw. hohen Strafkosten, welche aufgrund der mit der Full Speculation-Strategie schlecht zu antizipierenden Nachfrage verbunden sind. So führt das Anbieten sehr vieler Produktvarianten dazu, dass einige Varianten nicht gewinnbringend hergestellt und an die Kunden verteilt werden können. Diese Produktvarianten werden im Lösungszeitverlauf aus dem Produktportfolio eliminiert.

Darüber hinaus bietet sich ein Verbesserungspotential im Entfernen von Produktvarianten, was dazu führt, dass eine komplette Produktionsaktivität nicht mehr er-

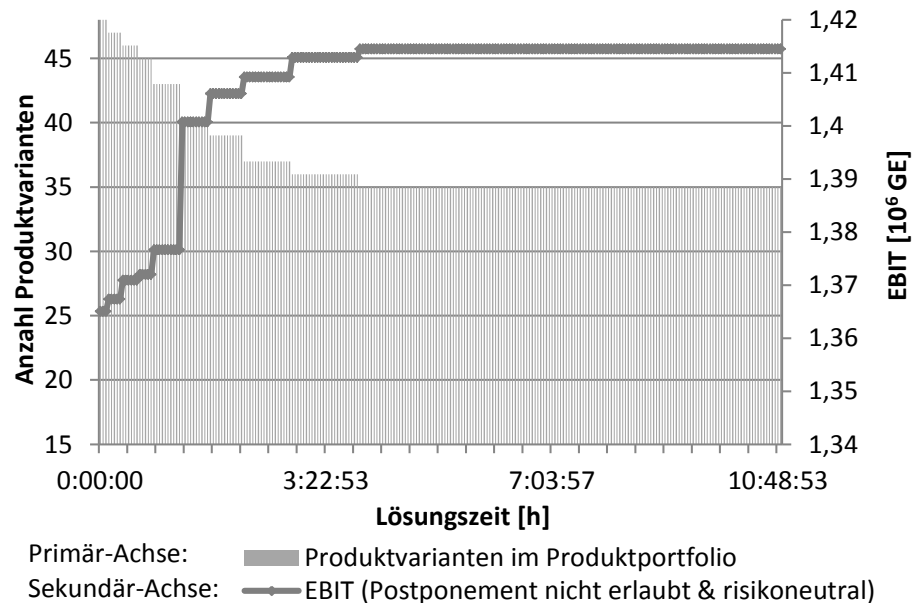


Abbildung 7.7: Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Textilindustrie) im Fall eines risikoneutralen Entscheidungsträgers und fixierter Full Speculation-Strategie

forderlich ist, wodurch Einsparungen bei den fixen Produktionskosten erzielt werden können. Damit gehen zwar Erlösminderungen einher, jedoch können über die Produktionskosten auch Lager-, Transport und Strafkosten reduziert werden, sodass diese Änderung insgesamt zu einer Verbesserung der Lösung führt.

7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Instrument zur Entscheidungsunterstützung für die integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie vorgestellt. Dazu wurde zunächst das konzeptionelle Vorgehen zur Kopplung der in Kapitel 5 und Kapitel 6 entwickelten Marktsimulation und Optimierung zu einem ganzheitlichen Instrumentarium beschrieben. Die Kopplung bietet dabei eine Schnittstelle zwischen Simulations- und Optimierungskomponenten mit welcher automatisiert für ein Produktportfolio die Marktdurchdringung und anschließend eine optimale Supply Chain-Strategie identifiziert werden kann (siehe Abschnitt 7.2.1). Anschließend wurde eine Rückkopplung zwischen Optimierungs- und Simulationskomponente in Form einer Metaheuristik in Abschnitt 7.2.2 präsentiert. Diese dient dazu, die mit einer Änderung am Produktportfolio verbundene Marktdynamik abzubilden. Die Um-

setzung beinhaltet die Auswahl der Metaheuristik Reduced Variable Neighborhood Search sowie die Spezifizierung von Nachbarschaftsoperatoren zur Modifikation des Produktportfolios.

Anschließend wurde das entwickelte Instrumentarium anhand von Fallstudien evaluiert, um den theoretischen Mehrwert der integrierten Planung für einen Entscheidungsträger herauszustellen. Die Evaluation wurde anhand von zwei Fallstudien in Abschnitt 7.3.2 und Abschnitt 7.3.3 durchgeführt, um auf diese Weise die domänenübergreifende Anwendbarkeit zu demonstrieren.

Die Ergebnisse spiegeln zum einen den ökonomischen Mehrwert des Instrumentariums wieder. So konnten in beiden Fallstudien das Unternehmensergebnis in Form eines gestiegenen EBIT bzw. eines reduzierten Risikos verbessert werden. Weiterhin wurde in der Fallstudie der Elektromobilität gezeigt, dass die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers Einfluss auf die Größe eines Produktportfolios hat. So konnten Nachfrageschwankungen über die einzelnen Szenarien durch eine Reduzierung des Produktportfolios verringert werden, welches schließlich auch ein geringeres Risiko implizierte. In der Fallstudie der Textilindustrie wurde zudem der Einfluss von Änderungen eines Produktportfolios auf die Supply Chain-Strategie dargestellt. So begünstigte ein größeres Produktportfolio die Notwendigkeit Konzepte des Postponements zu verwenden.

8 Schlussbetrachtung

In diesem Kapitel findet die Schlussbetrachtung dieser Arbeit statt. Dazu erfolgt zunächst eine Zusammenfassung der einzelnen Kapitel, anschließend eine kritische Würdigung der Ergebnisse sowie darauf aufbauend ein Ausblick über den potenziellen zukünftigen Forschungsbedarf.

8.1 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurde der Problemgegenstand der integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie eingeführt. Darauf aufbauend wurden die Anforderungen an die Planung abgeleitet. Insgesamt sind dabei die Wechselwirkungen zwischen der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie abzubilden, sodass die durch Änderungen eines Produktportfolios verursachte Marktdynamik und deren Auswirkungen auf die Gestaltung einer Supply Chain-Strategie im Planungsprozess berücksichtigt werden können.

Dazu müssen die relevanten Marktteilnehmer, das offerierte Angebot inklusive konkurrierender und komplementärer Produktvarianten, Dienstleistungen und Erlösmodelle sowie Unsicherheiten bei den Eingabedaten zur Planung eines Produktportfolios berücksichtigt werden. Zentrale Anforderungen bei der Planung einer Supply Chain-Strategie sind darüber hinaus die Abbildung der Eigenschaften einer Supply Chain, mögliche Strategien, Nachfrageunsicherheiten und die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers.

Kapitel 3 liefert eine Übersicht über die in dieser Arbeit zugrundeliegenden Methoden des Operations Research. Zunächst wurden dabei die relevanten Arten von mathematischen Optimierungsmodellen und deren Lösungsverfahren vorgestellt. Diese wurden als Grundlagen bei der Entwicklung einer Methodik zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien sowie bei der integrierten Planung eingesetzt. Anschließend wurden Grundlagen zur Simulation erläutert, welche als Basis für die Entwicklung einer Marktsimulation zur Produktportfolioplanung dienen.

Eine Analyse der wissenschaftlichen Literatur erfolgte in Kapitel 4. Dazu wurden die relevanten Ansätze zur integrierten Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie identifiziert und anhand der aus dem Problemgegenstand dieser Arbeit abgeleiteten Anforderungen bewertet. Es wurde deutlich, dass in vielen Ansätzen eine statisch gegebene Nachfrage je Produktvariante in den Eingabedaten

unterstellt wird, wodurch die Dynamik der Marktnachfrage bei Änderung eines Produktportfolios nicht betrachtet werden kann. Nur wenige Arbeiten berücksichtigen bisher diese Dynamik. Dabei weisen die Arbeiten jedoch einige Limitationen bei der Planung eines Produktportfolios (d.h. bspw. keine Betrachtung von Wettbewerbern) und der Planung einer Supply Chain-Strategie (d.h. bspw. keine ganzheitliche Betrachtung der Produktion und Logistik) auf.

Da bisher keiner der integrierten Planungsansätze weder alle Anforderungen der Planung eines Produktportfolios noch alle Anforderungen der Planung einer Supply Chain-Strategie vollständig erfüllt, wurden daraufhin existierende Ansätze innerhalb der beiden Planungsebenen evaluiert. Weil die Marktdurchdringung ein wesentliches Ziel der Produktportfolioplanung darstellt, wurde zunächst der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich bestehender Ansätze zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung von Produktvarianten analysiert. In der Analyse wurde deutlich, dass Arbeiten in diesem Bereich mit der Abbildung von Marktteilnehmern und ihren Interaktionen, innovativen Produkten sowie der Einbeziehung von Unsicherheiten viele relevante Anforderungen berücksichtigen. Forschungsbedarf besteht bei diesen Ansätzen in der expliziten Betrachtung von Dienstleistungen und unterschiedlichen Erlösmodellen sowie daraus abgeleitet generischen Strukturen zur domänenübergreifenden Anwendbarkeit der Methodik.

Im Bereich der Planung einer Supply Chain-Strategie hat sich gezeigt, dass Konzepte des Postponements bei Produktvarianten mit modularer Produktstruktur unter Nachfrageunsicherheiten Verbesserungspotential bezüglich des Unternehmensergebnisses darstellen können. Quantitative Ansätze zur Entscheidungsfindung erlauben dabei grundsätzlich eine generische Anwendbarkeit, weisen jedoch einige Limitationen auf. So wurde Handlungsbedarf bei der integrierten Betrachtung von verschiedenen Formen von Postponement-Strategien sowie der Berücksichtigung der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers identifiziert.

In Kapitel 5 wurde für die Planung eines Produktportfolios eine domänenunabhängige Marktsimulation zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung von Marktmodellen entwickelt. Marktmodelle beinhalten das am Markt offerierte Angebot in Form von innovativen Produktvarianten und schließen dabei komplementäre und konkurrierende Produktvarianten, Dienstleistungen und Erlösmodelle von kooperierenden Unternehmen sowie Wettbewerbern ein. Zudem werden unsichere Einflussfaktoren bei der Planung in Form von konsistenten Szenarien berücksichtigt.

Im ersten Schritt wurde ein Metamodell zur Abbildung der Problemstruktur entwickelt. Diese Struktur erlaubt die domänenunabhängige Formulierung des Problemgegenstands. So wurden Modellelemente zur Abbildung der Marktmodelle, Kundensegmente, deren Interaktionen sowie Modellelemente zur Abbildung von Unsicherheiten und des Planungszeitraums erstellt. Anschließend wurde das Verhalten der Marktsi-

mulation spezifiziert. Dieses gliedert sich in den Auswertungs-, Kundenentscheidungs- und Interaktionsprozess der Marktteilnehmer.

Im nächsten Schritt wurde die Anwendbarkeit der Marktsimulation anhand einer Fallstudie demonstriert. Dabei wurde der Einfluss von unsicheren Einflussfaktoren, Erweiterungen des Angebotes durch zusätzliche Dienstleistungen und Erlösmodelle sowie der Variation eines Produktportfolios im Rahmen von Sensitivitätsanalysen herausgestellt. Insgesamt wurde deutlich, dass die Marktsimulation zur Analyse des Chance-Risiko-Verhältnisses bei der Produktportfolioplanung eingesetzt werden kann.

Kapitel 6 stellt Ansätze der mathematischen Optimierung zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung einer Supply Chain-Strategie vor. Zunächst wurde ein stochastisches Optimierungsmodell zur Identifizierung von effizienten Supply Chain-Strategien unter Unsicherheiten entwickelt. In dem Modell wird zudem die Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers berücksichtigt. Mithilfe des Modells können verschiedene Formen von Postponement evaluiert werden, welches die Bestimmung des umgesetzten Grads an Postponement sowie eine mögliche Resequenzierung von Produktions- und Logistikaktivitäten einschließt. Weiterhin wurden exakte und approximative Lösungsverfahren adaptiert und in einer Analyse zur Laufzeit- und Lösungsqualität miteinander verglichen. Es wurde gezeigt, dass die Auswahl eines Lösungsverfahrens besonders in Abhängigkeit der Repräsentation der Unsicherheiten erfolgen sollte.

Um den Mehrwert des entwickelten Optimierungsmodells zu demonstrieren, wurde im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse anhand einer Fallstudie durchgeführt. Dabei konnte der Einfluss von Parameteränderungen, Wechselwirkungen zwischen Parameterkombinationen sowie der Zielkonflikt zwischen gewinnmaximalen und risikoaversen Supply Chain-Strategien gezeigt werden. In den Sensitivitätsanalysen wurde insbesondere der Mehrwert des generischen Optimierungsmodells deutlich, da in Abhängigkeit der betrachteten Eingabedaten komplett unterschiedliche Supply Chain-Strategien als optimale Lösung resultierten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass das Konzept des Postponements insbesondere unter Unsicherheiten signifikantes Potenzial zur Kosteneinsparung bietet. In einer weiteren Analyse zum Einfluss der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers führten Postponement-Strategien zwar einerseits zu leichten Gewinneinbußen, andererseits konnte jedoch das Supply Chain-Risiko signifikant gesenkt werden, sodass robustere Lösungen identifiziert wurden.

Schließlich wurden in Kapitel 7 die Marktsimulation und die stochastische Optimierung zu einem ganzheitlichen Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie integriert. Dazu wurde zunächst eine Schnittstelle zur sequentiellen Planung geschaffen. Diese verbindet die Simulations- und Optimierungskomponenten, sodass automatisiert für

ein Produktportfolio die Marktdurchdringung und anschließend eine optimale Supply Chain-Strategie identifiziert werden kann. Weiterhin wurde eine Rückkopplung zwischen Optimierungs- und Simulationskomponente in Form einer Metaheuristik (d.h. Reduced Variable Neighborhood Search) konzipiert. Diese dient als Steuermechanismus der Marktsimulation und Optimierung und ermöglicht somit die mit einer Änderung am Produktportfolio verbundene Marktdynamik zu berücksichtigen.

Im Anschluss wurde das entwickelte Instrumentarium anhand von zwei Fallstudien evaluiert, um die domänenübergreifende Anwendbarkeit zu demonstrieren. In Abhängigkeit der betrachteten Fallstudien und unter Berücksichtigung von Konzepten des Postponements sowie der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers konnte die Vorteilhaftigkeit der integrierten Planung gezeigt werden.

8.2 Kritische Würdigung und Ableitung des zukünftigen Forschungsbedarfs

In dieser Arbeit wurden Forschungsbeiträge bei der Planung eines Produktportfolios in Form der Entwicklung einer domänenunabhängigen Marktsimulation (1), bei der Planung einer Supply Chain-Strategie in Form der Entwicklung eines stochastischen Optimierungsmodells und Adaption geeigneter Lösungsverfahren (2) sowie bei der integrierten Planung in Form der Entwicklung eines Instrumentariums zur Entscheidungsunterstützung (3) realisiert. Darüber hinaus erfolgt in diesem Abschnitt ein Ausblick über zukünftigen Forschungsbedarf. Im Folgenden wird zunächst ein gemeinsamer Forschungsbedarf für die drei entwickelten Methodiken abgeleitet. Anschließend erfolgt anhand der einzelnen Forschungsziele die kritische Würdigung der Ergebnisse dieser Arbeit.

Die Funktionsweise der drei entwickelten Methodiken wurde in Sensitivitätsanalysen unter Verwendung von Fallstudien demonstriert, wodurch der theoretische Mehrwert der jeweiligen Methodik deutlich wurde. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Methodiken einen wichtigen Beitrag zu besseren Entscheidungsfindung liefern.

Darüber hinaus sollten im nächsten Schritt die entwickelten Methodiken auf Probleminstanzen der Praxis angewandt werden. Dazu ist zunächst das Zusammentragen bzw. Beschaffen von realen Daten für die Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie aus der Praxis erforderlich. Aufgrund der Vielfältigkeit der zu beschaffenden Daten ist dabei ein hoher Aufwand zu erwarten.

Weiterhin ist es möglich, dass sich durch das Betrachten von Probleminstanzen der Praxis neue Anforderungen ergeben. Diese müssen dann in die entwickelten Methodiken integriert werden. Da diese generisch gehalten und für eine domänenunabhängige Anwendbarkeit konzipiert worden sind, ist die Grundlage geschaffen worden, derartige Erweiterungen möglichst einfach umzusetzen.

Entwicklung einer domänenunabhängigen Marktsimulation für die Produktportfolioplanung

Für die Produktportfolioplanung wurde in Kapitel 5 eine Marktsimulation zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung von innovativen Produkten entwickelt. Die entwickelten Modellelemente sowie das Verhalten der Simulation wurden dabei verschiedenen Techniken der Verifizierung und Validierung unterzogen. So wurden in Anlehnung an Sargent (2013) beispielsweise die Modellstruktur und das -verhalten durch Experten innerhalb des Forschungsprojektes Smart EM auf Plausibilität überprüft (engl. face validity), das Verhalten der Simulation und die Ergebnisse unter extremen Parameterwerten getestet (engl. extrem condition test), Auswirkungen von Parameteränderungen in Sensitivitätsanalysen untersucht (engl. parameter variability-sensitivity analysis) und die Korrektheit des entwickelten Quellcodes überprüft (engl. structured walkthrough).

Darüber hinaus sollten in Zukunft noch ein Vergleich mit bestehenden Marktsimulationen durchgeführt (engl. comparison to other models) und die prognostizierten Ergebnisse mit der Entwicklung der Realität verglichen werden (engl. predictive validation). Ein Vergleich mit bestehenden Marktsimulationen erfordert dabei zunächst eine identische Datengrundlage. Da sich auch die jeweiligen Simulationsmodelle in den berücksichtigten Problemaspekten unterscheiden, müsste in einer solchen Datengrundlage auch über die betrachteten Problemaspekte entschieden werden.

Ein Vergleich der Modellergebnisse mit der Realität könnte im Rahmen der Betrachtung einer Problemistanz aus der Praxis erfolgen. In diesem Kontext könnte auch ein Vergleich der Methodik mit anderen (qualitativen) Prognoseverfahren oder Expertenschätzungen durchgeführt werden.

Entwicklung eines Optimierungsmodells und Adaption geeigneter Lösungsverfahren zur Identifizierung von Supply Chain-Strategien

Kapitel 6 präsentiert ein stochastisches Optimierungsmodell, welches zur Entscheidungsunterstützung für die Identifizierung von Supply Chain-Strategien unter Unsicherheiten eingesetzt werden kann. Das entwickelte Modell erweitert die Literatur durch die Berücksichtigung verschiedener Formen von Postponement und der Integration von Modellkomponenten zur Abbildung der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers. Die für die Entscheidungsfindung relevanten Aspekte werden dabei in dieser Arbeit berücksichtigt.

Darüber hinaus kann es für die Evaluation in der Praxis notwendig sein, zusätzliche Modellelemente, wie nichtlineare Kostenstrukturen, Abschreibungen oder alternative Transporttechnologien, zu betrachten. Forschungsbedarf besteht dabei sowohl bei der Integration in das entwickelte Modell als auch bei der Analyse der Auswirkungen auf die Lösungszeit.

Weiterhin wurden im entwickelten zweistufigen stochastischen Optimierungsmodell die Entscheidungsvariablen in diejenigen Variablen, die vor und diejenigen Variablen, die nach Realisieren der Unsicherheiten getroffen werden müssen, unterteilt. Dadurch lassen sich Entscheidungen des Verschiebens von Produktions- und Logistikaktivitäten modellieren, sodass verschiedene Formen von Postponement-Strategien im Modell miteinander verglichen werden können.

In der Realität steigen Nachfrageunsicherheiten im Planungszeitverlauf in vielen Domänen an. Im entwickelten Modelltyp wird davon abstrahiert, was potenziell zu einem Überschätzen der Nachfrageunsicherheiten führt. Einen Lösungsansatz stellen mehrstufige stochastische Optimierungsmodelle dar (Birge und Louveaux, 2011, S. 149 ff.). Dadurch kann der Problemaspekt steigender Unsicherheiten realitätsnäher modelliert werden. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch die Problemkomplexität, da die Anzahl der notwendigen Entscheidungsvariablen zunimmt. Dieses lässt einen deutlichen Anstieg der Lösungszeiten erwarten, sodass ein Forschungspotenzial bei der Entwicklung adäquater Lösungsverfahren resultiert.

Kopplung der Simulations- und Optimierungskomponenten zu einem Instrumentarium zur integrierten Planung

In Kapitel 7 wurde ein Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung für die integrierte Planung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie präsentiert. Die Metaheuristik Reduced Variable Neighborhood Search wurde als Steuerungsmechanismus ausgewählt, um auf Basis der Ergebnisse der Optimierung das Produktportfolio zu modifizieren. Zur Bewertung einer Lösung muss dabei sowohl die Marktsimulation ausgeführt als auch eine Lösung für das stochastische Optimierungsmodell identifiziert werden. Dieses führte in den Analysen zu langen Lösungszeiten (d.h. 12 Stunden), was trotz der strategischen Planungsebene als verbesserungswürdig einzuschätzen ist.

Einen Lösungsansatz könnte die Verwendung einer Approximation der Bewertung von Nachbarschaftslösungen darstellen. Ein solches Vorgehen wird beispielsweise im Kontext von laufzeitintensiven Simulationen eingesetzt und bietet auch im Bereich kombinatorischer Optimierungsprobleme ein Potenzial zur Laufzeitreduzierung (Jin, 2011). Im vorliegenden Fall ist die Anwendung besonders bei der laufzeitintensiven stochastischen Optimierung zu prüfen. So könnte beispielsweise das Verfahren der Sample Average Approximation zur Lösung des Problems Verwendung finden. Mit zunehmenden Grad an Approximation sinkt jedoch die Lösungsqualität, da in der nachfolgenden Iteration Entscheidungen auf einer approximativen Lösung getroffen werden (Jin, 2011). Forschungsbedarf besteht daher in der Analyse des Einflusses einer approximativen Bewertung einer Nachbarschaftslösung und einer möglichen Kombination von approximativen und exakten Lösungsverfahren über die Iterationen der Metaheuristik hinweg.

Weiterhin wurden in dieser Arbeit im Rahmen der integrierten Planung Entscheidungen über das grundsätzliche Anbieten von Produktvarianten im Produktportfolio für den gesamten Planungszeitraum getroffen. So wurden diese Entscheidungen als binäre Variablen modelliert, sodass die generierte Lösung widerspiegelt, ob eine Produktvariante im Produktportfolio angeboten wird. In der Realität überlappen sich mehrere Produktlebenszyklen (bspw. zwei Generationen einer Produktvariante) über gewisse Zeiträume. Dadurch resultiert ein zusätzlicher Freiheitsgrad, welcher die Entscheidungen über das Anbieten von Produktvarianten im zeitlichen Verlauf beinhaltet.

Um diesen Sachverhalt im Instrumentarium betrachten zu können, müsste insbesondere die Metaheuristik bezüglich der Nachbarschaftsoperatoren angepasst werden. Da mit dem zeitlichen Aspekt eine zusätzliche Dimension bei den Entscheidungsvariablen hinzukommt, ist mit einem deutlichen Komplexitätsanstieg zu rechnen. Darüber hinaus müssten auch die Kostenstrukturen im stochastischen Optimierungsmodell angepasst werden, da beispielsweise Entscheidungen über Produktionsaktivitäten nun auch in Abhängigkeit des Planungszeitraums zu treffen wären, d.h. je nachdem ab wann die Produktionsaktivität benötigt wird.

Literaturverzeichnis

- [Aghezzaf 2005] AGHEZZAF, E.: Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. In: *Journal of the Operational Research Society* 56 (2005), Nr. 4, S. 453–462
- [Al-Alawi und Bradley 2013] AL-ALAWI, B. M. ; BRADLEY, T. H.: Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling studies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (2013), S. 190–203
- [Alderson 1950] ALDERSON, W.: Marketing efficiency and the principle of postponement. In: *Cost and Profit Outlook* 3 (1950)
- [Allahverdi et al. 2008] ALLAHVERDI, A. ; NG, C. ; CHENG, T. ; KOVALYOV, M. Y.: A survey of scheduling problems with setup times or costs. In: *European Journal of Operational Research* 187 (2008), Nr. 3, S. 985–1032
- [Alonso-Ayuso et al. 2003] ALONSO-AYUSO, A. ; ESCUDERO, L. ; GARÍN, A. ; ORTUÑO, M. ; PÉREZ, G.: An approach for strategic supply chain planning under uncertainty based on stochastic 0-1 programming. In: *Journal of Global Optimization* 26 (2003), Nr. 1, S. 97–124
- [Alvarez und Barney 2007] ALVAREZ, S. A. ; BARNEY, J. B.: Discovery and creation: Alternative theories of entrepreneurial action. In: *Strategic Entrepreneurship Journal* 1 (2007), Nr. 1-2, S. 11–26
- [Anand und Girotra 2007] ANAND, K. S. ; GIROTRA, K.: The strategic perils of delayed differentiation. In: *Management Science* 53 (2007), Nr. 5, S. 697–712
- [Anderson und Joglekar 2005] ANDERSON, E. G. ; JOGLEKAR, N. R.: A hierarchical product development planning framework. In: *Production and Operations Management* 14 (2005), Nr. 3, S. 344–361
- [Appelqvist und Gubi 2005] APPELQVIST, P. ; GUBI, E.: Postponed variety creation: Case study in consumer electronics retail. In: *International Journal of Retail & Distribution Management* 33 (2005), Nr. 10, S. 734–748

- [Azaron et al. 2008] AZARON, A. ; BROWN, K. ; TARIM, S. ; MODARRES, M.: A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. In: *International Journal of Production Economics* 116 (2008), Nr. 1, S. 129–138
- [Backhaus et al. 2010] BACKHAUS, K. ; BECKER, J. ; BEVERUNGEN, D. ; FROHS, M. ; KNACKSTEDT, R. ; MÜLLER, O. ; STEINER, M. ; WEDDELING, M.: *Vermarktung hybrider Leistungsbündel: Das ServPay-Konzept*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Backhaus et al. 2016] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; PLINKE, W. ; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 14. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2016
- [Bass 1969] BASS, F. M.: A new product growth for model consumer durables. In: *Management Science* 15 (1969), Nr. 5, S. 215–227
- [Baum und Delfmann 2010] BAUM, H. ; DELFMANN, W.: *Strategische Handlungsoptionen der deutschen Automobilindustrie in der Wirtschaftskrise: Sachverständigen-Expertise für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie*. Kölner Wiss.-Verlag, 2010. – ISBN 9783937404837
- [Becker et al. 2009] BECKER, J. ; BEVERUNGEN, D. ; KNACKSTEDT, R. ; MÜLLER, O.: Model-based decision support for the customer-specific configuration of value bundles. In: *Enterprise Modelling and Information Systems Architectures* 4 (2009), Nr. 1, S. 26–38
- [Benders 1962] BENDERS, J. F.: Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. In: *Numerische Mathematik* 4 (1962), Nr. 1, S. 238–252
- [Bidhandi und Yusuff 2011] BIDHANDI, H. M. ; YUSUFF, M. R.: Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach. In: *Applied Mathematical Modelling* 35 (2011), Nr. 6, S. 2618–2630
- [Bihlmaier et al. 2009] BIHLMAIER, R. ; KOBERSTEIN, A. ; OBST, R.: Modeling and optimizing of strategic and tactical production planning in the automotive industry under uncertainty. In: *OR Spectrum* 31 (2009), Nr. 2, S. 311–336
- [Birge und Louveaux 2011] BIRGE, J. R. ; LOUVEAUX, F.: *Introduction to stochastic programming*. 2. Aufl. Springer Science & Business Media, 2011
- [Bonabeau 2002] BONABEAU, E.: Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (2002), Nr. 3, S. 7280–7287

- [Boone et al. 2007] BOONE, C. A. ; CRAIGHEAD, C. W. ; HANNA, J. B.: Postponement: An evolving supply chain concept. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 37 (2007), Nr. 8, S. 594–611
- [Brandenburg et al. 2014] BRANDENBURG, M. ; GOVINDAN, K. ; SARKIS, J. ; SEURING, S.: Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. In: *European Journal of Operational Research* 233 (2014), Nr. 2, S. 299–312
- [Brandtner 2012] BRANDTNER, M.: *Moderne Methoden der Risiko- und Präferenzmessung: Konzeption, entscheidungstheoretische Implikationen und finanzwirtschaftliche Anwendungen*. Gabler Verlag, 2012 (Schriften zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre)
- [Bruhn und Hadwich 2006] BRUHN, M. ; HADWICH, K.: *Produkt- und Servicemanagement: Konzepte, Methoden, Prozesse*. Vahlen, 2006 (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [Buchholz 2012] BUCHHOLZ, M.: *Theorie der Variantenvielfalt: Ein produktions- und absatzwirtschaftliches Erklärungsmodell*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2012
- [Bucklin 1965] BUCKLIN, L. P.: Postponement, speculation and the structure of distribution channels. In: *Journal of Marketing Research* 2 (1965), Nr. 1, S. 26–31
- [Cao et al. 2012] CAO, Y. ; LUO, X. G. ; KWONG, C. K. ; TANG, J. F. ; ZHOU, W.: Joint optimization of product family design and supplier selection under multinomial logit consumer choice rule. In: *Concurrent Engineering* 20 (2012), Nr. 4, S. 335–347
- [Carneiro et al. 2010] CARNEIRO, M. C. ; RIBAS, G. P. ; HAMACHER, S.: Risk management in the oil supply chain: A CVaR approach. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research* 49 (2010), Nr. 7, S. 3286–3294
- [Chaudhry und Hodge 2012] CHAUDHRY, H. ; HODGE, G.: Postponement and supply chain structure: Cases from the textile and apparel industry. In: *Journal of Fashion Marketing and Management* 16 (2012), Nr. 1, S. 1361–2026
- [Cheng et al. 2010] CHENG, T. ; LI, J. ; WAN, C. L. J. ; WANG, S. ; HILLIER, F. S. (Hrsg.): *Postponement strategies in supply chain management*. New York : Springer-Verlag, 2010
- [Choi et al. 2013] CHOI, J. Y. ; SHIN, J. ; LEE, J.: Strategic demand forecasts for the tablet PC market using the Bayesian mixed logit model and market share

- simulations. In: *Behaviour & Information Technology* 32 (2013), Nr. 11, S. 1177–1190
- [Choi et al. 2012] CHOI, K. ; NARASIMHAN, R. ; KIM, S. W.: Postponement strategy for international transfer of products in a global supply chain: A system dynamics examination. In: *Journal of Operations Management* 30 (2012), Nr. 3, S. 167–179
- [Cholette 2009] CHOLETTE, S.: Mitigating demand uncertainty across a winery's sales channels through postponement. In: *International Journal of Production Research* 47 (2009), Nr. 13, S. 3587–3609
- [Christopher 2005] CHRISTOPHER, M.: *Logistics and supply chain management: Creating value-adding networks*. FT Prentice Hall, 2005 (Financial Times Series)
- [Christopher 2000] CHRISTOPHER, M.: The agile supply chain: Competing in volatile markets. In: *Industrial Marketing Management* 29 (2000), Nr. 1, S. 37–44
- [Christopher und Ryals 1999] CHRISTOPHER, M. ; RYALS, L.: Supply chain strategy: Its impact on shareholder value. In: *The International Journal of Logistics Management* 10 (1999), Nr. 1, S. 1–10
- [Chung et al. 2015] CHUNG, D. ; ELQGVIST, E. ; SANTHANAGOPALAN, S.: Automotive lithium-ion battery (LIB) supply chain and U.S. competitiveness considerations / Clean Energy Manufacturing Analysis Center. 2015. – Forschungsbericht
- [Chvátal 1983] CHVÁTAL, V.: *Linear Programming*. W. H. Freeman, 1983 (Series of books in the mathematical sciences)
- [Cohen und Huchzermeier 1999] COHEN, M. ; HUCHZERMEIER, A.: Global supply chain management: A survey of research and applications. In: TAYUR, S. (Hrsg.) ; GANESHAN, R. (Hrsg.) ; MAGAZINE, M. (Hrsg.): *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer Academic Publishers, 1999, S. 669–702
- [Cordón et al. 2013] CORDÓN, C. ; HALD, K. ; SEIFERT, R.: *Strategic Supply Chain Management*. Taylor & Francis, 2013
- [Dangelmaier 2009] DANGELMAIER, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen? (2009)
- [Dantzig und Wolfe 1960] DANTZIG, G. B. ; WOLFE, P.: Decomposition principle for linear programs. In: *Operations Research* 8 (1960), Nr. 1, S. 101–111
- [Dantzig 1955] DANTZIG, G. B.: Linear programming under uncertainty. In: *Management Science* 1 (1955), Nr. 3 ,4, S. 197–206

- [Dapiran 1992] DAPIRAN, P.: Benetton - Global logistics in action. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 22 (1992), Nr. 6, S. 7–11
- [Deng et al. 2014] DENG, S. ; AYDIN, R. ; KWONG, C. ; HUANG, Y.: Integrated product line design and supplier selection: A multi-objective optimization paradigm. In: *Computers & Industrial Engineering* 70 (2014), S. 150–158
- [Diez 2015] DIEZ, W.: *Automobil-Marketing: Erfolgreiche Strategien, praxisorientierte Konzepte, effektive Instrumente*. Vahlen, 2015
- [DVZ 2011] DVZ: Ansatzpunkte zur Erhöhung der Flexibilität von Supply Chains im Jahr 2011. In: *Deutsche Verkehrs Zeitung* (2011), Juni
- [El-Sayed et al. 2010] EL-SAYED, M. ; AFIA, N. ; EL-KHARBOTLY, a.: A stochastic model for forward&“reverse logistics network design under risk. 58 (2010), Nr. 3, S. 423–431
- [ElMaraghy und Mahmoudi 2009] ELMARAGHY, H. A. ; MAHMOUDI, N.: Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22 (2009), Nr. 6, S. 483–493
- [ElMaraghy et al. 2013] ELMARAGHY, H. A. ; SCHUH, G. ; ELMARAGHY, W. ; PILLER, F. ; SCHÖNSLEBEN, P. ; TSENG, M. ; BERNARD, A.: Product variety management. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2013), Nr. 2, S. 629–652
- [Ernst und Kamrad 2000] ERNST, R. ; KAMRAD, B.: Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement. In: *European Journal of Operational Research* 124 (2000), Nr. 3, S. 495–510
- [Fábián 2008] FÁBIÁN, C. I.: Handling CVaR objectives and constraints in two-stage stochastic models. In: *European Journal of Operational Research* 191 (2008), Nr. 3, S. 888–911
- [Farahani et al. 2014] FARAHANI, R. Z. ; REZAPOUR, S. ; DREZNER, T. ; FALLAH, S.: Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. In: *Omega* 45 (2014), S. 92–118
- [Feitzinger und Lee 1997] FEITZINGER, E. ; LEE, H. L.: Mass customization at Hewlett-Packard: The power of postponement. In: *Harvard business review* 75 (1997), Nr. 1, S. 116–120

- [Ferreira et al. 2015] FERREIRA, K. A. ; TOMAS, R. N. ; ALCÂNTARA, R. L. C.: A theoretical framework for postponement concept in a supply chain. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 18 (2015), Nr. 1, S. 46–61
- [Fisher 1997] FISHER, M. L.: What is the right supply chain for your product. In: *Harvard Business Review* 75 (1997), Nr. 2, S. 105–116
- [Fixson 2005] FIXSON, S. K.: Product architecture assessment: a tool to link product, process, and supply chain design decisions. In: *Journal of Operations Management* 23 (2005), Nr. 3-4, S. 345–369
- [Follmer et al. 2010] FOLLMER, R. ; GRUSCHWITZ, D. ; JESSKE, B. ; QUANDT, S. ; LENZ, B. ; NOBIS, C. ; KÖHLER, K. ; MEHLIN, M.: *Mobilität in Deutschland - Ergebnisbericht*. Technischer Bericht. infas - Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e.V, 2010
- [Fourt und Woodlock 1969] FOURT, L. ; WOODLOCK, J.: Early prediction of market success for new grocery products. In: *Journal of Marketing* 25 (1969), Nr. 2, S. 31–38
- [Freter 2008] FRETER, H.: *Markt- und Kundensegmentierung: kundenorientierte Markterfassung und -bearbeitung*. Kohlhammer, 2008 (Kohlhammer-Edition Marketing)
- [Fujita et al. 2013] FUJITA, K. ; AMAYA, H. ; AKAI, R.: Mathematical model for simultaneous design of module commonalization and supply chain configuration toward global product family. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 24 (2013), Nr. 5, S. 991–1004
- [Garg und Tang 1997] GARG, A. ; TANG, C. S.: On postponement strategies for product families with multiple points of differentiation. In: *IIE Transactions* 29 (1997), Nr. 8, S. 641–650
- [Gausmann 2008] GAUSMANN, O.: *Kundenindividuelle Wertschöpfungsnetze: Gestaltungsempfehlungen unter Berücksichtigung einer auftragsorientierten Produktindividualisierung*. Gabler Verlag, 2008 (Gabler Edition Wissenschaft)
- [Gebreslassie et al. 2012] GEBRESLASSIE, B. ; YAO, Y. ; YOU, F.: Design under uncertainty of hydrocarbon biorefinery supply chains: Multiobjective stochastic programming models, decomposition algorithm, and a comparison between CVaR and downside risk. In: *AIChE Journal* 58 (2012), Nr. 7, S. 2155–2179

- [Geoffrion und Graves 1974] GEOFFRION, A. ; GRAVES, G.: Multicommodity distribution system design by Benders Decomposition. In: *Management Science* 20 (1974), Nr. 5, S. 822–844
- [Georgiadis et al. 2011] GEORGIADIS, M. C. ; TSIAKIS, P. ; LONGINIDIS, P. ; SOFIOGLOU, M. K.: Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. In: *Omega* 39 (2011), Nr. 3, S. 254–272
- [Gnann et al. 2015] GNANN, T. ; PLÖTZ, P. ; KÜHN, A. ; WIETSCHER, M.: Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data - German market and policy options. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77 (2015), S. 95–112
- [Godet und Roubelat 1996] GODET, M. ; ROUBELAT, F.: Creating the future: The use and misuse of scenarios. In: *Long Range Planning* 29 (1996), Nr. 2, S. 164–171
- [Goh et al. 2007] GOH, M. ; LIM, J. Y. ; MENG, F.: A stochastic model for risk management in global supply chain networks. In: *European Journal of Operational Research* 182 (2007), Nr. 1, S. 164–173
- [Graman 2010] GRAMAN, G. A.: A partial-postponement decision cost model. In: *European Journal of Operational Research* 201 (2010), Nr. 1, S. 34–44
- [Graves et al. 1998] GRAVES, S. C. ; KLETTER, D. B. ; HETZEL, W. B. ; GRAVES, S. C.: A dynamic model for requirements planning with application to supply chain optimization. In: *Operations Research* 46 (1998), Nr. 3, S. 35–49
- [Guericke et al. 2012] GUERICKE, S. ; KOBERSTEIN, A. ; SCHWARTZ, F. ; VOSS, S.: A stochastic model for the implementation of postponement strategies in global distribution networks. In: *Decision Support Systems* 53 (2012), Nr. 2, S. 294–305
- [Guillén et al. 2005] GUILLÉN, G. ; MELE, F. D. ; BAGAJEWICZ, M. J. ; ESPUÑA, A. ; PUIGJANER, L.: Multiobjective supply chain design under uncertainty. In: *Chemical Engineering Science* 60 (2005), Nr. 6, S. 1535–1553
- [Gupta und Maranas 2003] GUPTA, A. ; MARANAS, C. D.: Managing demand uncertainty in supply chain planning. In: *Computers & Chemical Engineering* 27 (2003), Nr. 8-9, S. 1219–1227
- [Handfield et al. 2013] HANDFIELD, R. ; STRAUBE, F. ; PFOHL, H.-C. ; WIELAND, A.: *Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management: Vorteile im Wettbewerb durch Beherrschung von Komplexität*. DVV Media Group GmbH, 2013 (BVL-Studien)

- [Hansen und Mladenović 2001] HANSEN, P. ; MLADENović, N.: Variable neighborhood search: Principles and applications. In: *European Journal of Operational Research* 130 (2001), Nr. 3, S. 449–467
- [Hansen et al. 2010] HANSEN, P. ; MLADENović, N. ; BRIMBERG, J. ; PÉREZ, J. A. M.: Handbook of Metaheuristics. In: GENDREAU, M. (Hrsg.) ; POTVIN, J.-Y. (Hrsg.): *Variable Neighborhood Search*. Springer, 2010 (International Series in Operations Research & Management Science), S. 61–86
- [Harrison 2001] HARRISON, T. P.: Global supply chain design. In: *Information Systems Frontiers* 3 (2001), Nr. 4, S. 413–416
- [Huang und Goetschalckx 2014] HUANG, E. ; GOETSCHALCKX, M.: Strategic robust supply chain design based on the Pareto-optimal tradeoff between efficiency and risk. In: *European Journal of Operational Research* 237 (2014), Nr. 2, S. 508–518
- [Huang et al. 2007] HUANG, G. Q. ; ZHANG, X. Y. ; LO, V. H. Y.: Integrated configuration of platform products and supply chains for mass customization: A game-theoretic approach. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 54 (2007), Nr. 1, S. 156–171
- [Huang et al. 2005] HUANG, G. Q. ; ZHANG, X. ; LIANG, L.: Towards integrated optimal configuration of platform products, manufacturing processes, and supply chains. In: *Journal of Operations Management* 23 (2005), Nr. 3-4, S. 267–290
- [IBM CPLEX 2016] IBM CPLEX: *CPLEX Optimizer - High-performance mathematical programming solver for linear programming, mixed integer programming, and quadratic programming*. 2016. – URL <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>. Zugriffsdatum: 2016-07-24
- [ISO 9000 2005] ISO 9000: *Quality management systems - Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2005); Trilingual version EN ISO 9000:2005*. Dezember 2005
- [Jaworski und Kohli 1993] JAWORSKI, B. J. ; KOHLI, A. K.: Market orientation: Antecedents and consequences. In: *Journal of Marketing* 57 (1993), Nr. 3, S. 53–70
- [Jiao et al. 2007] JIAO, J. ; SIMPSON, T. W. ; SIDDIQUE, Z.: Product family design and platform-based product development: A state-of-the-art review. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 18 (2007), Nr. 1, S. 5–29

- [Jiao und Zhang 2005] JIAO, J. ; ZHANG, Y.: Product portfolio planning with customer-engineering interaction. In: *IIE Transactions* 37 (2005), S. 801–814
- [Jin 2011] JIN, Y.: Surrogate-assisted evolutionary computation: Recent advances and future challenges. In: *Swarm and Evolutionary Computation* 1 (2011), Nr. 2, S. 61–70
- [Kall und Wallace 1994] KALL, P. ; WALLACE, S.: *Stochastic programming*. Wiley, 1994
- [Kasperk und Drauz 2013] KASPERK, G. ; DRAUZ, R.: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette. In: KAMPKER, A. (Hrsg.) ; VALLÉE, D. (Hrsg.) ; SCHNETTLER, A. (Hrsg.): *Elektromobilität*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 103–148
- [Kawlath 1969] KAWLATH, A.: *Theoretische Grundlagen der Qualitätspolitik*. Wiesbaden : Gabler, 1969
- [Khakdaman et al. 2015] KHAKDAMAN, M. ; WONG, K. Y. ; ZOHOORI, B. ; TIWARI, M. K. ; MERKERT, R.: Tactical production planning in a hybrid Make-to-Stock-Make-to-Order environment under supply, process and demand uncertainties: A robust optimisation model. In: *International Journal of Production Research* 53 (2015), Nr. 5, S. 1358–1386
- [Kieckhäfer 2013] KIECKHÄFER, K. ; FLEISCHMANN, B. (Hrsg.) ; GRUNOW, M. (Hrsg.) ; HELBER, S. (Hrsg.) ; INDERFURTH, K. (Hrsg.) ; KOPFER, H. (Hrsg.) ; MEYR, H. (Hrsg.) ; STADTLER, H. (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, H. (Hrsg.) ; SPENGLER, T. S. (Hrsg.) ; WÄSCHER, G. (Hrsg.): *Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios - Dargestellt am Beispiel innovativer Antriebe in der Automobilindustrie*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2013
- [Kieckhäfer et al. 2014] KIECKHÄFER, K. ; VOLLING, T. ; SPENGLER, T. S.: A hybrid simulation approach for estimating the market share evolution of electric vehicles. In: *Transportation Science* 48 (2014), Nr. 4, S. 651–670
- [Kiesling et al. 2012] KIESLING, E. ; GÜNTHER, M. ; STUMMER, C. ; WAKOLBINGER, L. M.: Agent-based simulation of innovation diffusion: A review. In: *Central European Journal of Operations Research* 20 (2012), Nr. 2, S. 183–230
- [Kim 2014] KIM, S.-h.: Postponement for designing mass-customized supply chains: Categorization and framework for strategic decision making. In: *International Journal of Supply Chain Management* 3 (2014), Nr. 1, S. 1–11

- [Klein und Scholl 2011] KLEIN, R. ; SCHOLL, A.: *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. 2. Aufl. München : Vahlen, 2011 (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [Klepper 1996] KLEPPER, S.: Entry, exit, growth, and innovation over the product life cycle. In: *The American Economic Review* 86 (1996), Nr. 3, S. 562–583
- [Klug 2010] KLUG, F.: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (VDI-Buch)
- [Knight 1921] KNIGHT, F. H.: *Risk, Uncertainty, and Profit*. New York : Houghton Mifflin, 1921
- [Kotler et al. 2007] KOTLER, P. ; KELLER, K. ; BLIEMEL, F.: *Marketing-Management: Strategien für wertschaffendes Handeln*. Pearson Deutschland, 2007 (Pearson Studium - Economic BWL)
- [Koufteros et al. 2005] KOUFTEROS, X. ; VONDEREMBSE, M. ; JAYARAM, J.: Internal and external integration for product development: The contingency effects of uncertainty, equivocality, and platform strategy. 36 (2005), Nr. 1, S. 97–133
- [Krishnan und Ulrich 2001] KRISHNAN, V. ; ULRICH, K. T.: Product development decisions: A Review of the literature. In: *Management Science* 47 (2001), Nr. 1, S. 1–21
- [Kumar und Chatterjee 2013] KUMAR, S. ; CHATTERJEE, A. K.: A heuristic-based approach to integrate the product line selection decision to the supply chain configuration. In: *International Journal of Production Research* 51 (2013), Nr. 8, S. 2399–2413
- [Lampel und Mintzberg 1996] LAMPEL, J. ; MINTZBERG, H.: Customizing customization. In: *Sloan Management Review* 38 (1996), Nr. 1, S. 21–30
- [Law 2014] LAW, A.: *Simulation Modeling and Analysis*. 5. Aufl. McGraw-Hill Education, 2014
- [Lee 2002] LEE, H. L.: Aligning supply chain strategies with product uncertainties. In: *California Management Review* 44 (2002), Nr. 3, S. 105–119
- [Lee und Billington 1994] LEE, H. L. ; BILLINGTON, C.: Designing products and processes for postponement. In: *Management of Design*. Springer Netherlands, 1994, S. 105–122

- [Lee et al. 1993] LEE, H. L. ; BILLINGTON, C. ; CARTER, B.: Hewlett-Packard gains control of inventory and service through design for localization. In: *Interfaces* 23 (1993), Nr. 4, S. 1–11
- [Lee und Tang 1997] LEE, H. L. ; TANG, C. S.: Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation. In: *Management Science* 43 (1997), Nr. 1, S. 40–53
- [Leung und Ng 2007a] LEUNG, S. C. H. ; NG, W.-l.: A stochastic programming model for production planning of perishable products with postponement. In: *Production Planning & Control* 18 (2007), Nr. 3, S. 190–202
- [Leung und Ng 2007b] LEUNG, S. C. ; NG, W.-l.: A goal programming model for production planning of perishable products with postponement. In: *Computers & Industrial Engineering* 53 (2007), Nr. 3, S. 531–541
- [Li et al. 2008] LI, J. ; WANG, S. ; CHENG, T. E.: Analysis of postponement strategy by EPQ-based models with planned backorders. In: *Omega* 36 (2008), Nr. 5, S. 777–788
- [Linderoth et al. 2006] LINDEROTH, J. ; SHAPIRO, A. ; WRIGHT, S.: The empirical behavior of sampling methods for stochastic programming. In: *Annals of Operations Research* 142 (2006), Nr. 1, S. 215–241
- [Longinidis und Georgiadis 2014] LONGINIDIS, P. ; GEORGIADIS, M. C.: Integration of sale and leaseback in the optimal design of supply chain networks. In: *Omega* 47 (2014), S. 73–89
- [Lu und Jing 2013] LU, Y. ; JING, P.: The combination of postponement operations in a supply chain network with multi-level product differentiations. In: *Journal of Networks* 8 (2013), Nr. 12, S. 2900–2907
- [Luo et al. 2011] LUO, X. ; KWONG, C. ; TANG, J. ; DENG, S. ; GONG, J.: Integrating supplier selection in optimal product family design. In: *International Journal of Production Research* 49 (2011), Nr. 14, S. 4195–4222
- [Ma et al. 2002] MA, S. ; WANG, W. ; LIU, L.: Commonality and postponement in multistage assembly systems. In: *European Journal of Operational Research* 142 (2002), Nr. 3, S. 523–538
- [Mag 1981] MAG, W.: Risiko und Ungewissheit. In: *Handwörterbuch der Wirtschaftswissenschaft (HdWW)* Bd. 6. Stuttgart, New York : Gustav Fischer, 1981, S. 478–495

- [Malik et al. 2011] MALIK, Y. ; NIEMEYER, A. ; BRIAN, R.: Building the supply chain of the future. In: *McKinsey Quarterly* (2011)
- [Mansoornejad et al. 2010] MANSOORNEJAD, B. ; CHAMBOST, V. ; STUART, P.: Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. In: *Computers and Chemical Engineering* 34 (2010), Nr. 9, S. 1497–1506
- [Martin 1999] MARTIN, R. K.: *Large scale linear and integer optimization: A unified approach*. Springer Science & Business Media, 1999
- [Massiani 2015] MASSIANI, J.: Cost-benefit analysis of policies for the development of electric vehicles in germany: Methods and results. In: *Transport Policy* 38 (2015), S. 19–26
- [McFadden 1974] MCFADDEN, D.: Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In: *Frontiers in econometrics*. New York : Academic Press, 1974, S. 105–142
- [Meade und Islam 2006] MEADE, N. ; ISLAM, T.: Modelling and forecasting the diffusion of innovation - A 25-year review. In: *International Journal of Forecasting* 22 (2006), Nr. 3, S. 519–545
- [Meffert et al. 2015] MEFFERT, H. ; BURMANN, C. ; KIRCHGEORG, M.: *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung; Konzepte - Instrumente - Praxisbeispiele*. Gabler, 2015 (Meffert Marketing Edition)
- [Meixell und Gargeya 2005] MEIXELL, M. J. ; GARGEYA, V. B.: Global supply chain design: A literature review and critique. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 41 (2005), Nr. 6, S. 531–550
- [Melo et al. 2009] MELO, M. ; NICKEL, S. ; GAMA, F. Saldanha-da: Facility location and supply chain management - A review. In: *European Journal of Operational Research* 196 (2009), Nr. 2, S. 401–412
- [Meyr und Stadler 2015] MEYR, H. ; STADTLER, H.: Types of supply chains. In: STADTLER, H. (Hrsg.) ; KILGER, C. (Hrsg.) ; MEYR, H. (Hrsg.): *Supply chain management and advanced planning*. Springer, 2015, S. 55–69
- [Minner und Kiesmüller 2012] MINNER, S. ; KIESMÜLLER, G. P.: Dynamic product acquisition in closed loop supply chains. In: *International Journal of Production Research* 50 (2012), Nr. 11, S. 2836–2851

- [Mueller und de Haan 2009] MUELLER, M. ; HAAN, P. de: How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars: Part I Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation. In: *Energy Policy* 37 (2009), Nr. 2, S. 1072–1082
- [Nickel et al. 2012] NICKEL, S. ; GAMA, F. Saldanha-da ; ZIEGLER, H.-P.: A multi-stage stochastic supply network design problem with financial decisions and risk management. In: *Omega* 40 (2012), Nr. 5, S. 511–524
- [Nikolaev und Jacobson 2010] NIKOLAEV, A. G. ; JACOBSON, S. H.: Handbook of Metaheuristics. In: GENDREAU, M. (Hrsg.) ; POTVIN, J.-Y. (Hrsg.): *Simulated Annealing*. Springer, 2010 (International Series in Operations Research & Management Science), S. 1–39
- [North und De Vos 2002] NORTH, E. ; DE VOS, R.: The use of conjoint analysis to determine consumer buying preferences: A literature review. In: *Journal of Family Ecology and Consumer Sciences/Tydskrif vir Gesinsekologie en Verbruikerswetenskap* 30 (2002), Nr. 1
- [Pagh und Cooper 1998] PAGH, J. D. ; COOPER, M. C.: Supply chain postponement and speculation strategies : How to choose the right strategy. In: *Journal of Business Logistics* 19 (1998), Nr. 2, S. 13–33
- [Pan und Nagi 2010] PAN, F. ; NAGI, R.: Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. In: *Computers & Operations Research* 37 (2010), Nr. 4, S. 668–683
- [Piller 1998] PILLER, F.: *Kundenindividuelle Massenproduktion: Die Wettbewerbssstrategie der Zukunft*. Hanser, 1998
- [Plötz et al. 2014] PLÖTZ, P. ; GNANN, T. ; KÜHN, A. ; WIETSCHER, M.: *Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge Langfassung*. 2014
- [PRTM 2010] PRTM: Supply Chains - Treiber der Komplexität. In: *Log.Kompass* (2010), Nr. 9
- [Qi et al. 2011] QI, Y. ; ZHAO, X. ; SHEU, C.: The impact of competitive strategy and supply chain strategy on business performance: The role of environmental uncertainty. In: *Decision Sciences* 42 (2011), Nr. 2, S. 371–389
- [Qrunfleh und Tarafdar 2013] QRUNFLEH, S. ; TARAFDAR, M.: Lean and agile supply chain strategies and supply chain responsiveness: The role of strategic supplier partnership and postponement. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 18 (2013), Nr. 6, S. 571–582

- [Raffel 2005] RAFFEL, W.-U.: *Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten-Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels Fahrerloser Transportsysteme*, Freie Universität Berlin, Dissertation, 2005
- [Rahmandad und Sterman 2008] RAHMANDAD, H. ; STERMAN, J.: Heterogeneity and network structure in the dynamics of diffusion: Comparing agent-based and differential equation models. In: *Management Science* 54 (2008), Nr. 5, S. 998–1014
- [Ramdas 2003] RAMDAS, K.: Managing product variety: An integrative review and research directions. In: *Production and Operations Management* 12 (2003), Nr. 1, S. 79–101
- [Randall und Ulrich 2001] RANDALL, T. ; ULRICH, K.: Product variety, supply chain structure, and firm performance: Analysis of the U.S. bicycle industry. In: *Management Science* 47 (2001), Nr. 12, S. 1588–1604
- [Rau und Liu 2006] RAU, H. ; LIU, C.-K.: The optimal combination of postpone-ment operations in a supply chain. In: *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers* 23 (2006), Nr. 3, S. 253–261
- [von Reibnitz 1992] REIBNITZ, U. von: *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*. 2. Gabler Verlag, 1992
- [Rizk et al. 2008] RIZK, N. ; MARTEL, a. ; D’AMOURS, S.: Synchronized production-distribution planning in a single-plant multi-destination network. In: *Journal of the Operational Research Society* 59 (2008), Nr. 1, S. 90–104
- [Rockafellar und Uryasev 2000] ROCKAFELLAR, R. T. ; URYASEV, S.: Optimization of conditional value-at-risk. In: *Journal of Risk* 2 (2000), S. 21–41
- [Rogers 2003] ROGERS, E. M.: *Diffusion of innovations*. 5. New York : Free Press, 2003
- [Roland Berger 2012] ROLAND BERGER ; ROLAND BERGER STRATEGY CONSULTANTS (Hrsg.): *Mastering product complexity*. 2012
- [Roland Berger 2016] ROLAND BERGER ; ROLAND BERGER STRATEGY CONSULTANTS (Hrsg.): *Trend Compendium 2030 - Trend 5: Dynamic technology & innovation*. 2016
- [Ruszczyński und Shapiro 2003] RUSZCZYŃSKI, A. ; SHAPIRO, A.: Stochastic programming models. In: *Handbooks in operations research and management science* 10 (2003), S. 1–64

- [Sahling und Kayser 2016] SAHLING, F. ; KAYSER, A.: Strategic supply network planning with vendor selection under consideration of risk and demand uncertainty. In: *Omega* 59 (2016), S. 201–214
- [Salvador et al. 2004] SALVADOR, F. ; RUNGTUSANATHAM, M. ; FORZA, C.: Supply-chain configurations for mass customization. In: *Production Planning and Control* 15 (2004), Nr. 4, S. 381–397
- [Santoso et al. 2005] SANTOSO, T. ; AHMED, S. ; GOETSCHALCKX, M. ; SHAPIRO, A.: A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. In: *European Journal of Operational Research* 167 (2005), Nr. 1, S. 96–115
- [Sargent 2013] SARGENT, G. R.: Verification and validation of simulation models. In: *Journal of Simulation* 7 (2013), Nr. 1, S. 12–24
- [Scholl 2001] SCHOLL, A.: *Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen - Konzepte und Methoden - experimentelle Untersuchungen*. Physica-Verlag, 2001
- [Schöning 2016] SCHÖNING, S. ; SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): *Umsatzrentabilität*. 2016 (Gabler Wirtschaftslexikon). – URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/14777/umsatzrentabilitaet-v10.html>. Zugriffsdatum: 2016-08-06
- [Schönsleben 2011] SCHÖNSLEBEN, P.: *Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*. Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [Schuh 2005] SCHUH, G.: *Produktkomplexität managen*. 2. Aufl. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2005
- [Schütz et al. 2009] SCHÜTZ, P. ; TOMASGARD, A. ; AHMED, S.: Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. In: *European Journal of Operational Research* 199 (2009), Nr. 2, S. 409–419
- [Schwartz und Voß 2007] SCHWARTZ, F. ; VOSS, S.: Distribution network design with postponement. In: OBERWEIS, A. (Hrsg.) ; WEINHARDT, C. (Hrsg.) ; GIMPEL, H. (Hrsg.) ; KOSCHMIDER, A. (Hrsg.) ; PANKRATIUS, V. (Hrsg.) ; SCHNIZLER, B. (Hrsg.): *eOrganisation: Service-, Prozess-, Market-Engineering*. Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2007, S. 373–390
- [Scrosati und Garche 2010] SCROSATI, B. ; GARCHE, J.: Lithium batteries: Status, prospects and future. In: *Journal of Power Sources* 195 (2010), Nr. 9, S. 2419–2430

- [Shafiei et al. 2013] SHAFIEI, E. ; STEFANSSON, H. ; ASGEIRSSON, E. I. ; DAVIDSDOTTIR, B. ; RABERTO, M.: Integrated agent-based and system dynamics modelling for simulation of sustainable mobility. In: *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal* 33 (2013), Nr. 1, S. 44–70
- [Shao und Ji 2008] SHAO, X.-F. ; JI, J.-H.: Evaluation of postponement strategies in mass customization with service guarantees. In: *International Journal of Production Research* 46 (2008), Nr. 1, S. 153–171
- [Silver und Minner 2005] SILVER, E. A. ; MINNER, S.: A replenishment decision involving partial postponement. In: *OR Spectrum* 27 (2005), Nr. 1, S. 1–19
- [Simatupang und Sridharan 2002] SIMATUPANG, T. M. ; SRIDHARAN, R.: The collaborative supply chain. In: *The International Journal of Logistics Management* 13 (2002), Nr. 1, S. 15–30
- [Simpson 2004] SIMPSON, T. W.: Product platform design and customization: Status and promise. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 18 (2004), Nr. 1, S. 3–20
- [Soosay et al. 2008] SOOSAY, C. a. ; HYLAND, P. W. ; FERRER, M.: Supply chain collaboration: Capabilities for continuous innovation. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 13 (2008), Nr. 2, S. 160–169
- [von Stackelberg 1952] STACKELBERG, H. von: *The Theory of the Market Economy*. Oxford University Press, 1952
- [Stadtler und Kilger 2008] STADTLER, H. ; KILGER, C.: *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*. Springer, 2008
- [Stadtler 2005] STADTLER, H.: Supply chain management and advanced planning-basics, overview and challenges. In: *European Journal of Operational Research* 163 (2005), Nr. 3, S. 575–588
- [Stark 2011] STARK, J.: *Product Lifecycle Management: 21st Century Paradigm for Product Realisation*. 2. Aufl. Springer, 2011
- [Stummer et al. 2015] STUMMER, C. ; KIESLING, E. ; GÜNTHER, M. ; VETSCHERA, R.: Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach. In: *European Journal of Operational Research* 245 (2015), Nr. 1, S. 157–167

- [Su et al. 2005] SU, J. C. ; CHANG, Y.-L. ; FERGUSON, M.: Evaluation of postponement structures to accommodate mass customization. In: *Journal of Operations Management* 23 (2005), Nr. 3-4, S. 305–318
- [Subulan et al. 2015] SUBULAN, K. ; BAYKASOĞLU, A. ; ÖZSOYDAN, F. B. ; TAŞAN, A. S. ; SELIM, H.: A case-oriented approach to a lead/acid battery closed-loop supply chain network design under risk and uncertainty. In: *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015), Nr. 1, S. 340–361
- [Suhl und Mellouli 2013] SUHL, L. ; MELLOULI, T.: *Optimierungssysteme - Modelle, Verfahren, Software und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg : Springer Gabler, 2013
- [Swaminathan und Tayur 1998] SWAMINATHAN, J. M. ; TAYUR, S. R.: Managing broader product lines through delayed differentiation using vanilla boxes. In: *Management Science* 44 (1998), Nr. 12, S. 161–172
- [Tang 2006] TANG, C. S.: Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. In: *International Journal of Logistics: Research and Applications* 9 (2006), Nr. 1, S. 33–45
- [Tang 2011] TANG, D.: Managing finished-goods inventory under capacitated delayed differentiation. In: *Omega* 39 (2011), Nr. 5, S. 481–492
- [Thonemann und Brandeau 2000] THONEMANN, U. W. ; BRANDEAU, M. L.: Optimal commonality in component design. In: *Operations Research* 48 (2000), Nr. 1, S. 1–19
- [Tomczak et al. 2014] TOMCZAK, T. ; KUSS, A. ; REINECKE, S.: *Marketingplanung: Einführung in die marktorientierte Unternehmens- und Geschäftsfeldplanung*. 7., überarb. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [Tompkins und Harmelink 2004] TOMPKINS, J. ; HARMELINK, D.: *The Supply Chain Handbook*. Tompkins Press, 2004
- [Train 2009] TRAIN, K.: *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2. Aufl. Cambridge University Press, 2009
- [Treacy und Wiersema 1997] TREACY, M. ; WIERSEMA, F.: *The discipline of market leaders: Choose your customers, narrow your focus, dominate your market*. Addison-Wesley Publishing Company, 1997
- [Ulrich 1995] ULRICH, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: *Research Policy* 24 (1995), Nr. 3, S. 419–440

- [van Hoek 1997] VAN HOEK, R. I.: Postponed manufacturing: A case study in the food supply chain. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 2 (1997), Nr. 2, S. 63–75
- [van Hoek 2001] VAN HOEK, R. I.: The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. In: *Journal of Operations Management* 19 (2001), Februar, Nr. 2, S. 161–184
- [Väyrynen und Salminen 2012] VÄYRYNEN, A. ; SALMINEN, J.: Lithium ion battery production. In: *The Journal of Chemical Thermodynamics* 46 (2012), S. 80–85
- [VDI 3633 2013] VDI-RICHTLINIE: VDI 3633 BLATT 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. 2013
- [Venkatesh und Swaminathan 2004] VENKATESH, S. ; SWAMINATHAN, J. M.: Managing Product Variety Through Postponement: Concept and Applications. In: *The Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge* Bd. 62. Springer US, 2004, S. 139–155
- [Vonderembse et al. 2006] VONDEREMBSE, M. a. ; UPPAL, M. ; HUANG, S. H. ; DISMUKES, J. P.: Designing supply chains: Towards theory development. In: *International Journal of Production Economics* 100 (2006), Nr. 2, S. 223–238
- [Wallace und Ziemba 2005] WALLACE, S. W. ; ZIEMBA, W. T.: *Application of stochastic programming*. MPS-SIAM Series on Optimization. SIAM, 2005 (MPS-SIAM Series on Optimization)
- [Weber 2016] WEBER, J. ; SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): *Gemeinkosten*. 2016 (Gabler Wirtschaftslexikon). – URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1504/gemeinkosten-v5.html>. Zugriffsdatum: 2016-08-06
- [Weckbach 2011] WECKBACH, L.: *Entwicklung und Analyse programmorientierter Materialabrufkonzepte in der Automobilindustrie*. Eichstätt-Ingolstadt: Cuvillier, 2011
- [Weskamp et al. 2014] WESKAMP, C. ; JOHN, T. ; SUHL, L. ; KUNDISCH, D. ; TEETZ, A. ; ROSE, M.: Towards a simulation-based approach for evaluating business models for the electric vehicle market. In: *European Electric Vehicle Congress* (2014)

- [Weskamp et al. 2016] WESKAMP, C. ; KOBERSTEIN, A. ; SCHWARTZ, F. ; SUHL, L. ; VOSS, S.: A stochastic programming approach for identifying optimal postponement strategies in supply chains with uncertain demand. In: *DS&OR Working Paper* (2016), Nr. WP1601
- [Wolf und Koberstein 2013] WOLF, C. ; KOBERSTEIN, A.: Dynamic sequencing and cut consolidation for the parallel hybrid-cut nested L-shaped method. In: *European Journal of Operational Research* 230 (2013), Nr. 1, S. 143–156
- [Wolf et al. 2011] WOLF, C. ; KOBERSTEIN, A. ; T., H.: Stochastic extensions to FlopC++. In: HU, B. (Hrsg.) ; MORASCH, K. (Hrsg.) ; PICKL, S. (Hrsg.) ; SIEGLE, M. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 333–338
- [Wong et al. 2011] WONG, H. ; POTTER, A. ; NAIM, M.: Evaluation of postponement in the soluble coffee supply chain: A case study. In: *International Journal of Production Economics* 131 (2011), Nr. 1, S. 355–364
- [Wong et al. 2009] WONG, H. ; WIKNER, J. ; NAIM, M.: Analysis of form postponement based on optimal positioning of the differentiation point and stocking decisions. In: *International Journal of Production Research* 47 (2009), Nr. 5, S. 1201–1224
- [WTO 2016] WTO ; WORLD TRADE ORGANIZATION (Hrsg.): *World trade statistical review 2016*. 2016
- [Yang und Burns 2003] YANG, B. ; BURNS, N.: Implications of postponement for the supply chain. In: *International Journal of Production Research* 41 (2003), Januar, Nr. 9, S. 2075–2090
- [Yang et al. 2004] YANG, B. ; BURNS, N. D. ; BACKHOUSE, C. J.: Management of uncertainty through postponement. In: *International Journal of Production Research* 42 (2004), Nr. 6, S. 1049–1064
- [Yang und Yang 2010] YANG, B. ; YANG, Y.: Postponement in supply chain risk management: A complexity perspective. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010), Nr. 7, S. 1901–1912
- [Yang et al. 2015] YANG, D. ; JIAO, J. R. ; JI, Y. ; DU, G. ; HELO, P. ; VALENTE, A.: Joint optimization for coordinated configuration of product families and supply chains by a leader-follower Stackelberg game. In: *European Journal of Operational Research* (2015), S. 1–18

- [Yang und Jiao 2014] YANG, D. ; JIAO, R. J.: Simultaneous configuration of product families and supply chains for mass customization using leader-follower game theory. In: *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (2014), S. 707–711
- [Yu und Huang 2010] YU, Y. ; HUANG, G. Q.: Nash game model for optimizing market strategies, configuration of platform products in a Vendor Managed Inventory (VMI) supply chain for a product family. In: *European Journal of Operational Research* 206 (2010), Nr. 2, S. 361–373
- [Zhang et al. 2008] ZHANG, X. ; HUANG, G. Q. ; RUNGTUSANATHAM, M. J.: Simultaneous configuration of platform products and manufacturing supply chains. In: *International Journal of Production Research* 46 (2008), Nr. 21, S. 6137–6162
- [Zimmermann 1996] ZIMMERMANN, G.: Faktorkombinationen. In: KERN, W. (Hrsg.) ; SCHRÖDER, H. (Hrsg.) ; WEBER, J. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2. Auflage. Schäffer-Poeschel, 1996, S. 444–451
- [Zinn und Bowersox 1988] ZINN, W. ; BOWERSOX, D. J.: Planning physical distribution with the principle of postponement. In: *Journal of Business Logistics* 9 (1988), Nr. 2, S. 117–136

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht eines beispielhaften Wertschöpfungsnetzes	9
2.2	Übersicht der betrachteten Planungsebenen	10
2.3	Schematische Darstellung zur Gestaltung eines Produktportfolios . .	13
2.4	Schematische Darstellung zur Konfiguration einer Supply Chain-Strategie in Abhängigkeit eines Produktportfolios	15
2.5	Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen der Gestal- tung eines Produktportfolios und einer Supply Chain-Strategie	16
2.6	Darstellung eines Variantenbaums	18
2.7	Schematische Darstellung eines Marktumfelds	19
2.8	Beispielhafte Darstellung verschiedener Fertigstellungsgraden von Pro- duktvarianten	26
2.9	Arten von Postponement-Strategien	33
4.1	Kapitelstruktur der weiteren Arbeit in Anlehnung an das zu entwi- ckelnde Instrumentarium	71
5.1	Metamodell der Marktsimulation	75
5.2	Schematische Darstellung der Simulationszeit	77
5.3	Schematische Darstellung von Szenarien	78
5.4	Beispielhafte Modellierung von Restriktionen und Zielfunktionen . . .	84
5.5	Überblick über den Ablauf der Marktsimulation	87
5.6	Ablauf der Auswertung von Restriktionen und Präferenzen von Kun- densegmenten	88
5.7	Übersicht der betrachteten Marktteilnehmer innerhalb der Fallstudie	93
5.8	Annahmen bezüglich der prognostizierten Entwicklung der unsicheren Parameter im Rahmen der Fallstudie	95
5.9	Entwicklung der Bestandskunden je Marktmodell im Planungszeitver- lauf für das potenziell neutrale EM-Szenario	98
5.10	Einfluss von Unsicherheiten auf die Marktdurchdringung von Antriebs- formen	99
5.11	Einfluss von Unsicherheiten auf die Anzahl an Bestandskunden für verschiedene Batteriesysteme	100
5.12	Einfluss von kritischen Einflussfaktoren auf das Risiko ein Marktpo- tential nicht zu erreichen	101

5.13	Änderung der Marktdurchdringung durch die Berücksichtigung zusätzlicher Dienstleistungen und Erlösmodelle im neutralen Szenario .	102
5.14	Einfluss von zusätzlichen Dienstleistungen und Erlösmodellen auf das Chance/Risiko-Verhältnis	104
5.15	Auswirkungen einer Variation der Batteriekapazität auf den Anteil der Kundenentscheidungen je Fahrzeugtyp	106
5.16	Auswirkungen einer Erweiterung eines Produktportfolios auf den Anteil der Kundenentscheidungen je Antriebstyp am Beispiel der Batteriekapazität	107
6.1	Entscheidungsebenen der Freiheitsgrade bei der Planung einer Supply Chain-Strategie	112
6.2	Lösungszeitvergleich in Abhängigkeit einer steigenden Anzahl an Szenarien	126
6.3	Lösungszeitvergleich bei steigender Problemkomplexität	126
6.4	Qualitäts- und Lösungszeitvergleich für SAA	128
6.5	Zulässige Produktionsaktivitäten und betrachtete Supply Chain der Fallstudie	129
6.6	Annahmen der Kostenstruktur für die Fallstudie	130
6.7	Schematische Übersicht zur Generierung von Nachfrageszenarien . . .	133
6.8	Entwicklung der Kennzahl des EBIT für optimale Strategien in Abhängigkeit der Nachfrageunsicherheit und Nachfragekorrelation	136
6.9	Kostenvergleich zwischen Full Speculation- und Full Postponement-Strategien	137
6.10	Einfluss der Risikobereitschaft eines Entscheidungsträgers auf die Kennzahl des EBIT in Abhängigkeit zur angewendeten Strategie	140
6.11	Paretofront am Beispiel der Instanz mit mittlerer Nachfrageunsicherheit und einer positiven Nachfragekorrelation (Postponement erlaubt)	142
6.12	Vergleich der Paretofronten für Full Speculation- und Full Postponement-Strategien	143
7.1	Architektur des Instrumentariums	147
7.2	Übersicht zum Ablauf des Datenaustausches zwischen Marktsimulation und Optimierung	150
7.3	Ablauf zum Hinzufügen von unähnlichen Produktvarianten	159
7.4	Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Elektromobilität) im Fall eines risikoneutralen Entscheidungsträgers und der potenziellen Anwendbarkeit von Postponement-Strategien	167

7.5	Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Elektromobilität) im Fall eines risikoaversen Entscheidungsträgers und der potenziellen Anwendbarkeit von Postponement-Strategien	169
7.6	Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Textilindustrie) im Fall eines risikoneutralen Entscheidungsträgers und der potenziellen Anwendbarkeit von Postponement-Strategien	171
7.7	Ergebnisse des integrierten Planungsverfahrens (Fallstudie Textilindustrie) im Fall eines risikoneutralen Entscheidungsträgers und fixierter Full Speculation-Strategie	172

Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der Publikationen zur mathematischen Optimierung im Bereich Postponement	56
4.2	Übersicht der Publikationen zum SCND ohne Risikobetrachtung . . .	61
4.3	Übersicht der Publikationen zum SCND mit Risikobetrachtung	64
5.1	Übersicht der betrachteten Marktmodelle im Rahmen der Fallstudie .	94
5.2	Anteil der Kundensegmente mit Restriktionen	96
5.3	Übersicht der Forschungsfragen zur Analyse der Marktsimulation . .	97
5.4	Grad der Prognoseunsicherheit (in Standardabweichung des Anteils der Kaufentscheidungen) für Elektro- und Hybridfahrzeuge mit und ohne Dienstleistungen und Erlösmodelle	103
6.1	Mengen des Optimierungsmodells	115
6.2	Entscheidungsvariablen des Optimierungsmodells	117
6.3	Parameter des Optimierungsmodells	119
6.4	Übersicht über die Größe der Problem instanzen	125
6.5	Lösungszeit- und Qualitätsvergleich für die Lösungsverfahren	127
6.6	Übersicht der Forschungsfragen zur Analyse des Optimierungsmodells	131
6.7	Ergebnisse bezüglich einer optimalen Supply Chain-Strategie unter Variation des Grads der Nachfrageunsicherheit und der Nachfragekorrelation	134
6.8	Optimale Strategie bei variierender Nachfrageunsicherheit, Nachfragekorrelation und unterschiedlicher Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers	139
7.1	Unterschiede der Fallstudien	164
7.2	Übersicht der Forschungsfragen zur Analyse des Instrumentariums zur integrierten Planung	165

Liste der Algorithmen

- 1 Pseudocode des Sample-Average-Approximation-Algorithmus in Anlehnung an Linderoth et al. (2006) 124
- 2 Pseudocode der Reduced Variable Neighborhood Search zur Identifizierung eines effizienten Produktportfolios sowie einer Supply Chain-Strategie (Grundmethodik in Anlehnung an (Hansen et al., 2010)) . . . 154

