

Masterarbeit

**Untersuchung der Eignung der Simulationstechnik für Probleme
des Supply Chain Managements**

Kevin Ehrmann
Matrikelnummer 192265
Master Logistik

Ausgegeben am: 08.06.2018

Eingereicht am: 23.11.2018

Betreuer:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe
M.Sc. Astrid Klüter

Technische Universität Dortmund
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet IT in Produktion und Logistik
www.itpl.mb.tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen des Supply Chain Managements.....	4
	2.1 Definition	4
	2.2 Ziele und Aufgaben.....	8
3	Methoden zur Analyse von Fragestellungen im Supply Chain Management.....	12
	3.1 Tabellenkalkulationsprogramme.....	12
	3.2 Mathematische Optimierungsverfahren unter Anwendung von Tabellekalkulationsprogrammen	14
	3.3 Simulation.....	17
4	Entscheidungskriterien für den Einsatz der ereignisdiskreten Simulation	25
	4.1 Allgemeingültige Entscheidungskriterien	25
	4.2 Entscheidungskriterien für den Einsatz im Supply Chain Management	28
5	Konzept zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit von Problemstellungen des Supply Chain Managements	32
	5.1 Kriterienkatalog.....	32
	5.2 Vorgehensweise und Methodik	38
	5.3 Konzept zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit	44

6 Erprobung des Konzepts zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit	55
6.1 Konzeptmodell.....	55
6.2 Modellierung unter Verwendung einer Tabellenkalkulation	60
6.3 Grenzen der Tabellenkalkulation und Vorteile der Simulation	70
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	79
Literaturverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
Eidesstattliche Versicherung.....	XIII

1 Einleitung

Mit der zunehmenden Komplexität logistischer Systeme und der fortschreitenden Digitalisierung hat sich der Einsatz der Simulationstechnik in der Logistik vollumfänglich etabliert (Gutenschwager et al. 2017, S. 1). Die Simulation stellt einen intuitiven Ansatz dar, reale Systeme zu abstrahieren und die wesentlichen Aspekte in einem Modell abzubilden, um ein Verständnis über die Funktionsweise sowie die Zusammenhänge der Systeme zu erhalten. Anschließend kann das Modell über Stellgrößen verändert werden, um die Dynamik des Systems zu untersuchen ohne in das Realsystem einzugreifen. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ist es möglich, Rückschlüsse auf das Realsystem zu ziehen und dieses zu verbessern (Eley 2012, vii).

Im Supply Chain Management (SCM) werden durch Simulationsstudien globale Lieferketten von den Lieferanten bis zu den Endkunden analysiert, mit dem Ziel der Erreichung eines definierten Servicelevels unter möglichst geringen Gesamtkosten (Eley 2012, S. 5–6). Die Simulationstechnik kann sowohl bei der Planung als auch während des Betriebs von Supply Chains (SC) eingesetzt werden, wobei die Mehrheit der Simulationsstudien in die Planungsphase fällt (Gutenschwager et al. 2017, S. 45). Während der Planungsphase von SCs wird die optimale Netzwerkstruktur sowie die optimale Allokation der Standorte, aufgrund einer hohen Anzahl an Einflussfaktoren, häufig mit Hilfe von Simulationsstudien ermittelt (Eley 2012, S. 6). In der Betriebsphase dient die Simulation dazu, verschiedene Lösungsmöglichkeiten am vorhandenen Modell zu testen, sollten sich die vorhandenen Rahmenbedingungen ändern oder unerwartete Zwischenfälle die Abläufe stören (Banks et al. 2002; Arndt 2008, S. 200).

Die Vorteile der Simulationstechnik sind vielfältig. Es ist möglich, Systeme zu untersuchen, die in der Realität noch nicht existieren. Ein Simulationsmodell erlaubt es zudem, existierende Systeme ohne Eingriff in den laufenden Betrieb zu analysieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Verhalten komplexer Systeme durch Zeitraffung über einen langen Zeitraum betrachtet werden kann (VDI 2014, S. 5–6). Des Weiteren kann das Simulationsmodell mit geringem Aufwand auf sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst werden (Liebl 1995).

Die Simulationstechnik hat jedoch den signifikanten Nachteil, dass die Implementierung und Anwendung mit großem Aufwand verbunden sind und ein hohes Maß an Know-how sowie Erfahrung benötigen. Daraus resultieren hohe Kosten für die Durchführung einer Simulationsstudie. Zu Beginn eines Planungs- bzw. Optimierungsprojekts ist daher stets zu prüfen, ob die Simulationstechnik das geeignete Werkzeug ist, um die vorliegende Fragestellung zu analysieren (VDI 2014, S. 19).

Tabellenkalkulationsprogramme bieten eine kostengünstige Alternative, Fragestellungen logistischer Systeme mittels Datenanalysen zu untersuchen. Neben der herkömmlichen Tabellenkalkulation besteht die Option, durch integrierbare Zusatzprogramme mathematische Optimierungen durchzuführen (Mayer et al. 2017, S. 225). In Microsoft Excel können mit Hilfe des Solvers lineare sowie nichtlineare Optimierungsmodelle aufgestellt und durch integrierte Algorithmen berechnet werden (Vonhoegen 2016, S. 815). Neben der Analyse ist es dadurch möglich, eine mathematisch fundierte Optimierung von Problemstellungen im SCM kostengünstig durchzuführen. Eine Empfehlung über die Angemessenheit des Werkzeugs der Simulation als Lösungsmethode erfolgt in weiten Teilen anhand der Vor- und Nachteile von Simulationen sowie den Nachteilen alternativer Lösungsmethoden. Außerdem werden potenzielle Gefahren aufgeführt, die aus dem Verzicht der Simulation resultieren (Gutenschwager et al. 2017, S. 38). In der Literatur existiert bisher kein konkreter Leitfaden, unter welchen Rahmenbedingungen die Simulationstechnik zum Einsatz kommen sollte und wann die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms zur Entscheidungsunterstützung effizienter ist.

Das Ziel dieser Arbeit ist, diese Forschungslücke zu schließen und ein Konzept zu entwickeln, anhand dessen die Simulationswürdigkeit von Problemstellungen des SCM geprüft werden kann. Der Erreichung des Ziels gehen zwei aufeinander aufbauende Teilziele voraus. Das erste Teilziel ist die Analyse der Fachliteratur hinsichtlich allgemeingültiger Entscheidungskriterien für den Einsatz des Werkzeugs der ereignisdiskreten Simulation. Das folgende Teilziel ist die Spezifizierung der allgemeingültigen Entscheidungskriterien hinsichtlich der Überprüfung der Simulationswürdigkeit von Problemstellungen im Anwendungsfeld des SCM. Dies bildet gleichzeitig die Basis des Konzepts zur Prüfung der Simulationswürdigkeit.

Die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit gliedert sich, nachfolgend an diese Einleitung, in mehrere Kapitel. Die Kapitel zwei, drei und vier bilden die theoretischen Grundlagen für die Erarbeitung des Konzepts der Simulationswürdigkeit von Problemstellungen im SCM. Zunächst wird eine Einführung in das Feld des SCM gegeben. Hierbei liegt der Fokus darauf, mögliche Aufgaben, die innerhalb des SCM zu lösen sind, hervorzuheben. Zusätzlich wird definiert, was der Autor unter dem Begriff des SCM versteht. Im dritten Kapitel werden Methoden vorgestellt, mit deren Hilfe die vorab beschriebenen Problemstellungen analysiert werden können. Neben der Simulation, welche die zentrale Lösungsmethodik dieser Arbeit darstellt, wird auf die Möglichkeit der Analyse mittels Tabellenkalkulationsprogrammen eingegangen. Außerdem wird die Methodik der mathematischen Optimierung innerhalb eines Tabellenkalkulationsprogramms erläutert, da diese eine weitere Alternative zur Lösung von Fragestellungen im SCM darstellt. Den Abschluss der theoretischen Grundlagen bildet das vierte Kapitel. Es wird, basierend auf aktueller

Fachliteratur, analysiert, welche Entscheidungskriterien für den Einsatz der ereignisdiskreten Simulation bestehen. Im ersten Abschnitt des Kapitels wird dies bereichsübergreifend betrachtet, bevor im zweiten Teil die Entscheidungskriterien für den Anwendungsbereich des SCM spezifiziert werden. Ziel dieses Abschnitts ist, herauszuarbeiten, welche Kriterien zur Prüfung der Simulationswürdigkeit in der Literatur diskutiert werden. Die Erkenntnisse aus den theoretischen Grundlagen bilden die Basis für die, im fünften Kapitel folgende, Ausarbeitung des Konzepts zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit im SCM. Ein Leitfaden zur Prüfung der Simulationswürdigkeit ist das Resultat dieses Kapitels. Im sechsten Kapitel wird die Tauglichkeit des erarbeiteten Konzepts anhand eines praktischen Fallbeispiels geprüft. Hierfür wird eine Problemstellung des SCM in einem Tabellenkalkulationsprogramm modelliert und durch mathematische Optimierung gelöst. Anhand des aufgestellten Modells werden anschließend die Grenzen der Tabellenkalkulation sowie mögliche Vorteile der Simulation erläutert. Das Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit wird als Leitfaden verwendet, um die Bewertung der Modellierung strukturiert durchzuführen und zusätzlich aufzuzeigen, weshalb ein Tabellenkalkulationsprogramm für die Analyse der untersuchten Fragestellung das effizienteste Werkzeug darstellt.

2 Grundlagen des Supply Chain Managements

In den letzten Jahrzehnten entwickelte sich das SCM zu einem festen Bestandteil der Organisationsstruktur von Unternehmen (Cohen und Roussel 2006, S. XIV). Grund dafür ist das steigende Bedürfnis der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Parteien einer Wertschöpfungskette, resultierend aus dem zunehmenden internationalen Wettbewerb sowie den wachsenden Kundenanforderungen (Papier und Thonemann 2008, S. 21; Schulte 2017, S. 28).

Im folgenden Kapitel werden Aufgaben aufgezeigt, die innerhalb des SCM zu lösen sind. Im ersten Abschnitt werden hierfür verschiedene Definitionen des SCM analysiert. In Abschnitt 2.2 werden zunächst die Ziele des SCM erläutert. Anschließend erfolgt die Vorstellung der Aufgaben anhand des SCM-Aufgabenmodells nach Hellingrath et al. (2008).

2.1 Definition

Der Begriff Supply Chain (SC) beschreibt einen Zusammenschluss von Unternehmen, die direkt oder indirekt an der Erfüllung eines Kundenbedarfs beteiligt sind. Hierzu zählen neben dem Produzenten und den Lieferanten auch Dienstleister, Zwischenhändler sowie der Endkunde (Chopra und Meindl 2016, S. 13). Die teilnehmenden Unternehmen stehen über den Material-, den Informations- und den Geldfluss miteinander in Beziehung (Göpfert 2004).

Die Beziehungen und Interaktionen zwischen den einzelnen Teilnehmern sind wesentliche Elemente einer Wertschöpfungskette. Zur grafischen Veranschaulichung stellt die Abbildung 1 eine beispielhafte SC nach Busch und Dangelmaier (2004, S. 5) dar. Die Quadrate im oberen Bildbereich repräsentieren die beteiligten Unternehmen, welche über die dargestellten Kanten zueinander in Beziehung stehen. Bei der Betrachtung der einzelnen Kettenglieder wird deutlich, dass obwohl die Begrifflichkeit der SC eine Kette impliziert, von einem Wertschöpfungsnetzwerk auszugehen ist (Chopra und Meindl 2016, S. 14). Die Ursache dafür sind die Vielzahl verschiedener Unternehmen je Netzwerkstufe. Im unteren Teil der Darstellung sind der Informations-, der Material- und der Geldfluss inklusive der Flussrichtung abgebildet, welche die Interaktionen zwischen den Unternehmen hervorheben. Der Informationsfluss findet in beide Richtungen statt. Dies gilt auch für den Materialfluss. Neben den produzierten Gütern, die vom Rohstoffhersteller zum Endkunden fließen, wird die Rückführung von Produkten und Teilen berücksichtigt. Die Abwicklung der Zahlungen erfolgt in Richtung der Rohstofflieferanten.

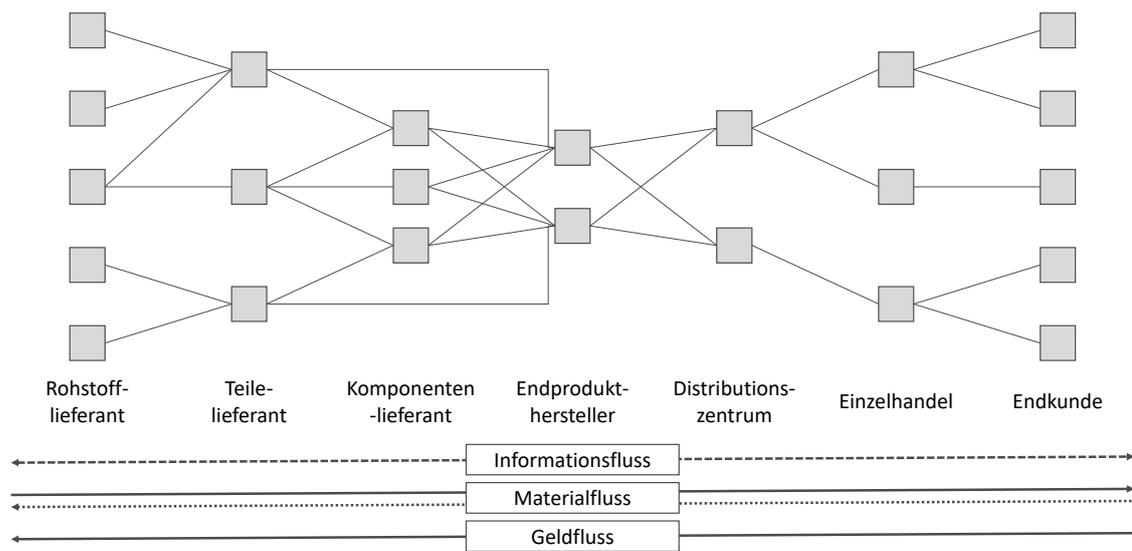


Abbildung 1: Beispielhafte Supply Chain nach Busch und Dangelmaier (2004, S. 5)

Die Abbildung einer SC verdeutlicht, dass neben den Unternehmen auch deren Interaktionen ein Bestandteil der SC sind und gesteuert werden müssen (Busch und Dangelmaier 2004, S. 5). Verantwortlich dafür ist das SCM, dessen Entwicklung im Folgenden ausführlich beschrieben wird.

Mitte der 1990er-Jahre etablierte sich das SCM sowohl in der Unternehmenspraxis als auch im wissenschaftlichen Kontext (Stewens 2005, S. 5). Bis heute existiert jedoch keine einheitliche Definition für den Begriff des SCM. Dies wird vor allem damit begründet, dass der Ursprung des SCM in der Praxis liegt und nicht in der Theorie (Schulte 2017, S. 24). Zusätzlich wird durch verschiedene Wissenschaftler eine Idealvorstellung des SCM geprägt, die nur bedingt anwendbar ist und sich dadurch vom praktischen Verständnis des SCM abhebt (Bretzke 2015, S. 67). Um die Kernelemente des SCM herauszuarbeiten, wird zunächst auf die Entwicklung von der klassischen Logistik hin zum SCM eingegangen.

Das SCM entwickelte sich, basierend auf der klassischen Logistik, über mehrere Entwicklungsstufen unter dem steten Grundsatz der „Gewährleistung der Versorgungssicherheit bzw. der Verfügbarkeit der von den Unternehmen benötigten Ressourcen“ (Weber 2012, S. 4). Weber (2012) beschreibt das SCM als vierte und vorerst letzte Stufe der Evolution der Logistik. Die dem SCM vorgelagerten Stufen sind in Abbildung 2 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

In der ersten Entwicklungsstufe wurden die bis dato eigenständigen Prozesse Transport, Umschlag und Lagerung (TUL) unter dem Begriff der Logistik zusammengefasst, um Effizienzsteigerungen zu erzielen (Weber 2012, S. 7–8). Die darauffolgende Stufe betrachtete die logistischen Schnittstellen zwischen den separaten Unternehmensbereichen näher, da das Bewusstsein dafür geschärft wurde, dass das Optimum eines einzelnen Bereichs nicht zum Optimum der gesamten

Organisation führt. Im Fokus der Betrachtung stand die flussbezogene Koordination der Warenströme zwischen verschiedenen Unternehmensbereichen (Weber 2012, S. 10). Außerdem wurden in dieser Stufe bereits Ströme von wichtigen Lieferanten und zu Kunden berücksichtigt und erste beschaffungsoptimierende Konzepte wie Just-In-Time entwickelt (Schulze 2008, S. 19).

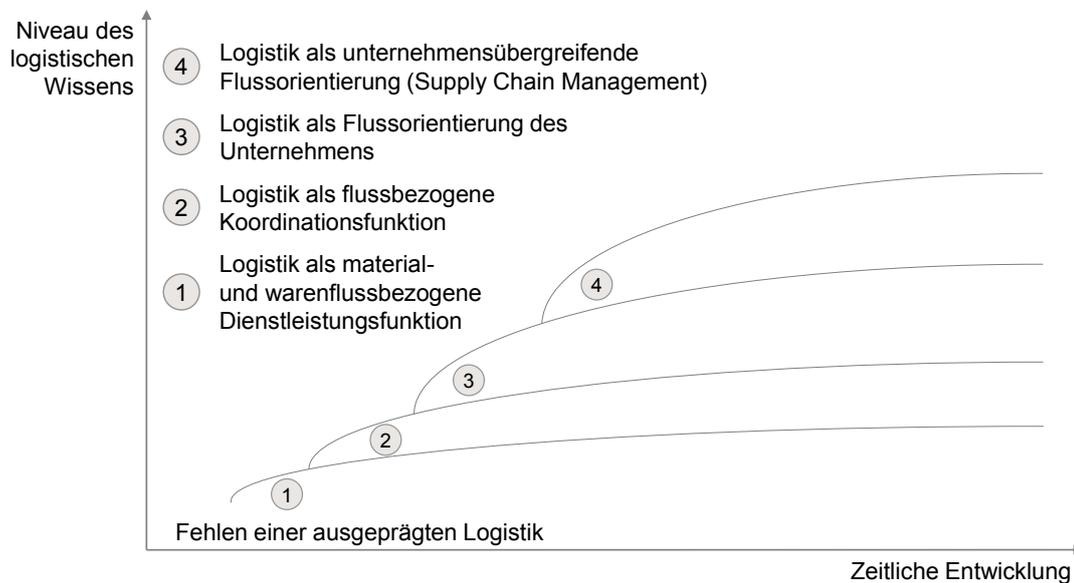


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Logistik nach Weber (2012, S. 5)

Während in den ersten beiden Entwicklungsphasen versucht wurde, Prozesskosten zu minimieren, war das Ziel der dritten Stufe die Erhöhung der qualitativen Potenziale der Wertschöpfung (Weber 2012, S. 15). Durch die Steigerung der Lieferschnelligkeit, Liefersicherheit und Lieferflexibilität konnten sich Unternehmen vom zunehmenden Wettbewerb abheben (Schulze 2008, S. 19). Dies gelang durch den Übergang der Logistik hin zu einer Führungsfunktion, die Einfluss auf bestehende Prozesse nehmen konnte, um diese gemäß dem betrieblichen Materialfluss auszugestalten (Weber 2012, S. 15). In der vierten und letzten Entwicklungsstufe der Logistik, dem SCM, richtet sich der Blick auf die materialflussorientierte Verknüpfung aller in der Wertschöpfungskette beteiligten Unternehmen, beginnend bei der Rohstoffgewinnung bis zum Konsumenten (Weber 2012, S. 19). Die Definition von Hahn (2000) kommt diesem, durch die Praxis geprägten, Verständnis des SCM sehr nahe.

„Als Supply Chain Management kann die Planung, Steuerung und Kontrolle des gesamten Material- und Dienstleistungsflusses, einschließlich die damit verbundenen Informations- und Geldflüsse, innerhalb eines Netzwerks von Unternehmen und deren Bereichen verstanden werden, die im Rahmen von aufeinanderfolgenden Stufen der Wertschöpfungskette an der Entwicklung, Erstellung und Verwertung von Sachgütern und/ oder Dienstleistungen partnerschaftlich zusammenarbeiten, um Effektivitäts- und Effizienzsteigerungen zu erreichen.“ (Hahn 2000, S. 9)

Wissenschaftler wie Cooper, Lambert und Pagh sehen im SCM einen weitaus höheren Grad der Kooperation von Geschäftsprozessen als Hahn. Neben den logistischen Prozessen sind durch das SCM auch darüberhinausgehende Geschäftsprozesse zu koordinieren (Cooper et al. 1997, S. 1). Als Beispiel dafür dient die Produktentwicklung, bei der, gesteuert durch das SCM, alle Geschäftsbereiche miteinzubeziehen sind. Zusätzlich zur Forschungs- und Entwicklungsabteilung, müssen das Marketing, die Produktion und Logistik sowie die Finanzabteilung involviert sein. Außer den innerbetrieblichen Beteiligten sind auch die Partner der SC, wie Lieferanten und Kunden, frühzeitig in den Entwicklungsprozess zu integrieren, um eine effiziente und marktorientierte Produktentwicklung zu realisieren (Cooper et al. 1997, S. 1). Die folgende Definition von Lambert (2014) spiegelt dieses wissenschaftliche Verständnis des SCM wider.

„Supply Chain Management is the management of relationships in the network of organizations, from end customers through original suppliers, using key cross-functional business processes to create value for customers and other stakeholders.“ (Lambert 2014, S. 2)

Das Resultat dieses vollumfassenden SCM ist eine unternehmensübergreifende SC ohne Schnittstellen zwischen einzelnen Unternehmen (Schulte 2017, S. 22). Die beteiligten Parteien der Wertschöpfungskette agieren folglich wie ein gemeinschaftlich organisiertes Unternehmen und ordnen die eigenen Ziele dem Gesamterfolg der SC unter (Scheer und Borowsky 1999, S. 7).

Das SCM kann, wie die vorgestellten Definitionen unterstreichen, in zwei Definitionsgruppen eingeteilt werden (Seuring und Schneidewind 2000, S. 229–230). Definitionen, die das SCM als durchgängigen Informations- und Materialfluss vom Rohstofflieferanten bis zum Endkunden, basierend auf der klassischen Logistik, beschreiben sowie Definitionen, welche das SCM als Integration sämtlicher Geschäftsprozesse entlang der gesamten SC ansehen (Schulte 2017, S. 23).

Trotz der Unterschiede haben Corsten und Gössinger (2008, S. 97) Kernelemente aus den in der Literatur vorhandenen Definitionen des SCM herausgearbeitet, welche die Grundpfeiler des SCM bilden:

- Unternehmensübergreifende Optimierung der Gesamtprozesse der Wertschöpfungskette.
- Kooperative Zusammenarbeit aller Teilnehmer der Wertschöpfungskette.
- Steuerung der SC basierend auf den Bedarfsdaten der Endkunden.
- Durchgängiger Informationsaustausch als Voraussetzung für eine informationstechnische Verknüpfung der beteiligten Parteien.

Die Definition von Hahn vertritt alle durch Corsten und Gössinger (2008) beschriebenen Grundpfeiler des SCM und repräsentiert zudem das praktische Verständnis des SCM. Da in der vorlie-

genden Arbeit ein in der Praxis anwendbares Konzept zur Prüfung der Eignung der Simulationstechnik entwickelt werden soll, wird nachfolgend das SCM als „*die Planung, Steuerung und Kontrolle des gesamten Material- und Dienstleistungsflusses, einschließlich die damit verbundenen Informations- und Geldflüsse, innerhalb eines Netzwerks von Unternehmen und deren Bereichen*“ (Hahn 2000, S. 9) angesehen.

2.2 Ziele und Aufgaben

Die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Definitionen von Hahn (2000) und Lambert (2014) enthalten zentrale Ziele des SCM. Während Hahn „Effektivitäts- und Effizienzsteigerungen“ (Hahn 2000, S. 9) bei der Herstellung von Gütern nennt, beschreibt Lambert das Ziel des SCM als Erzeugung von Mehrwert für den Endkunden sowie weitere Interessensvertreter (Lambert 2014, S. 2). Dieser Mehrwert kann durch die Realisierung dreier untergeordneter Ziele geschaffen werden: Kostenvorteile, Zeitvorteile und Qualitätsvorteile gegenüber im Wettbewerb stehenden Wertschöpfungsketten (Schulte 2017, S. 24).

Chopra und Meindl (2016, S. 15) quantifizieren den Erfolg von SCs mittels einer Formel bestehend aus der Differenz des Kundennutzens und den Kosten, die entlang der SC bei der Herstellung eines Produkts anfallen. Der Kundennutzen entspricht dem Preis, den ein Endkunde bereit ist, für ein Produkt zu bezahlen.

$$\text{Supply Chain-Überschuss} = \text{Kundennutzen} - \text{Supply Chain Kosten}$$

Die Autoren vertreten den Ansatz, dass die Maximierung dieser Gleichung das übergeordnete Ziel des SCM darstellt. Von Bedeutung ist, dass der SC-Überschuss nicht je Teilnehmer gemessen wird, sondern für die SC als Ganzes, da die Fokussierung auf ein einzelnes Unternehmen eine Reduktion des Gesamterfolgs zur Folge haben kann (Chopra und Meindl 2016, S. 16).

Durch die Umsetzung der genannten Unterziele ist es möglich, den von Chopra und Meindl beschriebenen SC-Überschuss zu steigern. Durch Kosten- und Zeitvorteile erhöht sich der Kundennutzen, da der Kunde nach der Optimierung gewillt ist, einen höheren Preis für das Endprodukt zu bezahlen. Außerdem führt die Erreichung von Kostenvorteilen zu einer Senkung der SC-Kosten. Beides hat eine Erhöhung des SC-Überschusses und somit eine Steigerung der Effektivität und Effizienz zur Folge.

Erfolgreiches SCM erfordert eine Vielzahl von Entscheidungen bezüglich des Material-, Informations- und Finanzflusses. Die zu treffenden Entscheidungen können, abhängig vom Zeithori-

zont und der Häufigkeit in der sie zu treffen sind, in drei verschiedenen Phasen kategorisiert werden (Chopra und Meindl 2016, S. 18). In der deutschsprachigen Literatur wird hierbei vom Aufgabenmodell des SCM gesprochen (Werner 2017, S. 87; Kuhn 2008, S. 220; Wannenwetsch 2005, S. 82). Abbildung 3 zeigt das Aufgabenmodell des SCM, das sich in die Phasen SC Design, SC Planning und SC Execution aufteilt. Auf der rechten Seite sind zusätzlich die einzelnen Aufgaben der Planungsphase aufgeführt, um ein besseres Verständnis über die Inhalte der einzelnen Phasen zu schaffen.

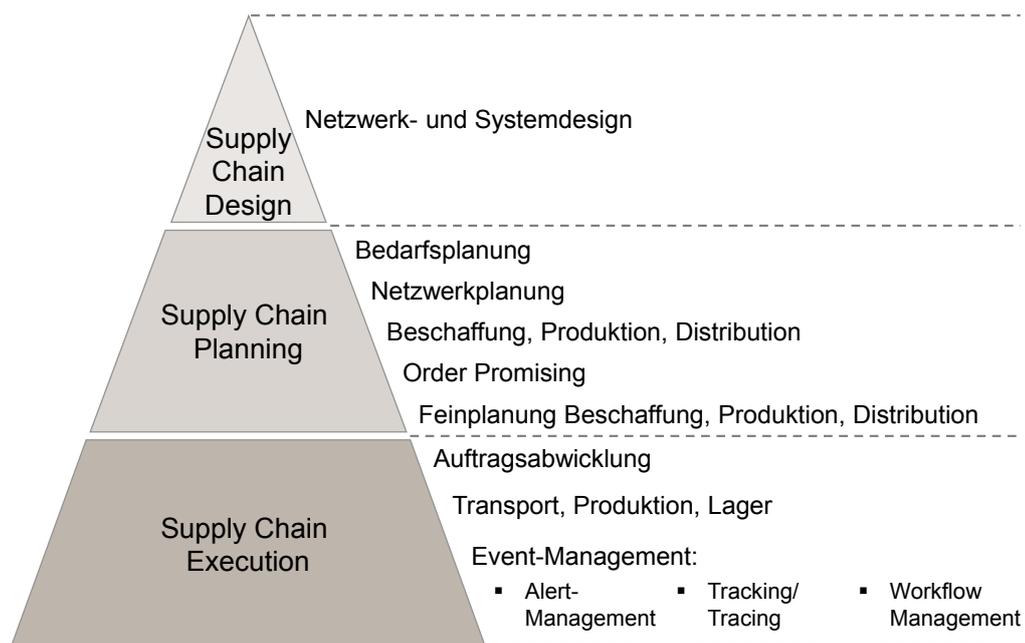


Abbildung 3: Aufgabenmodell des SCM nach Werner (2017, S. 87)

Der Zeithorizont der Planung nimmt von der Basis zur Spitze des Dreiecks zu. Während die operative Planung (SC Execution) kurzfristig und somit in kurzen zeitlichen Abständen durchzuführen ist, haben Entscheidungen in der strategischen Ebene (SC Design) eine Gültigkeit von mehreren Jahren (Chopra und Meindl 2016, S. 18). Die drei Phasen des Aufgabenmodells sowie die Kernfunktionen jeder Phase werden nachfolgend detailliert.

Supply Chain Design

In der Phase des SC Design wird auf strategischer Ebene die langfristige Ausrichtung der SC definiert. Die Hauptaufgabe ist die Gestaltung des Wertschöpfungsnetzwerks über alle SC-Partner hinweg. Zur Erfüllung dieser Aufgabe sind verschiedene Fragen zu beantworten: Welcher Prozess wird durch welchen Teilnehmer ausgeführt? Wird der Prozess extern vergeben oder intern ausgeführt? Wo sind Produktionsorte und Lagerstätten anzusiedeln? Wie werden die Produkte auf die Standorte verteilt? Welche Kapazitäten müssen Produktion und Lager haben? Wie

werden die Beschaffung und die Distribution je Stufe ausgestaltet? Welches Informationssystem wird für den durchgängigen Informationsfluss verwendet?

Die Beispiele zeigen, dass es sich hierbei um eine Aufgabe handelt, die hohe Auswirkungen auf die Struktur der SC hat. Diese Ebene des SCM-Aufgabenmodells charakterisiert, dass die Entscheidungen nur mit erheblichem finanziellen Aufwand kurzfristig korrigiert werden können. Bei der Entscheidungsfindung sind daher Unternehmensstrategie und zukünftige Marktentwicklungen miteinzubeziehen. Die Resultate des SC Design bilden den Entscheidungsrahmen, in dem sich das SC Planning bei der weiteren Planung bewegt (Chopra und Meindl 2016, S. 18–19; Werner 2017, S. 87–88).

Supply Chain Planning

Das SC Planning ist die taktische Entscheidungsebene des SCM-Aufgabenmodells. Während im SC Design Entscheidungen mit einer Beständigkeit von mehreren Jahren getroffen werden, liegt der Planungshorizont im SC Planning bei drei bis zwölf Monaten. Der Ausgangspunkt des SC Planning sind die jährlichen Absatzprognosen der Endkunden (Chopra und Meindl 2016, S. 19).

Die Planungsinhalte dieser Phase können, wie in Abbildung 3 dargestellt, in Bedarfsplanung, Netzwerkplanung, Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsplanung, Order Promising sowie Feinplanung von Beschaffung, Produktion und Distribution unterteilt werden (Kuhn 2008, S. 220).

Die Aufgabe der Bedarfsplanung ist die Prognose lang-, mittel- und kurzfristiger Bedarfe für jeden Teilnehmer der SC. Die Herausforderung ist die unmittelbare Weitergabe von Bedarfsänderungen entlang der SC, um ein Aufschaukeln der Bedarfsschwankungen entgegengesetzt der Fließrichtung zu verhindern (Werner 2017, S. 89).

Die Netzwerkplanung umfasst die Koordination der einzelnen Teilnehmer einer SC, mit dem Ziel, die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsplanung des Wertschöpfungsnetzwerks kollaborativ zu optimieren. Beispielsweise werden zu produzierende Mengen auf Basis der Nachfrage- und Lieferantendaten auf die einzelnen Produktionskapazitäten verteilt, um eine Zuordnung von Markt und Lieferant zu erhalten. Der stärkste Akteur einer SC oder der Akteur mit direktem Kontakt zum Endkunden ist für die Netzwerkplanung zuständig, da er umfassende Informationen über die SC sowie die Bedarfe der Endkunden besitzt (Werner 2017, S. 89).

Die Beschaffungs-, die Produktions- sowie die Distributionsplanung werden für einen Zeithorizont von mehreren Tagen bis Wochen erstellt. Die Beschaffungsplanung dient der Sicherung der

Teileversorgung unter möglichst niedrigen Beständen. Hierzu werden die Wiederbeschaffungszeiten sowie die Ziel-Bestandsmengen, unter Zuhilfenahme der Stücklisten, für Primär-, Sekundär- und Tertiärbedarfe definiert. Die Produktionsplanung bestimmt für jeden Standort der SC die in der jeweiligen Periode zu produzierenden Güter, mit dem Ziel einer hohen Auslastung. Die Gewährleistung der Versorgung der Endkunden ist die zentrale Aufgabe der Distributionsplanung. Hierbei sind verschiedene Versorgungsszenarien auszuarbeiten, die es zudem ermöglichen, marktspezifische Lieferengpässe zu überbrücken (Werner 2017, S. 90).

Eine weitere Aufgabe des SC Planning ist das Order Promising, mit dem Ziel dem Kunden die Ware unter Einhaltung der Lieferversprechen zu liefern. Mit Hilfe von Kennzahlen wird geprüft, zu welchem Prozentsatz die zugesagten Lieferversprechen eingehalten werden. Ein Beispiel eines Lieferversprechens ist die Next-Day-Zustellung von Amazon (Werner 2017, S. 90–91).

Den Übergang von der taktischen Planungs- zur operativen Planungsebene des SCM-Aufgabenmodells bildet die Feinplanung der Beschaffung, Produktion und Distribution. Deren Aufgabe ist, die bereits getätigte, längerfristige Planung zu überprüfen und möglichst optimal an die vorhandenen Ressourcen anzupassen. Der Planungshorizont liegt, je nach Prozess, bei mehreren Stunden oder ein bis zwei Tagen. (Werner 2017, S. 91).

Supply Chain Execution

Die Ebene des SC Execution umfasst alle logistischen Aktivitäten, welche die geplanten Prozesse operativ umsetzen. Beginnend beim Auftragseingang wird der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsprozess, inklusive der Zahlung der Kunden, durch die operative Planung gesteuert. Die zentrale Aufgabe dieser Ebene ist die Auftragsabwicklung, mit dem Ziel eingehende Kundenaufträge bestmöglich zu erfüllen. Ein wichtiger Teil der SC Execution ist zudem das Event-Management, das in Echtzeit Störungen in der SC erkennt und die Prozesse kurzfristig anpasst. Beispiele sind eine plötzlich steigende Absatzmenge, Transportengpässe oder Produktionsausfälle, welche die Leistung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks negativ beeinflussen (Chopra und Meindl 2016, S. 19; Werner 2017, S. 92–93).

3 Methoden zur Analyse von Fragestellungen im Supply Chain Management

Die stetige Weiterentwicklung und das Streben nach dem wirtschaftlichen Optimum sind Eigenschaften, die die Ökonomie von Beginn an prägten. Das SCM strebt als Teil einer Unternehmensorganisation ebenfalls nach immer effizienteren Prozessen, um sich von der steigenden Konkurrenz einer globalisierten Marktwirtschaft abzusetzen. Die anwendbaren Methoden zur Prozessanalyse und -optimierung sind vielfältig und müssen abhängig vom Anwendungsfall gewählt werden.

Im folgenden Kapitel werden drei verschiedene Methoden zur Analyse und Optimierung von Fragestellungen im SCM beschrieben. Im ersten Abschnitt erfolgt eine allgemeine Vorstellung von Tabellenkalkulationsprogrammen. Hierbei werden neben den Einsatzmöglichkeiten auch die Grenzen der Tabellenkalkulation skizziert. Im zweiten Abschnitt wird die Möglichkeit aufgezeigt, mathematische Optimierung unter Verwendung des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft EXCEL durchzuführen. Um die Grundlagen dafür zu legen, erfolgt zu Beginn des Abschnitts eine kurze Einführung in das Thema der mathematischen Optimierung. Abschließend wird die Analysemethode Simulation erläutert. Innerhalb dieses Abschnitts werden die Grundlagen der Simulation sowie das generelle Vorgehen bei einer Simulationsstudie aufgeführt. Zusätzlich werden im Rahmen der Vorstellung der Vorteile von Simulation Anwendungsfelder der Methode innerhalb des SCM genannt.

3.1 Tabellenkalkulationsprogramme

Tabellenkalkulationsprogramme dienen der „Erstellung, Verwaltung, Bearbeitung und grafische[n] Darstellung von Daten“ (Benker 2014, S. 1). Die Daten, die je nach Bedarf in verschiedenen Typen vorliegen können, werden mittels zweidimensionalen Tabellen dargestellt und verarbeitet. Die häufigsten Einsatzgebiete von Tabellenkalkulationen sind der kaufmännische Bereich sowie das Unternehmens-Controlling. Die Tabellenkalkulation wird in diesen Bereichen dazu verwendet, aufwendige oder sich wiederholende Rechnungen und Analysen effizient auszuführen (Benker 2014, S. 1).

Das verbreitetste Tabellenkalkulationsprogramm ist Microsoft EXCEL (MS Excel). MS Excel wird in den meisten Unternehmen als Standardsoftware zur Auswertung von Daten genutzt (Benker 2014, S. 1; Vonhoegen 2011, S. 2). Tabellenkalkulationsprogramme anderer Anbieter sind beispielsweise Numbers, das von Apple entwickelt wurde oder Calc, welches Teil des Apache

OpenOffice-Pakets ist.

Aufgrund der hohen Verbreitung ist MS Excel das in dieser Arbeit eingesetzt Tabellenkalkulationsprogramm. Explizit wird die Version MS Excel 2016 verwendet.

MS Excel bietet dem Anwender diverse vordefinierte Funktionen verschiedener Bereiche (Vonhoegen 2011, S. 2). Neben den Grundrechenarten können Funktionen der Mathematik und Geometrie, Finanzmathematik sowie der Statistik für Berechnungen genutzt werden. Zusätzlich stehen logische Funktionen, wie beispielsweise die Wenn-Funktion, die Booleschen Operatoren, Text-Funktionen sowie Datums- und Zeitfunktionen zur Verfügung. Die Vielzahl an Funktionen verschiedener Themengebiete ermöglichen eine individuelle Datenanalyse. Für spezifische Anwendungsfälle lassen sich zusätzlich Add-Ins von Drittanbietern integrieren, die in die Excel-Umgebung eingebettet werden können. Abseits der herkömmlichen Tabellenkalkulation können in MS Excel, mit Hilfe eines integrierbaren Solvers, Optimierungen durchgeführt werden. Hierfür muss der vorinstallierte Solver einmalig als Add-In aufgenommen werden, bevor er eingesetzt werden kann (Vonhoegen 2016, S. 815). Eine detaillierte Beschreibung der Möglichkeit einer mathematischen Optimierung unter Verwendung des Solvers folgt in Abschnitt 3.2.

Unbegrenzte Möglichkeiten der Erweiterung bietet der VBA-Editor, der eine anwenderspezifische Programmierung über die Sprache Visual Basic for Applications (VBA) ermöglicht. Der Einsatz von Tabellenkalkulationsprogrammen unter Anwendung einer eigenständigen Programmierung wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, da dies über den herkömmlichen Einsatz von Tabellenkalkulationsprogrammen hinausreicht. Außerdem würde die Betrachtung dieses Bereichs den Umfang der Arbeit deutlich überschreiten.

Trotz der Vielseitigkeit in der Anwendung hat der Einsatz von MS Excel Grenzen. Die Datenmengen sind hinsichtlich der Zeilen- und Spaltenanzahl auf rund 1.000.000 Zeilen und ca. 16.000 Spalten je Tabellenblatt limitiert. Bei der Verwendung von Formeln zur Analyse großer Datenmengen ist es zudem keine Seltenheit, dass die Rechenleistung aufgrund der Funktionsweise der Formeln nicht ausreicht. In diesen Fällen muss entweder die Datenmenge reduziert oder eine andere Methodik der Datenanalyse gewählt werden. Besser geeignet für die standardisierte Auswertung großer Datenmengen sind Datenbanken. Hierbei ist es in der Praxis durchaus üblich, die Vorverarbeitung von Daten mittels Datenbanken durchzuführen, um nachfolgend unter Verwendung von MS Excel eine detaillierte Datenanalyse zu erstellen. Bei der Bearbeitung von Daten in MS Excel muss außerdem beachtet werden, dass keine Überprüfung zum Erhalt der Datenintegrität stattfindet. Es ist somit möglich, dass die Basis einer Berechnung gelöscht wird, ohne dass

dies durch das System verhindert wird. Die fehlende Datenintegrität und die vorhandene Verbindung von Daten und Layout sind Gründe, die eine gemeinsame Bearbeitung einer Excel-Datei erschweren.

Die Tabellenkalkulation und im Speziellen MS Excel ist dennoch ein komfortables Werkzeug zur Analyse von verschiedensten Daten und sollte als mögliche Methode zur Analyse von Fragestellungen im SCM berücksichtigt werden.

3.2 Mathematische Optimierungsverfahren unter Anwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen

In der heutigen Ökonomie nehmen mathematische Optimierungsaufgaben eine wichtige Rolle bei der Entscheidungsunterstützung ein (Krug und Rose 2011, S. 21). Das Ziel einer Optimierungsaufgabe ist, das Gesuchte, unter Einhaltung aller gegebenen Nebenbedingungen, so zu bestimmen, dass die Zielfunktion minimiert oder maximiert wird (Papageorgiou 1991, S. 3; Gohout 2009, S. 7).

Das Vorgehen bei einer mathematischen Optimierung ist in zwei Schritte gegliedert. Der Aufstellung eines mathematischen Optimierungsmodells, abgeleitet aus der Aufgabenstellung und der Lösungsbestimmung durch mathematische Optimierung (Benker 2014, S. 255). Bei der Modellbildung sind die Variablen, die Zielfunktion und die Nebenbedingungen festzulegen. Bei der Lösungsbestimmung ist eine für das Problem geeignete Methodik zu wählen. Die Algorithmen, die zur Lösung mathematischer Optimierung eingesetzt werden, sind in den verwendeten Programmen bereits implementiert (Papageorgiou 1991, S. 122). Dadurch kann, auch ohne Kenntnis über die expliziten Vor- und Nachteile der einzelnen Lösungsalgorithmen, eine mathematische Optimierung unter Verwendung einer geeigneten Software durchgeführt werden (Benker 2014, S. 256). Es ist jedoch zwingend nötig die generelle Art der Optimierungsaufgabe zu bestimmen, um den geeigneten Lösungsalgorithmus wählen zu können.

Optimierungsmodelle lassen sich unter anderem in stetig, diskret und dynamisch einordnen. Während bei stetigen Optimierungsmodellen alle Entscheidungsvariablen reelle Zahlen sind, haben diskrete Optimierungsmodelle die Eigenschaft, dass lediglich natürliche Zahlen als Entscheidungsvariablen auftreten (Kistner 1988, S. 4–5). Eine dynamische Optimierungsaufgabe liegt vor, wenn eine zu treffende Entscheidung direkte Auswirkung auf die folgenden Entscheidungen hat und das Problem dadurch als Ganzes zu betrachten ist (Nickel et al. 2014, S. 289). Ein Beispiel aus der angewandten Logistik ist ein Kürzeste-Wege-Problem bei dem die kürzeste Verbindung zwischen mehreren Orten gesucht wird. Die Entscheidung über die nächste Teilstrecke des Weges

ist dabei von den bereits zurückgelegten Teilstücken abhängig und beeinflusst die nachfolgenden Entscheidungen direkt, da der Lösungsraum eingegrenzt wird (Nickel et al. 2014, S. 290).

Eine weitere Unterscheidung, die bei der Einordnung von Optimierungsmodellen getroffen werden muss, ist die der Linearität. Optimierungsaufgaben werden grundsätzlich zwischen linear und nichtlinear unterschieden, abhängig der Ordnung der enthaltenen Funktionen (Papageorgiou 1991, S. 141).

Die lineare Optimierung ist ein Teilgebiet der Optimierung bei der alle Funktionen linear sind. Bei der Modellierung werden sowohl das Ziel als auch die gegebenen Restriktionen durch Funktionen erster Ordnung beschrieben (Burkard und Zimmermann 2012, S. 3). Die lineare Optimierung ist bei der Lösung von Produktions- und Logistikproblemen weit verbreitet. Dies hängt vor allem mit der Einfachheit der Modellbildung und des Vorhandenseins numerischer Algorithmen zur zuverlässigen Bestimmung des globalen Optimums zusammen (Papageorgiou 1991, S. 122). Der im weiteren Verlauf des Abschnitts näher betrachtete MS Excel Solver verwendet den Simplexalgorithmus zur Lösung linearer Optimierungen. Dieser Algorithmus hat sich aufgrund des effizienten Verfahrens bei der Lösung linearer Probleme etabliert (Hochstättler 2017, S. 141).

In einigen praktischen Anwendungen ist die lineare Modellierung einer Aufgabe aufgrund der gegebenen Struktur jedoch nicht möglich. Durch in der Praxis vorhandene Skaleneffekte entstehen nichtlineare Zielfunktionen, die eine lineare Abbildung des Problems erschweren (Nickel et al. 2014, S. 231). Neben der linearen Optimierung sind dadurch auch nichtlineare Optimierungsprobleme für die vorliegende Arbeit relevant. Nachfolgend werden jedoch ausschließlich kontinuierliche nichtlineare Optimierungsprobleme berücksichtigt, da diese Art der nichtlinearen Optimierung die einzige ist, die mittels des in MS Excel integrierten Solvers gelöst werden kann. Der Solver verwendet hierfür die Lösungsmethodik des generalisierten reduzierten Gradienten (GRG-Verfahren). Für ganzzahlige nichtlineare Optimierungsprobleme gibt es nur unter bestimmten Bedingungen Ansätze zur Lösung des Problems (Nickel et al. 2014, S. 231). Einen Einblick in die nichtlineare ganzzahlige Optimierung bieten Floudas (1995) sowie Wolsey und Nemhauser (2014).

Das Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel bietet die Möglichkeit lineare sowie nichtlineare Optimierungsaufgaben unter Einsatz eines vorinstallierten Add-Ins zu lösen. Der bereits integrierte Solver wurde von der Firma Frontline Systems Inc. entwickelt und ist somit ein extern eingekauftes Modul (Mehr und Mehr 2015, S. 325). Das Werkzeug verknüpft die skizzierten Optimierungsverfahren mit der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Tabellenkalkulation. Dies vereinfacht die Entscheidungsfindung bei Problemstellungen mit einer Vielzahl von Alternativen (Mehr und

Mehr 2015, S. 323). Neben dem vorinstallierten Solver können weitere Add-Ins zur Lösung mathematischer Optimierungen installiert und eingesetzt werden. Ein Beispiel dafür ist der Open-Solver, der lineare, nichtlineare und ganzzahlige Optimierungen ermöglicht. Mit Ausnahme des vorinstallierten Solvers werden in der vorliegenden Arbeit jedoch keine Add-Ins von Drittanbietern berücksichtigt. Dies ist auf die Größe und Unübersichtlichkeit des Marktes zurückzuführen.

Der in MS Excel integrierte Solver ermöglicht die Bestimmung der Extremstellen einer aufgestellten Zielfunktion unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen des Systems und kann dadurch für mathematische Optimierungen eingesetzt werden (Mehr und Mehr 2015, S. 325). Abbildung 4 zeigt das Dialogfenster „Solver-Parameter“, in dem das Optimierungsmodell definiert werden muss. Das Fenster erscheint, nachdem der Solver über das Menü aufgerufen wird.

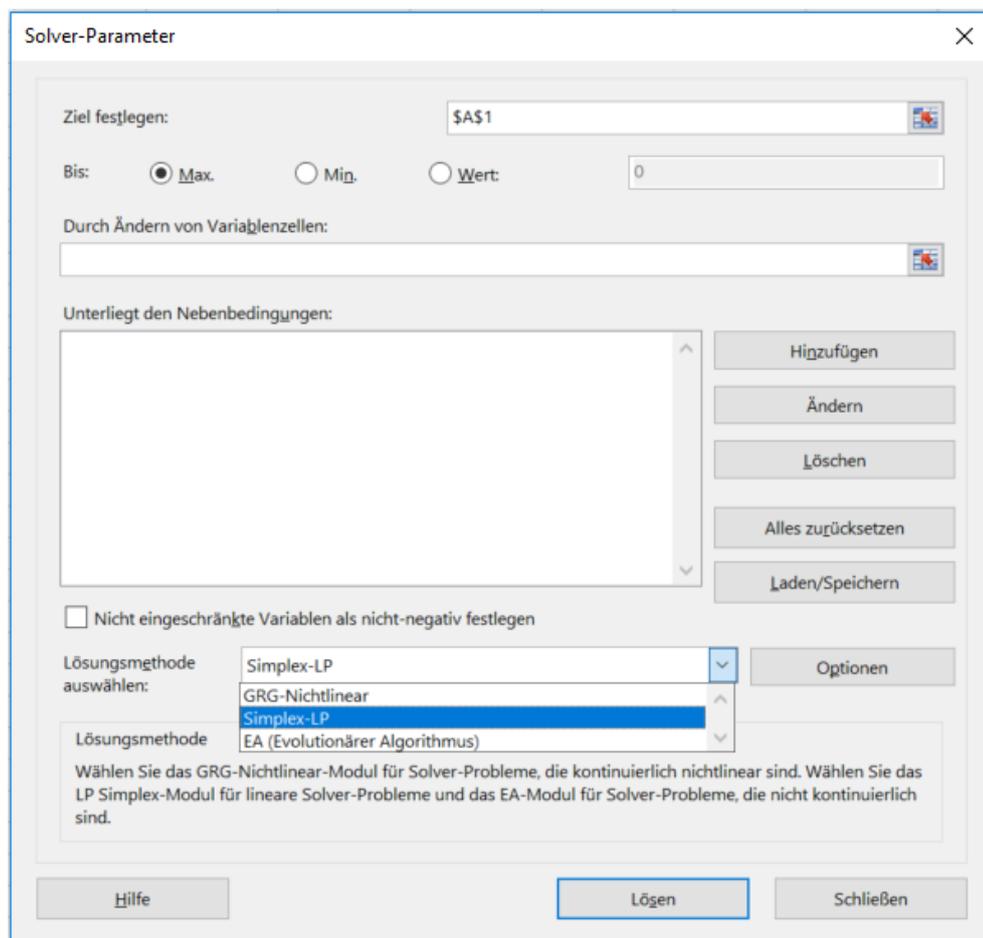


Abbildung 4: Eingabefenster des MS Excel Solvers

Das Dialogfenster wird dafür genutzt, ein im Tabellenkalkulationsblatt aufgestelltes Modell dem Solver über die Eingabe der relevanten Zellbereiche vorzugeben. Die Zelle, welche die Zielfunktion enthält, ist im Eingabebereich „Ziel festlegen:“ anzugeben. Zusätzlich ist das Ziel der Suche

zu definieren. Neben der Maximierung und Minimierung der Zielfunktion kann ein konkreter Wert hinterlegt werden, den die Funktion annehmen soll. Damit eine Lösung erzeugt werden kann, ist der Bereich zu bestimmen, der die variablen Parameter enthält. Die in Form von Gleichungen und Ungleichung angegebenen Restriktionen können über den „Hinzufügen-Button“ in die Solver-Parameter eingefügt werden. Final ist die vom Solver anzuwendende Lösungsmethode auszuwählen. Hierfür stehen drei verschiedene Lösungsmethoden zur Auswahl. Der Infokasten im unteren Teil des Dialogfensters gibt einen Überblick über die Einsatzbereiche der Lösungsmethoden. Zur Lösung einer linearen Optimierung ist das Simplexverfahren zu verwenden. Sind die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen nichtlinear, ist das GRG-Nichtlinear-Modul auszuwählen. Bei diskreten Optimierungen ist der Evolutionäre Algorithmus einzusetzen. Die Funktionsweisen der Algorithmen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher thematisiert, da dies für die Prüfung der Simulationswürdigkeit unerheblich ist. Eine detaillierte Herleitung und Erläuterung des Simplex-Algorithmus bietet Hochstättler (2017, S. 95–174). Informationen bezüglich der Funktionsweise der restlichen Algorithmen sind in der herkömmlichen Literatur nicht vorhanden. Für weitere Informationen über das GRG-Nichtlinear-Modul sowie den Evolutionären Algorithmus kann allerdings Frontline Systems Inc. kontaktiert werden (Frontline Systems Inc. 2018).

Typische Optimierungsaufgaben des SCM, die mit Einschränkungen durch den Solver gelöst werden können, sind das Minimieren von Transport- sowie Produktionskosten entlang der SC sowie die Maximierung des Servicelevels für den Endkunden.

3.3 Simulation

Simulation ist eine häufig eingesetzte Methodik zur Analyse und Planung von komplexen und dynamischen Logistiksystemen (März und Weigert 2011, S. 10). Simulation dient dazu, abgesicherte und nachvollziehbare Entscheidungen zu treffen, wenn analytische Verfahren an ihre Grenzen stoßen (Gutenschwager et al. 2017, S. 1). Moderne Wertschöpfungsnetzwerke, geprägt durch eine Vielzahl von Teilnehmern und unetliche Rahmenbedingungen, sind ein Beispiel für komplexe Logistiksysteme. Jede der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Phasen des SC Aufgabenmodells beinhaltet Aufgaben, in denen das Werkzeug der Simulation eine sinnvolle Methodik der Entscheidungsunterstützung darstellt (VDI 2014, S. 4). Die Technik hat den Vorteil, dass quantitativ belegbare Entscheidungen getroffen werden können, selbst wenn das System in der Realität nicht vorliegt oder eine testweise Änderung am bestehenden System nicht möglich ist (VDI 2014, S. 5). Dadurch eignet sich die Methodik bei der Bestimmung des bestmöglichen Netzwerksdesigns im Rahmen des SC Designs. Ein weiterer Vorteil der Simulation ist die Möglichkeit von Analysen

über längere Zeiträume hinweg und unter Betrachtung dynamischen Rahmenbedingungen (VDI 2014, S. 6). Im SCM können dadurch strategische und taktische Entscheidungen unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen getroffen werden. Durch die Anwendung von statistischen Verteilungsfunktionen, welche die Dynamik einzelner Variablen abbilden, können sich ändernde Nachfrageszenarien betrachtet werden (Liebl 1995). Außerdem lassen sich verschiedene Systemvarianten durch Anpassung des Simulationsmodells mit geringem Aufwand untersuchen (VDI 2014, S. 6). In der Phase der SC Execution ist dies hilfreich, um im Zuge des Event-Managements den bestmöglichen Notfallprozess auszuwählen. Poole und Szymankiewicz (1977) führen zusätzlich auf, dass Simulation eine geeignete Methodik ist, um Transparenz über eine ausgesprochene Empfehlung zu schaffen, wenn ein komplexes Vorhaben auf Führungsebene anschaulich und verständlich darzustellen ist.

Die beschriebenen Vorteile machen deutlich, dass das Werkzeug der Simulation eine zu berücksichtigende Möglichkeit ist, komplexe SCs zu untersuchen. Für einen detaillierten Überblick über die Anwendung von Simulation werden nachfolgend die Grundlagen der Methodik erläutert. Anschließend wird das Vorgehen zur Durchführung einer Simulationsstudie erläutert.

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) veröffentlichte im Jahr 2014 die VDI-Richtlinie 3633, welche die Grundlagen der Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen beschreibt. Die Richtlinie dient dem Anwender als Orientierung für den Einsatz der Simulationstechnik und schafft Klarheit bei der Kommunikation zwischen Auftraggeber, Softwarehersteller und Dienstleister (VDI 2014, S. 2–3).

Der VDI definiert die Simulation als das *„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“* (VDI 2014, S. 3). Abbildung 5 stellt diese Definition grafisch dar und führt die vier wesentlichen Bestandteile der Simulation auf.

Das reale bzw. geplante System ist der Untersuchungsgegenstand einer Simulationsstudie. Der Simulationsexperte überführt, in enger Abstimmung mit dem Fachexperten, den Untersuchungsgegenstand in ein Simulationsmodell. Das Simulationsmodell ist definiert als *„[v]ereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“* (VDI 2014, S. 3). Eine zentrale Herausforderung bei der Modellierung ist die Wahl des richtigen Detaillierungsgrades. Ein zu geringer Detaillierungsgrad hat zur Folge, dass wesentliche Elemente des Systems nicht abgebildet werden. Es besteht dadurch die Gefahr, dass falsche Simulationsergebnisse erzeugt werden. Ein zu hoher Detaillierungsgrad führt zu einem stark steigenden Aufwand und somit zu höheren Kosten, aus

welchen jedoch kein Informationsgewinn hervorgeht (VDI 2014, S. 22).

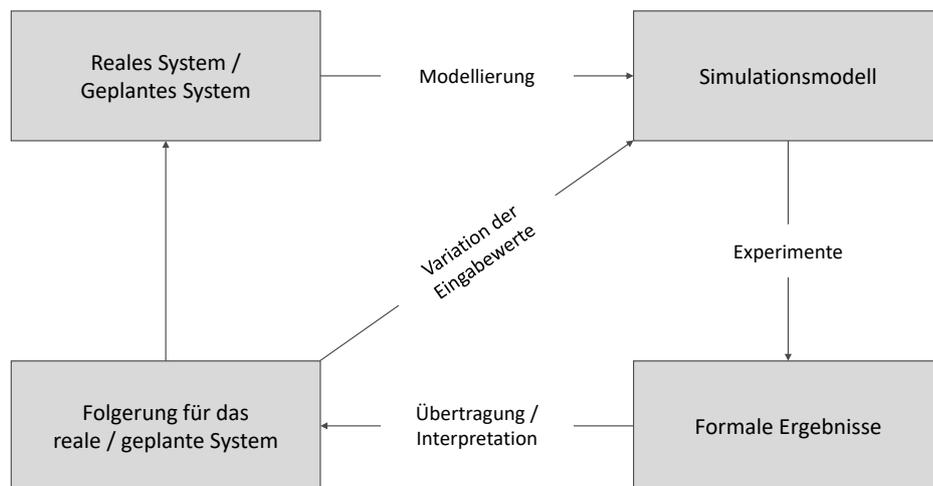


Abbildung 5: Grafische Darstellung der Definition der Simulation nach Arbeitsgemeinschaft Simulation (1997, S. 3)

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Simulation sind die Experimente und die daraus resultierenden formalen Ergebnisse. Als Simulationsexperiment bezeichnet man die „[g]ezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation“ (VDI 2014, S. 3). Die aus den Simulationsläufen gewonnenen formalen Ergebnisse sind anschließend zu interpretieren (Arbeitsgemeinschaft Simulation 1997, S. 3). Dabei ist es wichtig, dass die Ergebnisse gemeinsam mit dem Fachexperten validiert werden, um die Sinnhaftigkeit der Ergebnisse zu prüfen. Die interpretierten Ergebnisse werden auf das reale bzw. geplante System übertragen, um Schlussfolgerungen für das reale bzw. geplante System zu ziehen. Eine Simulation erzeugt somit keine optimale Lösung. Die Simulationsexperimente dienen lediglich der Untersuchung eines Systemverhaltens durch gezielte Analysen, die anschließend manuell interpretiert werden müssen. Zur Betrachtung verschiedener Gestaltungsvarianten eines Systems kann, durch die Variation der Eingabewerte, das Simulationsmodell angepasst werden. Dieser Schritt ist ebenfalls notwendig, wenn die formalen Ergebnisse nicht schlüssig sind und die Rückschlüsse für das untersuchte System auf ein fehlerhaftes Simulationsmodell hinweisen.

Nach Gordon (1978) unterscheidet man bei Simulationen zwischen kontinuierlichen und ereignisdiskreten Modellen. Kontinuierliche Simulationen charakterisiert, dass sich die Zustandsvariablen stetig ändern (Banks et al. 2005, S. 9). Bei diskreten Simulationen ändern sich die Zustandsvariablen nur zu einzelnen Zeitpunkten (Banks et al. 2005, S. 9). Die Unterscheidung zwischen diskret und kontinuierlich kann sowohl in Bezug auf die Zeit als auch auf den Systemzustand erfolgen (Gutenschwager et al. 2017, S. 16). Daraus ergeben sich vier Fälle der Unterscheidung

von Simulationssystemen, die in Abbildung 6 veranschaulicht werden.

Bei kontinuierlichen Systemen und Modellen ergeben sich die Änderungen der Zustands- und Zeitmengen, in Abhängigkeit der Zeit, stetig. Hierbei liegen positive reelle Zahlen inklusive der Null zugrunde (Gutenschwager et al. 2017, S. 17). Ein Beispiel ist der Wasserpegel eines Stausees, der sich im Laufe der Zeit stetig durch Zu- und Abläufe ändert. Der Füllgrad des Stausees wird als kontinuierliche Zustandsmenge beschrieben (Banks et al. 2005, S. 16).

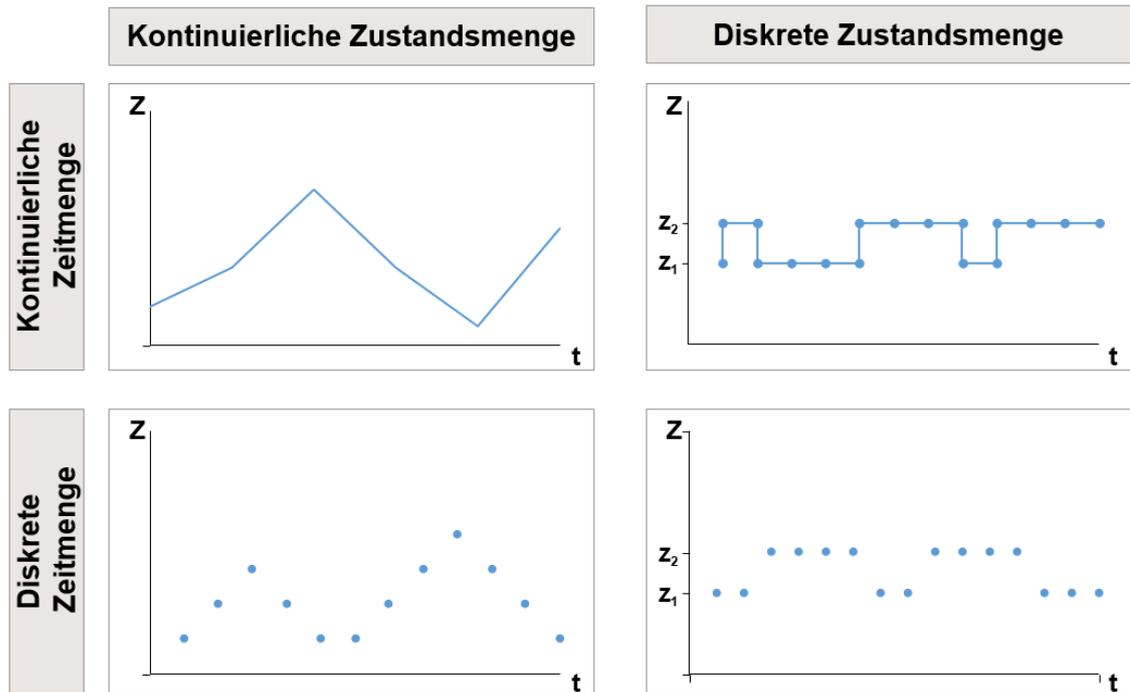


Abbildung 6: Fälle der Unterscheidung von Simulationen nach Ören (1979, S. 36)

Bei kontinuierlichen Zeitmengen und diskreten Zustandsmengen sind Änderungen zu jedem beliebigen Zeitpunkt möglich. Die Zustandsmenge ist jedoch diskret. Dadurch können nur bestimmte Zustände eintreten (Gutenschwager et al. 2017, S. 17).

Bei einer diskreten Zeitmenge gepaart mit einer kontinuierlichen Zustandsmenge kann eine stetige Zustandsänderung lediglich zu bestimmten Ereignissen eintreten. Die Zustandsmenge ist kontinuierlich und kann jede positiv reelle Zahl inklusive der Null einnehmen (Gutenschwager et al. 2017, S. 17). Die Anzahl wartender Kunden in einer Bank, die sich nur ändert, wenn ein Kunde die Bank betritt oder die durchgeführte Dienstleistung beendet ist, kann als Beispiel für diese Fallunterscheidung herangezogen werden (Banks et al. 2005, S. 9).

Sind sowohl die Zeitmenge als auch die Zustandsmenge diskret, erfolgt die Zustandsänderung zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die möglichen Zustandsmengen sind klar abgegrenzt (Gutenschwager et al. 2017, S. 17). Als Beispielprozess kann die Befüllung eines Behälters für Schüttgut

genannt werden, die beginnt, sobald der nächste leere Behälter zur Verfügung steht. Die möglichen Zustände eines Behälters beschränken sich auf „voll“ und „leer“.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Verwendung der ereignisdiskreten Simulation. Diese ist prädestiniert, die Analyse, Planung und Steuerung von logistischen Systemen zu unterstützen (Eley 2012, S. 8; März und Rose 2011, S. 14). Es werden somit lediglich Systeme betrachtet, bei denen die Zustandsänderung durch den Eintritt eines diskreten Ereignisses erfolgt. Nachfolgend wird der Begriff Simulation mit der ereignisdiskreten Simulation gleichgesetzt.

Rabe et al. (2008) entwickelten ein Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien, das wesentliche Aspekte des Projektmanagements, der Softwareentwicklung sowie der Modellbildung und Simulation vereint (Gutenschwager et al. 2017, S. 141). Das Konzept ist in Abbildung 7 visualisiert. Die einzelnen Phasen des Modells sind als Ellipsen dargestellt. Die Phasenergebnisse sind in der Abbildung als Rechtecke symbolisiert. Die Art der Aufbereitung der Phasenergebnisse wird durch das Vorgehensmodell vorgeschlagen. Das Ergebnis der einzelnen Phasen kann als Modell, Dokument oder einer Kombination aus beidem festgehalten werden. Dies ist abhängig von der jeweiligen Phase sowie den Anforderungen des Projekts. Die Zielbeschreibung ist nicht als Phasenergebnis, sondern als Grundlage der Simulationsstudie anzusehen (Gutenschwager et al. 2017, S. 142). Die einzelnen Phasen der Simulationsstudie sind im Vorgehensmodell in der Abfolge der generellen Bearbeitung dargestellt. In der Anwendung ist eine streng sequentielle Vorgehensweise jedoch nicht zwingend möglich, da die Phasen teilweise iterativ durchlaufen werden. Eine wiederholte Bearbeitung einer Phase ist beispielsweise notwendig, wenn das Modell aufgrund sich ändernder Annahmen angepasst werden muss (Gutenschwager et al. 2017, S. 142). Nachfolgend werden die einzelnen Phasen des Simulationsvorgehensmodells skizziert. Die Ausführungen basieren auf den Erläuterungen von Gutenschwager et al. (2017, S. 144–145).

Die Zielbeschreibung ist der Ausgangspunkt einer Simulationsstudie und gibt das zu untersuchende Problem strukturiert wieder. Das Dokument sollte bereits eine Begründung für den Einsatz des Analysewerkzeugs der Simulation enthalten.

Die erste Phase des Vorgehensmodells dient dazu, dass alle beteiligten Parteien der Studie ein gemeinsames Verständnis über die Aufgabenstellung haben. Hierfür werden die Inhalte der Aufgabendefinition konkretisiert und mit zusätzlichen Dokumenten ergänzt. Des Weiteren wird empfohlen, dass der angestrebte Lösungsweg bereits Teil der Aufgabenspezifikation ist.

Die Systemanalyse grenzt den Umfang der Studie ein. Dies beinhaltet die Definition der Systemgrenzen sowie des nötigen Detaillierungsgrades. Das Konzeptmodell, welches das Ergebnis der

Systemanalyse darstellt, führt auf, welche Bestandteile des untersuchten Systems in welcher Genauigkeit abzubilden sind und inwieweit die Elemente interagieren. Die Dokumentation enthält häufig Grafiken, Ablaufdiagramme sowie schriftliche Systembeschreibungen.

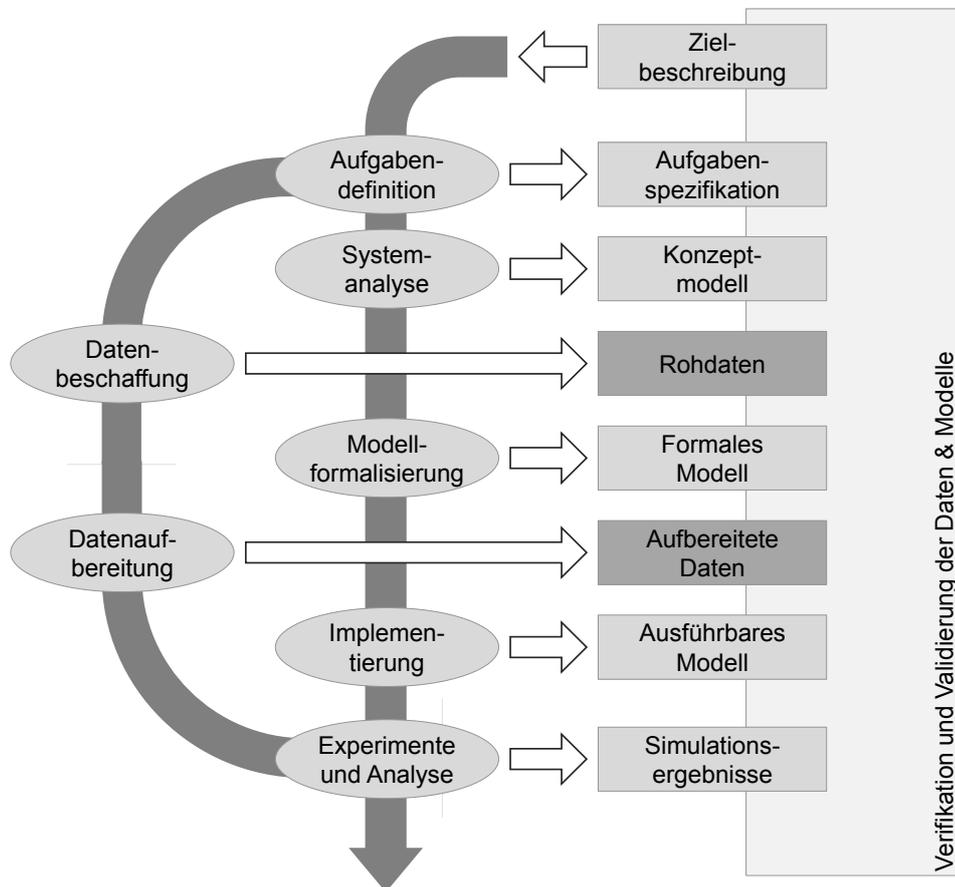


Abbildung 7: Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien nach (Rabe et al. 2008, S. 5)

Die Modellformalisierung überträgt die Ergebnisse der Systemanalyse in ein formales Modell, welches ohne zusätzliche Erläuterungen implementierbar sein sollte. Beispielsweise werden in dieser Phase die Ablaufdiagramme und die Textdokumente, die das zu untersuchende System beschreiben, in Programmablaufpläne überführt.

Das Simulationsmodell wird durch die Implementierung des formalen Modells erzeugt. Das ausführbare Modell sowie die Art der Implementierung sind abhängig vom eingesetzten Simulationstool. Diese unterscheiden sich bezüglich des Vorgehens bei der Implementierung beispielsweise bei der Verfügbarkeit von vordefinierten Bausteinen oder zu leistenden Programmieraufwänden.

Die Phasen der Datenbeschaffung und -aufbereitung sind im Vorgehensmodell in einem zur Modellbildung parallelen Pfad angeordnet. In der ersten Phase werden die Rohdaten, die häufig aus

unterschiedlichen Quellen stammen, gesammelt und konsolidiert. Ist der Umfang der verfügbaren Informationen ungenügend, sind im Rahmen der Datenbeschaffung zusätzliche Daten zu erheben. Die Art und Menge der benötigten Daten hängen von der Aufgabenspezifikation sowie dem Konzeptmodell ab und sind den Ergebnisdokumenten zu entnehmen. Aufgabe der Datenaufbereitung ist, die Rohdaten soweit aufzubereiten, dass sie mit dem ausführbaren Modell zusammengeführt werden können. Hierbei sind die Daten auf die relevanten Informationen zu reduzieren und in die benötigte Form zu übertragen. Die Bestimmung der statistischen Verteilung von stochastischen Einflussfaktoren ist ebenfalls Teil dieser Phase.

Das ausführbare Modell und die aufbereiteten Daten werden für die Phase der Experimente und Analyse vereint. In dieser Phase erfolgt die Durchführung der gezielten Experimente. Zur Sicherstellung einer strukturierten Variation der Parameter des Modells werden die Simulationsläufe im Vorfeld geplant. Die Ergebnisse der Experimente werden aufgezeichnet, um diese im Anschluss zu analysieren und interpretieren. Auf den Analysen der Experimente basieren die Schlussfolgerungen für das reale bzw. geplante System. Die Ergebnisse dieser Phase werden von Rabe et al. (2008, S. 5) als Simulationsergebnisse bezeichnet. Die Dokumentation der Ergebnisse umfasst sowohl die gespeicherten Resultate der Simulationsläufe als auch die Analyse und die Schlussfolgerung für das reale System.

Im Anschluss an jede Phase des Vorgehensmodells ist eine Verifikation und Validierung der Daten und Modelle durchzuführen, um Fehler frühzeitig zu identifizieren. In Abbildung 7 ist dieser Bestandteil des Konzepts daher als Rechteck dargestellt, das sich über die komplette Dauer der Simulationsstudie erstreckt und jedes Phasenergebnis abdeckt.

Eine ausführliche Vorstellung der Phasen des Vorgehensmodells findet sich in Gutenschwager et al. (2017, S. 147–208). Des Weiteren befassen sich Wenzel et al. (2008) im Detail mit dem qualitätskonformen Vorgehen bei der Durchführung von Simulationsstudien.

Eine Simulationsstudie wird meist von spezialisierten Projektteams durchgeführt. Die Differenzierung der Teams erfolgt anhand der Aufgabengebiete. Die auftretenden Rollen sind: Entscheidungsträger des Auftraggebers, Projektleiter, Fachexperte sowie Simulationsexperte. Die Entscheidungsträger des Auftraggebers verfügen über das für die Studie vorhandene Budget. Die Projektleiter sind für das Projekt- und Qualitätsmanagement zuständig und müssen sicherstellen, dass das Projekt ordnungsgemäß durchgeführt und fristgerecht abgeschlossen wird. Die Fachexperten verfügen über detailliertes Systemwissen und stellen die für die Simulation benötigten Daten und Informationen zur Verfügung. In der Verantwortung der Simulationsexperten liegt die

Modellierung des zu untersuchenden Systems sowie die Durchführung der Simulationsläufe. Außerdem sind sie häufig für die Verifikation und Validierung der Ergebnisse zuständig. Neben den genannten Rollen können zudem Anwender, Softwareexperten und IT-Verantwortliche Bestandteil einer Simulationsstudie sein (Rabe et al. 2008, S. 23–25). Die einzelnen Parteien stehen zu meist in einer Auftraggeber-Auftragnehmer-Beziehung. Dies ist unabhängig davon, ob für die Simulationsstudie ein externer Dienstleister beauftragt wird (Wenzel et al. 2008, S. 36–38). Die Simulations- sowie Softwareexperten treten aufgrund ihrer starken Spezialisierung, selbst innerhalb eines Unternehmens, als eigenständige Organisationseinheit auf. Aufgrund der unterschiedlichen Organisationseinheiten wird auf beiden Seiten ein Projektleiter eingesetzt, der die Teammitglieder steuert. Die Fachexperten sowie mögliche IT-Verantwortliche sind Teil des Projektteams des Auftraggebers (Gutenschwager et al. 2017, S. 146).

4 Entscheidungskriterien für den Einsatz der ereignisdiskreten Simulation

In Kapitel drei wurde aufgezeigt, dass verschiedene Lösungsmethoden zur Analyse und Optimierung von Fragestellungen im SCM existieren. Um sich der Beantwortung der Fragestellung anzunähern, wann welche Problemlösungsmethode anzuwenden ist, wird an dieser Stelle erläutert, welche Kriterien für die Angemessenheit der Simulation als Analysewerkzeug in der Literatur genannt werden.

Zunächst werden allgemeingültige Entscheidungskriterien zur Prüfung der Simulationswürdigkeit aufgezeigt. Im darauffolgenden Abschnitt werden SCM-spezifische Entscheidungskriterien aufgeführt. Hierfür werden wissenschaftliche Artikel zum Thema SC Simulation analysiert, die innerhalb der Beitragsreihen der Winter Simulation Conference sowie der ASIM-Fachtagungen veröffentlicht wurden.

4.1 Allgemeingültige Entscheidungskriterien

Mit steigendem Aufkommen der praktischen Anwendung von Simulationen, Ende der 1990er Jahre, befasste sich die Literatur vermehrt mit der Frage der Angemessenheit von Simulationen (Gibson und Banks 1997, S. 30). Banks et al. (2005) fassen die Ausführungen verschiedener Wissenschaftler, wie Naylor et al. (1966) und Shannon (1998), zu elf Kriterien zusammen, die vermitteln, unter welchen Bedingungen Simulation die geeignete Methodik ist. Die Entscheidungskriterien sind allgemein formuliert und orientieren sich an den Vorteilen der Simulation. Nach Banks et al. (2005, S. 4) ist die Simulation, unter anderem, für folgende Anwendungen das geeignete Werkzeug:

- Analyse von internen Wechselwirkungen komplexer Systeme oder deren Teilsysteme.
- Untersuchung des Modelverhaltens bei auftretenden informationstechnischen, organisatorischen und umweltbedingten Veränderungen.
- Betrachtung der wichtigsten Variablen sowie deren Auswirkungen auf das Systemverhalten durch gezielte Änderung der Eingabewerte.
- Unterstützung und Verifizierung von analytischen Lösungsmethoden.
- Vorbereitung auf die Risiken der Implementierung neuer Systemdesigns und Rahmenbedingungen.
- Animation von simulierten Prozessen und ausgearbeiteten Maßnahmen.

- Untersuchung von modernen Systemen, die zu komplex sind, um mit Hilfe anderer Werkzeuge untersucht werden zu können.

Neben den genannten Anwendungsfällen der Simulation führt Banks gemeinsam mit Gibson (1997) zehn Regeln auf, die die Anwendung der Simulation ausschließen. Die erste Regel gibt an, dass Simulation nicht verwendet werden soll, wenn das Problem auch mit herkömmlichen Analysen gelöst werden kann. Dies ist der Fall, wenn das zu lösende Problem trivial ist. Gibson und Banks (1997, S. 30) belegen dies anhand des nachfolgend wiedergegebenen Fallbeispiels. Die Problemstellung ist die Auslegung einer Automobilwerkstatt und die Berechnung der minimal benötigten Servicestationen. Bekannt ist, dass durchschnittlich 100 Kunden pro Stunde eintreffen und im Mittel 12 Kunden pro Stunde je Servicestation bedient werden können. Zur Lösung dieser Aufgabe reicht eine einfache Tabellenkalkulation aus, da lediglich die Anzahl der Kunden pro Stunde durch die mittlere Anzahl der bearbeiteten Aufträge pro Stunde geteilt werden muss. Es werden insgesamt neun Servicestation benötigt, resultierend aus der folgenden Division: $100 / 12 = 8,33$. Die zweite Regel besagt, dass Simulation nicht verwendet werden soll, sofern eine analytische Lösung des Problems möglich ist. Im vorgestellten Beispiel kann die durchschnittliche Wartezeit eines Kundenmittels der von Hillier und Lieberman (2015) entwickelten Graphen, deutlich kostengünstiger bestimmt werden als unter Verwendung von Simulation (Gibson und Banks 1997, S. 30). Außerdem sollte die Durchführung eines Experiments am realen System nicht einfacher durchzuführen sein als eine Simulation. Obwohl dies ein offensichtliches Kriterium ist, gibt es in der Praxis immer wieder Fälle, bei denen dieser Grundsatz nicht berücksichtigt wird (Gibson und Banks 1997, S. 30). Das vierte Ausschlusskriterium ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis. Übersteigen die Kosten einer Simulation die Einsparungspotenziale, ist die Simulation nicht das geeignete Werkzeug. Die Beurteilung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses erfordert einen gewissen Grad an Erfahrung, da die Kostenfaktoren einer Simulation vielschichtig sind und die Kosten einer Simulationsstudie stark von der Komplexität der Problemstellung abhängen (Gibson und Banks 1997, S. 31). Die Regeln fünf und sechs berücksichtigen die für die Simulation vorhandenen Ressourcen. Die drei primär benötigten Ressourcen sind Wissen, Geld und Zeit. Während Wissen durch externe Unterstützung zugekauft werden kann, ist die Verfügbarkeit von ausreichend finanziellen Mitteln und vorhandener Zeit essenziell. Übersteigen die Kosten der Simulationsstudie das vorhandene Budget oder liegt die Frist für die benötigte Entscheidung zu nah in der Zukunft, um das System ausreichend genau zu modellieren, ist von der Simulation abzuraten (Gibson und Banks 1997, S. 31). Ein weiteres Kriterium, welches zu einem Ausschluss führt, ist die Nichtverfügbarkeit von Daten. Die Datenbeschaffung ist ein kritisches Aufgabengebiet innerhalb einer Simulationsstudie. Sollte festgestellt werden, dass die Datenbasis

nicht ausreicht, um belastbare Ergebnisse zu erzeugen, ist die Simulationsstudie zu beenden. Die achte Regel macht deutlich, dass eine Simulation nicht durchgeführt werden soll, wenn das Modell nicht verifiziert und validiert werden kann. In den meisten Fällen hängt dies eng mit der Verfügbarkeit von Personen, Daten und Zeit zusammen (Gibson und Banks 1997, S. 31–32). Das vorletzte Kriterium bezieht sich darauf, dass die Simulation keine Anwendung finden soll, wenn die Erwartungen an die Simulation zu hoch sind. In diesem Fall würde stets die Methodik der Simulation oder der Simulationsexperte für die begrenzten Möglichkeiten eines Simulationsmodells verantwortlich gemacht werden. Das zehnte Ausschlusskriterium thematisiert die Komplexität des Systems. Ist ein System aufgrund der hohen Komplexität nicht in der nötigen Detaillierung zu modellieren, ist die Methode der Simulation ebenfalls nicht geeignet. Ein Beispiel ist die Modellierung des menschlichen Verhaltens in außergewöhnlichen Situationen (Gibson und Banks 1997, S. 32).

Die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 greift die beiden Ansätze von Gibson auf und bildet daraus zum einen Anwendungsfelder der Simulation und zum anderen Gesichtspunkte, anhand derer die Simulationswürdigkeit einer Problemstellung zu prüfen ist. Die Anwendungsfelder geben einen ersten Überblick, unter welchen Bedingungen eine Simulation generell angewendet werden kann. Die Überprüfung der Simulationswürdigkeit ist ein grundsätzlicher Bestandteil einer Simulationsstudie, der vor Beginn oder direkt nach der Beauftragung eines externen Experten durchzuführen ist (Wenzel et al. 2008, S. 16).

Der VDI (2014, S. 5–6) empfiehlt die generelle Anwendung von Simulationen unter folgenden Rahmenbedingungen:

- Das zu untersuchende System weist starke Wirkungszusammenhänge auf und die Systemgrößen sind zeit- und zufallsabhängig.
- Ein System in der Realität nicht existiert.
- Ein Eingriff in ein existierendes System nicht vorgenommen werden kann.
- Verschiedene Gestaltungsvarianten analysiert werden müssen.
- Ein System über einen längeren Zeitraum untersucht wird.
- Bei Anlaufvorgängen und Einschwingphasen.

Die Simulationswürdigkeit zu Beginn einer Simulationsstudie wird, analog zu Gibson und Banks (1997), anhand des Kosten-Nutzen-Verhältnisses, der Komplexität der Aufgabenstellung, der Unsicherheit der Datenlage und deren Einfluss auf die Ergebnisgrößen sowie dem Fehlen alternativer Lösungsmethoden mit adäquatem Kosten-Nutzen-Verhältnis beurteilt (VDI 2014, S. 19–20). Außerdem ergänzt die Richtlinie des VDI, dass das Sicherheitsbedürfnis bei unscharfen Vorgaben

und die Häufigkeit der Verwendung des Simulationsmodells bei der Prüfung der Simulationswürdigkeit zu berücksichtigen sind (VDI 2014, S. 20).

Schulze (1988) führt ein weiteres Kriterium auf, das weder Banks noch der VDI nennen. Bei der Prüfung der Simulationswürdigkeit ist, neben den bereits beschriebenen Kriterien, das Risiko des Verzichts auf Simulation zu berücksichtigen.

Eine konkrete Definition des Begriffs Simulationswürdigkeit erarbeiteten Wenzel et al. (2008), basierend auf den Darstellungen der Literatur.

„Eine Aufgabenstellung ist immer simulationswürdig, wenn die Lösung eines Problems nur mit der Methode Simulation gefunden werden kann. Das ist etwa der Fall, wenn dynamische Prozesse oder stochastische Einflüsse eine nicht zu vernachlässigende Rolle in dem zu untersuchenden System spielen. Die Simulationswürdigkeit ist ebenfalls gegeben, wenn die Lösung mit anderen mathematischen Verfahren zwar möglich wäre, ein Simulationsmodell die Lösung aber wesentlich erleichtert. Sind besondere Anforderungen bezüglich Kommunikation und Visualisierung der Ergebnisse gestellt, so ist die Erstellung eines Simulationsmodells durchaus auch dann zu vertreten, wenn das zugrunde liegende Problem mit anderen Mitteln u. U. sogar einfacher und schneller zu lösen wäre.“ (Wenzel et al. 2008, S. 15)

Wenzel et al. (2008) führen ergänzend auf, dass der Auftraggeber, nachdem die Simulation als mögliches Werkzeug identifiziert wurde, prüfen muss, ob der Aufwand einer Simulationsstudie gerechtfertigt ist. Dabei ist es erforderlich, das zu untersuchende System hinsichtlich aller Kenngrößen zu analysieren, um die benötigte Modellierungsgenauigkeit festzulegen. Mangelt es dem Auftraggeber an Erfahrung bei der Durchführung von Simulationsstudien, wird die Aufgabe an einen Simulationsdienstleister übertragen. Dieser prüft die Simulationswürdigkeit direkt zu Beginn der Simulationsstudie in Abstimmung mit dem Auftraggeber (Wenzel et al. 2008, S. 15–16).

4.2 Entscheidungskriterien für den Einsatz im Supply Chain Management

Die Winter Simulation Conference (WSC) ist das international führende Forum auf dem Gebiet der Simulation. Die WSC ist der zentrale Treffpunkt für Praktiker, Wissenschaftler und Anbieter, um die neuesten Entwicklungen der Simulation vorzustellen (Winter Simulation Conference 2018). Die wissenschaftlichen Beiträge der jährlichen Konferenz werden nach Themengebieten gegliedert und im Anschluss an das Forum als Sammelwerk veröffentlicht. Einer der Themenbereiche befasst sich mit Simulationsstudien aus den Bereichen Transport, Logistik und SCM. Darunter fallen Beiträge, welche die praktische Anwendung von Simulation im SCM anhand von

Case Studies vorstellen und den Einsatz des Werkzeugs Simulation begründen.

Eine deutsche Organisation, die sich mit der Förderung und Weiterentwicklung der Simulation sowie der Modellbildung befasst, ist die Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM). Die ASIM ist in Fachgruppen untergliedert, die sich mit spezifischen Gebieten der Simulation auseinandersetzen. Eine Fachgruppe beschäftigt sich mit der Anwendung der Simulationstechnik in der Produktion und Logistik (Arbeitsgemeinschaft Simulation 2018a). Die Fachgruppe veranstaltet alle zwei Jahre die internationale Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“. Analog zur WSC werden die wissenschaftlichen Beiträge und Fallstudien als Sammelwerk veröffentlicht (Arbeitsgemeinschaft Simulation 2018b). Enthalten sind Beiträge, die sich mit der Anwendung von Simulation bei Fragestellungen des SCM befassen und verschiedene Anwendungsfälle anhand von Fallstudien vorstellen.

Die wissenschaftlichen Beiträge der beiden Simulationskonferenzen, die das Thema der SC Simulation aufgreifen, dienen als Grundlage, um spezifische Entscheidungskriterien für den Einsatz der Simulationstechnik im SCM herauszuarbeiten. Betrachtet werden Beiträge und Fallstudien zwischen den Jahren 2010 und 2017. Insgesamt wurden 12 Beiträge im Detail analysiert, die sich mit der Verwendung von ereignisdiskreter Simulation im SCM befassen. Die nachfolgende Tabelle listet die betrachteten Beiträge und gibt neben dem Autor auch den Tagungsband an, in dem der Beitrag veröffentlicht wurde.

Tabelle 1: Wissenschaftliche Beiträge zum Thema Supply Chain Simulation

Titel	Autor	Quelle
Simulation of a Logistics Network to Import Goods with Unknown Risk to Increase the Security in the Supply Chain	Hellingrath, B.; Böhle, C.; Mittelhoff, M.	Simulation in Produktion und Logistik 2013 (ASIM)
Ganzheitliche Supply-Chain-Optimierung mittels Kombination von mathematischer Optimierung und Simulation	Klaas, A.; Klibi, K.	Simulation in Produktion und Logistik 2015 (ASIM)
Simulation-based Optimization for a Supply Chain with Load Bundling Opportunity	Felberbauer, T.; Peirleitner, A.; Altendorfer, K.	Simulation in Produktion und Logistik 2017 (ASIM)
A Simulation Model to Evaluate Sugarcane Supply Systems	De Assis Rangel, J.; Cunha, A.	WSC 2010

Discrete Event Simulation Combined with Multi-Criteria Decision Analysis Applied to Steel Plant Logistics System Planning	Brito, T.; dos Santos Silva, R.; Botter, R.; Pereira, N.; Medina, A.	WSC 2010
Initial Provisioning and Spare Parts Inventory Network Optimisation in a Multi Maintenance Base Environment	Lendermann, P.; Thirunavukkarasu, A.; Hean Low, M.; McGinnis, L.	WSC 2012
Revenue and Production Management in a Multi-Echelon Supply Chain	Kabirian, A.; Sarfaraz, A.; Rajai, M.	WSC 2013
Solving Location Problems with Simulation Modelling - A Case from the Construction Industry	Persson, F.; Erlandsson, D.; Larsson, A.; Johansson, M.	WSC 2013
Simulation Analysis of Supply Chain Systems with Reverse Logistics	Umeda, S.	WSC 2013
Application of Discrete Event Simulation at Eastman Chemical Company	Lakshmanan, K.	WSC 2014
Modeling a Vaccine Distribution Supply Chain	Krahl, D.; Schwerzmann, J.; Graitcer, S.	WSC 2015
A Simulation Approach for Multi-Stage Supply Chain Optimization to Analyze Real World Transportation Effects	Peirleitner, A.; Altendorfer, K.; Felberbauer, T.	WSC 2016

Die von den Autoren erläuterten Entscheidungskriterien für die Verwendung von Simulation im SCM decken sich zu weiten Teilen mit den im vorherigen Abschnitt erläuterten, allgemeingütigen Entscheidungskriterien. Beispielsweise führen alle Autoren die hohen stochastischen Einflüsse der untersuchten Systeme als Grund für die Nutzung von Simulation auf.

Neben den bereits in der Literatur beschriebenen Entscheidungskriterien werden in den Fallstudien weitere Kriterien genannt, die typisch für den Einsatz von Simulation bei Fragestellungen des SCM sind. Klaas und Klibi (2015), Felberbauer et al. (2017) sowie Brito et al. (2010) nennen gegenläufigen Ziele im SCM als wesentlichen Faktor für den Einsatz von Simulation. Dies betrifft sowohl interne Zielkonflikte als auch unternehmensübergreifende Zielkonflikte, die zwischen den

Unternehmen der verschiedenen Netzwerkstufen auftreten. Die hohen Interdependenzen in der SC Optimierung machen den Einsatz von Simulation unumgänglich, da eine ganzheitliche Optimierung mit mathematischen Methoden nicht möglich ist und die Optimierung einzelner Stufen negative Konsequenzen für das Gesamtsystem hat. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Entscheidung über die Bestellfrequenz und das Bestellvolumen entlang einer SC, die bei lokaler Optimierung den Bullwhip-Effekt als negative Auswirkung hervorrufen kann (Klaas und Klibi 2015, S. 130). Daraus wiederum lassen sich zwei weitere Kriterien ableiten, die bei der Prüfung der Simulationswürdigkeit berücksichtigt werden müssen. Zum einen ist zu bestimmen, ob nur ein Unternehmen der SC Teil der Analyse ist oder ob die SC als ganze Einheit optimiert wird. Zum anderen ist zu prüfen, inwieweit eine Zerlegung des Gesamtsystems in einzelne Subsysteme möglich ist, ohne eine niedrigere Ergebnisqualität zu erhalten.

Ein weiteres Entscheidungskriterium, welches von den Autoren der wissenschaftlichen Beiträge aufgeführt wird, ist die Frage nach dem eigentlichen Ziel der Lösung der Problemstellung. Umeda (2013), Lakshmanan (2014) sowie Krahl et al. (2015) führen als Grund für den Einsatz der Simulationstechnik auf, dass keine Optimierung des Gesamtsystems im Fokus der Fragestellung steht, sondern die Analyse des Systemverhaltens bei verschiedenen What-if-Szenarien. Dies ist typisch für Anwendungsfelder der Simulation im SCM, da durch die Vielzahl der stochastischen Einflüsse und der hohen Systemdynamik die Wirkungszusammenhänge sowie das Systemverhalten nur durch den Einsatz von Simulation analysiert werden können. Krahl et al. (2015) untersuchen beispielsweise, wie sich die Versorgung von Impfstoffen im Falle einer Grippewelle verändert, wenn der herkömmliche Distributionsprozess angepasst wird. Das Ergebnis wird hierbei über den exakten zeitlichen Verlauf einer Grippe ausgewertet, sodass die Dynamik der Verbreitung einer Grippewelle abgebildet wird.

Die analysierten wissenschaftlichen Beiträge der WSC und der ASIM-Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ verdeutlichen, dass neben den allgemeingültigen, in der Literatur diskutierten Entscheidungskriterien weitere SCM-spezifische Entscheidungskriterien bei der Prüfung der Simulationswürdigkeit für Fragestellungen des SCM berücksichtigt werden müssen. Die innerhalb dieses Abschnitts beschriebenen Entscheidungskriterien fließen daher ebenfalls in das Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit ein.

5 Konzept zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit von Problemstellungen des Supply Chain Managements

Die Prüfung der Angemessenheit der Simulation ist Teil einer jeden Simulationsstudie und ist spätestens vor Beginn der Modellbildung durchzuführen. Zum einen ist zu prüfen, ob die Simulation die Rahmenbedingungen der zu analysierenden Problemstellung erfüllen kann und zum anderen ist zu bewerten, ob die Simulation das effizienteste Werkzeug zur Lösung der Fragestellung ist. Alternative Werkzeuge sind herkömmliche Tabellenkalkulationen und der in MS Excel integrierte Solver. Die Grundlagen dieser Werkzeuge sowie die Grundlagen der Simulation sind in Kapitel 3 ausführlich beschrieben und dienen als Basis für dieses Kapitel.

Obwohl die Beurteilung der Simulationswürdigkeit Teil einer jeden Simulationsstudie ist, existiert kein konkreter Leitfaden, anhand dessen die Prüfung der Adäquanz des Werkzeugs durchgeführt werden kann. Für Problemstellungen des SCM wird daher innerhalb dieses Kapitels ein Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit ausgearbeitet. Hierfür werden im ersten Abschnitt die identifizierten Entscheidungskriterien (vgl. Kapitel 4) zu Indikatoren konkretisiert, die auf die Verwendung der ereignisdiskreten Simulation bei Problemstellungen des SCM hinweisen. Diese werden zu einem Kriterienkatalog zusammengefasst und basieren auf allgemeingültigen sowie SCM-spezifischen Kriterien, die auf Basis von in der Praxis durchgeführten SC Simulation-Fallstudien erarbeitet wurden. In Abschnitt 5.2 werden die Vorgehensweise zur Erarbeitung des Konzepts und die verwendete Methodik der Entscheidungsfindung erläutert. Die Verknüpfung der ersten beiden Abschnitte ergibt das Konzept zur Beurteilung der sogenannten Simulationswürdigkeit von Problemen des SCM, welches im abschließenden Abschnitt detailliert vorgestellt wird. Es richtet sich im Speziellen an die Auftraggeber einer Simulationsstudie, die noch vor Beauftragung eines spezialisierten Teams über die Simulationswürdigkeit entscheiden müssen.

Das Konzept zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit wird in MS Excel abgebildet und ist auf einem der Arbeit beigelegten Datenträger enthalten.

5.1 Kriterienkatalog

Die Grundlage des Konzepts zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit bei Fragestellungen im SCM bildet ein ausführlicher Kriterienkatalog. Dieser ist in Tabelle 2 und Tabelle 3 vollständig abgebildet. Im Katalog wird ein Kriterium durch die Nummerierung, die Kategorie, eine kurze

Beschreibung sowie mögliche Ausprägungen näher spezifiziert. Die Nummerierung des Kriteriums erleichtert die anschließende Beschreibung. Die Kategorie fasst die Fragen zu verschiedenen Themengebieten zusammen und dient dazu, diese übersichtlich darzustellen. Die Kriterien sind gemäß den Kategorien geordnet, sodass Fragen, die das gleiche Themengebiet abdecken, nacheinander behandelt werden. Die Beschreibung der Kriterien ist mittels geschlossenen Fragen formuliert, die der Anwender des Konzepts unter Verwendung der möglichen Ausprägungen beantwortet. Die Ausprägungen des Kriteriums geben somit die konkreten Antwortmöglichkeiten vor. Es gibt sowohl binäre Kriterien als auch Kriterien, die drei Ausprägungen besitzen. Eine rein binäre Ausprägung der Kriterien würde das Konzept signifikant vereinfachen. Jedoch wird dies der Vielzahl an unterschiedlichen Systemen im SCM nicht gerecht. Dadurch ist es unumgänglich sowohl binäre als auch Kriterien mit drei möglichen Ausprägungen im Kriterienkatalog aufzuführen. Reicht die binäre Struktur eines Kriteriums nicht aus, folgt im gleichen Themengebiet ein Kriterium, das über drei verschiedene Ausprägungen verfügt, um die Frage genauer zu spezifizieren.

Zusätzlich werden die Kriterien in Ausschlusskriterien und weiche Kriterien aufgeteilt, um die Auswahl einer adäquaten Methode zur Entscheidungsfindung zu erleichtern. Die Ausschlusskriterien sind in Tabelle 2 aufgeführt, die weichen Kriterien in Tabelle 3.

Die Ausschlusskriterien setzen sich hauptsächlich aus den von Gibson und Banks (1997) beschriebenen Regeln zusammen, die eine Übersicht darüber geben, wann auf das Werkzeug der Simulation verzichtet werden sollte (vgl. Abschnitt 4.1). Die Ausschlusskriterien überprüfen somit die generelle Eignung der Simulation für die zu untersuchende Problemstellung des SCM.

Tabelle 2: Kriterienkatalog – Ausschlusskriterien

Nr.	Kategorie	Kriterien zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit	Mögliche Ausprägung
1	Allgemein	Übersteigen die Kosten einer Simulation den Nutzen der Analyse / Optimierung?	Ja / Nein
2	Allgemein	Überschreitet die Dauer der Simulationsstudie die Deadline für die benötigte Entscheidung?	Ja / Nein
3	Allgemein	Ist die Datenlage ausreichend für die Durchführung einer Simulationsstudie?	Ja / Nein
4	Allgemein	Sind ausreichend finanzielle Mittel für die Verwendung der Simulation vorhanden?	Ja / Nein

Während die generelle Eignung der Simulation durch die Ausschlusskriterien geprüft wird, helfen weiche Kriterien bei der Beurteilung der Sinnhaftigkeit und Effizienz des Werkzeugs Simulation gegenüber anderen Werkzeugen. Im Anschluss an Tabelle 3 werden die Kriterien sowie deren Ausprägungen kurz erläutert, um deren Bedeutung für das Konzept zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit deutlich zu machen.

Tabelle 3: Kriterienkatalog – Weiche Kriterien

Nr.	Kategorie	Kriterien zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit	Mögliche Ausprägung
5	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja / Nein
6	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Kurzfristig / Mittelfristig / Langfristig
7	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Ja / Nein
8	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Gering / Mittel / Hoch
9	Allgemein	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut?	Gering / Mittel / Hoch
10	Ziel der Untersuchung	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Systemverständnis / Optimierung
11	Ziel der Untersuchung	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	Ja / Nein
12	Wiederverwendung	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Gering / Mittel / Hoch
13	Dynamik und Stochastik	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	Ja / Nein

14	Dynamik und Stochastik	Wie hoch sind stochastische (zeit-/ zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Gering / Mittel / Hoch
15	Supply Chain spezifisch	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Komplette SC / Teilsystem
16	Supply Chain spezifisch	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne, dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Ja / Nein
17	Supply Chain spezifisch	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (Multi-Objective Optimization/Pareto-Optimierung)	Ja / Nein

Die Frage nach der Verfügbarkeit des zu untersuchenden Systems in der Realität ist für die Entscheidung der Simulationswürdigkeit von hoher Bedeutung. Simulation bietet die Möglichkeit, nicht vorhandene Systeme grafisch abzubilden. Durch die anschauliche Darstellung und der Möglichkeit ein Systemverhalten über verschiedene Experimente zu analysieren, ergibt sich ein klarer Vorteil für den Einsatz von Simulation, sollte das System in der Realität nicht existieren.

Die Simulation ist in der Vorbereitung, Modellierung und Validierung ein zeitintensives Werkzeug. Der Anwender muss daher die Frage beantworten, welcher Zeitraum für die Lösung der Problemstellung zur Verfügung steht. Ist eine kurzfristige Problemlösung notwendig, haben Tabellenkalkulationen einen Vorteil gegenüber der Simulation. Analog verhält sich dies bei analytischen Methoden, die kurz- bis mittelfristig umsetzbar sind. Als kurzfristig wird ein Zeitraum von bis zu vier Wochen eingestuft. Als mittelfristig kategorisiert sind Zeiträume bis zu drei Monaten. Zeiträume über drei Monate sind als langfristig klassifiziert.

Eine geeignete Aufbereitung der Ergebnisse, vor allem in visueller Form, ist hilfreich, um die Entscheidungsträger von einer Lösung zu überzeugen. Im Gegensatz zu Tabellenkalkulationen und analytischen Methoden bietet die Simulation diese Möglichkeit.

Die Simulation gilt als die aufwendigste aber gleichzeitig zuverlässigste Lösungsmöglichkeit von Problemstellungen im SCM. Je höher das Risiko einer falschen Entscheidung ist, desto eher ist die Methodik der Simulation zu empfehlen. Das bestehende Risiko ist unter monetären Gesichtspunkten zu bewerten. Da die monetären Verhältnisse stark von der Branche und der Größe des

Unternehmens abhängen, haben die Projektverantwortlichen des Auftraggebers individuell zu entscheiden, ob das Risiko im vorliegenden Fall als gering, mittel oder hoch einzustufen ist.

Entscheidungen werden leichter getroffen, wenn die vorgeschlagene Lösung nachvollziehbar ist. Die Nachvollziehbarkeit von mathematischen Optimierungen ist stark eingeschränkt, da ein im Hintergrund laufender Algorithmus die Lösung gemäß den gewählten Restriktionen ausgibt. Hierbei ist häufig nicht ersichtlich, ob es sich um ein globales oder lediglich um ein lokales Optimum handelt. Sind Entscheidungsträger nicht mit der mathematischen Optimierung vertraut, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass keine Entscheidung auf Basis des Ergebnisses getroffen wird. Daher ist zu bewerten, inwieweit die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut sind und das erzielte Ergebnis nachvollziehen können.

Ein häufig genannter Grund für die Verwendung von Simulation, in den in Abschnitt 4.2 analysierten Fallstudien, ist das Erlangen eines tiefgründigen Systemverständnisses. Der Anwender muss daher die Frage beantworten, ob eine reine Optimierung eines Systems im Vordergrund der Analyse steht oder ob eine detaillierte Analyse des Systemverhaltens das Ziel der Untersuchung ist. Simulationen eignen sich daher nur bedingt zur Optimierung von Systemen. Die eigentliche Optimierung wird bei Simulationen im Anschluss an die Simulationsdurchführung, durch den Simulations- sowie den Prozessexperten, mittels Anpassungen im Modell bzw. am System durchgeführt.

Ein weiteres Kriterium, das in der Praxis als Grund für die Anwendung von Simulation genannt wird, ist der Vergleich verschiedener Gestaltungsvarianten eines Systems (vgl. Abschnitt 4.1). Die Simulation ermöglicht dies durch einfache Anpassungen am vorhandenen Modell. Anpassungen in Tabellenkalkulationsprogrammen sowie Programmen der mathematischen Optimierung sind häufig deutlich aufwendiger.

Der Modellierungsaufwand, welcher der Durchführung einer Simulation vorausgeht, hat einen hohen Anteil an der Gesamtzeit einer Simulationsstudie. Der Vorteil besteht jedoch darin, dass ein Modell wiederverwendet werden kann und kleinere Anpassungen dabei leicht durchzuführen sind. Wird ein System häufiger untersucht, bzw. ist eine Wiederverwendung des Modells in Aussicht, ändert sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Simulationsstudie. Ein Kriterium, das bei der Entscheidung zur Verwendung der Simulation daher zu berücksichtigen ist, ist die voraussichtliche Häufigkeit der Wiederverwendbarkeit des Modells. Als gering ist die Wiederverwendbarkeit kategorisiert, wenn das Modell in den folgenden zwei Jahren lediglich einmal erneut eingesetzt wird. Eine mittlere Regelmäßigkeit der Wiederverwendung ist die Nutzung des Modells von bis zu viermal innerhalb von zwei Jahren. Eine Wiederverwendung von über viermal in den

kommenden zwei Jahren ist als hoch einzustufen.

Die beiden am häufigsten genannten Motive für die Verwendung von Simulation sind die hohe Dynamik in den zu untersuchenden Systemen sowie die stochastischen Einflüsse, die bei der Analyse zu berücksichtigen sind. Als Dynamik ist ein sich über einen zeitlichen Verlauf änderndes System anzusehen. Von Systemdynamik wird gesprochen, wenn Bedarfsschwankungen oder Bedarfsspitzen über einen zeitlichen Verlauf im System vorliegen. Die Simulation ermöglicht die Berücksichtigung dieser sich zeitlich ändernden Bedarfe. In der mathematischen Optimierung sowie bei herkömmlichen Tabellenkalkulationen können schwankende Bedarfe nur durch Mittelwerte, Grenzwerte oder Sensitivitätsanalysen berücksichtigt werden.

Zeit- und zufallsabhängige Einflussfaktoren sind ein fester Bestandteil von modernen logistischen Systemen. Beispielsweise ist die Lieferzeit von Rohstoffen und Materialien häufig sehr unterschiedlich. Ein weiteres Beispiel ist die Produktionszeit, die stark von zufallsabhängigen Einflüssen, wie der Ausfallzeit einer Anlage, abhängig ist. Simulation ermöglicht es, diese stochastischen Einflüsse im Modell mittels statistischen Funktionen zu berücksichtigen. Je höher die Anzahl an stochastischen Einflüssen in einem System ist, desto besser ist das Werkzeug der Simulation geeignet. Die Höhe der stochastischen Einflüsse eines Systems wird im Rahmen des Konzepts anhand der Anzahl stochastischer Attribute gemessen. Bei null bis fünf stochastischen Attributen sind die stochastischen Einflüsse des Systems als gering einzustufen. Gibt es fünf bis zehn zeit- oder zufallsabhängige Attribute innerhalb des Systems, entspricht dies einer mittleren Ausprägung. Treten mehr als zehn stochastische Attribute auf, unterliegt das System hohen stochastischen Einflüssen. Ein Attribut ist als stochastisch zu klassifizieren, wenn die Ausprägung des Attributs variiert. Die variable Lieferzeit eines spezifischen Rohstoffes oder Materials ist somit als ein stochastisches Attribut anzusehen. Unterliegt die Lieferzeit eines anderen Materials ebenfalls Schwankungen, zählt dies als weiteres stochastisches Attribut.

Neben den allgemeingültigen Entscheidungskriterien existieren auch SCM spezifische Entscheidungskriterien, die zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit hinzuzuziehen sind. Ein wesentlicher Faktor ist der Analyseumfang. Eine ganzheitliche Betrachtung einer SC ist aufgrund der hohen Komplexität, resultierend aus den vernetzten Wirkungszusammenhängen, lediglich unter Verwendung von Simulation in einer geeigneten Qualität möglich. Diese Komplexität wird durch die Reduktion des betrachteten Umfangs signifikant reduziert, da sich die Wirkungszusammenhänge bei der Betrachtung eines einzelnen Unternehmens auf die vor- und nachgelagerten Unternehmen beschränken.

Eine weitere Möglichkeit der Reduktion der Komplexität bei der Lösungsfindung im SCM ist die

Zerlegung des Gesamtsystems in Subsysteme. Der geringere Betrachtungsumfang senkt die Komplexität der einzelnen Systeme. Dadurch können Tabellenkalkulationen sowie analytische Methoden leichter angewendet werden. Hierbei ist jedoch zu prüfen, ob das System ohne Einbußen bei der Ergebnisqualität in Einzelteile zerlegbar ist.

Eine weitere Charaktereigenschaft von modernen Wertschöpfungsnetzwerken sind gegenläufige Ziele der beteiligten Unternehmen. Eine Optimierung von mehreren Zielen ist mittels mathematischen Methoden und herkömmlichen Tabellenkalkulationen nur bedingt möglich. Die Simulation umgeht dieses Problem durch verschiedene Simulationsläufe und einem anpassbaren Simulationsmodell. Dadurch ist es möglich sich dem Gesamtoptimum schrittweise anzunähern.

5.2 Vorgehensweise und Methodik

Das Ziel des Konzepts zur Beurteilung von Problemstellungen im SCM ist, den Projektverantwortlichen des Auftraggebers einer Simulationsstudie einen Leitfaden zu bieten, anhand dessen sie, ausgehend von der zu untersuchenden Problemstellung, entscheiden können, ob die Simulation die geeignete Lösungsmethode ist.

Die nachfolgende Abbildung stellt die Vorgehensweise und Methodik der Konzeption der Prüfung der Simulationswürdigkeit grafisch dar. Der erste Schritt der Vorgehensweise ist die Recherche von Entscheidungskriterien zur Prüfung der Simulationswürdigkeit. Die Recherche teilt sich in allgemeingültige Entscheidungskriterien, die in der Grundlagenliteratur beschrieben sind und SCM-spezifische Kriterien auf. Für die spezifischen Kriterien wurden wissenschaftliche Beiträge von internationalen Simulationskonferenzen zum Thema SC Simulation analysiert, um deren Gründe für die Wahl des Werkzeugs nachzuvollziehen. Die Entscheidungskriterien sind als Fragen formuliert, anhand derer der Anwender die Rahmenbedingungen der vorliegenden Problemstellung hinterfragt.

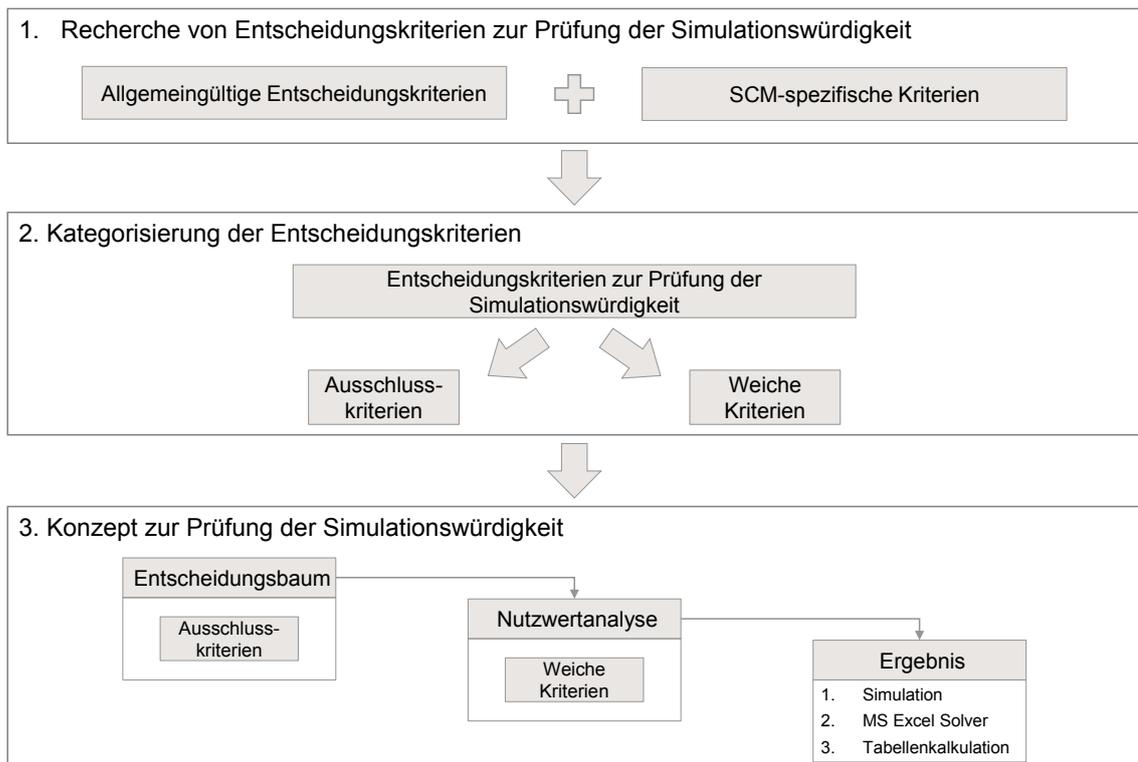


Abbildung 8: Vorgehensweise und Methodik zur Prüfung der Simulationswürdigkeit

Die erarbeiteten Kriterien werden im Anschluss in weiche Kriterien und Ausschlusskriterien unterschieden. Die Kategorisierung hilft, eine geeignete Methodik für das Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit zu finden. Der Kriterienkatalog inklusive der Kategorisierung wurde im ersten Abschnitt des Kapitels im Detail vorgestellt.

Der dritte Schritt der Vorgehensweise ist die Konzeption der Methodik der Prüfung der Simulationswürdigkeit. Hierfür wurde ein zweistufiges Verfahren gewählt, welches als Ergebnis das geeignetste Werkzeug zur Analyse der vorliegenden Problemstellung ausgibt. Die im Rahmen des Konzepts untersuchten Alternativen sind Simulation, herkömmliche Tabellenkalkulationsprogramme sowie der Einsatz von mathematischer Optimierung innerhalb von Tabellenkalkulationsprogrammen.

Die Ausschlusskriterien prüfen, ob Simulation die Anforderungen der zu analysierenden Problemstellung erfüllt oder ob der Einsatz grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Ausschlusskriterien besitzen die Eigenschaft, dass die Antwortmöglichkeiten auf das als Frage formulierte Kriterium eindeutig sind. Bei einer Eindeutigkeit der Auswahlmöglichkeiten sind Entscheidungsbäume eine geeignete Methodik der Entscheidungsfindung. Aufgrund der baumartigen Darstellung sind diese leicht zu verstehen und der Prozess der Entscheidungsfindung ist gut nachzuvollziehen. Ein Entscheidungsbaum kann als Abfolge von „If-Then“ Regeln angesehen werden, die

als Wurzelknoten mit mindestens zwei folgenden Verzweigungen abgebildet werden (Wetterer 2005, S. 64–65). Abbildung 9 verdeutlicht dies und zeigt gleichzeitig die generelle Funktionsweise von Entscheidungsbäumen auf. Das Ziel des dargestellten Entscheidungsbaums ist die Unterstützung einer Führungskraft bei der Frage, inwieweit ein Team in den Entscheidungsprozess miteinzubeziehen ist und wie das Team über das Ergebnis des Prozesses informiert werden soll. Die Antwort wird durch die Verkettung von verschiedenen Fragestellungen gegeben, die sukzessive zu beantworten sind.

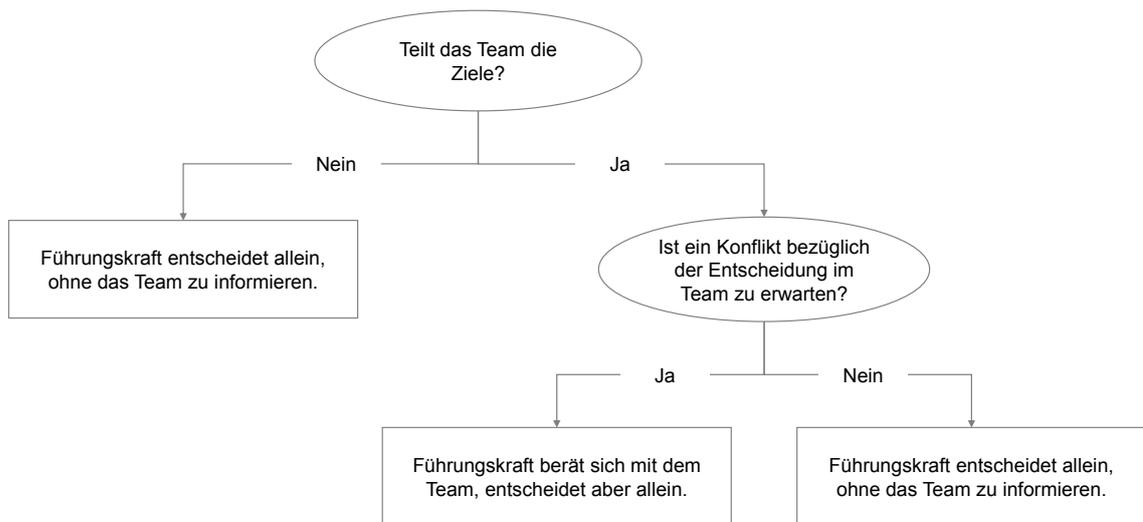


Abbildung 9: Beispielhafte Struktur eines Entscheidungsbaums nach Sauerland und Gewehr (2017, S. 91)

Die grundsätzliche Angemessenheit der Simulation wird in einer ersten Stufe des Konzepts, analog des Beispiels in Abbildung 9, unter Verwendung eines Entscheidungsbaums geprüft. Die Ausschlusskriterien bilden die Wurzelknoten des Entscheidungsbaums. Durch die Beantwortung der in den Wurzelknoten aufgeführten Fragen erfährt der Anwender, ob Simulation für die vorliegende Problemstellung angemessen ist. Die Prüfung der Ausschlusskriterien erfolgt im ersten Schritt des Konzepts, da diese die Verwendung von Simulation definitiv ausschließen können. Wird die Simulation durch eines der Kriterien ausgeschlossen, ist eine weitere Prüfung der Simulationswürdigkeit nicht nötig.

Die Prüfung, ob Simulation das effizienteste Werkzeug zur Lösung der vorliegenden Fragestellung ist, erfolgt in der zweiten Stufe der Eignungsprüfung. Hierfür werden die weichen Entscheidungskriterien herangezogen. Diese benötigen die Möglichkeit einer graduellen Abstufung der Eignung. Eine graduelle Abstufung von Auswahlmöglichkeiten ist bei der Verwendung eines Entscheidungsbaums nicht möglich, da die Bedingung der einzelnen Entscheidungskriterien immer maximal erfüllt sein müssen. Für die Prüfung der effizientesten Methodik wird daher die

Nutzwertanalyse verwendet, die es erlaubt, die Eignung der Werkzeuge je Kriterium graduell zu bewerten.

Die Nutzwertanalyse vergleicht Auswahlmöglichkeiten miteinander, indem die Eignung der Auswahlmöglichkeiten je Kriterium bewertet wird. Zur Durchführung der Nutzwertanalyse werden Entscheidungskriterien gesammelt und gemäß ihrer Bedeutung für das Entscheidungsproblem prozentual gewichtet. Anschließend wird eine Bewertungsskala für den Erfüllungsgrad eines Kriteriums festgelegt und der Zielerfüllungsgrad einer Auswahlmöglichkeit je Kriterium bewertet. Durch die Gewichtung des Kriteriums und dem Zielerfüllungsgrad ergibt sich je Kriterium und Auswahlmöglichkeit ein Punktwert. Die Auswahlmöglichkeit mit der höchsten Summe an Punktwerten stellt die beste Alternative für das vorliegende Entscheidungsproblem dar. Tabelle 4 veranschaulicht das Ergebnis einer Nutzwertanalyse. Auswahlmöglichkeit Y ist, gemäß der Summe der Punktwerte, die geeignetste Alternative für die abgebildete Entscheidungsfindung.

Tabelle 4: Ergebnis einer Nutzwertanalyse mit Bewertungsskala 1-10
nach Kühnappel (2014, S. 19)

<i>Kriterium</i>	<i>Gew. [%]</i>	<i>Auswahlmöglichkeit X</i>		<i>Auswahlmöglichkeit Y</i>	
		Bewertung	Punktwert	Bewertung	Punktwert
<i>A</i>	12,9	3	0,39	1	0,13
<i>B</i>	28,1	4	1,12	7	1,96
<i>C</i>	47,8	2	0,96	4	1,91
<i>D</i>	5,4	7	0,38	9	0,49
<i>E</i>	5,9	9	0,53	10	0,59
Summe	100		3,37		5,08

Die Festlegung der Gewichtung der Kriterien stellt bei der Nutzwertanalyse eine besondere Herausforderung dar, da bei einer hohen Anzahl an Kriterien eine Gewichtung ohne den Einsatz eines geeigneten Verfahrens schnell unübersichtlich wird. Außerdem ist die Gefahr einer subjektiven Gewichtung höher, sollte kein strukturiertes Verfahren gewählt werden (Kühnappel 2014, S. 5–20).

Die Gewichtung der Entscheidungskriterien mittels des Analytic Hierarchy Process (AHP) ermöglicht, durch eine Fragmentierung des Gesamtproblems in handhabbare Teilprobleme, eine objektive Gewichtung. Die Idee des AHP ist, die Bedeutung aller Kriterien paarweise miteinander zu vergleichen. Hierfür werden alle Kriterien in einer Matrix aufgelistet und gegenübergestellt.

Die Bewertungsskala reicht hierbei von 1/9 bis 9. Die Skala ist reziprok, daraus folgt, dass sich aus dem Resultat eines paarweisen Vergleichs der reziproke Wert für den umgekehrten Vergleich ableitet. 1/9 bedeutet, dass ein Kriterium dem anderen absolut unterlegen ist, während 9 dementsprechend absolute Dominanz ausdrückt. Weitere Kriterien sind:

- 1 = gleiche Bedeutung der beiden Elemente
- 3 = etwas höhere Bedeutung des Elements
- 5 = deutlich höhere Bedeutung des Elements
- 7 = viel höhere Bedeutung des Elements

Die Werte 2, 4, 6 und 8 bilden die Zwischenschritte der Skala. Tabelle 5 verdeutlicht die Vorgehensweise sowie die Logik der Methode. Kriterium B hat eine etwas höhere Bedeutung als Kriterium A. Umgekehrt hat Kriterium A somit eine etwas geringere Bedeutung als Kriterium A. In der Matrix ist entweder die obere oder die untere Hälfte der Diagonale zu befüllen, da sich die restlichen Werte aufgrund der Reziprozität ableiten lassen. Die grau schattierte Diagonale ergibt sich, da Kriterium A die gleiche Wichtigkeit hat wie Kriterium A.

Tabelle 5: Beispielhafte paarweise Vergleiche des Analytic Hierarchy Process

<i>Kriterium</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>A</i>	1	1/3	1/5	3	3
<i>B</i>	3	1	1/2	5	4
<i>C</i>	5	2	1	7	6
<i>D</i>	1/3	1/5	1/7	1	1
<i>E</i>	1/3	1/4	1/6	1	1

Sind alle paarweisen Vergleiche abgeschlossen, folgt die Berechnung des Eigenvektors. Der Eigenvektor gibt die Gewichtung der einzelnen Kriterien wieder. Hierfür wird die Matrix quadriert. Abschließend werden die Reihensummen berechnet und normalisiert, indem die Reihensummen durch die Gesamtsumme der Reihensumme dividiert werden. Die normalisierten Werte entsprechen dem Eigenvektor. Die Rechenschritte werden wiederholt, bis die Differenz zwischen den resultierenden Eigenvektoren minimal ist. Tabelle 6 zeigt das Ergebnis der Quadrierung der in Tabelle 5 dargestellten Matrix. Neben den quadrierten Werten sind die Reihensummen sowie der Eigenvektor und die daraus resultierende Gewichtung aufgeführt.

Tabelle 6: Quadrierung der Matrix und Berechnung der Gewichtung der Kriterien

<i>Kriterium</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>Summe</i>	<i>Eigenvektor</i>	<i>Gew. [%]</i>
<i>A</i>	5,00	2,42	1,50	12,07	11,53	32,51	0,1286	12,9
<i>B</i>	11,50	5,00	2,98	26,50	25,00	70,98	0,2807	28,1
<i>C</i>	20,33	8,57	5,00	45,00	42,00	120,90	0,4782	47,8
<i>D</i>	2,31	1,05	0,62	5,00	4,66	13,64	0,0539	5,4
<i>E</i>	2,58	1,14	0,67	5,42	5,00	14,81	0,0586	5,9
<i>Summe</i>						252,84	1,0000	100

Wie bereits erwähnt, ergibt sich der Punktwert einer Auswahlmöglichkeit aus der Multiplikation der Gewichtung eines Kriteriums mit der Bewertung der Eignung einer Auswahlmöglichkeit. Nachdem das Vorgehen zur Bestimmung der Kriteriengewichte erläutert wurde, folgt nun die Vorstellung der angewendeten Bewertungsskala. Das Ziel der Bewertungsskala ist, die Frage zu beantworten, in welchem Maße eine Auswahlmöglichkeit ein Kriterium erfüllt.

Für das Konzept der Bewertung der Simulationswürdigkeit wird eine klassische 10er-Skala verwendet (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Skala zur Bewertung der Auswahlmöglichkeiten nach (Kühnapfel 2014, S. 17)

Punkte	Bedeutung
0	Auswahlmöglichkeit ist nicht nützlich
1-3	Auswahlmöglichkeit ist unzureichend und nur bedingt nützlich
4-6	Auswahlmöglichkeit ist hinreichend aber mit Mängeln nützlich
7-9	Auswahlmöglichkeit ist sehr nützlich
10	Auswahlmöglichkeit ist außerordentlich nützlich

Die verwendete Skala wurde gewählt, da sie leicht verständlich ist und aufgrund der Orientierungskorridore keinen Spielraum für Interpretationen bietet. Außerdem ist sie weder zu weit gespreizt noch zu stark eingegrenzt. Daher bietet die Skala trotz der Einfachheit das nötige Maß an Differenzierung.

5.3 Konzept zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit

Nachdem die Vorgehensweise der Konzeptionierung, die verwendete Methodik sowie der zugrundeliegende Kriterienkatalog in den vorherigen Abschnitten ausführlich vorgestellt wurden, folgt an dieser Stelle eine detaillierte Erläuterung des Konzepts zur Prüfung der Simulationswürdigkeit bei Problemstellungen des SCM. Das zweistufige Konzept zur Entscheidungsfindung, bestehend aus einem Entscheidungsbaum und einer Nutzwertanalyse, wird nachfolgend mit den konkretisierten Entscheidungskriterien kombiniert. Das Resultat ist ein für Anwender nutzbarer Leitfaden. Dieser basiert auf den Ausschlusskriterien und den weichen Kriterien, die sukzessive zu beantworten sind, um final das Ergebnis der Beurteilung der Simulationswürdigkeit zu erhalten. Der Leitfaden ist mittels des Tabellenkalkulationsprogramms MS Excel gestaltet, um eine einfache Handhabbarkeit und eine automatisierte Auswertung zu ermöglichen. Die Erläuterungen der Hintergründe sowie der Funktionsweise des Konzepts erfolgen daher anhand von Grafiken aus MS Excel. Die Excel-Datei ist der Arbeit auf einem separaten Datenträger beigelegt.

Das in MS Excel abgebildete Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit umfasst drei Hauptbestandteile: einen Fragenkatalog, der sowohl die Ausschlusskriterien als auch die weichen Entscheidungskriterien enthält, den Entscheidungsbaum zur Prüfung der generellen Eignung von Simulation und die Nutzwertanalyse, die das effiziente Werkzeug zur Lösung der Fallstudie ermittelt. Die Hauptbestandteile werden durch weitere Funktionen gestützt, die ebenfalls erläutert werden. Hierbei sind vor allem die Umsetzung der Gewichtung der Entscheidungskriterien anhand des AHP und die Bewertung der Ausprägungen der Entscheidungskriterien zu nennen.

Der zentrale Bestandteil des Konzepts ist der Fragenkatalog, der alle Entscheidungskriterien beinhaltet. Die Trennung der Kriterien sowie deren Reihenfolge erfolgt analog zu den in Abschnitt 5.1 vorgestellten Tabellen. Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt des Fragekatalogs. Neben der Beschreibung der Kriterien, sind die Nummerierung sowie die Art und die Kategorie der Kriterien abgebildet. Die Ausprägung des Entscheidungskriteriums ist durch den Anwender auszufüllen. Um dies zu verdeutlichen, sind die zu entsprechenden Zellen grün schattiert. Die vorgegebenen Antwortmöglichkeiten können über Dropdown-Listen ausgewählt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass nur die gegebenen Ausprägungen als Antworten ausgewählt werden können.

A	B	C	D	E	F	G
1						
2	Kriterium-Nr.	Art	Kategorie	Kriterium	Antwort	
3	1	Ausschluss	Allgemein	Übersteigen die Kosten einer Simulation den Nutzen der Analyse / Optimierung?	Nein	
4	2	Ausschluss	Allgemein	Überschreitet die Dauer d. Simulationsstudie die Deadline für die benötigte Entscheidung?	Ja	
5	3	Ausschluss	Allgemein	Ist die Datenlage ausreichend für die Durchführung einer Simulationsstudie?	Ja	
6	4	Ausschluss	Allgemein	Sind ausreichend finanzielle Mittel für die Verwendung der Simulation vorhanden?	Nein	
7						
8	5	Weich	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja	
9	6	Weich	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Kurzfristig	
10	7	Weich	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Ja	
11	8	Weich	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Mittel	
12	9	Weich	Allgemein	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Hoch	

Abbildung 10: Ausschnitt des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit

Eine Übersicht über die auswählbaren Antworten steht entweder direkt in der Dropdown-Liste oder in einem ebenfalls integrierten Kriterienkatalog zur Verfügung. Dieser führt alle möglichen Ausprägungen eines Kriteriums in einem separaten Tabellenblatt auf. Der Kriterienkatalog enthält die gleichen Informationen, die in den Tabellen 2 und 3 gelistet sind. Abbildung 11 verdeutlicht die Funktion der Dropdown-Liste. Außerdem wird die Implementierung des Entscheidungsbaums dargestellt, da sich die auszufüllenden Zellen nur grün färben, wenn die Angemessenheit der Simulation nicht ausgeschlossen ist.

Kriterium-Nr.	Art	Kategorie	Kriterium	Antwort
1	Ausschluss	Allgemein	Übersteigen die Kosten einer Simulation den Nutzen der Analyse / Optimierung?	Nein
2	Ausschluss	Allgemein	Überschreitet die Dauer d. Simulationsstudie die Deadline für die benötigte Entscheidung?	Nein
3	Ausschluss	Allgemein	Ist die Datenlage ausreichend für die Durchführung einer Simulationsstudie?	Ja
4	Ausschluss	Allgemein	Sind ausreichend finanzielle Mittel für die Verwendung der Simulation vorhanden?	Ja
5	Weich	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja
6	Weich	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Kurzfristig
7	Weich	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Kurzfristig Mittelfristig Langfristig
8	Weich	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Mittel

Abbildung 11: Funktionsweise Dropdown-Liste und Umsetzung Entscheidungsbaum

Die Umsetzung der ersten Stufe der Prüfung der Simulationswürdigkeit ist ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Konzepts. Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, wird in der ersten Stufe mittels eines Entscheidungsbaums geprüft, ob die Simulation für die vorliegende Problemstellung grundsätzlich angemessen ist. Abbildung 12 bildet die Logik des in MS Excel implementierten Entscheidungsbaums ab. Das erste Entscheidungskriterium thematisiert das Kosten-Nutzen-Verhältnis der vorliegenden Problemstellung. Übersteigen die Kosten der Simulation den maximal erzielbaren Nutzen, ist die Simulation für die Problemstellung nicht geeignet. Analog verhält sich

dies, sobald die erwartete Dauer der Simulationsstudie die Frist der benötigten Entscheidung überschreitet. In der dritten Ebene des Entscheidungsbaums ist zu prüfen, ob die Datenlagen für die Durchführung einer Simulationsstudie ausreicht. Eine Simulationsstudie ist nur bei ausreichender Datenlage erfolgsversprechend. Ist diese Prämisse nicht gegeben, sollte das Werkzeug nicht verwendet werden.

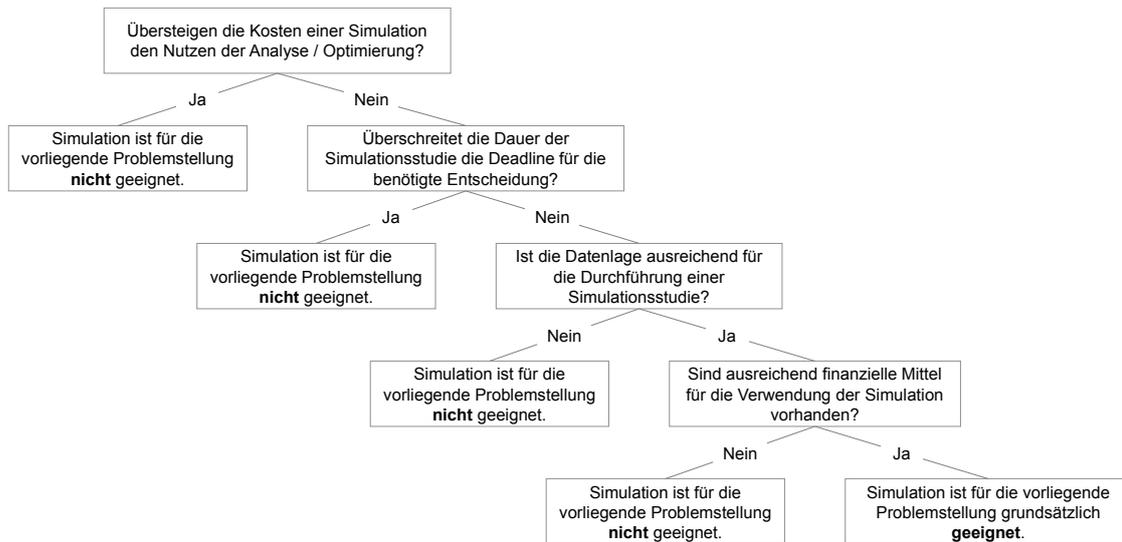


Abbildung 12: Entscheidungsbaum – Ist die Simulation die Anforderungen der vorliegenden Problemstellung geeignet?

Im Rahmen des Entscheidungsbaums ist final zu prüfen, ob die vorhandenen finanziellen Mittel für die Durchführung einer Simulationsstudie ausreichen. Dieses Kriterium ist das abschließende Ausschlusskriterium, da die finanziellen Mittel zum Teil noch angepasst werden können, sollten die restlichen Kriterien die Verwendung von Simulation empfehlen.

Die für den Entscheidungsbaum relevanten Kriterien sind ebenfalls im Fragenkatalog enthalten und müssen, wie aus Abbildung 10 und 11 hervorgeht, innerhalb des Fragebogens über die Dropdown-Liste ausgewählt werden. Das nächste Entscheidungskriterium ist zu beantworten, sobald die Angemessenheit der Simulation durch das vorhergehende Kriterium nicht ausgeschlossen wurde. Deutlich wird dies, da das folgende Kriterium im Fragenkatalog nicht mehr ausgegraut ist und die auszufüllende Zelle grün schattiert ist. Ob die generelle Simulationswürdigkeit nach vollständiger Beantwortung der Ausschlusskriterien gegeben ist, wird zum einen anhand des Fragenkatalogs deutlich und zum anderen in einem zentralen Tabellenblatt zur Ergebnisdarstellung der Prüfung der Simulationswürdigkeit angezeigt. Innerhalb des Fragenkatalogs ist dies daran zu erkennen, dass die weichen Entscheidungskriterien ausgegraut sind, falls die vorliegende Problemstellung die Voraussetzungen der ersten Stufe des Konzepts nicht erfüllt. Eine Beantwortung der weichen Entscheidungskriterien ist somit nicht notwendig. Abbildung 13 zeigt die Darstellung

des Ergebnisses der ersten Stufe des Konzepts in einem Tabellenblatt, das der Ergebnisdarstellung dient. In Spalte E ist die durch den Anwender gegebene Antwort dargestellt.

	A	B	C	D	E	F	
1							
2		Stufe I: Entscheidungsbaum					
3							
4		Kriterium-Nr.	Kategorie	Kriterium	Gewählte Ausprägung	Simulationswürdig	
5		1	Allgemein	Übersteigen die Kosten einer Simulation den Nutzen der Analyse / Optimierung?	Nein	Ja	
6		2	Allgemein	Überschreitet die Dauer d. Simulationsstudie die Deadline für die benötigte Entscheidung?	Nein	Ja	
7		3	Allgemein	Ist die Datenlage ausreichend für die Durchführung einer Simulationsstudie?	Ja	Ja	
8		4	Allgemein	Sind ausreichend finanzielle Mittel für die Verwendung der Simulation vorhanden?	Ja	Ja	
10		Ergebnis Stufe I:				Ist die generelle Simulationswürdigkeit gegeben?	Ja

Abbildung 13: Ergebnisdarstellung Stufe 1 – Entscheidungsbaum

In Spalte F erfolgt die Prüfung der Simulationswürdigkeit je Ausschlusskriterium. Sind alle Entscheidungskriterien als simulationswürdig eingestuft, bestätigt Zelle F10 die generelle Eignung der Simulation für die vorliegende Problemstellung. In diesem Fall ist die Zelle grün schattiert. Verstößt ein Kriterium gegen die Voraussetzung der Simulationswürdigkeit, ist Zelle F10 rot gefärbt. Die Durchführung der Nutzwertanalyse ist in diesem Fall nicht nötig.

Ist die generelle Simulationswürdigkeit durch den Entscheidungsbaum bestätigt, folgt die zweite Stufe der Prüfung der Simulationswürdigkeit. Der Einsatz der Nutzwertanalyse dient dazu, das effizienteste Werkzeug zur Lösung der vorliegenden Fragestellung zu ermitteln. Analog zur ersten Stufe sind die für die Nutzwertanalyse herangezogenen Entscheidungskriterien im Fragenkatalog enthalten. In der zweiten Stufe des Konzepts werden die weichen Entscheidungskriterien berücksichtigt. Die Beantwortung dieser Kriterien ist jedoch nur möglich, falls das Ergebnis des Entscheidungsbaums den Einsatz von Simulation nicht ausschließt. In diesem Fall sind die weichen Kriterien nicht ausgegraut und alle auszufüllenden Felder sind grün schattiert.

Die Nutzwertanalyse ist vollständig im Tabellenblatt der Ergebnisdarstellung enthalten. Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt dieses Tabellenblatts. Dargestellt sind die für die Nutzwertanalyse hinzugezogenen Entscheidungskriterien sowie die im Fragenkatalog ausgewählten Antworten. Diese werden automatisch vom Fragenkatalog in die Ergebnisübersicht übertragen und sind in der Abbildung beispielhaft gewählt. Zusätzlich sind in Spalte F die Gewichtungen der einzelnen Kriterien aufgeführt. Die Gewichtungen werden für die Bewertung der einzelnen Analysewerkzeuge hinzugezogen und wurden mittels des AHP berechnet. Mit 21,2 % ist die Höhe der stochastischen Einflüsse das wichtigste Kriterium der Nutzwertanalyse. Ein ebenso wichtiges Kriterium ist die Frage nach gegenläufigen Zielen im Rahmen der Analyse bzw. Optimierung. Die Antwort

auf die Adäquanz der Simulation für eine Problemstellung im SCM ist daher zu einem großen Teil von diesen beiden Entscheidungskriterien abhängig. Eher unwichtig sind dagegen die Verfügbarkeit des Systems in der Realität sowie der Erfahrungsschatz der Entscheider mit analytischen Methoden.

A	B	C	D	E	F
13	Stufe II: Nutzwertanalyse				
14					
15	Kriterium-Nr.	Kategorie	Kriterium	Gewählte Ausprägung	Gewichtung
16	5	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja	2.08%
17	6	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Kurzfristig	4.33%
18	7	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Ja	4.59%
19	8	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Mittel	11.60%
20	9	Allgemein	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Hoch	1.35%
21					
22	10	Ziel der Untersuchung	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Besseres Systemverständnis	11.92%
23	11	Ziel der Untersuchung	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	Nein	3.90%
24					
25	12	Wiederverwendung des Modells	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Gering	8.49%
26					
27	13	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	Ja	5.61%
28	14	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Wie hoch sind stochastische (zeit-/ zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Hoch	21.16%
29					
30	15	SC spezifisch	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Komplette Supply Chain	5.06%
31	16	SC spezifisch	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Ja	2.27%
32	17	SC spezifisch	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (multi-objective optimization/Pareto-Optimierung)	Ja	17.62%
33	100.00%				

Abbildung 14: Entscheidungskriterien der Nutzwertanalyse inklusive Gewichtung

Die Grundlage der Berechnung der Kriteriengewichte sind paarweise Vergleiche zwischen den einzelnen Kriterien. Es werden die für die Nutzwertanalyse herangezogenen Kriterien direkt miteinander verglichen und deren Bedeutung für das gesamthafte Entscheidungsproblem in Relation gesetzt (vgl. Abschnitt 5.2).

Abbildung 15 zeigt die paarweisen Vergleiche der Berechnung der Kriteriengewichte. Hierfür wird ein separates Tabellenblatt in MS Excel verwendet, um den AHP in das Konzept der Prüfung der Simulationswürdigkeit zu integrieren und eine dynamische Kopplung mit der Nutzwertanalyse zu erreichen.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	<p>Paarweiser Vergleich AHP-Methode:</p> <p><u>Vergleich der Bedeutung von zwei Kriterien:</u> 1/9 = absolut unterlegen 1 = gleiche Bedeutung der beiden Elemente 3 = etwas höhere Bedeutung des Elements 5 = deutlich höhere Bedeutung des Elements 7 = viel höhere Bedeutung des Elements 9 = absolut dominierende Bedeutung des Elements</p>														
2		Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	Wie hoch sind stochastische (zeit- / zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (multi-objective optimization/Pareto-Optimierung)	
3		Nr.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
4	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	5	1	1/3	1/3	1/5	3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/7	1/3	1	1/7
5	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	6	3	1	2	1/4	4	1/4	1	1/2	1/2	1/4	1/2	3	1/4
6	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	7	3	1/2	1	1/3	3	1/3	3	1/3	1	1/5	1	3	1/5
7	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	8	5	4	3	1	7	1	3	3	3	1/3	3	3	1/3
8	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	9	1/3	1/4	1/3	1/7	1	1/7	1/5	1/5	1/5	1/7	1/5	1/3	1/7
9	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	10	5	4	3	1	7	1	3	3	3	1/3	3	5	1/3
10	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	11	3	1	1/3	1/3	5	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1	3	1/5
11	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	12	3	2	3	1/3	5	1/3	3	1	3	1/3	3	5	1/3
12	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	13	3	2	1	1/3	5	1/3	3	1/3	1	1/3	1	3	1/3
13	Wie hoch sind stochastische (zeit- / zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	14	7	4	5	3	7	3	5	3	3	1	3	5	3
14	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	15	3	2	1	1/3	5	1/3	1	1/3	1	1/3	1	3	1/3
15	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	16	1	1/3	1/3	1/3	3	1/5	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1/5
16	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (multi-objective optimization/Pareto-Optimierung)	17	7	4	5	3	7	3	5	3	3	1/3	3	5	1

Abbildung 15: Paarweise Vergleiche des AHP

Die bei der Nutzwertanalyse berücksichtigten Entscheidungskriterien sind in den Spalten und Zeilen des Tabellenblatts abgetragen. In den Zellen der Matrix werden somit die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche abgebildet. Zelle D9 drückt beispielsweise aus, dass das Kriterium bezüglich des primären Nutzens der Analyse eine deutlich höhere Bedeutung hat als das Kriterium, welches das Vorhandensein des Systems in der Realität thematisiert. Auf diese Weise wird jedes Kriterium mit jedem anderen Kriterium der Nutzwertanalyse verglichen.

Zur detaillierten Erläuterung der Funktionsweise des AHP werden die paarweisen Vergleiche des Entscheidungskriteriums bezüglich der Höhe der stochastischen Einflüsse, die in Zeile 13 aufgeführt sind, nachfolgend näher vorgestellt. Hierbei wird deutlich, weshalb die Höhe der stochastischen Einflüsse eine große Bedeutung bei der Prüfung der Adäquanz der Simulationswürdigkeit besitzt. Alle weiteren paarweisen Vergleiche werden aufgrund der großen Menge nicht detailliert erläutert und sind Abbildung 15 zu entnehmen.

Die Höhe der stochastischen Einflüsse hat eine viel höhere Bedeutung als folgende Entscheidungskriterien:

- Das Vorhandensein des Systems in der Realität.
- Die Vertrautheit der Entscheidungsträger mit analytischen Methoden.

Das Nichtvorhandensein des zu untersuchenden Systems hat keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Analyseergebnisse. Es ist jedoch eine Hilfe bei der Erreichung eines tiefergehenden Systemverständnisses, wenn das System mittels eines Modells adaptiv abgebildet wird. Daher ist es ein Kriterium, das bei der Prüfung der Adäquanz der Simulation bei Problemstellungen des SCM berücksichtigt werden muss. Die Bedeutung im Vergleich zu anderen Kriterien ist jedoch gering. Ebenfalls geringe Auswirkungen auf die Ergebnisqualität hat die Vertrautheit der Entscheidungsträger mit analytischen Methoden. Diese treffen zwar deutlich leichter Entscheidungen, wenn der Lösungsweg verständlich ist, im Vergleich mit der Höhe der stochastischen Einflüsse ist dies aber signifikant unbedeutender.

Die Höhe der stochastischen Einflüsse hat eine deutlich höhere Bedeutung als folgende Entscheidungskriterien:

- Der Zeitraum in dem das Ergebnis der Untersuchung benötigt wird.
- Die Notwendigkeit einer Visualisierung der Ergebnisse.
- Die Untersuchung verschiedener Gestaltungsvarianten des Systems.
- Die Möglichkeit einer Zerlegung des Systems in Einzelteile.

Die Bedeutung des verfügbaren Zeitraums zur Analyse des Ergebnisses ist als niedriger eingestuft, da in der ersten Stufe des Konzepts bereits geprüft wurde, ob genug Zeit für den Einsatz von Simulation vorhanden ist. Dennoch muss dieses Kriterium bei der Nutzwertanalyse hinzugezogen werden, da andere Werkzeuge bei kurz- bzw. mittelfristig benötigten Analysen besser geeignet sind. Simulation bietet, im Gegensatz zu anderen Werkzeugen, die Möglichkeit ein System zu visualisieren und anschaulich darzustellen. Dies hat jedoch nur geringe Auswirkungen auf die Qualität des Ergebnisses einer Analyse bzw. Optimierung. Daher hat die Notwendigkeit einer Visualisierung einen deutlich geringeren Einfluss auf die Gesamtentscheidung als die Höhe der stochastischen Einflüsse. Ebenso hat das Entscheidungskriterium bezüglich der Untersuchung verschiedener Gestaltungsvarianten eine deutlich geringere Relevanz, da verschiedene Gestaltungsvarianten prinzipiell mit jedem der vorhandenen Werkzeuge analysiert werden können. Simulation vereinfacht dies durch ein leicht anpassbares Modell. Die Möglichkeit ein System, ohne einen Verlust der Ergebnisqualität, in Subsysteme zu zerlegen, erleichtert den Einsatz analytischer Methoden sowie Tabellenkalkulationen. Es schließt diese Methoden jedoch nicht vollständig aus, sollte die Zerlegung in Subsysteme nicht möglich sein.

Die Höhe der stochastischen Einflüsse hat eine etwas höhere Bedeutung als folgende Entscheidungskriterien:

- Die Höhe des Risikos bei einem Verzicht von Simulation.
- Das Hauptziel der Untersuchung eines Systems.
- Die Regelmäßigkeit in der das System untersucht wird.
- Die Dynamik des Systemverhaltens.
- Der Untersuchungsumfang der Supply Chain.
- Das Vorhandensein von gegenläufigen Zielen im Rahmen der Untersuchung.

Die genannten Kriterien haben alle eine hohe Bedeutung für die Prüfung der Angemessenheit der Simulation. Jedoch ist deren Relevanz etwas geringer einzustufen als die Höhe der Bedeutung der stochastischen Einflüsse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Höhe der stochastischen Einflüsse in den Beiträgen der Simulationskonferenzen das meistgenannte Kriterium für den Einsatz von Simulation ist (vgl. Abschnitt 4.2).

Im Anschluss an die paarweisen Vergleiche folgt, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, die Berechnung der Eigenvektoren. Hierbei wird das bereits erläuterte Vorgehen in MS Excel umgesetzt. Auf eine Erklärung der Umsetzung wird verzichtet, da es für das Verständnis des Konzepts der Prüfung der Simulationswürdigkeit keinen Mehrwert bietet.

Für die Bewertung der Eignung der Analysewerkzeuge wird, neben der Gewichtung der Entscheidungskriterien, eine Bewertungsskala zur Bepunktung der Auswahlmöglichkeiten je Entscheidungskriterium benötigt. Als Skala wird im vorliegenden Konzept eine 10er-Skala gewählt, da diese leicht nachvollziehbar ist und dennoch eine ausreichende Differenzierung zulässt (vgl. Abschnitt 5.2). Anhand der Bewertungsskala wird jeder Ausprägung eines Entscheidungskriteriums ein Punktwert zugeordnet, der die Eignung einer Auswahlmöglichkeit widerspiegelt. Die zugrundeliegende Übersetzungstabelle ist in Tabelle 7 aufgeführt. Die nachfolgende Tabelle listet die Bepunktung der Analysewerkzeuge je Ausprägung der Entscheidungskriterien. Diese ist analog in MS Excel umgesetzt und mit der Nutzwertanalyse verknüpft, damit der zu einer Ausprägung gehörige Punktwert automatisch in die Nutzwertanalyse eingefügt wird.

Tabelle 8: Bepunktung der Analysewerkzeuge je Ausprägung

Kriterien zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit	Ausprägung	Bepunktung		
		Tabellenkalkulation	MS Excel Solver	Simulation
Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja	7	7	7
	Nein	7	7	9
In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Kurzfristig	9	3	0
	Mittelfristig	7	9	3
	Langfristig	7	7	9
Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Ja	5	5	10
	Nein	7	7	7
Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Gering	10	8	6
	Mittel	7	7	7
	Hoch	4	6	9
Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit einer analytischen Methode vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Gering	7	3	7
	Mittel	7	7	7
	Hoch	7	9	7
Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeuges ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Systemverständnis	6	6	10
	Optimierung	7	9	5
Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	Ja	7	7	9
	Nein	7	7	7
In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Gering	7	7	5
	Mittel	7	7	7
	Hoch	7	7	9

Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen?	Ja	5	5	9
	Nein	7	7	5
Wie hoch sind stochastische (zeit-/ zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Gering	9	9	4
	Mittel	5	5	7
	Hoch	2	2	10
Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Komplette SC	4	4	10
	Einzelne Teile der SC	8	8	6
Ist das System in Einzelteile zerlegbar, ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Ja	8	8	6
	Nein	3	3	9
Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen?	Ja	3	3	9
	Nein	8	8	5

Abbildung 16 zeigt die Nutzwertanalyse, die im selben Tabellenblatt wie das Ergebnis der ersten Stufe des Konzepts enthalten ist. Die Spalten B bis F sind identisch zu den in Abbildung 14 dargestellten Spalten und enthalten die Beschreibung der Entscheidungskriterien, die zugehörige Gewichtung sowie die im Fragebogen ausgewählte Ausprägung. Die Bepunktung der Analysewerkzeuge, die aus Tabelle 8 hervorgeht, ist in den Spalten H, K und N, abhängig von der gewählten Ausprägung, aufgeführt. Die Bewertung der Analysewerkzeuge ist das Summenprodukt der Kriteriengewichte und der Punktwerte der gewählten Ausprägungen. Je höher der Wert des Summenprodukts desto geeigneter ist das Analysewerkzeug. Der maximal erreichbare Wert ist 10,0. Resultierend aus den gewählten Ausprägungen je Entscheidungskriterium ist die Simulation mit einem Wert von 8,25 das effizienteste Werkzeug zur Analyse des charakterisierten Systems.

Das finale Ergebnis des übergeordneten Konzepts zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit von Problemen des SCM stellt Zelle F37 dar. Das Resultat ergibt sich aus der Prüfung der generellen Eignung der Simulation im Rahmen der ersten Stufe des Konzepts und dem Ergebnis der Nutzwertanalyse. Eine Problemstellung des SCM ist als simulationswürdig bewertet, wenn die erste Stufe des Konzepts Simulation als generell geeignet einstuft und die Nutzwertanalyse die Simulation als effizientestes, zur Auswahl stehendes Werkzeug bestätigt.

A	B	C	D	E	F	H	I	K	L	N	O
13	Stufe II: Nutzwertanalyse										
14						Tabellenkalkulation		MS Excel Solver		Simulation	
15	Kriterium-Nr.	Kategorie	Kriterium	Gewählte Ausprägung	Gewichtung	Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert
16	5	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja	2.08%	7	0.1	7	0.1	7	0.1
17	6	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Kurzfristig	4.33%	9	0.4	3	0.1	0	0.0
18	7	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Ja	4.59%	5	0.2	5	0.2	10	0.5
19	8	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Mittel	11.60%	7	0.8	7	0.8	7	0.8
20	9	Allgemein	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Hoch	1.35%	7	0.1	9	0.1	7	0.1
21											
22	10	Ziel der Untersuchung	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Besseres Systemverständnis	11.92%	6	0.7	6	0.7	10	1.2
23	11	Ziel der Untersuchung	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	Nein	3.90%	7	0.3	7	0.3	7	0.3
24											
25	12	Wiederverwendung des Modells	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Gering	8.49%	7	0.6	7	0.6	5	0.4
26											
27	13	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	Ja	5.61%	5	0.3	5	0.3	9	0.5
28	14	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Wie hoch sind stochastische (zeit-/ zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Hoch	21.16%	2	0.4	2	0.4	10	2.1
29											
30	15	SC spezifisch	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Komplette Supply Chain	5.06%	4	0.2	4	0.2	10	0.5
31	16	SC spezifisch	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Ja	2.27%	8	0.2	8	0.2	6	0.1
32	17	SC spezifisch	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (multi-objective optimization/Pareto-Optimierung)	Ja	17.62%	3	0.5	3	0.5	9	1.6
33					100.00%						
34					Summe	4.87		4.64		8.25	
35					Rang	2		3		1	
36											
37	Ergebnis Prüfung Simulationswürdigkeit:			Ist die Simulationswürdigkeit gegeben?		Ja					

Abbildung 16: Ergebnisdarstellung Stufe 2 – Nutzwertanalyse

6 Erprobung des Konzepts zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit

Im abschließenden Kapitel der Arbeit erfolgt die Erprobung des entwickelten Konzepts zur Beurteilung der Simulationswürdigkeit von Problemstellungen des SCM. Hierfür wird eine reale Problemstellung des SCM im Detail vorgestellt und mittels MS Excel modelliert. Das Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit und im Speziellen die enthaltenen Entscheidungskriterien dienen als Leitlinien, um die Grenzen der Tabellenkalkulation sowie die Vorteile der Simulation strukturiert aufzuführen.

Das Fallbeispiel thematisiert die Bestimmung der optimalen Flottengröße des Distributionsnetzwerks eines produzierenden Unternehmens. Bei einem Teil der Produktionsstandorte erfolgt die Distribution der Fertigerzeugnisse ausschließlich mittels eines intern disponierten Fuhrparks, der von Transportunternehmen eingekauft wird. Die Höhe der benötigten Ressourcen hat somit direkten Einfluss auf die Transportkosten. Zielstellung des Fallbeispiels ist, zu untersuchen, ob eine Reduzierung der Transportressourcen möglich ist, um die entstehenden Kosten intern zu optimieren.

Die beschriebene Problemstellung ist dem taktischen SCM zuzuordnen (vgl. Abschnitt 2.2). Als Teil der Distributionsplanung ist die Bestimmung der Flottengröße von jedem produzierenden Unternehmen zu tätigen, das Materialien und Erzeugnisse durch einen selbstständig disponierten Fuhrpark transportiert. Ziel dieser Teilaufgabe des SCM ist, die benötigten Transportressourcen für die nächsten sechs bis zwölf Monate sicherzustellen. Die Bestimmung der Flottengröße ist ein in wissenschaftlichen Artikeln häufig behandeltes Problem, da es sich zu weiten Teilen mit klassischen Vehicle-Routing-Problemen überschneidet. Ein verbreiteter Ansatz zur Lösung solcher Probleme sind Verfahren der mathematischen Optimierung. Die hohe Dynamik des Systems sowie die stochastischen Einflüsse auf das System erfordern jedoch eine detaillierte Untersuchung der Auswahl eines geeigneten Werkzeugs zur Lösung der vorliegenden Problemstellung.

6.1 Konzeptmodell

Der Untersuchungsgegenstand der Fallstudie ist das Distributionsnetzwerk eines produzierenden Unternehmens. Das Unternehmen verfügt über mehrere Produktionsstandorte in Deutschland. Fünf dieser Standorte beliefern den Endkunden mittels eigens disponierten Fahrzeugen, die von

Transportunternehmen bezogen werden. Die Abnahmemenge wird bilateral mit den Transportunternehmen vereinbart. Der Planungshorizont liegt bei sechs bis zwölf Monaten. Die Fahrzeuge werden zu einem individuell verhandelten Festpreis je Tag abgerechnet. Die Anzahl der zugestellten Sendung hat somit keine Auswirkung auf die entstehenden Transportkosten je Fahrzeug. Die fünf Werke beliefern circa 50 Kunden pro Tag. Die Fahrzeuge verkehren flexibel zwischen den Werken, fahren aber stets Werke und Ablieferorte abwechselnd an, da die kleinstmögliche Abnahmemenge ein Fahrzeug vollständig auslastet. Aufgrund des Produktsortiments kommen vier verschiedene Fahrzeugtypen zum Einsatz, die abhängig vom gelieferten Produkt eingesetzt werden. Der Betrachtungszeitraum umfasst ein vollständiges Kalenderjahr, da eine starke Saisonalität vorliegt, die hohe Bedarfsschwankungen im System zur Folge hat. Das Ziel der Untersuchung ist die Minimierung der Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen. Hierbei sind verschiedene Restriktionen zu berücksichtigen, die nachfolgend erläutert werden.

Ein Arbeitstag eines Fahrzeugs inklusive Fahrer beträgt maximal zehn Stunden. Die Arbeitszeit setzt sich aus der Summe der Fahrzeit, die maximal acht Stunden betragen darf sowie der Be- und Entladezeiten zusammen. Die Beladezeiten unterliegen starken Schwankungen. Zum einen ist dies auf die differierenden Verlademethoden innerhalb der fünf Werke zurückzuführen, zum anderen ist die Dauer der Beladung von der aktuellen Auslastungssituation abhängig. Analog verhält sich dies bei den Entladezeiten, da die Bedingungen an den Zustellorten stark variieren. Die Zustellung muss zwischen 06:00 Uhr und 18:00 Uhr erfolgen. Vorgegebene Zeitfenster sind zu berücksichtigen. Die beiden möglichen Lieferfenster sind Zustellungen bis 09:00 Uhr sowie bis spätestens 12:00 Uhr. Der Fahrzeugtyp ist abhängig vom transportierten Material und muss aufgrund von Richtlinien bezüglich der Ladungssicherung zwingend eingehalten werden. Es ist möglich, dass einige Fahrzeugtypen durch andere ersetzt werden können. Die Substituierbarkeit ist hierbei meist nur einseitig gegeben. Eine genaue Erläuterung der Substituierbarkeit folgt im weiteren Verlauf des Abschnitts.

Die Datenbasis umfasst das vergangene Kalenderjahr. Die Daten beinhalten unter anderem folgende Informationen:

- Lieferdatum
- Versendendes Werk inklusive Standort
- Adresse der Zustellung
- Transportdistanz
- Zeitfenster der Zustellung
- Verwendetes Transportunternehmen

- Verwendeter Fahrzeugtyp

Die Bestimmung der optimalen Transportflotte erfolgt retrospektiv. Die initialen Anforderungen eines Auftrags, wie die Art des Zustellfahrzeugs, das Lieferdatum sowie das Zeitfenster der Zustellung müssen beachtet werden. Fahrzeuge können jedoch gemäß der Substituierbarkeit eines Fahrzeugs getauscht werden. Die Erstellung einer anschaulichen Lösung ist nicht notwendig, da die Entscheidungsträger über ein detailliertes Systemverständnis verfügen.

Die einzelnen Arbeitstage können ohne eine Beeinträchtigung der Ergebnisqualität unabhängig voneinander betrachtet werden. Dies ermöglicht eine sequenzielle Lösung des Problems. Außerdem kann das betrachtete System, aufgrund der gegebenen Restriktionen bezüglich der Fahrzeugtypen, in zwei Subsysteme getrennt werden, ohne das Gesamtergebnis negativ zu beeinflussen. Dies ist auf die unterschiedlichen Verpackungsprozesse der Fertigerzeugnisse zurückzuführen. Die Art der Verpackung, die in zwei der fünf Werke verwendet wird, erfordert spezielle Fahrzeuge, die eine besondere Art der Ladungssicherung ermöglichen.

Im nächsten Abschnitt wird eines der Subsysteme modelliert. Es besteht aus drei Werken und zwei verschiedenen Fahrzeugtypen. Abbildung 17 stellt das Distributionsnetzwerk grafisch dar. Neben den Rechtecken, die Werke symbolisieren, sind Kreise dargestellt. Die Kreise repräsentieren die Senken des Netzwerks, welche die Endkunden widerspiegeln.

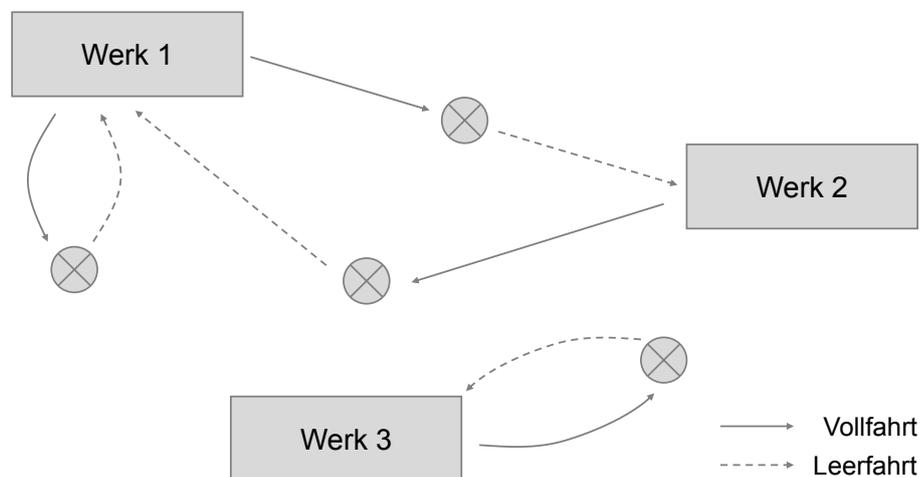


Abbildung 17: Fallbeispiel I – Konzeptmodell

Aus der Abbildung kann zudem abgeleitet werden, dass die Fahrzeuge nicht einem Werk zugeordnet sind, sondern sich frei im Netzwerk bewegen können. Die Vollfahrten sind mittels durchgängigen Pfeilen dargestellt. Leerfahrten sind durch gestrichelte Pfeile visualisiert. Da lediglich Ganzladungsverkehre vorkommen, sind Quellen und Senken stets im Wechsel anzufahren. Die

beiden eingesetzten Fahrzeugtypen des Teilsystems sind inklusive ihrer Substituierbarkeit in Tabelle 9 enthalten. Es wird deutlich, dass Fahrzeug A für jeden der Transportaufträge des Systems eingesetzt werden kann, während Fahrzeug B nicht für Transportaufträge verwendet werden kann, die initial mit einem Fahrzeug des Typs A gefahren wurden.

Tabelle 9: Substituierbarkeit der Fahrzeugtypen

Fahrzeugtyp	Kann ersetzen	
	Fahrzeug A	Fahrzeug B
Fahrzeug A	Ja	Ja
Fahrzeug B	Nein	Ja

Die Substituierbarkeits-Matrix wird verwendet, da die Restriktionen der Fertigerzeugnisse vielschichtig sind und nicht in einem Modell innerhalb eines Tabellenkalkulationsprogramms umgesetzt werden können.

Abschließend wird, anhand der beschriebenen Eigenschaften des zu untersuchenden Systems, der erstellte Fragenkatalog des Konzepts zur Prüfung der Simulationswürdigkeit beantwortet. Dies dient dazu, die Systemeigenschaften gemäß der ausgearbeiteten Struktur zusammenzufassen, um die Bewertung des gewählten Analysewerkzeugs zu vereinfachen. Abbildung 18 führt die Ausschlusskriterien des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit auf. Die Potenziale einer Optimierung der Flottengröße rechtfertigen den Einsatz der Simulation, da die Tagessätze eines Fahrzeugs einen signifikanten Betrag darstellen. Die Deadline für die benötigte Entscheidung ist als flexibel anzusehen und wird daher nicht überschritten. Die gegebene Datenlage ist für die Durchführung einer Simulationsstudie ausreichend. Der Einsatz von Simulation wird zudem nicht durch die Höhe der finanziellen Mittel reglementiert. Daher schränken die Ausschlusskriterien den Einsatz von Simulation bei der vorliegenden Problemstellung nicht ein (vgl. Abschnitt 5.3).

Kriterium-Nr.	Art	Kategorie	Kriterium	Antwort
1	Ausschluss	Allgemein	Übersteigen die Kosten einer Simulation den Nutzen der Analyse / Optimierung?	Nein
2	Ausschluss	Allgemein	Überschreitet die Dauer d. Simulationsstudie die Deadline für die benötigte Entscheidung?	Nein
3	Ausschluss	Allgemein	Ist die Datenlage ausreichend für die Durchführung einer Simulationsstudie?	Ja
4	Ausschluss	Allgemein	Sind ausreichend finanzielle Mittel für die Verwendung der Simulation vorhanden?	Ja

Abbildung 18: Beantwortung der Ausschlusskriterien des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit

Der zweite Teil des Fragenkatalogs, der die Entscheidungskriterien der Nutzwertanalyse enthält, ist in Abbildung 19 aufgeführt. Entscheidungskriterien, die eine hohe Relevanz für die Wahl eines geeigneten Analysewerkzeuges haben, werden nachfolgend ausführlich erläutert.

Kriterium-Nr.	Art	Kategorie	Kriterium	Antwort
5	Weich	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja
6	Weich	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Mittelfristig
7	Weich	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Nein
8	Weich	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Mittel
9	Weich	Allgemein	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Gering
10	Weich	Ziel der Untersuchung	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Optimierung
11	Weich	Ziel der Untersuchung	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	Nein
12	Weich	Wiederverwendung des Modells	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Gering
13	Weich	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	Ja
14	Weich	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Wie hoch sind stochastische (zeit-/ zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Mittel
15	Weich	SC spezifisch	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Einzelne Teile der Supply Chain
16	Weich	SC spezifisch	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Ja
17	Weich	SC spezifisch	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (multi-objective optimization/Pareto-Optimierung)	Nein

Abbildung 19: Beantwortung der weichen Kriterien des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit

Das untersuchte System ist in der Realität vorhanden. Für die Lösung der Problemstellung ist ein zeitlicher Rahmen von zwei Monaten gegeben. Der verfügbare Zeitraum ist daher als mittelfristig zu charakterisieren. Eine anschauliche Darstellung der Lösung ist, wie bereits erläutert, nicht notwendig. Das Risiko einer falschen Entscheidung ist als moderat zu bewerten. Dies ist damit zu begründen, dass die auf taktischer Ebene getroffene Entscheidung für circa 12 Monate Bestand hat. Bei einer zu geringen Einschätzung der benötigten Transportkapazität besteht jedoch die Möglichkeit, kurzfristig zusätzliche Ressourcen einzukaufen.

Der Fokus der Analyse liegt, wie der Systembeschreibung zu entnehmen ist, auf der Optimierung der Flottengröße. Eine Restrukturierung des Systems ist nicht möglich. Daher wird lediglich eine Gestaltungsvariante untersucht. Die Berechnung der optimalen Flottengröße erfolgt maximal einmal im Jahr. Die Regelmäßigkeit der Wiederverwendung ist demnach als gering zu klassifizieren. Aufgrund der saisonalen Schwankungen unterliegt das System einer Dynamik. Die zeit- und zufallsabhängigen Einflussfaktoren des Systems sind als moderat eingestuft. Das System enthält sieben stochastische Attribute: Durchschnittsgeschwindigkeit je Tour, Beladedauer je Tour abhängig des Werks, Entladedauer je Tour sowie Ausfallzeit der Fahrzeuge. Da für die drei verschiedenen Werke unterschiedliche Verteilungen angenommen werden, ist die Beladedauer je Werk als eigenständiges Attribut anzusehen. Das Distributionsnetzwerk eines Unternehmens ist lediglich ein einzelner Teil einer SC, wodurch die SC nicht ganzheitlich betrachtet wird. Die gegebenen Fahrzeugrestriktionen ermöglichen es, das System ohne Konsequenzen für die Ergebnisqualität in zwei Subsysteme zu teilen. Das einzige Optimierungsziel der Untersuchung ist die Ermittlung einer minimalen Flottengröße. Daher sind keine gegenläufigen Ziele vorhanden.

6.2 Modellierung unter Verwendung einer Tabellenkalkulation

Die Modellierung des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Teilsystems, bestehend aus drei Werken und zwei verschiedenen Fahrzeugtypen, erfolgt im Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel. Der Betrachtungszeitraum von einem Jahr wird auf die Kalenderwoche 19 des Jahres 2017 eingeschränkt, da diese die Woche mit dem höchsten Bedarf darstellt. Somit wird die Mindestmenge an Transportressourcen in der bedarfsstärksten Woche ermittelt. Die Bedarfe der weiteren Wochen werden aus dem erzielten Ergebnis abgeleitet. Die Wochentage der Kalenderwoche werden sequentiell betrachtet. In der vorliegenden Arbeit wird lediglich der 09.05.2017 exemplarisch in MS Excel modelliert. Die restlichen Tage der Woche können analog in separaten Tabellenkalkulationen abgebildet werden. Jedoch sind diese aufgrund des geringen Mehrwerts und des begrenzten Umfangs kein Teil der Arbeit.

Die Excel-Datei, welche die Ermittlung der Höhe der Transportressourcen des Distributionsnetzwerks enthält, ist ebenfalls auf dem beigefügten Datenträger enthalten.

Die Input-Daten für die Optimierung der Flottengröße sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Deren Basis ist der Tourenplan vom 09.05.2017, den die Disponenten am vorausgegangenen Werktag anfertigten. Der Tourenplan umfasst 21 Touren, die von neun verschiedenen Fahrzeugen gefahren wurden. Je Tour ist das verwendete Fahrzeug, das Lieferfenster sowie das Werk

und der Empfänger gegeben. Der eindeutigen Empfängernummer liegen exakte Adressdaten zugrunde, die aufgrund der ausreichenden Genauigkeit auf Postleitzahlengebiete reduziert sind. Die ebenfalls eindeutige Fahrzeugnummer enthält mit dem Zusatz „-Fhzg. A“ bzw. „-Fhzg. B“ ein Kennzeichen, das den verwendeten Fahrzeugtyp charakterisiert. Die 21 Warenempfänger werden von drei verschiedenen Werken beliefert. Die Werksnummer ist in der Spalte „Werk“ enthalten.

Tabelle 10: Input-Daten Flottenoptimierung

Nr.	Fahrzeugnummer	Lieferdatum	Tour	Lieferfenster	Werk	Speditioneur	Empfänger	Postleitzahl
1	Spedition1-Fhzg. B	09.05.2017	1	09:00:00	4937	Spedition1	70184296	59229
2	Spedition2-Fhzg. B	09.05.2017	1	09:00:00	4905	Spedition2	70154970	44789
3	Spedition3-Fhzg. B_1	09.05.2017	1	09:00:00	4905	Spedition3	70215959	50933
4	Spedition3-Fhzg. B_2	09.05.2017	1	09:00:00	4937	Spedition3	70163735	44803
5	Spedition3-Fhzg. A	09.05.2017	1	09:00:00	4905	Spedition3	70216456	42651
6	Spedition4-Fhzg. A	09.05.2017	1	09:00:00	4905	Spedition4	70192048	50968
7	Spedition5-Fhzg. B_1	09.05.2017	1	09:00:00	4914	Spedition5	70213368	50679
8	Spedition5-Fhzg. B_2	09.05.2017	1	09:00:00	4914	Spedition5	70204347	51109
9	Spedition2-Fhzg. B	09.05.2017	2	12:00:00	4905	Spedition2	70201142	52531
10	Spedition3-Fhzg. B_1	09.05.2017	2	12:00:00	4905	Spedition3	70216065	47228
11	Spedition3-Fhzg. A	09.05.2017	2	12:00:00	4905	Spedition3	70215671	40764
12	Spedition4-Fhzg. B	09.05.2017	2	12:00:00	4905	Spedition4	70196707	41747
13	Spedition5-Fhzg. B_1	09.05.2017	2	12:00:00	4914	Spedition5	70213368	50679
14	Spedition5-Fhzg. B_2	09.05.2017	2	12:00:00	4914	Spedition5	70205236	53332
15	Spedition2-Fhzg. B	09.05.2017	3	18:00:00	4905	Spedition2	70216420	41542
16	Spedition3-Fhzg. B_1	09.05.2017	3	18:00:00	4905	Spedition3	70217199	40789
17	Spedition3-Fhzg. A	09.05.2017	3	18:00:00	4905	Spedition3	70218322	53127
18	Spedition5-Fhzg. B_1	09.05.2017	3	18:00:00	4914	Spedition5	70118411	47877
19	Spedition5-Fhzg. B_2	09.05.2017	3	18:00:00	4914	Spedition5	70019928	53721
20	Spedition1-Fhzg. B	09.05.2017	4	18:00:00	4937	Spedition1	70103749	46485
21	Spedition1-Fhzg. B	09.05.2017	5	18:00:00	4937	Spedition1	70218997	46539

Das Ziel des Modells ist die Minimierung der für die 21 Touren benötigten Transportressourcen. Hierbei sind alle initialen Rahmenbedingungen, wie der verwendete Fahrzeugtyp und das Lieferfenster einzuhalten. Zur Erreichung dieses Ziels wird innerhalb der Tabellenkalkulation ein nicht-lineares Programm aufgestellt und mittels des integrierten MS Excel Solvers gelöst.

Das Grundgerüst der Modellierung des nichtlinearen Programms ist die Zuordnung der Fahrzeuge zu den 21 Touren. Das beschriebene Grundgerüst ist in Abbildung 20 dargestellt und wird nachfolgend näher erläutert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
11															
12															Summe LKW
13					LKW verwendet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14					Touren je LKW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15					Fahrzeugnummer	Spedition1-Fhgz. B	Spedition2-Fhgz. B	Spedition3-Fhgz. B_1	Spedition3-Fhgz. B_2	Spedition3-Fhgz. A	Spedition4-Fhgz. A	Spedition4-Fhgz. B	Spedition5-Fhgz. B_1	Spedition5-Fhgz. B_2	
16					Fahrzeugtyp	B	B	B	B	A	A	B	B	B	
17															
18	Tag	Nr.	Werk	Lieferort											Tour gefahren
19	09.05.2017	1	4937	70184296	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	09.05.2017	2	4905	70154970	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	09.05.2017	3	4905	70215959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	09.05.2017	4	4937	70163735	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	09.05.2017	5	4905	70216456	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	09.05.2017	6	4905	70192048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	09.05.2017	7	4914	70213368	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	09.05.2017	8	4914	70204347	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	09.05.2017	9	4905	70201142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	09.05.2017	10	4905	70216065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	09.05.2017	11	4905	70215671	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	09.05.2017	12	4905	70196707	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	09.05.2017	13	4914	70213368	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	09.05.2017	14	4914	70205236	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	09.05.2017	15	4905	70216420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	09.05.2017	16	4905	70217199	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	09.05.2017	17	4905	70218322	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	09.05.2017	18	4914	70118411	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	09.05.2017	19	4914	70019928	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	09.05.2017	20	4937	70103749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	09.05.2017	21	4937	70218997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40															

Abbildung 20: Zuordnung der Fahrzeuge zu Touren

In den Spalten C, D und E sind, ab Zeile 19, die in Tabelle 10 enthaltenen Touren abgebildet. Die fortlaufende Nummer in Spalte C ist die Verknüpfung zu den Input-Daten, um die im Tourenplan enthaltenen Informationen automatisiert in das aufgestellte Programm zu integrieren. Die Spalte „Werk“ gibt das versendende Werk wieder. Die Spalte „Lieferort“ listet die eindeutige Empfängeradresse, der die genauen Adressdaten zugeordnet sind. Der Zellbereich F19 bis N39 enthält

binär formatierte Zellen. Diese signalisieren mittels des Wertes „1“ die Zuordnung eines Fahrzeugs zu einer Tour. Die Zellen O19 bis O39 drücken aus, ob einer Tour bereits ein Fahrzeug zugeordnet wurde. Die Werte dieser Zellen sind das Resultat der Reihensummen der Spalten F bis N. Zeile 15 führt die neun zur Verfügung stehenden Fahrzeuge gemäß ihrer eindeutigen Fahrzeugnummer auf. Die Anzahl der geleisteten Touren je Fahrzeug ist in den Zellen oberhalb der Fahrzeugnummer enthalten. Ist die Anzahl der Touren größer oder gleich „1“, ist das Fahrzeug in Verwendung. Die Zelle O13 gibt die Summe der verwendeten Fahrzeuge wieder. Der Fahrzeugtyp ist in Zeile 16 und somit unterhalb der Fahrzeugnummer abgebildet.

Die weitere Aufstellung des nichtlinearen Programms erfolgt über das Dialogfenster des Excel-Add-Ins „Solver“. Abbildung 21 zeigt das Eingabefenster des Solvers und enthält die Parameter der Optimierung. Zur Aufstellung des Programms muss, in der ersten Zeile des Fensters, die Zielzelle festgelegt werden. Für die Minimierung der Flottengröße ist dies die Summe der eingesetzten Fahrzeuge, die in Abbildung 20 in Zelle O13 dargestellt ist.

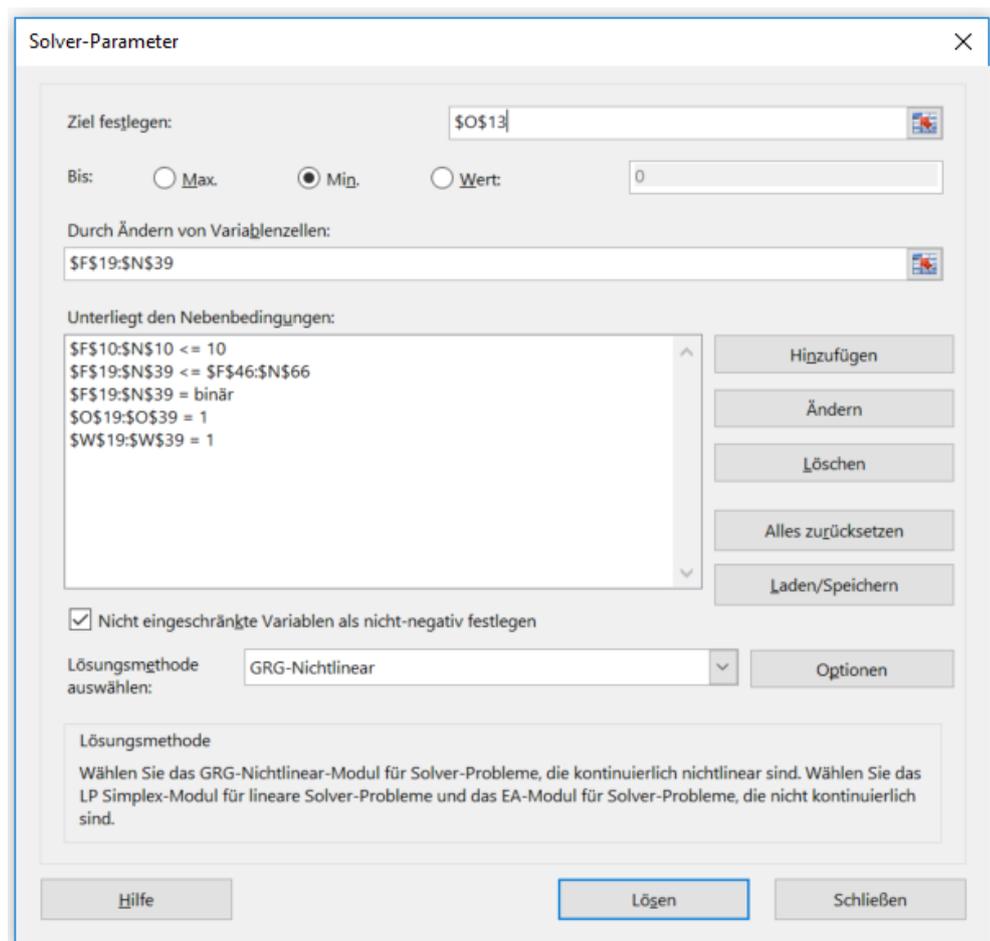


Abbildung 21: Solver-Parameter der Flottengrößenoptimierung

Zusätzlich muss eine Zielvorgabe für die Zelle definiert werden. Bei der vorliegenden Optimierung ist die minimal benötigte Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen gesucht. Alternativ stehen auch die Maximierung sowie die Angabe eines gesuchten Wertes als Zielvorgaben zur Auswahl. Anschließend sind die variablen Zellen vorzugeben. Für das Modell der vorliegenden Optimierung sind dies die Zellen F19 bis N39 (vgl. Abbildung 20).

Abschließend sind die zu berücksichtigenden Nebenbedingungen zu definieren. Die Nebenbedingungen des zu optimierenden Systems wurden im vorherigen Abschnitt des Kapitels im Detail erläutert. In den Solver-Parametern können die Nebenbedingungen, welchen das System unterliegt, über den „Hinzufügen“-Button aufgestellt werden. Die bereits hinzugefügten Nebenbedingungen sind mittig in einem zusätzlichen Fenster aufgeführt. Neben der Definition der Restriktionen in den Solver-Parametern, müssen die Nebenbedingungen mittels Logiken und Formeln in der Tabellenkalkulation modelliert werden, damit diese vom Algorithmus berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise der Implementierung der Restriktionen in MS Excel wird nachfolgend detailliert vorgestellt.

Die erste in Abbildung 21 angezeigte Nebenbedingung drückt aus, dass die Arbeitszeit eines Fahrzeugs 10 Stunden nicht überschreiten darf. Die Arbeitszeit ist die Summe der Be- und Entladezeiten sowie der Fahrzeit. Für die Berechnung der Fahrzeit wird die zurückgelegte Wegstrecke durch die Durchschnittsgeschwindigkeit eines Fahrzeugs geteilt. Als Durchschnittsgeschwindigkeit werden 60 km/h angenommen. Dieser Wert basiert auf einer Auswertung von Fahrzeug-Telemetriedaten, die teilweise von den Transportunternehmen zur Verfügung gestellt werden. Die Wegstrecken je Fahrzeug ergeben sich aus den Distanzen zwischen den Werken und Zustellorten, den Leerfahrten sowie der Distanz vom letzten Zustellort zurück zum Ausgangswerk. Die Bestimmung der Leerfahrten stellt dabei die größte Herausforderung dar, da die Entfernung sowohl vom Zielort der ersten Zustellung als auch vom Ausgangswerk der folgenden Zustellung abhängig ist.

Die Entfernungen von den Lieferorten zu den Werken, die für die Bestimmung der variablen Anteile der insgesamt zurückgelegten Distanz benötigt werden, sind in Abbildung 22 aufgelistet.

Lieferort	PLZ	Entfernung zu Werk [km]		
		4937	4905	4914
70184296	59229	122	128	170
70154970	44789	84	64	117
70215959	50933	124	26	26
70163735	44803	84	64	116
70216456	42651	102	36	72
70192048	50968	123	29	33
70213368	50679	118	29	34
70204347	51109	119	34	45
70201142	52531	163	69	46
70216065	47228	68	50	79
70215671	40764	98	29	64
70196707	41747	111	46	58
70213368	50679	118	29	34
70205236	53332	146	54	37
70216420	41542	98	1	48
70217199	40789	106	31	66
70218322	53127	150	61	55
70118411	47877	100	36	66
70019928	53721	142	57	63
70103749	46485	28	81	114
70218997	46539	42	61	106

Abbildung 22: Entfernungen zur Berechnung der variablen Fahrstrecken

Die Entfernungen wurden beim Kartendienst „Here“ abgefragt und repräsentieren die Distanz der effizientesten Route zwischen Quelle und Senke. Für die Berechnung der Distanzen der Leerfahrten je Fahrzeug ist eine Hilfstabelle in das Modell integriert, die analog zur Zuordnungs-Matrix (vgl. Abbildung 20) aufgebaut ist. Die Tabelle enthält für jede Tour und jedes Fahrzeug alle potentiell möglichen Entfernungen zum nächstgewählten Werk. Die möglichen Entfernungen werden dynamisch bestimmt, da diese vom Auslieferwerk der nachfolgenden Tour abhängig sind. Die Hilfstabelle wird mit der Zuordnungs-Matrix (vgl. Abbildung 20) multipliziert. Nur wenn die Zuordnung eines Fahrzeugs zu einer Route gegeben ist, wird, durch die Multiplikation der Distanz mit dem Wert „1“, die Entfernung der Leerfahrt berücksichtigt. Die Berechnung der Distanzen der Rückfahrten zum Ausgangswerk erfolgt analog, unter Verwendung einer weiteren Hilfstabelle. Die Länge der Vollfahrten sind aufgrund der vorgegebenen Startpunkte und Lieferorte determiniert.

Die Beladezeiten werden durch einen Mittelwert ausgedrückt, der anhand eines je Werk geführten Ein- und Ausfahrtenbuchs berechnet wurde. Die durchschnittliche Ladezeit beträgt, unabhängig des Werks, 35 Minuten je Tour. Da eine Erhebung der Entladezeiten nicht verfügbar ist, wird auf

Basis von Erfahrungswerten eine Entladedauer von durchschnittlich 45 Minuten je Zustellung angenommen. In der Tabellenkalkulation wird die Arbeitszeit, wie in Abbildung 23 zu sehen, je Fahrzeug angegeben.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2		Geschwindigkeit [km/h]	60		Fahrt zu Ausgangswerk [km]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		Ladezeit [min]	35		Leerfahrten [km]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		Entladedauer [min]	45		Vollfahrten [km]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		Fahrzeit max. [h]	8												
6															
7					Fahrzeit [h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8					Ladezeit [h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9					Entladedauer [h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10					Arbeitszeit [h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11															
12															
13					LKW verwendet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14					Touren je LKW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15					Fahrzeugnummer	Spedition1-Fhrg. B	Spedition2-Fhrg. B	Spedition3-Fhrg. B_1	Spedition3-Fhrg. B_2	Spedition3-Fhrg. A	Spedition4-Fhrg. A	Spedition4-Fhrg. B	Spedition5-Fhrg. B_1	Spedition5-Fhrg. B_2	
16					Fahrzeugtyp	B	B	B	B	A	A	B	B	B	

Abbildung 23: Berechnung der Arbeitszeit je Fahrzeug

Die in den Solver-Parametern definierte Restriktion gibt vor, dass sich die Arbeitszeiten je Fahrzeug, die in Zeile 10 aufgeführt sind, unterhalb der zehn Stunden Grenze befinden müssen.

Die zweite Restriktion schränkt die möglichen Fahrzeugtypen ein, die für eine Tour eingesetzt werden dürfen. Um diese Restriktion zu implementieren, wurde die Zuordnungs-Matrix dupliziert und je Tour mit den potentiell möglichen Fahrzeugtypen befüllt. Abbildung 24 zeigt die Matrix der möglichen Fahrzeuge je Tour. Die im Solver implementierte Restriktionen drückt aus, dass der Wert einer Zelle der Zuordnungs-Matrix den Wert der gleichen Zelle in der duplizierten Matrix nicht übersteigen darf. Dadurch wird sichergestellt, dass nur geeignete Fahrzeugtypen für eine Tour eingesetzt werden.

Hilfstabelle Verwendbare Fahrzeuge je Tour

				Fahrzeugnummer	Spedition1-Fhgz. B	Spedition2-Fhgz. B	Spedition3-Fhgz. B_1	Spedition3-Fhgz. B_2	Spedition3-Fhgz. A	Spedition4-Fhgz. A	Spedition4-Fhgz. B	Spedition5-Fhgz. B_1	Spedition5-Fhgz. B_2
Tag	Nr.	Werk	Lieferort										
09.05.2017	1	4937	70184296	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	2	4905	70154970	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	3	4905	70215959	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	4	4937	70163735	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	5	4905	70216456	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
09.05.2017	6	4905	70192048	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
09.05.2017	7	4914	70213368	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	8	4914	70204347	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	9	4905	70201142	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	10	4905	70216065	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	11	4905	70215671	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
09.05.2017	12	4905	70196707	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	13	4914	70213368	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	14	4914	70205236	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	15	4905	70216420	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	16	4905	70217199	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	17	4905	70218322	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
09.05.2017	18	4914	70118411	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	19	4914	70019928	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	20	4937	70103749	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09.05.2017	21	4937	70218997	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Abbildung 24: Mögliche Fahrzeuge je Tour

Die dritte Restriktion gibt vor, dass die variablen Zellen lediglich die Werte „1“ und „0“ annehmen können. Diese Einschränkung ist nötig, da der Algorithmus sonst Lösungen ausgeben könnte, die eine Tour auf mehrere Fahrzeuge verteilen. Da eine Tour lediglich von einem Fahrzeug bedient werden kann, ist diese Nebenbedingung ebenfalls aufzuführen.

Die vierte Nebenbedingung ist eine elementare Restriktion des nichtlinearen Programms. Die Restriktion stellt sicher, dass jeder Tour ein Fahrzeug zugeordnet ist. Die Zellen anhand derer die Erfüllung der Bedingungen geprüft werden, sind ebenfalls in Abbildung 20 enthalten. Die Zellen O19 bis O39, welche die Reihensummen der variablen Zellen darstellen, müssen den Wert „1“ annehmen, um eine Lösung innerhalb der gegebenen Nebenbedingungen zu ermöglichen.

Die letzte Restriktion stellt sicher, dass die Zustellung innerhalb des durch den Tourenplan vorgegeben Lieferzeitfensters erfolgt. Dies wird mittels einer in der Tabellenkalkulation enthaltenen Spalte geprüft. Abbildung 26 vermittelt die Methodik der Prüfung der Ankunftszeit und stellt die Spalte „On-time?“, anhand derer die Zustellung gemäß Lieferzeitfenster geprüft wird, grafisch dar.

16	Fahrzeugtyp				Maximale Arbeitszeit [=< 10 h]			
	17	18	19	20	10			04:30:00
18	Tag	Nr.	Werk	Lieferort	Arbeitszeit bei Ankunft [h]	Ankunftszeit	Deadline	On-time?
19	09.05.2017	1	4937	70184296	0	4:30	9:00	1
20	09.05.2017	2	4905	70154970	0	4:30	9:00	1
21	09.05.2017	3	4905	70215959	0	4:30	9:00	1
22	09.05.2017	4	4937	70163735	0	4:30	9:00	1
23	09.05.2017	5	4905	70216456	0	4:30	9:00	1
24	09.05.2017	6	4905	70192048	0	4:30	9:00	1
25	09.05.2017	7	4914	70213368	0	4:30	9:00	1
26	09.05.2017	8	4914	70204347	0	4:30	9:00	1
27	09.05.2017	9	4905	70201142	0	4:30	12:00	1
28	09.05.2017	10	4905	70216065	0	4:30	12:00	1
29	09.05.2017	11	4905	70215671	0	4:30	12:00	1
30	09.05.2017	12	4905	70196707	0	4:30	12:00	1
31	09.05.2017	13	4914	70213368	0	4:30	12:00	1
32	09.05.2017	14	4914	70205236	0	4:30	12:00	1
33	09.05.2017	15	4905	70216420	0	4:30	18:00	1
34	09.05.2017	16	4905	70217199	0	4:30	18:00	1
35	09.05.2017	17	4905	70218322	0	4:30	18:00	1
36	09.05.2017	18	4914	70118411	0	4:30	18:00	1
37	09.05.2017	19	4914	70019928	0	4:30	18:00	1
38	09.05.2017	20	4937	70103749	0	4:30	18:00	1
39	09.05.2017	21	4937	70218997	0	4:30	18:00	1
40								

Abbildung 25: Prüfung der Ankunftszeit der Zustellung

Die Spalte „On-time?“ umfasst die innerhalb der Restriktionen der Solver-Parametern aufgeführten Zellen W19 bis W39. Die Kalkulation der Ankunftszeit basiert auf der bereits beschriebenen Berechnung der Arbeitszeit. In einem ersten Schritt wird die Arbeitszeit je Tour berechnet, die sich aus der Be- und Entladedauer, der Fahrzeit für die Vollfahrt sowie der Fahrzeit zum nächsten Werk zusammensetzt. Die Arbeitszeiten je Tour werden zur Berechnung der Ankunftszeit anschließend gemäß den getätigten Touren eines Fahrzeugs kumuliert. Die bereits inkludierte Fahrzeit zum darauffolgenden Werk sowie die Entladedauer werden für die Berechnung der Ankunftszeit abgezogen, sodass für diese lediglich die bisher geleistete Arbeitszeit berücksichtigt wird. Die Spalte Ankunftszeit gibt die Summe der Startzeit und der bisher geleisteten Arbeitszeit wieder. Frühestmögliche Startzeit ist 04:30 Uhr, da die Werke spätestens um diese Uhrzeit öffnen. Ist die Ankunftszeit kleiner oder gleich der Deadline, wurde die Sendung pünktlich zugestellt.

Nachdem alle Nebenbedingungen in den Solver-Parametern gepflegt wurden, ist ein Algorithmus zur Lösung des aufgestellten Problems zu wählen. Am unteren Rand des Eingabefensters sind Vorgaben aufgeführt, gemäß derer der geeignete Algorithmus zu wählen ist. Die im Anwendungsfall vorhandene nichtlineare Optimierung erfordert das GRG-Nichtlinear-Modul. Anschließend muss der „Lösen“-Button gedrückt werden, um eine automatisierte Lösung des Problems anzustoßen.

Die durch den Solver generierte Lösung der vorliegenden nichtlinearen Optimierung ist in Abbildung 26 dargestellt.

Geschwindigkeit [km/h]	60
Ladezeit [min]	35
Entladezeit [min]	45
Fahrzeit max. [h]	8

Fahrt zu Ausgangswerk	0	42	114	66	55	29	118	50	46
Leerfahrten	0	122	142	120	69	65	116	90	69
Vollfahrten	0	164	91	134	141	94	118	140	115

Fahrzeit [h]	0	5.47	5.78	5.33	4.42	3.13	5.87	4.67	3.83
Ladezeit [h]	0	1.17	1.17	1.75	2.33	1.75	1.17	1.75	1.17
Entladedauer [h]	0	1.50	1.50	2.25	3.00	2.25	1.50	2.25	1.50
Arbeitszeit [h]	0	8.13	8.45	9.33	9.75	7.13	8.53	8.67	6.50

LKW verwendet	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8	
Touren je LKW	0	2	2	3	4	3	2	3	2		
Fahrzeugnummer		Spedition1-Fhrg. B	Spedition2-Fhrg. B	Spedition3-Fhrg. B_1	Spedition3-Fhrg. B_2	Spedition3-Fhrg. A	Spedition4-Fhrg. A	Spedition4-Fhrg. B	Spedition5-Fhrg. B_1	Spedition5-Fhrg. B_2	
Fahrzeugtyp		B	B	B	B	A	A	B	B	B	

Tag	Zustellung Nr.	Werk	Lieferort									Tour gefahren
09.05.2017	1	4937	70184296	0	1	0	0	0	0	0	0	1
09.05.2017	2	4905	70154970	0	0	0	0	0	0	0	1	1
09.05.2017	3	4905	70215959	0	0	0	0	0	0	0	1	1
09.05.2017	4	4937	70163735	0	0	0	0	0	0	1	0	1
09.05.2017	5	4905	70216456	0	0	0	0	0	1	0	0	1
09.05.2017	6	4905	70192048	0	0	0	0	0	1	0	0	1
09.05.2017	7	4914	70213368	0	0	0	0	1	0	0	0	1
09.05.2017	8	4914	70204347	0	0	0	0	1	0	0	0	1
09.05.2017	9	4905	70201142	0	0	0	0	0	0	0	1	1
09.05.2017	10	4905	70216065	0	0	0	0	0	0	0	1	1
09.05.2017	11	4905	70215671	0	0	0	0	0	1	0	0	1
09.05.2017	12	4905	70196707	0	0	0	0	0	0	0	1	1
09.05.2017	13	4914	70213368	0	0	0	0	0	0	1	0	1
09.05.2017	14	4914	70205236	0	0	0	1	0	0	0	0	1
09.05.2017	15	4905	70216420	0	0	0	0	1	0	0	0	1
09.05.2017	16	4905	70217199	0	0	0	0	1	0	0	0	1
09.05.2017	17	4905	70218322	0	0	0	0	1	0	0	0	1
09.05.2017	18	4914	70118411	0	0	0	1	0	0	0	0	1
09.05.2017	19	4914	70019928	0	0	1	0	0	0	0	0	1
09.05.2017	20	4937	70103749	0	0	1	0	0	0	0	0	1
09.05.2017	21	4937	70218997	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Abbildung 26: Lösung der nichtlinearen Optimierung

Die variablen Zellen, welche die Zuordnung der Fahrzeuge zu Touren widerspiegeln, wurden automatisiert mit den Werten „1“ und „0“ befüllt, bis durch den Algorithmus ein lokales Optimum erreicht wurde. Das ausgegebene Minimum an benötigten Fahrzeugen liegt bei acht. Somit konnte im Vergleich zur initialen Lösung ein Fahrzeug eingespart werden. Abbildung 26 dokumentiert, dass jeder Tour ein Fahrzeug zugeordnet wurde und kein Fahrzeug die Arbeitszeit von zehn Stunden überschreitet. Zudem sind die variablen Zellen nur mit binären Werten befüllt. Dementsprechend wurden drei der fünf Restriktionen eingehalten. Eine weitere Restriktion des Systems ist der Einsatz eines Fahrzeugs des Typs „A“ bei den Touren mit den fortlaufenden Nummern 5,6,11 und 17. Die Abbildung zeigt, dass auch diese Nebenbedingung berücksichtigt wurde, da diese Touren mit dem Fahrzeugtyp „A“ bedient wurden (vgl. Abbildung 24).

Zustellung Nr.	Werk	Lieferort									Tour gefahren	Arbeitszeit bei Ankunft [h]	Ankunftszeit	Dead-line	On-time?
1	4937	70184296	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2.62	7:07	9:00	1
2	4905	70154970	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.65	6:09	9:00	1
3	4905	70215959	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4.48	8:59	9:00	1
4	4937	70163735	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1.98	6:29	9:00	1
5	4905	70216456	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1.18	5:41	9:00	1
6	4905	70192048	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3.60	8:06	9:00	1
7	4914	70213368	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1.15	5:39	9:00	1
8	4914	70204347	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3.80	8:18	9:00	1
9	4905	70201142	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.73	6:14	12:00	1
10	4905	70216065	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7.08	11:35	12:00	1
11	4905	70215671	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5.90	10:24	12:00	1
12	4905	70196707	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4.98	9:29	12:00	1
13	4914	70213368	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5.82	10:19	12:00	1
14	4914	70205236	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1.20	5:42	12:00	1
15	4905	70216420	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5.72	10:13	18:00	1
16	4905	70217199	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3.95	8:27	18:00	1
17	4905	70218322	0	0	0	0	1	0	0	0	0	8.08	12:35	18:00	1
18	4914	70118411	0	0	0	1	0	0	0	0	0	7.48	11:59	18:00	1
19	4914	70019928	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1.63	6:08	18:00	1
20	4937	70103749	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5.80	10:18	18:00	1
21	4937	70218997	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6.68	11:11	18:00	1

Abbildung 27: Einhaltung der Lieferzeitfenster

Dass auch die Restriktion bezüglich der Lieferzeitfenster eingehalten wurde, beweist Abbildung 27. Somit wurde gegen keine der definierten Nebenbedingungen verstoßen. Die ausgegebene Lösung ist zulässig.

Die Optimierung ist in analoger Art und Weise für die restlichen Tage der Woche durchzuführen. Die dabei maximal erzielte Lösung der Optimierung entspricht der benötigten Anzahl an Transportressourcen, um die Bedarfsspitze abzudecken. Für alle weiteren Wochen ist die Höhe der benötigten Transportressourcen abzuleiten.

6.3 Grenzen der Tabellenkalkulation und Vorteile der Simulation

Nachdem die Umsetzung und das Resultat der in MS Excel durchgeführten Optimierung im vorherigen Abschnitt detailliert erläutert wurden, folgt in diesem Abschnitt eine Bewertung der Modellierung der analysierten Fallstudie. Der Fokus liegt auf den Grenzen, die das Analysewerkzeug Tabellenkalkulation aufweist. Darauf basierend werden ergänzend die Vorteile, welche die Simulation bei der betrachteten Bestimmung der Flottengröße hätte, aufgezeigt.

Für eine strukturierte Vorgehensweise bei der Bewertung der Modellierung der untersuchten Problemstellung des SCM wird das Konzept zur Prüfung der Simulationswürdigkeit, das im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wurde, als Leitfaden verwendet. Der in der ersten Stufe des Konzepts angewendete Entscheidungsbaum schließt den Einsatz von Simulation nicht kategorisch aus (vgl. Abschnitt 6.1). Daher ist in der zweiten Stufe des Konzepts zu prüfen, welches Werkzeug das Effizienteste für die Analyse der Problemstellung der Flottengrößenbestimmung ist.

Stufe II: Nutzwertanalyse

Kriterium-Nr.	Kategorie	Kriterium	Gewählte Ausprägung	Gewichtung	Tabellenkalkulation		MS Excel Solver		Simulation	
					Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert
5	Allgemein	Ist das zu untersuchende System in der Realität vorhanden?	Ja	2.08%	7	0.1	7	0.1	7	0.1
6	Allgemein	In welchem Zeitraum wird das Ergebnis der Analyse benötigt?	Mittelfristig	4.33%	7	0.3	9	0.4	3	0.1
7	Allgemein	Ist die Art der Aufbereitung des Ergebnisses relevant? Ist eine Visualisierung des Modells nötig?	Nein	4.59%	7	0.3	7	0.3	7	0.3
8	Allgemein	Wie hoch ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation?	Mittel	11.60%	7	0.8	7	0.8	7	0.8
9	Allgemein	Inwieweit sind die Entscheidungsträger mit analytischen Methoden vertraut? (Bezüglich Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses)	Gering	1.35%	7	0.1	3	0.0	7	0.1
10	Ziel der Untersuchung	Ist das Hauptziel des Einsatzes des Werkzeugs ein detailliertes Systemverständnis oder eine Optimierung?	Optimierung	11.92%	7	0.8	9	1.1	5	0.6
11	Ziel der Untersuchung	Sind verschiedene Gestaltungsvarianten des Systems zu untersuchen?	Nein	3.90%	7	0.3	7	0.3	7	0.3
12	Wiederverwendung des Modells	In welcher Regelmäßigkeit wird das System voraussichtlich untersucht werden bzw. das Modell wieder verwendet werden?	Gering	8.49%	7	0.6	7	0.6	5	0.4
13	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Besteht eine Dynamik im Systemverhalten? Ist das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen (Zeitraffung)?	Ja	5.61%	5	0.3	5	0.3	9	0.5
14	Dynamik und Stochastik des Systemverhaltens	Wie hoch sind stochastische (zeit-/ zufallsabhängige) Einflussfaktoren im System?	Mittel	21.16%	5	1.1	5	1.1	7	1.5
15	SC spezifisch	Ist die Supply Chain als Ganzes zu betrachten oder sind nur einzelne Teile der Wertschöpfungskette relevant?	Einzelne Teile der Supply Chain	5.06%	8	0.4	8	0.4	6	0.3
16	SC spezifisch	Ist das System in Einzelteile zerlegbar ohne dass bei einer Optimierung das Gesamtsystem leidet?	Ja	2.27%	8	0.2	8	0.2	6	0.1
17	SC spezifisch	Bestehen gegenläufige Ziele, die im Rahmen der Analyse analysiert und optimiert werden sollen? (multi-objective optimization/Pareto-Optimierung)	Nein	17.62%	8	1.4	8	1.4	5	0.9
100.00%										
Summe					6.71		6.99		6.10	
Rang					2		1		3	

Abbildung 28: Nutzwertanalyse zur Prüfung der Simulationswürdigkeit der Problemstellung der Flottengrößenbestimmung

Abbildung 28 präsentiert das Ergebnis der zweiten Stufe der Prüfung der Simulationswürdigkeit. Die im ersten Abschnitt des Kapitels erläuterte Beantwortung des Fragenkatalogs ist die Grundlage dieser Nutzwertanalyse (vgl. Abschnitt 6.1). Die innerhalb von Abschnitt 6.1 erläuterten Charakteristika des Systems sind in der Spalte „Gewählte Ausprägung“ aufgeführt. In der Spalte zuvor sind die weichen Entscheidungskriterien abgebildet, anhand derer das System charakterisiert wird. Außerdem sind die Gewichtungen der Entscheidungskriterien enthalten, die Auskunft darüber geben, welche Relevanz das Kriterium für die Wahl des Analysewerkzeugs besitzt. Je Werkzeug, das für die Analyse der Problemstellung zur Auswahl steht, sind die Spalten „Punkte“ und „Wert“ in der Abbildung aufgeführt. Die Spalte „Punkte“ repräsentiert die Eignung des Werkzeugs gemäß der gewählten Ausprägung je Entscheidungskriterium. Hierfür wird eine klassische 10er-Skala verwendet. Umso höher der Punktwert, desto besser ist das Analysewerkzeug geeignet. Die Übersetzungstabelle der Punktwerte ist in Tabelle 7 aufgeführt (vgl. Abschnitt 5.2). Die Spalte „Wert“ gibt die gewichtete Eignung eines Analysewerkzeugs je Entscheidungskriterium wieder. Der aufgeführte Wert ist das Produkt des Punktwertes und der Gewichtung des Kriteriums. Die Zeile Summe führt die Summen der Spalten „Wert“ auf. Das Analysewerkzeug mit der höchsten Summe ist das geeignetste für die Untersuchung der Problemstellung des SCM.

Für die vorgestellte Problemstellung der Flottengrößenbestimmung ist der Einsatz der Tabellenkalkulation unter Verwendung des integrierten Solvers die am besten geeignete Methode. Weshalb der Einsatz des Solvers der herkömmlichen Verwendung einer Tabellenkalkulation vorzuziehen ist, wird durch Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Entscheidungskriterien in Abbildung 28 deutlich. Das Kriterium mit der Identifikationsnummer 10, das sich mit dem Untersuchungsziel der Analyse befasst, ist das einzige Kriterium, bei dem sich die gewichteten Punktwerte der beiden Werkzeuge signifikant unterscheiden. Bei der vorliegenden Fallstudie ist die Optimierung der vorhandenen Flottengröße die primäre Zielsetzung. Daher eignet sich der MS Excel Solver, aufgrund der Möglichkeit der Modellierung nichtlinearer Programme, in besonderem Maße für die Durchführung der Untersuchung. Da die Bewertung der beiden Analysewerkzeuge bei den restlichen Entscheidungskriterien identisch ist, erfolgen die Beurteilung der Grenzen der Tabellenkalkulation sowie die Erläuterung der Vorteile von Simulation nachfolgend anhand des Vergleichs von Simulation und Tabellenkalkulation, unter Verwendung des integrierten Solvers.

Das Ergebnis der in Abbildung 28 dargestellten Nutzwertanalyse zeigt, dass Simulation nicht das effizienteste Werkzeug für die untersuchte Problemstellung darstellt. Die Optimierung der Flottengröße ist somit nicht simulationswürdig. Dies ist vor allem auf die Ausprägungen der Entschei-

dungskriterien mit den Nummern 7, 8, 10, 12, 14,15 und 17 zurückzuführen. Diese Entscheidungskriterien haben aufgrund ihrer Bedeutung für die Gesamtentscheidung und den signifikanten Differenzen bei der Bepunktung der Ausprägungen einen hohen Einfluss auf die gewichteten Punktwerte. Zur vollständigen Bewertung der Modellierung der Problemstellung wird nachfolgend auf alle Entscheidungskriterien eingegangen. Im Zuge dessen werden außerdem die Grenzen der Tabellenkalkulation sowie die Vorteile der Simulation aufgezeigt.

Die Tatsache, ob ein System in der Realität vorhanden ist, hat nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis der Prüfung der Simulationswürdigkeit. Sofern Input-Daten vorhanden sind und plausible Annahmen getroffen werden können, die ein noch nicht existierendes System ausreichend genau beschreiben, stellt das Nichtvorhandensein des Systems keine Einschränkung für die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms dar. Die Simulation bietet in diesem Fall jedoch den klaren Vorteil, dass ein System visualisiert werden kann. Dadurch ist es einfacher, ein detailliertes Systemverständnis zu entwickeln und mögliche Schwachstellen frühzeitig zu identifizieren, die bei einer klassischen Berechnung oder Optimierung unerkannt blieben.

Der verfügbare Zeitraum für die Analyse eines Systems stellt für die Verwendung von Tabellenkalkulation, unabhängig der Ausprägung, ebenfalls keine Einschränkung dar. Die Tabellenkalkulation ist gegenüber der Simulation jedoch im Vorteil, sollte nur ein kurzer Zeitraum zur Verfügung stehen. Die Simulation ist in diesem Fall häufig nur unter geringer Genauigkeit durchzuführen.

Die Notwendigkeit der Visualisierung eines Systems ist eine Rahmenbedingung, welche die Verwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen sowie analytischen Verfahren eingrenzt. Eine geeignete Visualisierung ist lediglich mittels Simulation möglich. Die Möglichkeit der Visualisierung ist ein klarer Vorteil der Simulation. Dieser kommt im betrachteten Fallbeispiel jedoch nicht zum Tragen, da keine Visualisierung gefordert ist. Eine Möglichkeit das Distributionsnetzwerk unter Verwendung von Simulation zu visualisieren, ist die Abbildung der drei Werke sowie der Vielzahl der Auslieferorte auf einer Deutschlandkarte. Die Transportströme zwischen den Quellen und Senken könnten mittels Fahrzeug-Icons dargestellt werden. Mit der Wahl einer geeigneten Zeitraffung bei der Durchführung der Simulation wären dadurch die einzelnen Transporte auf der verwendeten Karte sichtbar.

Ein bedeutendes Entscheidungskriterium ist das Risiko einer falschen Entscheidung bzw. des Verzichts von Simulation. In der vorliegenden Optimierung ist dieses Risiko, wie in Abschnitt 6.1 erläutert, als mittelhoch eingestuft, da die getroffene Entscheidung relativ kurzfristig durch den Zukauf zusätzlicher Ressourcen angepasst werden kann. Dadurch kommt der Vorteil, den die

Simulation bietet, nicht zur Geltung. Anders verhält sich dies, wenn eine strategische Entscheidung zur geographischen Bestimmung von Lagerstandorten im SCM getroffen werden muss oder die Allokation der Bestandsmengen zu definieren ist, auf deren Basis Lagerstandorte dimensioniert werden. Entscheidungen dieser Größenordnung haben über mehrere Jahre Bestand und können nur unter signifikanten Kosten geändert werden. Das Risiko solcher Entscheidungsfindungen ist somit als hoch anzusehen. Simulation bietet unter diesen Bedingungen den Vorteil, dass anhand des simulationsfähigen Modells das Systemverhalten unter verschiedenen Rahmenbedingungen ohne erheblichen Mehraufwand simuliert werden kann. Dadurch wird eine hohe Genauigkeit und Sicherheit bei der Entscheidungsfindung erreicht. Da bei der Verwendung der Tabellenkalkulation eine umfassende Betrachtung verschiedener Szenarien nicht möglich ist, sind Tabellenkalkulationsprogramme bei einem hohen Risiko einer falschen Entscheidung nur eingeschränkt nutzbar.

Das Entscheidungskriterium, das die Vertrautheit von Entscheidungsträgern im Umgang mit analytischen Methoden thematisiert, ist differenziert zu betrachten. Bezüglich der Ergebnisqualität schränkt eine Nichtvertrautheit die Verwendung einer Tabellenkalkulation mit integriertem mathematischen Optimierungsmodell nicht ein. Es ist jedoch zu beachten, dass Entscheidungsträger leichter Entscheidungen treffen, wenn diese die Lösungsfindung nachvollziehen und mögliche Fehlerquellen bewerten können. Diesbezüglich kann es zu Einschränkungen bei der Verwendung analytischer Methoden kommen, falls Entscheidungsträger die Lösung anzweifeln. Die bereits erwähnte Möglichkeit der Visualisierung der Simulation hilft, eine Lösung nachvollziehbar aufzubereiten und für den Entscheidungsträger greifbar abzubilden. In der untersuchten Problemstellung war dies jedoch nicht nötig, da die Entscheidungsträger die Lösung aufgrund eines umfassenden Systemverständnisses auch ohne Erfahrungen mit den Methoden des MS Excel Solver plausibilisieren konnten.

Ein weiteres Entscheidungskriterium mit hoher Gewichtung ist die Frage des zentralen Ziels der Untersuchung. Im vorgestellten Fallbeispiel war die Optimierung der Flottengröße das primäre Ziel. Ein alternatives Ziel, das im SCM aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge häufig verfolgt wird, ist das Erlangen eines detaillierten Systemverständnisses. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn das Systemverhalten noch nicht vollumfänglich nachvollziehbar ist. Simulation bietet bei dieser Ausprägung des Kriteriums den Vorteil, dass das Systemverhalten unter verschiedenen Szenarien betrachtet werden kann. Die Durchführung einer Vielzahl von Simulationsläufen erlaubt es, durch Anpassung der Input-Parameter, ein System vollumfänglich zu analysieren, mit dem Ziel, ein tiefgreifendes Verständnis über das Systemverhalten zu entwickeln.

Tabellenkalkulationen und mathematische Verfahren sind hierfür nicht zu empfehlen, da die Bestimmung der Lösung lediglich auf Basis fixierter Parameter erfolgt. Die festgelegten Eingabewerte können zwar variiert werden, dies ist jedoch deutlich aufwendiger als bei Simulationen. Umgekehrt eignen sich analytische Methoden, wie das Ergebnis der Nutzwertanalyse verdeutlicht, bei der Suche des Optimums.

Bei der untersuchten Problemstellung war lediglich eine Gestaltungsvariante des Systems zu bewerten. Daher genügte es, das System zu modellieren und über den ganzen Prozess der Lösungsfindung unverändert zu verwenden. Es gab unter dieser Rahmenbedingung somit keine Einschränkungen für die Verwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen. Sind jedoch verschiedene Gestaltungsvarianten zu analysieren, kann es zu Einschränkungen bezüglich der Verwendung von Tabellenkalkulationen kommen. Während ein Simulationsmodell Veränderungen im Modell ohne großen Aufwand zulässt, ist es bei Tabellenkalkulationen möglich, dass eine leichte Anpassung im Konzeptmodell zu gravierenden Änderungen im Lösungsmodell führt. Sind verschiedene Gestaltungsvarianten zu bewerten, kann die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms also eingeschränkt sein oder zu erheblichem Mehraufwand führen. Die Simulation bietet unter diesen Bedingungen die Möglichkeit das Modell im Vorfeld des folgenden Simulationslaufs kurzfristig anzupassen. Das Beispiel der Modellierung einer Multi-Produkt-SC eines Lebensmitteleinzelhändlers, der ein zweistufiges Distributionsnetzwerk verwendet, verdeutlicht die Ausführungen. Im ersten Szenario erfolgt die Lagerung der Produkte lediglich im Zentrallager. Die Regionallager werden ausschließlich für den Umschlag der Güter eingesetzt. Im zweiten Szenario werden die Produkte sowohl im Zentrallager als auch in den Regionallagern vorgehalten. Bei der Verwendung von Tabellenkalkulationen und analytischen Methoden hat die Betrachtung des zweiten Szenarios eine zusätzliche Modellierung des angepassten Systems zur Folge. Unter Verwendung von Simulation müssen lediglich die Parameter des Regionallagers geändert werden.

Die vorgestellte Optimierung der Flottengröße wird in geringer Regelmäßigkeit durchgeführt, da es eine Aufgabe ist, die dem taktischen SCM zuzuordnen ist. Selbst bei einer häufigeren Verwendung des aufgestellten Modells gibt es keine Einschränkungen für Tabellenkalkulationsprogramme. Die Konsequenz ist jedoch ein erneuter Modellierungsaufwand, sollten sich elementare Eigenschaften des Systems ändern. Simulation hat bei einer regelmäßigen Untersuchung der Problemstellung den Vorteil, dass das aufgestellte Modell ohne signifikante Anpassungen verwendet werden kann und sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis verbessert. Außerdem wird der Visualisierung bei häufiger Verwendung eine höhere Bedeutung beigemessen. Dies stellt ebenfalls einen Vorteil für die Simulation dar.

Ein dynamisches Systemverhalten ist mittels Tabellenkalkulationsprogrammen und analytischen Methoden nicht möglich. Die Modellierung des Distributionsnetzwerks unterstreicht dies (vgl. Abschnitt 6.2). Der Analysezeitraum von einem Jahr wurde auf einen mittels Tabellenkalkulation abbildbaren Zeitraum von fünf Tagen eingeschränkt. Hierbei wurde die bedarfsstärkste Woche verwendet, da diese die Woche mit den maximal benötigten Ressourcen widerspiegelt. Alle weiteren Wochenbedarfe werden anhand der maximal benötigten Transportressourcen abgeleitet. Simulation hingegen erlaubt die Untersuchung des kompletten Zeitraums, da sie zum einen mehr Daten verarbeiten kann als Tabellenkalkulationsprogramme und zum anderen die Abbildung eines zeitlichen Verlaufs möglich ist.

Das Entscheidungskriterium, das die Höhe der stochastischen Einflussfaktoren thematisiert, führt die höchste Gewichtung und ist somit das für die Gesamtentscheidung relevanteste Kriterium. Dies ist damit zu begründen, dass eine hohe Anzahl von zeit- und zufallsabhängigen Einflussfaktoren die Verwendung von Tabellenkalkulationen stark einschränkt. Das untersuchte Distributionsnetzwerk unterliegt sieben stochastischen Einflussfaktoren. Ausgenommen der Ausfallszeiten der Fahrzeuge, wurden diese durch Mittelwerte repräsentiert. Bei der vorgestellten Optimierung führte dies zu einer hinreichend genauen Lösung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die generelle Komplexität des Systems als eher gering einzustufen ist. In Tabellenkalkulationen können zeit- oder zufallsabhängige Einflussfaktoren lediglich über die Funktionen „Zufallszahl“ und „Zufallsbereich“ abgebildet werden. Beide Funktionen folgen einer Gleichverteilung. Während die Funktion „Zufallsbereich“ einer diskreten Gleichverteilung unterliegt, ist die Gleichverteilung der Funktion „Zufallszahl“ stetig. Die Funktion „Zufallszahl“ muss mit weiteren Funktionen oder Logiken kombiniert werden, da sie ausschließlich reelle Zahl zwischen 0 und 1 ausgibt. Bei der Modellierung eines komplexen Systems entsteht durch Verwendung der beiden Funktionen ein erhöhter Rechenaufwand für das Tabellenkalkulationsprogramm. Eine Vielzahl von stochastischen Attributen bringt herkömmliche Tabellenkalkulationen letztendlich an ihre rechnerischen Grenzen. Der Vorteil von Simulationen ist, dass die stochastischen Einflüsse verschiedenen Verteilungen folgen können und nicht auf die Gleichverteilung reduziert sind. Zudem verfügen Simulationsprogramme über effizientere Rechenoperationen, welche die Berücksichtigung einer Vielzahl von stochastischen Einflussfaktoren ermöglichen.

Im Rahmen der vorliegenden Fallstudie wurde mit der Untersuchung des Distributionsnetzwerks lediglich ein Teil der SC betrachtet. Die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms wird dadurch begünstigt, da die Komplexität der Wirkungszusammenhänge des Systems überschaubar ist. Eine ganzheitliche Betrachtung der SC kann zu Einschränkungen bei der Verwendung von

Tabellenkalkulationsprogrammen führen, da diese die Vielzahl an Teilnehmern sowie deren Wirkungszusammenhänge nicht ohne Verluste der Ergebnisqualität abbilden können. Ein weiterer Nachteil für den Einsatz von Tabellenkalkulationsprogrammen zur Analyse kompletter SCs ist die Unübersichtlichkeit der Darstellung bei mehrstufigen SCs. Der Einsatz von Tabellenkalkulation ist hierbei auf eine oberflächliche Betrachtung des Problems beschränkt. Bei Simulation hingegen ist trotz vielen Parteien und komplexen Wirkungszusammenhängen eine tiefergehende Analyse möglich. Simulation eignet sich demzufolge besonders, wenn die SC ganzheitlich zu analysieren ist. Zudem vergrößert sich die Datenmenge bei der Betrachtung von kompletten SCs erheblich. Aufgrund der begrenzten Datenmenge bei Tabellenkalkulationsprogrammen müssen die Input-Daten im Vorfeld häufig konsolidiert werden, um eine Bearbeitung mittels Tabellenkalkulation zu ermöglichen. Im Gegensatz dazu können bei Simulationsstudien Daten in einem hohen Detaillierungsgrad für die Analyse verwendet werden.

Ein weiterer Grund für die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms zur Optimierung der Flottengröße ist die Möglichkeit das System ohne Ergebnisdefizite in Einzelteile zu zerlegen. Das Distributionsnetzwerk konnte aufgrund der voneinander unabhängigen Fahrzeugtypen in zwei Subsysteme geteilt werden, die zwei bzw. drei Werke enthalten. Dadurch sind die Größe des Systems und damit einhergehend die Komplexität der Modellierung handhabbar. Ist es nicht möglich das Gesamtsystem in mehrere Bestandteile zu teilen, hat die Simulation den Vorteil, dass das System dennoch modelliert werden kann. Simulationsprogramme sind, im Gegensatz zu Tabellenkalkulationsprogrammen, darauf ausgelegt, große und komplexe Systeme detailliert und vollumfänglich abzubilden. Die Betrachtung einer vollständigen Multi-Produkt-SC vom Lieferant des Lieferanten bis zum Endkunden ist selbst bei einem mittleren Aggregationslevel ausschließlich unter Verwendung von Simulation möglich. Führt die Teilung des Gesamtsystems zu einer nicht ausreichenden Ergebnisqualität, da Wirkungszusammenhänge nicht abgebildet werden können, ist die Verwendung von Tabellenkalkulationen eingeschränkt.

Das Ziel der Untersuchung des Distributionsnetzwerks war ausschließlich die Reduzierung der eingesetzten Transportressourcen. Somit bestehen bei der Fallstudie keine gegenläufigen Ziele, die den Einsatz der Tabellenkalkulation sowie analytischen Methoden einschränken. Gegenläufige Ziele treten in der Logistik häufig auf. Beispielsweise, wenn die Maximierung des Servicelevels für den Kunden bei gleichzeitiger Minimierung der Bestands- sowie Transportkosten der SC-Partner erreicht werden soll. Die Ermittlung des optimalen Verhältnisses zwischen niedrigen Kosten und hohem Servicelevel wird unter Anwendung von Simulation vereinfacht, da die Wechselwirkung der beiden Kennzahlen detaillierter erfasst werden kann. Bei der Verwendung von Ta-

bellenkalkulation in Kombination mit analytischen Methoden kann nur ein Wert optimiert werden. Das Eingabefenster der Solver-Parameter, bei dem nur eine Zielzelle ausgewählt werden kann, verdeutlicht dies. Für das zusätzliche Optimierungsziel ist in diesem Fall eine Annahme zu treffen. Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse prüft anschließend den Einfluss der getroffenen Annahme auf das Optimierungsergebnis. Da dieser Prozess jedoch einen erheblichen Aufwand mit sich bringt, ist der Einsatz von Simulation bei gegenläufigen Zielen vorzuziehen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Management globaler Wertschöpfungsnetzwerke ist eine Aufgabe, mit der sich Unternehmen seit Mitte der 1990er-Jahre vermehrt befassen. Dieser Trend wird zukünftig weiter anhalten, da die Potenziale des kollaborativen SCM noch nicht vollständig ausgeschöpft sind. Die Vergrößerung des Betrachtungsumfangs, die aus einer ganzheitlichen Planung von SCs resultiert, führt zu immer aufwendigeren und komplexeren Analyseaufgaben. Dies erfordert vermehrt die Verwendung von Methoden, die zur Untersuchung und Lösung solcher Problemstellungen geeignet sind. Wie in Abschnitt 3.3 herausgearbeitet wurde, stellt die ereignisdiskrete Simulation eine Möglichkeit dar, diffizile Fragestellungen des SCM zu untersuchen. Aufgrund des hohen Modellierungsaufwands und den daraus resultierenden Kosten, ist vor Beginn jedoch stets die Adäquanz der Methode zu prüfen.

Um ein Konzept für die Prüfung der Simulationswürdigkeit bei Problemstellungen des SCM zu entwickeln, wurde in der aktuellen Literatur und in Veröffentlichungen internationaler Konferenzen nach Kriterien gesucht, die auf die Notwendigkeit des Einsatzes der Technik hinweisen. Der daraus abgeleitete Kriterienkatalog bildet die Basis des entwickelten Konzepts, das vor allem den Projektverantwortlichen des Auftraggebers einer Simulationsstudie als Leitlinie für die Bewertung der Sinnhaftigkeit des Einsatzes der Simulation dient. Das Konzept vergleicht Simulation mit der Tabellenkalkulation. Diese Problemlösungsmethode hat den Vorteil, dass sie flexibel und kostengünstig einsetzbar ist. Zudem lassen sich Tabellenkalkulationsprogramme durch Add-Ins beliebig erweitern, wodurch auch der Einsatz von mathematischer Optimierung ermöglicht wird. Im Rahmen der Anwendung sind die Charakteristika des zu untersuchenden Systems anhand der Entscheidungskriterien zu bestimmen. In zwei Stufen wird, basierend auf den beschriebenen Eigenschaften, geprüft, ob die Simulation für die betrachtete Problemstellung angemessen ist.

Das im sechsten Kapitel vorgestellte Fallbeispiel der optimalen Auslegung von Transportressourcen innerhalb eines Distributionsnetzwerks verdeutlicht, dass die Anwendung der Simulationstechnik bei Problemen des SCM nicht grundsätzlich sinnvoll ist. Handelt es sich um ein System, das in sich geschlossen ist und somit wenig äußere Einflussfaktoren besitzt, sind Tabellenkalkulationsprogramme aufgrund der Kosteneffizienz im Vorteil. Darüber hinaus handelt es sich bei der untersuchten Problemstellung um eine reine Optimierungsaufgabe. Dies begünstigt, die in Abschnitt 3.2 skizzierten, mathematischen Verfahren. Simulation entwickelt den vollen Nutzen, sobald Systeme mit starken Wirkungszusammenhängen untersucht werden und der Verlässlichkeit

des Ergebnisses eine hohe Bedeutung beigemessen wird. Außerdem erleichtert die Simulationstechnik, aufgrund der Möglichkeit der Betrachtung verschiedener Systemzustände, das Erlangen eines detaillierten Systemverständnisses.

Die Höhe der stochastischen Einflussfaktoren, die Existenz von gegenläufigen Zielen sowie starke Wirkungszusammenhänge, die ein vollumfängliches Systemverständnis nur schwer ermöglichen, sind die Kriterien mit der höchsten Bedeutung für die Beurteilung der Adäquanz von Simulation (vgl. Abschnitt 5.3). Diese bilden die Hauptfaktoren für die hohe Komplexität bei der Analyse von SCs. Der Trend hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung der SC erschwert dadurch zunehmend den Einsatz herkömmlicher Tabellenkalkulationsprogramme. Gleichzeitig wird die Verwendung von spezifischeren Problemlösungsmethoden gefördert. Eine potenzielle zukünftige Untersuchung ist daher der Vergleich der Simulation mit mathematischen Optimierungsverfahren außerhalb der Tabellenkalkulation. Zusätzlich sind Analysewerkzeuge zu berücksichtigen, die ähnliche Rechenoperationen wie Tabellenkalkulationsprogramme nutzen, jedoch größere Datenmengen verarbeiten können. Im Zuge dessen sollten quantifizierbare Entscheidungskriterien erarbeitet werden, auf Grundlage derer eine Empfehlung über die einzusetzende Methode gegeben werden kann.

Die Kombination der Simulation mit Verfahren der mathematischen Optimierung, die auf aktuellen Fachtagungen regelmäßig thematisiert wird, eröffnet die Möglichkeit, die Vorteile der beiden Methoden zu vereinen. Der Nachteil der Simulation, dass keine Optimierung im eigentlichen Sinne möglich ist, wird dadurch aufgehoben. Die Entwicklung dieser Methodik der Problemlösung sollte daher im Detail untersucht werden. Hierbei ist zudem die Vorgehensweise bei der Anwendung zu berücksichtigen, da neue Rollen bei der Durchführung einer Simulationsstudie entstehen.

Der erzielte Fortschritt hinsichtlich der Einfachheit der Anwendung von Simulationswerkzeugen ist ebenfalls zu verfolgen. Ein Abbau der Hemmnisse des Einsatzes verändert die Bewertung der Angemessenheit der Problemlösungsmethode innerhalb des Konzepts maßgeblich. Bei vielen Ausprägungen der Entscheidungskriterien ist die Simulationstechnik lediglich aufgrund eines negativen Kosten-Nutzen-Verhältnisses schlechter bewertet. Eine niedrige Komplexität des Untersuchungsgegenstands rechtfertigt die durch Simulation anfallenden Kosten nicht, solange deutlich kostengünstiger Analysemethoden zur Verfügung stehen.

Literaturverzeichnis

- Arbeitsgemeinschaft Simulation (Hg.) (1997): Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. Online verfügbar unter <http://www.uwe-pret.de/fabrikplanung/doku/asim-leitfa-den.pdf>, zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- Arbeitsgemeinschaft Simulation (Hg.) (2018a): ASIM. Online verfügbar unter <https://www.asim-gi.org/asim/>, zuletzt geprüft am 25.09.2018.
- Arbeitsgemeinschaft Simulation (Hg.) (2018b): Fachtagung "Simulation in Produktion und Logistik". Online verfügbar unter <https://www.asim-gi.org/tagungen/asim-fachtagung-simulation-in-produktion-und-logistik/>, zuletzt geprüft am 25.09.2018.
- Arndt, Holger (2008): Supply Chain Management. Optimierung logistischer Prozesse. 4. Aufl. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH.
- Banks, Jerry; Carson, John S.; Nelson, Barry L.; Nicol, David M. (2005): Discrete-event system simulation. 4. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- Banks, Jerry; Jain, Sanjay; Buckley, Steve; Lendermann, Peter; Manivannan, Mani (2002): Panel Session: Opportunities for Simulation in Supply Chain Management. In: Enver Yücesan, Chun-Hung Chen, Jane L. Snowdon und John M. Charnes (Hg.): 2002 Winter Simulation Conference. Proceedings. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 1652–1658.
- Benker, Hans (2014): EXCEL in der Wirtschaftsmathematik. Wiesbaden: Springer.
- Bretzke, Wolf-Rüdiger (2015): Logistische Netzwerke. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Brito, Thiago; dos Santos Sila, Rodolfo; Botter, Rui Carlos; Pereira, Newton; Medina, Afonso (2010): Discrete Event Simulation Combined with Multi-Criteria Decision Analysis Applied to Steel Plant Logistics System Planning. In: Björn Johansson, Sanjay Jain und Jairo Montoya-Torres (Hg.): 2010 Winter Simulation Conference. Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, S. 2126–2137.
- Burkard, Rainer E.; Zimmermann, Uwe T. (2012): Einführung in die Mathematische Optimierung. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Busch, Axel; Dangelmaier, Wilhelm (2004): Integriertes Supply Chain Management - ein koordinationsorientierter Überblick. In: Axel Busch und Wilhelm Dangelmaier (Hg.): Integriertes Supply Chain Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 1–21.
- Chopra, Sunil; Meindl, Peter (2016): Supply Chain Management. Strategy, Planning, and Operation. 6. ed. Boston, Mass.: Pearson.
- Cohen, Shoshanah; Roussel, Joseph (2006): Strategisches supply chain management. Berlin: Springer.
- Cooper, Martha C.; Lambert, Douglas M.; Pagh, Janus D. (1997): Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. In: *The International Journal of Logistics Management* 8 (1), S. 1–14.
- Corsten, Hans; Gössinger, Ralf (2008): Einführung in das Supply Chain Management. 2. Aufl. München: Oldenbourg.
- Eley, Michael (2012): Simulation in der Logistik. Eine Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin [u.a.]: Springer/Gabler.
- Felberbauer, Thomas; Peirleitner, Andreas; Altendorf, Klaus (2017): Simulation-based Optimization for a Supply Chain with Load Bundling Opportunity. In: Sigrid Wenzel und Tim Peter (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik 2017. 17. ASIM-Fachtagung. Kassel: Kassel University Press GmbH, S. 139–148.
- Floudas, Christodoulos A. (1995): Nonlinear and mixed-integer optimization. Fundamentals and applications. New York: Oxford University Press.
- Frontline Systems Inc. (Hg.) (2018): Excel Solver. Algorithms and Methods Used. Online verfügbar unter <https://www.solver.com/excel-solver-algorithms-and-methods-used>, zuletzt geprüft am 07.11.2018.
- Gibson, Randall; Banks, Jerry (1997): Don't simulate when... 10 rules for determining when simulation is not appropriate. In: *IIE Solutions* 29 (9), S. 30–32.
- Gohout, Wolfgang (2009): Operations Research. Einige ausgewählte Gebiete der linearen und nichtlinearen Optimierung. 4. Aufl. München: Oldenbourg.

- Göpfert, Ingrid (2004): Einführung, Abgrenzung und Weiterentwicklung des Supply Chain Managements. In: Axel Busch und Wilhelm Dangelmaier (Hg.): Integriertes Supply Chain Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 25–46.
- Gordon, Geoffrey (1978): System simulation. 2. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer/Vieweg.
- Hahn, Dietger (2000): Problemfelder des Supply Chain Management. In: Horst Wildemann (Hg.): Supply Chain Management. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag, S. 9–19.
- Hellingrath, Bernd; Hegmanns, Tobias; Maaß, Jan-Christoph; Toth, Michael (2008): Prozesse in Logistiknetzwerken - Supply Chain Management. In: Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 459–486.
- Hillier, Frederick S.; Lieberman, Gerald J. (2015): Introduction to Operations Research. 10. ed. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Hochstättler, Winfried (2017): Lineare Optimierung. Berlin: Springer.
- Kistner, Klaus-Peter (1988): Optimierungsmethoden. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Klaas, Alexander; Klibi, Kamel (2015): Ganzheitliche Supply-Chain-Optimierung mittels Kombination von mathematischer Optimierung und Simulation. In: Markus Rabe und Uwe Clausen (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik 2015. 16. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 129–135.
- Krahl, David; Schwerzmann, Joy; Graitcer, Sam (2015): Modeling a Vaccine Distribution Supply Chain. In: 2015 Winter Simulation Conference. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 937–938.
- Krug, Wilfried; Rose, Oliver (2011): Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 21–28.
- Kuhn, Axel (2008): Logistikprozesse in Industrie und Handel. Das Modellierungsparadigma. In: Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 219–224.

- Kühnapfel, Jörg B. (2014): Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. Wiesbaden: Springer/Gabler.
- Lakshmanan, Kavitha (2014): Application of Discrete Event Simulation at Eastman Chemical Company. In: Andreas Tolk (Hg.): 2014 Winter Simulation Conference. Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, S. 4185–4186.
- Lambert, Douglas M. (2014): Supply chain management. Processes, partnerships, performance. 4. ed. Sarasota, Florida: Supply Chain Management Institute.
- Liebl, Franz (1995): Simulation. Problemorientierte Einführung. 2. Aufl. München: Oldenbourg.
- März, Lothar; Rose, Oliver (2011): Simulation. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 13–19.
- März, Lothar; Weigert, Gerald (2011): Simulationsgestützte Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–12.
- Mayer, Christoph; Weber, Carsten; Francas, David (2017): Lineare Optimierung mit Excel. In: Christoph Mayer, Carsten Weber und David Francas (Hg.): Lineare Algebra für Wirtschaftswissenschaftler. Mit Aufgaben und Lösungen. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer/Gabler, S. 225–242.
- Mehr, Franz Josef; Mehr, María Teresa (2015): Excel und VBA. Einführung mit praktischen Anwendungen in den Naturwissenschaften. Wiesbaden: Springer/Vieweg.
- Naylor, Thomas H.; Balintfy, Joseph L.; Burdick, Donald S.; Chu, Kong (1966): Computer simulation techniques. New York: Wiley.
- Nickel, Stefan; Stein, Oliver; Waldmann, Karl-Heinz (2014): Operations Research. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Papageorgiou, Markos (1991): Optimierung. Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung. München: Oldenbourg.
- Papier, Felix; Thonemann, Ulrich (2008): Supply Chain Management. In: Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 21–34.

- Poole, Tom G.; Szymankiewicz, Jan Z. (1977): Using simulation to solve problems. London: McGraw-Hill.
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer.
- Scheer, August-Wilhelm; Borowsky, Rainer (1999): Supply Chain Management: Die Antwort auf neue Logistikanforderungen. In: Herbert Kopfer und Christian Bierwirth (Hg.): Logistik Management. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–14.
- Schulte, Christof (2017): Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. 7. Aufl. München: Vahlen.
- Schulze, Lothar (1988): Simulation von Materialflußsystemen. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.
- Schulze, Manuel (2008): Prozesskostenorientierte Gestaltung von Wertschöpfungsketten. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.
- Seuring, Stefan; Schneidewind, Uwe (2000): Kostenmanagement in der Wertschöpfungskette. In: Horst Wildemann (Hg.): Supply Chain Management. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag, S. 227–250.
- Shannon, Robert E. (1998): Introduction to the art and science of simulation. In: D. J. Medeiros, Edward F. Watson, John S. Carson und Mani S. Manivannan (Hg.): 1998 Winter simulation conference. Proceedings. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 7–14.
- Stewens, Michael (2005): Gestaltung und Steuerung von Supply Chains. Lohmar: Eul Verlag.
- Umeda, Shigeki (2013): Simulation analysis of supply chain systems with reverse logistics. In: Raghu Pasupathy (Hg.): 2013 Winter Simulation Conference. Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, S. 3375–3384.
- VDI (2014): VDI 3633 Blatt 1. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth.
- Vonhoegen, Helmut (2011): Excel 2010. Formeln und Funktionen. Bonn: Vierfarben.
- Vonhoegen, Helmut (2016): Excel 2016. Der umfassende Ratgeber. Bonn: Vierfarben.

- Weber, Jürgen (2012): Logistikkostenrechnung. Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer/Vieweg.
- Wenzel, Sigrid; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver; Weiß, Matthias (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Werner, Hartmut (2017): Supply Chain Management. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer.
- Wetterer, Eva-Christiane (2005): Die Kunst der richtigen Entscheidung. 40 Methoden, die funktionieren. Hamburg: Murmann.
- Winter Simulation Conference (2018): Simulation for a Noble Cause. Online verfügbar unter <http://meetings2.informs.org/wordpress/wsc2018/>, zuletzt geprüft am 25.09.2018.
- Wolsey, Laurence A.; Nemhauser, George L. (2014): Integer and Combinatorial Optimization. Hoboken: Wiley.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Supply Chain nach Busch und Dangelmaier (2004, S. 5)	5
Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Logistik nach Weber (2012, S. 5)	6
Abbildung 3: Aufgabenmodell des SCM nach Werner (2017, S. 87)	9
Abbildung 4: Eingabefenster des MS Excel Solvers	16
Abbildung 5: Grafische Darstellung der Definition der Simulation nach Arbeitsgemeinschaft Simulation (1997, S. 3)	19
Abbildung 6: Fälle der Unterscheidung von Simulationen nach Ören (1979, S. 36)	20
Abbildung 7: Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien nach (Rabe et al. 2008, S. 5)	22
Abbildung 8: Vorgehensweise und Methodik zur Prüfung der Simulationswürdigkeit	39
Abbildung 9: Beispielhafte Struktur eines Entscheidungsbaums nach Sauerland und Gewehr (2017, S. 91)	40
Abbildung 10: Ausschnitt des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit	45
Abbildung 11: Funktionsweise Dropdown-Liste und Umsetzung Entscheidungsbaum	45
Abbildung 12: Entscheidungsbaum – Ist die Simulation die Anforderungen der vorliegenden Problemstellung geeignet?	46
Abbildung 13: Ergebnisdarstellung Stufe 1 – Entscheidungsbaum	47
Abbildung 14: Entscheidungskriterien der Nutzwertanalyse inklusive Gewichtung	48
Abbildung 15: Paarweise Vergleiche des AHP	49
Abbildung 16: Ergebnisdarstellung Stufe 2 – Nutzwertanalyse	54
Abbildung 17: Fallbeispiel I – Konzeptmodell	57
Abbildung 18: Beantwortung der Ausschlusskriterien des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit	58

Abbildung 19: Beantwortung der weichen Kriterien des Fragenkatalogs zur Prüfung der Simulationswürdigkeit.....	59
Abbildung 20: Zuordnung der Fahrzeuge zu Touren	62
Abbildung 21: Solver-Parameter der Flottengrößenoptimierung	63
Abbildung 22: Entfernungen zur Berechnung der variablen Fahrtstrecken	65
Abbildung 23: Berechnung der Arbeitszeit je Fahrzeug	66
Abbildung 24: Mögliche Fahrzeuge je Tour	67
Abbildung 25: Prüfung der Ankunftszeit der Zustellung	68
Abbildung 26: Lösung der nichtlinearen Optimierung.....	69
Abbildung 27: Einhaltung der Lieferzeitfenster	70
Abbildung 28: Nutzwertanalyse zur Prüfung der Simulationswürdigkeit der Problemstellung der Flottengrößenbestimmung.....	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wissenschaftliche Beiträge zum Thema Supply Chain Simulation	29
Tabelle 2: Kriterienkatalog - Ausschlusskriterien.....	33
Tabelle 3: Kriterienkatalog - Weiche Kriterien.....	34
Tabelle 4: Ergebnis einer Nutzwertanalyse mit Bewertungsskala 1-10 nach Kühnapfel (2014, S. 19)	41
Tabelle 5: Beispielhafte paarweise Vergleiche des Analytic Hierarchy Process	42
Tabelle 6: Quadrierung der Matrix und Berechnung der Gewichtung der Kriterien	43
Tabelle 7: Skala zur Bewertung der Auswahlmöglichkeiten nach (Kühnapfel 2014, S. 17).....	43
Tabelle 8: Bepunktung der Analysewerkzeuge je Ausprägung	52
Tabelle 9: Substituierbarkeit der Fahrzeugtypen	58
Tabelle 10: Input-Daten Flottenoptimierung	61

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
MS Excel	Microsoft Excel
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WSC	Winter Simulation Conference

Eidesstattliche Versicherung (Affidavit)

Name, Vorname
(Last name, first name)

Matrikelnr.
(Enrollment number)

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem folgenden Titel selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

I declare in lieu of oath that I have completed the present Bachelor's/Master's* thesis with the following title independently and without any unauthorized assistance. I have not used any other sources or aids than the ones listed and have documented quotations and paraphrases as such. The thesis in its current or similar version has not been submitted to an auditing institution.

Titel der Bachelor-/Masterarbeit*:
(Title of the Bachelor's/ Master's* thesis):

*Nichtzutreffendes bitte streichen
(Please choose the appropriate)

Ort, Datum
(Place, date)

Unterschrift
(Signature)

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -).

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Official notification:

Any person who intentionally breaches any regulation of university examination regulations relating to deception in examination performance is acting improperly. This offense can be punished with a fine of up to €50,000.00. The competent administrative authority for the pursuit and prosecution of offenses of this type is the chancellor of TU Dortmund University. In the case of multiple or other serious attempts at deception, the examinee can also be unenrolled, section 63, subsection 5 of the North Rhine-Westphalia Higher Education Act (*Hochschulgesetz*).

The submission of a false affidavit will be punished with a prison sentence of up to three years or a fine.

As may be necessary, TU Dortmund will make use of electronic plagiarism-prevention tools (e.g. the "turnitin" service) in order to monitor violations during the examination procedures.

I have taken note of the above official notification:**

Ort, Datum
(Place, date)

Unterschrift
(Signature)

****Please be aware that solely the German version of the affidavit ("Eidesstattliche Versicherung") for the Bachelor's/ Master's thesis is the official and legally binding version.**