

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

# **Steuerung zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie**

Corinna Eicher

Vollständiger Ausdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
2. Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski

Die Dissertation wurde am 15.07.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.01.2020 angenommen.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner  
**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2020

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Corinna Eicher  
Copyright © Corinna Eicher 2020  
ISBN: 978-3-948514-06-8

Printed in Germany, 2020

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit der MAN Truck & Bus SE. Während dieser Zeit und besonders bei der Finalisierung dieser Arbeit standen mir viele Personen unterstützend zur Seite, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Zu Beginn gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald Günthner, der es mir überhaupt erst ermöglicht hat meine Dissertation im Rahmen dieser Forschungs Kooperation anzufertigen. Seine konstruktiven Anregungen und seine Unterstützung, haben einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieses Promotionsvorhabens geleistet. Herzlichen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen. Meinen besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner entgegenbringen. Seine konstruktive Kritik und die Diskussionen mit ihm haben mich auf dem Weg der Promotion maßgeblich weitergebracht. Seine Ansichten haben mich stets zum Denken angeregt und so zu meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen. Danke für die Unterstützung und die mir gewährten Freiräume bei der Erstellung dieser Arbeit. Zudem danke ich herzlichst Herrn Professor Dr.-Ing. Uwe Dombrowski für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Herrn Dr. Lars Eiermann von der MAN Truck & Bus SE danke ich für die Initiierung des Forschungsprojektes und die unternehmensseitige Betreuung in den ersten Jahren. Sein Interesse und seine unermüdliche Art zu diskutieren habe mich stets gefordert und meinen Fortschritt gefördert. Ich danke Herrn Dr.-Ing. Michael Brieke von der MAN Truck & Bus SE, der die unternehmensseitige Betreuung in den letzten Jahren übernommen hat, für sein stets offenes Ohr und seine wertvollen, konstruktiven Anregungen. In unzähligen Diskussionen konnte ich von seiner analytischen Art profitieren und durch seinen Input konnte ich die Qualität dieser Arbeit um ein Vielfaches steigern.

Weiterhin danke ich allen Kollegen und Freunden der MAN Truck & Bus SE für die beste persönliche und fachliche Unterstützung, die man sich vorstellen kann. In diesem Zusammenhang möchte ich auch Frau Dr.-Ing. Annika Lechner für ihre Unterstützung, ihre kritischen Fragen und ihre motivierende Art danken. Mein weiterer Dank gilt allen aktiven und ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls fml für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre

sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ein großer Dank für das Engagement bei der Durchsicht dieser Arbeit gilt Herrn Tobias Staab, Frau Dr.-Ing. Kristina Däuschinger und Frau Dr.-Ing. Eva Klenk. Für die persönliche Unterstützung möchte ich mich vor allem bei Frau Dr.-Ing. Kristina Däuschinger und Frau Sarah Fink bedanken.

Meinen grenzenlosen Dank möchte ich meiner Familie aussprechen. Ich danke meinen Schwiegereltern, Angelika und Konrad Eicher, die immer mitgefiebert haben und mir motivierend zur Seite standen. Meinen Eltern, Edith und Dieter Maas, danke ich aus tiefstem Herzen. Ihr Glaube an mich, ihre Förderung und ihre bedingungslose Unterstützung haben diese Arbeit erst ermöglicht. Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meinem Ehemann Philipp Eicher, der mich die gesamte Promotionszeit begleitet hat. Sein Verständnis und Rückhalt, seine liebevolle Unterstützung und seine unterschiedliche Sicht auf die Dinge gaben mir stets Kraft und Motivation diese Arbeit erfolgreich fertigzustellen.

München, im Januar 2020

Corinna Eicher

## Kurzzusammenfassung

---

Die Automobilindustrie ist geprägt von einer zunehmenden Produktkomplexität, um unsicheren kundenindividuellen Nachfragen begegnen zu können. Die verringerte Fertigungstiefe bei Automobilherstellern bewirkt, dass über 70 % der Wertschöpfung in vorgelagerten Stufen der Lieferkette stattfindet. Automobilhersteller werden somit immer abhängiger von der Zulieferindustrie und der Inbound-Logistik kann im übertragenen Sinne eine wertschöpfende Bedeutung beigemessen werden. Zudem steigen die in der Inbound-Logistik entstehenden Kosten. In den letzten Jahrzehnten sind daher neue Logistikkonzepte, wie z. B. Just-in-Time und Just-in-Sequence, entwickelt worden. Sich stetig verändernde Gegebenheiten, wie zunehmende Bauteilbedarfe oder variierende Lieferanten, können jedoch dazu führen, dass die verwendeten Logistikkonzepten nicht über längere Zeit kostenoptimal bleiben. Um dem entgegenzuwirken, sind die Prozesse der Inbound-Logistik regelmäßig in Bezug auf Optimierungspotenziale zu untersuchen und bei Bedarf flexibel anzupassen.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Steuerungskonzept zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik begegnet den beschriebenen Herausforderungen der Automobilindustrie. Bei auftretenden Veränderungen wird erkannt, ob der Inbound-Prozess für ein Bauteil schnell und günstig in Bezug auf die verwendeten Logistikkonzepte anzupassen ist, sodass die Belieferung weiterhin kosteneffizient erfolgt. Das Steuerungskonzept besteht aus drei Planungsbausteinen. Der erste Planungsbaustein umfasst die Identifikation von Bauteilen, die Potenzial bezüglich der flexiblen Umstellung des Logistikkonzeptes besitzen. Der zweite Planungsbaustein ist ein Optimierungsmodell, welches das kostenoptimale Logistikkonzept – d. h. die Kombination aus Belieferungs- und Transportkonzept – bestimmt. Im dritten Planungsbaustein wird mit einem Realloptionsansatz entschieden, ob ein Logistikkonzept umzustellen ist und ob Flexibilisierungsmaßnahmen, die die Umstellkosten und -dauer senken bzw. verkürzen, umzusetzen sind.

Das Steuerungskonzept bietet einen durchgängigen planerischen Ansatz zur flexiblen Verwendung von Logistikkonzepten in der Inbound-Logistik. Dabei wird sichergestellt, dass Flexibilisierungsmaßnahmen nur zum notwendigen Zeitpunkt und im erforderlichen Maße umgesetzt werden. Zudem sind die Planungsbausteine als Einzelmethoden anwendbar, sodass sie für die Unternehmenspraxis einen direkten Mehrwert bieten. Die bei einem deutschen Nutzfahrzeughersteller betrachteten Fallbeispiele belegen die Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit der Einzelmethoden und des gesamten Steuerungskonzeptes.



## Abstract

---

The automotive industry is characterized by an increasing product complexity due to highly uncertain and customer-individual demand. The decreased vertical integration of automotive manufacturers causes a value creation of over 70% in the upstream stages of the supply chain. Automotive manufacturers depend more and more on their suppliers, whereby the inbound logistics receives figuratively a value adding meaning. Moreover, the costs arising within the inbound logistics increase permanently. Therefore, new inbound logistics concepts, such as just-in-time and just-in-sequence, have been developed over the last decades. Continuously changing circumstances, such as increasing part demand or varying suppliers, may lead to the fact that used logistics concepts are no longer cost optimal. Hence, logistics processes need to be analyzed regularly for optimization potentials and should be flexibly adapted according to changing circumstances.

The described challenges in the inbound logistics of the automotive industry are addressed in this work. This research provides a steering concept for the flexible configuration of the inbound logistics. When circumstances within the inbound logistics change the steering concept identifies the parts whose logistics concepts should be switched in a fast and low-priced way in order to remain cost efficient. The steering concept consists of three planning components. The first component is an identification method for parts that have potential to flexibly switch the inbound logistics concept. The second component is an optimization model, which detects the cost-optimal logistics concept – i.e. the combination of supply and transportation concept. The third component delivers a monetary decision model based on a real option approach. The model allows to decide whether to switch a logistics concept and whether to implement measures for flexibilization in order to reduce the costs and time for future logistics concept switches.

The developed steering concept offers a continuous planning approach for the flexible configuration of the inbound logistics. The concept ensures that measures for flexibilization are only implemented if necessary and reasonable regarding time and costs. Additionally, the planning components of the steering concept can be applied separately. Thereby this research delivers a direct contribution for practitioners. The conducted case studies at a German commercial vehicle manufacturer confirm that the developed steering concept and its methods are applicable in practice.





# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Notationsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XXIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation, Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage	4
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit	5
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>9</b>
2.1 Grundlagen der Automobillogistik	9
2.1.1 Logistik und Supply Chain Management	9
2.1.2 Versorgungsprozesse der Materiallogistik	11
2.1.2.1 Konzepte der Inbound-Logistik	12
2.1.2.2 Konzepte der Inhouse-Logistik	17
2.1.3 Prinzipien der schlanken Automobillogistik	20
2.2 Forschungsstand zu Flexibilität in der Logistik	23
2.2.1 Definitionen im Kontext von Flexibilität	23
2.2.2 Forschungsansätze zu Flexibilität in der Logistik	33
2.2.3 Diskussion der Literaturrecherche und Einordnung der Arbeit	37
2.3 Studie zur Flexibilität der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie	39
2.3.1 Zielsetzung und Rahmendaten der Studie	39
2.3.2 Wesentliche Erkenntnisse der Studie	40
2.3.3 Zusammenfassung – Handlungsbedarf in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie	42

2.4	Planungsmethoden zur Konfiguration einer flexiblen Inbound-Logistik	44
2.4.1	Ansätze der Materialklassifikation	45
2.4.1.1	Typische Klassifizierungsansätze in der Materiallogistik	45
2.4.1.2	Klassifikation von multivariaten Datensätzen	47
2.4.1.3	Diskussion der Materialklassifikationsansätze	50
2.4.2	Methoden zur Auswahl von Inbound-Logistikkonzepten	51
2.4.2.1	Qualitative Auswahlverfahren	51
2.4.2.2	Quantitative Auswahlverfahren	54
2.4.2.3	Diskussion der Auswahlmethoden von Logistikkonzepten	62
2.4.3	Investitionsentscheidung unter Berücksichtigung von Flexibilität	63
2.4.3.1	Investitionsrechenverfahren unter Sicherheit	63
2.4.3.2	Investitionsrechenverfahren unter Unsicherheit	66
2.4.3.3	Fazit zu Investitionsrechenverfahren in Bezug auf die Inbound- Logistik	70
<b>3</b>	<b>Konzeptioneller Rahmen des Steuerungskonzeptes</b>	<b>71</b>
3.1	Anforderungen an das Forschungsergebnis	71
3.2	Wirkungsweise und Struktur des Steuerungskonzeptes	74
3.2.1	Wirkungsablauf zur Steuerung der Inbound-Logistik	74
3.2.2	Planungsbausteine als Steuereinrichtung	77
<b>4</b>	<b>Identifikation von Grenzbauteilen mit Umstellpotenzial</b>	<b>81</b>
4.1	Anforderungen an die Identifikationsmethode	82
4.2	Systematische Bestimmung der relevanten Einflussfaktoren	84
4.2.1	Aufnahme von Einflüssen auf die Effizienz der Inbound-Logistik	84
4.2.2	Charakterisierung der Einflüsse	86
4.2.3	Bestimmung der relevanten Einflussfaktoren	87
4.3	Entwicklung der Identifikationsmethode für Grenzbauteile	89
4.3.1	Bewertung bestehender Materialklassifikationsansätze	89
4.3.2	Univariate Ermittlung der Grenzwerte	91
4.3.2.1	Statistische Grundlagen für die Grenzwertbestimmung	92
4.3.2.2	Grundidee der Grenzwertbestimmung	94
4.3.2.3	Vorgehen zur Grenzwertbestimmung	95
4.3.3	Multivariate Identifikation homogener Bauteilgruppen	95
4.3.3.1	Auswahl des Clusteranalyseverfahrens	96
4.3.3.2	Funktionsweise und Anwendung des k-Means-Verfahrens	97

---

4.3.4 Analytische Bestimmung der Grenzbauteile	101
4.3.4.1 Identifikation der Grenzbauteile	102
4.3.4.2 Priorisierung der Grenzbauteile	103
4.3.4.3 Erfahrungsbasierte Validierung der Grenzbauteile	105
4.4 Zusammenfassung und kritische Reflexion der Identifikationsmethode	106
<b>5 Integrierte Optimierung der Belieferungs- und Transportkonzepte</b>	<b>109</b>
5.1 Betrachtungsumfang und Rahmen des Optimierungsmodells	109
5.1.1 Optimierungsszenarien	109
5.1.2 Anforderungen an das Optimierungsmodell	111
5.1.3 Annahmen und Abgrenzungen	112
5.2 Prozesskosten der Inbound-Logistik	114
5.2.1 Allgemeine Prozessbeschreibung	114
5.2.2 Kostenkomponenten je Logistikkonzept	116
5.2.2.1 Transportkosten	119
5.2.2.2 Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten	121
5.2.2.3 Sonstige Kosten	122
5.3 Entwicklung des Optimierungsmodells	124
5.3.1 Auswahl des Modellierungsansatzes	124
5.3.2 Modellformulierung	125
5.3.3 Erweiterungen des Grundmodells	129
5.4 Zusammenfassung und kritische Reflexion des Optimierungsmodells	133
<b>6 Flexible Umstellung des Inbound-Prozesses</b>	<b>135</b>
6.1 Betrachtungsumfang des Flexibilitätsansatzes	135
6.1.1 Anforderungen an den Flexibilitätsansatz	135
6.1.2 Vorgehen zur Entwicklung des Flexibilitätsansatzes	137
6.2 Bewertung von Umstellungen und Flexibilisierungsmaßnahmen	138
6.2.1 Bewertung von Logistikkonzeptumstellungen	138
6.2.1.1 Inhalte des Umstellprozesses	138
6.2.1.2 Umstellkosten und Umstell dauern	144
6.2.1.3 Methode zur systematischen Umstellbewertung	146
6.2.2 Flexibilisierung von Umstellungen	147
6.3 Entscheidungsmodell für flexible Umstellungen	148
6.3.1 Methodischer Ansatz für Umstellentscheidungen	148
6.3.2 Strukturierung der Umstellentscheidung	152

6.3.3	Modellierung der Umstellentscheidung	153
6.3.3.1	Fundament der Modellierung	154
6.3.3.2	Stufe 1: Vereinfachte Umstellungen	157
6.3.3.3	Stufe 2: Basismodell für Umstellungen	160
6.3.3.4	Stufe 3: Flexibilisierung	161
6.3.3.5	Stufe 4: Umstelldauer	162
6.3.3.6	Stufe 5: Veränderung der Einflussgrößen	163
6.4	Zusammenfassung und kritische Reflexion des Flexibilitätsansatzes	165
<b>7</b>	<b>Evaluation des Steuerungskonzeptes in der industriellen Praxis</b>	<b>167</b>
7.1	Validierung der Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen	168
7.1.1	Datenanalyse	168
7.1.1.1	Univariate Datenanalyse	168
7.1.1.2	Multivariate Datenanalyse	171
7.1.2	Nachbereitung der Ergebnisse	173
7.1.3	Evaluation der Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen	176
7.2	Validierung des Optimierungsmodells auf ausgewählte Grenzbauteile	178
7.2.1	Vorgehen zur Anwendung des Optimierungsmodells	179
7.2.2	Ergebnisse aus der Anwendung des Optimierungsmodells	180
7.2.3	Evaluation des Optimierungsmodells	183
7.3	Validierung des Flexibilitätsansatzes	185
7.3.1	Umstellbewertung ausgewählter Grenzbauteile	185
7.3.2	Bewertung von Flexibilisierungsmaßnahmen für Umstellungen	188
7.3.3	Anwendung des Entscheidungsmodells für flexible Umstellungen	190
7.3.3.1	Analyse des Modellverhaltens	190
7.3.3.2	Umstellentscheidung bei Frontklappen	195
7.3.4	Evaluation des Flexibilitätsansatzes	196
7.4	Beantwortung der Forschungsfrage	198
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>201</b>
8.1	Zusammenfassung	201
8.2	Ausblick	204
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>229</b>
	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>231</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>235</b>

---

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>238</b>
<b>Anhang A Ergänzungen zur Identifikationsmethode</b>	<b>A-1</b>
<b>Anhang B Ergänzungen zum Optimierungsmodell</b>	<b>B-1</b>
B.1 Veranschaulichung der Berechnung der Bestände	B-1
B.2 Exemplarische Stufenfunktion von Transportkosten	B-1
B.3 Exemplarische Herleitung eines Zielfunktionskoeffizienten	B-2
B.4 Zielfunktionskoeffizienten des Optimierungsmodells	B-2
B.5 Effekt von Anlieferfrequenzen	B-6
<b>Anhang C Ergänzungen zum Flexibilitätsansatz</b>	<b>C-1</b>
C.1 Ergänzungen zur Umstellbewertung	C-1
C.2 Ergänzungen zum Entscheidungsmodell	C-4
<b>Anhang D Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel</b>	<b>D-1</b>
D.1 Ergänzungen zur Anwendung der Identifikationsmethode	D-1
D.1.1 Datenvorbereitung und -vorverarbeitung	D-1
D.1.2 Ergänzungen zur univariaten Datenanalyse	D-4
D.1.3 Ergänzungen zur multivariaten Datenanalyse	D-7
D.2 Ergänzungen zur Anwendung des Optimierungsmodells	D-11
D.3 Ergänzungen zur Anwendung des Flexibilitätsansatzes	D-12
D.3.1 Ergänzungen zur Umstellbewertung	D-12
D.3.2 Ergänzungen zur Anwendung des Entscheidungsmodells	D-18



## Notationsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
<b>Notation zu Kapitel 4</b>		
$F_{max_K}$	–	Maximaler F-Wert der Clusterlösung $K$
$i$	–	Index für Einflussfaktor $i \in 1, \dots, 6$
$j$	–	Index für Belieferungsform $i \in 1, 2, 1 =$ lagerhaltig, $2 =$ lagerlos
$k$	–	Index für Cluster $k \in 1, \dots, K$
$K$	–	Index für Clusterlösung mit $K$ Clustern
$G_{i,j}^u$	–	unterer Grenzwert für Einflussfaktor $i$ und Beliieferungsform $j$
$G_{i,j}^o$	–	oberer Grenzwert für Einflussfaktor $i$ und Beliieferungsform $j$
$n_k$	–	Anzahl an Objekten in Cluster $k$
$\eta_K^2$	–	Die durch die Clusterlösung $K$ erklärte Streuung
$PRE_K$	–	Prozentuale Verbesserung einer Clusterlösung $K$ gegenüber der vorherigen Clusterlösung $K - 1$
$SQS_{in}(K)$	–	Streuungsquadratsumme innerhalb der Cluster bei $K$ Clustern
<b>Notation zu Kapitel 5</b>		
$a_{LT}$	m <sup>2</sup>	Grundfläche eines Ladungsträgers (LT)
$a^f$	Anzahl	Vorgegebene Anlieferfrequenz
$c_{KB,konst}$	Euro	Konstante Kosten aus Kapitalbindung (KB)
$c_{KB,dyn}$	Euro	Dynamische Kosten aus Kapitalbindung (KB)
$c_{L,konst}$	Euro	Konstante Kosten aus Lagerhaltung (L)
$c_{L,dyn}$	Euro	Dynamische Kosten aus Lagerhaltung (L)
$c_{LT}$	Euro	Kosten für die Miete vom Ladungsträger (LT)
$c_{SQ}$	Euro	Kosten für die Sequenzierung (SQ) von Bauteilen
$c_{T,FTL}$	Euro	Transportkosten einer Komplettladung (englisch: <i>Full Truck Load</i> ) (FTL)
$c_{T,FTL,DA}$	Euro	Transportkosten für eine Hub-Direktabholung (DA) mit FTL-Tarif
$c_{T,FTL,MR}$	Euro	Milkrun (MR)-Transportkosten mit FTL-Tarif
$c_{T,FTL,VL}$	Euro	Vorlauf (VL)-Transportkosten mit FTL-Tarif

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$c_{T,GS}$	Euro	Transportkosten für die Gebietsspedition (GS)
$c_{T,HL}$	Euro	Transportkosten für den Hauptlauf (HL) beim Hub-and-Spoke (HuS)-Konzept
$c_{T,HuS}$	Euro	Transportkosten für das Hub-and-Spoke (HuS)-Konzept
$c_{T,LG}$	Euro	Transportkosten für den Leergut (LG)-Transport (T)
$c_{T,LTL}$	Euro	Transportkosten einer Teilladung (englisch: <i>Less than Truck Load</i> ) (LTL)
$c_{T,LTL,HL}$	Euro	Transportkosten für einen Hub-Hauptlauf (HL) mit LTL-Tarif
$c_{T,Stopp}$	Euro	Stoppkosten, die bei einem Milkrun (MR) anfallen
$c_{T,VL}$	Euro	Transportkosten für den Vorlauf (VL) beim Hub-and-Spoke-Konzept
$c_{T,*}$	Euro	Transportkosten des relevanten Transportkonzeptes (z. B. FTL)
$c_{TB}$	Euro	Kosten für die Trailerbewegung (TB) auf dem Werksgelände des OEM
$c_{TM}$	Euro	Kosten aus Trailermiete (TM)
$d_{TE}$	Stück	Bedarf an Transporteinheiten (TEs) im Betrachtungszeitraum
$d_{REF}$	Stück	Bedarf an Referenz-Transporteinheiten (Ref-TEs) im Betrachtungszeitraum
$e_{DR}$	km	Direkte Entfernung vom Lieferanten zum Empfängerwerk
$e_{HL}$	km	Hauptlauf (HL)-Entfernung vom Hub zum Empfängerwerk
$e_{MR}$	km	Distanz einer Milkrun-Route (inkl. der Zwischenhalte)
$e_{VL}$	km	Vorlauf (VL)Entfernung vom Lieferanten zum Hub
$f_i$	–	Binärvariable, ob Anlieferung in Periode $i$ stattfindet (= 1) oder nicht (= 0)
$g_{FP}$	kg	Frachtpflichtiges Gewicht einer Transporteinheit (TE)



Symbol	Einheit	Bedeutung
$g_{KG}$	kg	Tatsächliches Gewicht einer Transporteinheit (TE)
$h$	Tage	Hilfsindex für die Anzahl der Tage, die für die Festlegung der Anlieferfrequenz betrachtet wird (z. B. 5 Arbeitstage (AT)); entspricht der Länge einer Anlieferperiode $n$
$i$	–	Index für eine Periode
$I$	–	Anzahl an betrachteten Perioden; ist ein Vielfaches der Anzahl an betrachteten Anlieferperioden $n$
$\frac{I}{h}$	Anzahl	Maximale Anzahl an Anlieferperioden
$k$	–	Index für einen Tarif
$kv$	–	Ladungsträger (LT)-Klappverhältnis
$l_{FT}$		Maximale Frachträger (FT)-Nutzlast
$l_{FTL,min}$		Minimale FTL-Transport-Auslastung
$lb_k$	kg	Tarifuntergrenze (englisch: <i>lower bound</i> ) von Tarif $k$
$m$	–	Hilfsindex für die Tage in einer Anlieferperiode
$n$	–	Hilfsindex für eine Anlieferperiode
$p_{DA}$	Euro/km	Kostensatz für eine Hub-Direktabholung (DA)
$p_{EA}$	Euro/TE	Kostensatz für die Ein- und Auslagerung (EA) einer Transporteinheit (TE)
$p_{FL}$	Euro/m <sup>2</sup>	Tageskostensatz je Quadratmeter Fläche (FL) im Lager
$p_{FTL}$	Euro/km	Kostensatz für einen FTL-Transport
$p_{HL}$	Euro/100 kg	Kostensatz für einen Hub-HL-Transport
$p_{LT}$	Euro/TE	Kostensatz für die Ladungsträger (LT)-Tagesmiete
$p_{LTL}$	Euro/100 kg	Kostensatz für einen LTL-Transport
$p_{SQ}$	Euro/SNR	Kostensatz für die Sequenzierung (SQ) je Sachnummer (SNR)
$p_{Stopp}$	Euro/T	Kostensatz für die Milkrun-Zwischenhalte je Transport (T)

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$p_{TB}$	Euro/T	Kostensatz für eine Trailerbewegung (TB) je Transport (T) (vom Wareneingang zum Trailer-Yard oder vom Trailer-Yard zum Trailer-Dock oder zurück)
$p_{TE}$	Euro/TE	Preis einer Transporteinheit (TE)
$p_{TM}$	Euro/T	Tageskostensatz für die Trailermiete (TM)
$q_B$	Stück	Menge der Bestände (B)
$q_T$	Stück	Anzahl der durchgeführten Transporte (T)
$q_{TE}$	Stück	Anzahl der gelieferten Transporteinheiten (TEs)
$q_{TE,min}$	Stück	Mindestbestellmenge an Transporteinheiten (TEs)
$r_{KB}$	Prozent/Tag	Tageszinssatz für die Kapitalbindung (KB)
$s$	–	Index für eine bestimmte SNR, die in der Ref-TE enthalten ist
$sf$	–	Ladungsträger (LT)-Stapelfaktor
$t_{BV}$	Tage	Bedarfsvorlauf (BV)-Zeit
$t_{KB}$	Tage	Dauer der Kapitalbindung (KB)
$t_{LG}$	Tage	Leergut (LG)-Pufferzeit beim Lieferanten
$t_{LT}$	Tage	Beanspruchungsdauer eines Ladungsträger (LT)s
$t_{PF}$	Tage	Pufferzeit (entspricht der durchschnittlichen Dauer eines Trailers auf dem Trailer-Yard)
$t_{TM}$	Tage	durchschnittliche Trailerreichweite
$t_{TR}$	Tage	Transitzeit
$t_{VG}$	Tage	Vollgutpufferzeit beim Lieferanten
$t_{WE}$	Tage	Zeit im Wareneingang (WE)
$u_{TE}$	Stück	Packlos einer Transporteinheit (TE)
$ub_k$	kg	Tarifobergrenze (englisch: <i>upper bound</i> )
$w_{TE,k}$	kg	Berechnungsgrundlage einer TE für die Tarifstufenzuordnung
$\lambda_B$	–	Zielfunktionskoeffizient der Bestände (B)
$\lambda_T$	–	Zielfunktionskoeffizient der durchgeführten Transporte (T)
$\lambda_{T,i,k}$	–	Zielfunktionskoeffizient der durchgeführten Transporte (T) in Periode $i$ zum Tarif $k$

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\lambda_{TE}$	–	Zielfunktionskoeffizient der gelieferten Transporteinheiten (TEs)
$\lambda_{TE,i,k}$	–	Zielfunktionskoeffizient der gelieferten Transporteinheiten (TEs) in Periode $i$ zum Tarif $k$
$z_{REF}$	–	Eigenschaft einer Referenz-Transporteinheit (Ref-TE)
<b>Notation zu Kapitel 6</b>		
$B_0$	Stück	Bedarf in Periode $t = 0$
$B_t^s$	Stück	Bedarf in Periode $t$ und Zustand $s$
$BG$	Stück	Bedarfsgrenze
$\beta_t$	–	Änderungsfaktor, um den sich der Bedarf verringert ( $< 1$ ) oder erhöht ( $> 1$ )
$c_{LK_i, < BG}$	Euro	Logistikkostensatz bei Verwendung von $LK_i$ und einem Bedarf, der kleiner als die Bedarfsgrenze (BG) ist
$c_{LK_i, \geq BG}$	Euro	Logistikkostensatz bei Verwendung von $LK_i$ und einem Bedarf, der größer gleich der Bedarfsgrenze (BG) ist
$c_{LK_i, < BG}^*$	Euro	Logistikkostensatz bei Verwendung von $LK_i$ und einem Bedarf, der kleiner als die Bedarfsgrenze (BG) ist, zwischen den Zeitpunkten $t^{nK}$ und $t^{aK}$
$c_{LK_i, \geq BG}^*$	Euro	Logistikkostensatz bei Verwendung von $LK_i$ und einem Bedarf, der größer gleich der Bedarfsgrenze (BG) ist, zwischen den Zeitpunkten $t^{nK}$ und $t^{aK}$
$C_t^s(LK_i)$	Euro	Logistikkosten bei Verwendung von $LK_i$ in Periode $t$ und Zustand $s$
$d$	–	Faktor im Binomialmodell für die Down-Bewegung
$e$	–	Exponentialfunktion
$E[*]$	–	Erwartungswert von $*$
$E[C_t(LK_i)]$	Euro	Erwartungswert der Logistikkosten bei Verwendung von $LK_i$ in Periode $t$

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$E [F]$	Euro	Erwartungswert aus dem Zahlungsstrom einer flexiblen Inbound-Logistik
$E [S_t(i \rightarrow j)]$	Euro	Erwartungswert des Optionswertes das Logistikkonzept von $i$ zu $j$ in Periode $t$ umzustellen
$E_0 [F]$	Euro	Erwartungswert einer flexiblen Inbound-Logistik in Periode $t = 0$
$E_0 [F_{FM}]$	Euro	Erwartungswert einer flexiblen Inbound-Logistik in Periode $t = 0$ unter Berücksichtigung der Flexibilisierungsmaßnahme
$\hat{E} [E_{t+1}^s [LK_m]]$	Euro	Erwartete Zahlung der Folgeperiode für das jeweilige Logistikkonzept $m$
$F(i \rightarrow j)$	Euro	Flexibilitätswert der Logistikkonzeptumstellung von $i$ zu $j$
$i$	–	Index für das Logistikkonzept mit $i \in 1, 2$
$I(F)$	Euro	Investition in eine flexible Inbound-Logistik
$I(FM)$	Euro	Investition in eine Flexibilisierungsmaßnahme
$I(LK_i)$	Euro	erforderliche Investition zur Verwendung von $LK_i$
$I(i \rightarrow j)$	Euro	Umstellkosten für die Umstellung von $i$ zu $j$
$I^{re}(i \rightarrow j)$	Euro	Umstellkosten für die Erneut-Umstellung von $i$ zu $j$
$I^*(i \rightarrow j)$	Euro	angepasste Umstellkosten für die Umstellung von $i$ zu $j$ aufgrund der implementierten Flexibilisierungsmaßnahme
$LK_1$	–	aktuell verwendetes Logistikkonzept
$LK_2$	–	alternativ zu verwendendes Logistikkonzept
$n_{u(s)}$	Anzahl	Anzahl an Up-Bewegungen um Zustand $s$ zu erreichen
$m$	–	Hilfsindex zur Berechnung der erwarteten Zahlung der Folgeperiode
$PV(*)$	Euro	Barwert von $*$
$PV(LK_i)$	Euro	Barwert der Inbound-Logistik unter Verwendung von $LK_i$

Symbol	Einheit	Bedeutung
$PV(E[\Delta C_t(i \rightarrow j)])$	Euro	Summe der Barwerte der erwarteten Einsparungen bei Verwendung von $LK_j$ statt $LK_i$
$r$	Prozent	risikoloser Zinssatz
$s$	–	ein Zustand des Binomialmodells, der mit einer definierten Anzahl an Up-Bewegungen $n_{u(s)}$ erreicht werden kann
$S_t^s(i \rightarrow j)$	Euro	Optionswert das Logistikkonzept von $i$ zu $j$ in Periode $t$ und Zustand $s$ umzustellen
$t$	Monate	Periode mit $t \in 0, \dots, T$
$t^{aK}$	Monate	Zeitpunkt, ab welchem die ursprünglichen Kosten zur Verwendung der Logistikkonzepte wieder gelten
$t^{nK}$	Monate	Zeitpunkt, ab welchem die neuen Kosten zur Verwendung der Logistikkonzepte gelten
$T_{UZ}$	Monate	Dauer der Umstellzeit
$u$	–	Faktor im Binomialmodell für die Up-Bewegung
$\pi(B_t^s)$	Prozent	Eintrittswahrscheinlichkeit vom Wert $B_t^s$
$\pi(C_t^s)$	Prozent	Eintrittswahrscheinlichkeit vom Wert $C_t^s$
$\pi(S_t^s)$	Prozent	Eintrittswahrscheinlichkeit vom Wert $S_t^s$
$\pi_d$	Prozent	Wahrscheinlichkeit für die Down-Bewegung
$\pi_u$	Prozent	Wahrscheinlichkeit für die Up-Bewegung
$\sigma$	Prozent	Volatilität des Bedarfs



## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>AF</b>	Anlieferfrequenz
<b>AHP</b>	Analytical Hierarchy Process
<b>AT</b>	Arbeitstage
<b>B</b>	Bestand
<b>BG</b>	Bedarfsgrenze
<b>BTO</b>	Build-To-Order
<b>BV</b>	Bedarfvorlauf
<b>BVL</b>	Bundesvereinigung Logistik
<b>BeIK</b>	Belieferungskonzept
<b>BMW</b>	Bayerische Motoren Werke
<b>CLSP</b>	Capacitated-Lot-Sizing-Problem
<b>CMI</b>	Customer Managed Inventory
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>DA</b>	Direktabholung
<b>DAP</b>	Delivered At Place
<b>DCF</b>	Discounted Cashflow
<b>DDU</b>	Delivered Duty Unpaid
<b>DDP</b>	Delivered Duty Paid
<b>DFÜ</b>	Daten-Fern-Übertragung
<b>DLZ</b>	Durchlaufzeit
<b>EA</b>	Ein- und Auslagerung
<b>EOQ</b>	Economic Order Quantity
<b>EXW</b>	Ex Works
<b>FCA</b>	Free Carrier
<b>FL</b>	Fläche
<b>FM</b>	Flexibilisierungsmaßnahme
<b>FT</b>	Frachträger
<b>FTL</b>	Komplettladung (englisch: <i>Full Truck Load</i> )
<b>FTS</b>	Fahrerloses Transportsystem
<b>GPS</b>	Ganzheitliches Produktionssystem
<b>GS</b>	Gebietsspedition
<b>HL</b>	Hauptlauf
<b>HuS</b>	Hub-and-Spoke

<b>Incoterm</b>	International Commercial Term
<b>IQR</b>	Interquartilabstand
<b>KB</b>	Kapitalbindung
<b>KPI</b>	Key Performance Indicator
<b>L</b>	Lagerhaltung
<b>LDL</b>	Logistikdienstleister
<b>LG</b>	Leergut
<b>LH</b>	lagerhaltig
<b>Lkw</b>	Lastkraftwagen
<b>LL</b>	lagerlos
<b>LT</b>	Ladungsträger
<b>LTL</b>	Teilladung (englisch: <i>Less than Truck Load</i> )
<b>JIS</b>	Just-in-Sequence
<b>JIT</b>	Just-in-Time
<b>MR</b>	Milkrun
<b>mvGB</b>	multivariate Grenzbauteile
<b>NB</b>	Nebenbedingung
<b>NLK</b>	Neues Logistikkonzept
<b>NPV</b>	net present value
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>PERT</b>	Program-Evaluation-and-Review-Technique
<b>Ref-TE</b>	Referenz-Transporteinheit
<b>SCM</b>	Supply Chain Management
<b>SC</b>	Supply Chain
<b>SNR</b>	Sachnummer
<b>SLT</b>	Sonderladungsträger
<b>SQ</b>	Sequenzierung
<b>SQS</b>	Streuungsquadratsumme
<b>SVM</b>	Support Vector Machine
<b>T</b>	Transport
<b>TB</b>	Trailerbewegung
<b>TE</b>	Transporteinheit
<b>TK</b>	Transportkonzept
<b>TLC</b>	Total Landed Cost
<b>TM</b>	Trailermiete



<b>TPS</b>	Toyota-Produktionssystem
<b>ULT</b>	Universalladungsträger
<b>uvGB</b>	univariate Grenzbauteile
<b>VDA</b>	Verband der Automobilindustrie
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>VL</b>	Vorlauf
<b>VMI</b>	Vendor Managed Inventory
<b>WE</b>	Wareneingang
<b>ZSB</b>	Zusammenbau



# 1 Einleitung

---

## 1.1 Motivation, Ausgangssituation und Problemstellung

*Nichts ist so beständig wie der Wandel [Heraklit von Ephesos, 520–460 v. Chr.]* – mit dieser Aussage lässt sich das Umfeld heutiger produzierender Unternehmen treffend charakterisieren. Unsicherheiten und kontinuierliche Veränderungen wirken auf die Logistik- und Fertigungsprozesse von Unternehmen. Beispiele hierfür sind kürzere Produktlebenszyklen sowie eine steigende und zugleich unsichere Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten zu Preisen von Standardprodukten, wodurch die Variantenvielfalt der Produkte mannigfaltig wird [Jai-2013, S. 5946]. Eine Industrie, die diesen Herausforderungen in besonderem Maße ausgesetzt ist, ist die Automobilindustrie. Diese Industrie ist geprägt von einer steigenden Produktkomplexität, welche sich in der zunehmenden Anzahl an Modell- und Ausstattungsvarianten widerspiegelt. In Deutschland sind beispielsweise über 500 verschiedene Fahrzeugmodelle auf dem Markt. In den letzten 30 Jahren hat der Original Equipment Manufacturer (OEM) Mercedes Benz sein Pkw-Portfolio von fünf auf über 20 Modelltypen vergrößert [Kru-2014, S. 190]. Insgesamt kann bei europäischen OEMs in den Jahren 1998 bis 2008 von einer Verdreifachung der Derivate gesprochen werden [Ber-2007, S. 69 f.]. Hinzu kommen die vielfältigen, individuellen Ausstattungsmöglichkeiten (wie z. B. Motorisierung, Lackierung, Multimedia-Systeme), die die Produktkomplexität zusätzlich erhöhen. Der Premiumhersteller Bayerische Motoren Werke (BMW) besitzt beispielsweise  $10^{31}$  Varianten je Fahrzeugtyp [MöB-2007, S. 4] und der Hersteller Audi weist beim Modell A3  $10^{26}$  Varianten auf [Göt-2007, S. 19]. Neben der steigenden Variantenvielfalt verkürzen sich die Produktlebenszyklen: Beispielsweise wurde der erste VW-Golf zehn Jahre lang gefertigt [Kru-2014, S. 190], während heutige Pkw-Modelle eine Lebensdauer von nur fünf bis sechs Jahren aufweisen [Ihm-2006, S. 10].

Die zunehmende Produktkomplexität und die kürzer werdenden Produktlebenszyklen wirken sich auf die Fertigungsprozesse der OEMs aus. Um den beschriebenen Marktanforderungen begegnen zu können, verringern OEMs die eigene Fertigungstiefe immer weiter, um eine Fokussierung auf die Kernkompetenzen in der Fahrzeugproduktion zu ermöglichen und Kostenvorteile der Zulieferindustrie zu nutzen [Hil-2005, S. 40]. Mittlerweile erfolgt über 70 % der Wertschöpfung des Endprodukts in vorgelagerten Stufen der Supply Chain (SC) [MöB-2007, S. 5]. Entsprechend steigt die Verantwortung der Zulieferindustrie sowie die Abhängigkeit der OEMs von den Lieferanten [VDA-2014, S. 58]. Aufgrund dieser Wertschöpfungsverlagerung kann der Inbound-Logistik – d. h. dem Bindeglied zwischen Lieferanten und OEM – eine wertschöpfende Bedeutung beigemessen werden [Bac-

2012, S. 149]. Denn für die erfolgreiche Fahrzeugproduktion beim OEM müssen immer mehr Lieferanten die erforderlichen Halbfertigfabrikate und Bauteile herstellen und diese dem OEM zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Qualität zur Verfügung stellen. Beim Premiumautomobilhersteller BMW werden beispielsweise am Produktionsstandort Dingolfing täglich mehr als 13.000 Ladungsträger von über 600 verschiedenen Lieferanten in mehr als 400 Lkw-Sendungen angeliefert [Bat-2013, S. 210]. Für die Inbound-Logistik resultiert die Herausforderung, die Logistikprozesse effizient zu steuern, damit sowohl die steigende Anzahl anzuliefernder Bauteile und Halbfertigfabrikate als auch die wachsende Anzahl Tier-1-Lieferanten bewältigt werden kann.

Diese Herausforderung sowie der anhaltende Kostendruck in der Automobillogistik [Göp-2013c, S. 12 f.] haben dazu geführt, dass in den letzten Jahrzehnten neue Logistikkonzepte für die Inbound-Logistik, d. h. sowohl Belieferungs- als auch Transportkonzepte, entwickelt wurden [Klu-2011, S. 61 f.]. Die Automobilindustrie gilt beispielsweise als Vorreiter bei der Verwendung von Belieferungskonzepten wie Just-in-Time (JIT) und Just-in-Sequence (JIS) [Wer-2003, S. 107]. Während JIS-Belieferungen insbesondere bei Bauteilen mit vielen Varianten eingesetzt werden, erfolgen JIT-Belieferungen bei Bauteilen mit regelmäßigen Verbrauchsstrukturen, hohen Bedarfen und weniger Varianten [Klu-2010, S. 301]. Für die Produktion der S-Klasse von Mercedes Benz in Sindelfingen werden beispielsweise 42 % der Bauteile in JIS und 35 % in JIT angeliefert [Gra-2004, S. 64 f.]. Ziel beider Belieferungskonzepte ist die Vermeidung von Beständen und der damit einhergehenden verringerten Beanspruchung von Lagerflächen sowie die Reduktion von Kapitalbindung [VDI 2512, S. 14]. Da sich beispielsweise Verbrauchsstrukturen, Bedarfe und Bauteilvarianten über die Zeit verändern, sollte die Inbound-Logistik regelmäßig bezüglich Optimierungspotenziale untersucht werden [Göp-2013c, S. 12 f.]. Gleichzeitig sollte die Inbound-Logistik in bestimmtem Maße flexibel sein, da starre Logistikprozesse nicht in der Lage sind auf Veränderungen effizient zu reagieren [Gün-2008, S. 377].

Die Eigenschaft Flexibilität stellt somit eine Antwort auf die Anforderungen an die Inbound-Logistik dar. Allgemein ist Flexibilität die Fähigkeit mit einem geringen Einsatz von Zeit, Aufwand und Kosten schnell auf etwas zu reagieren oder sich schnell anzupassen [Upt-1994, S. 73; Gol-2000, S. 373]. Für die Inbound-Logistik bedeutet Flexibilität somit, die Anlieferung der Bauteile entsprechend der Anforderungen des Kunden (d. h. des OEM) in einer kosten- und zeiteffizienten Art ändern zu können [Duc-2003, S. 451; Cor-2007, S. 575; Men-2007, S. 1117]. Das bedeutet, dass die für bestimmte Bauteile verwendeten Logistikkonzepte (d. h. Belieferungs- oder Transportkonzepte) unter gegebenen Umstän-

den umzustellen sind. Auslöser für die Umstellung von lagerhaltigen Belieferungen auf JIT- oder JIS-Belieferungen können beispielsweise hohe Bauteilbestände oder häufig auftretende ungeplante Materialumschläge sein [VDI 2512, S. 4]. Zudem kann die Einführung von neuen Bauteilvarianten dazu führen, dass eine JIS-Belieferung gegenüber einer lagerhaltigen Belieferung vorzuziehen ist, sodass Lagerhaltungskosten gesenkt werden können. Gegebenenfalls entfällt zusätzlich eine zuvor erfolgte interne Sequenzierung der Bauteile, da diese dann vom Lieferanten oder Logistikdienstleister durchgeführt wird [Klu-2010, S. 304 f.; VDI 2512, S. 14].

Die Vielzahl an Literatur zu Flexibilität in der (Automobil-) Logistik deutet darauf hin (vgl. u. a. [Pfe-2016; Jaf-2015]), dass der Mehrwert von Flexibilität bereits erkannt wurde. Eine Praxisstudie der Autorin zeigt allerdings, dass noch Handlungsbedarf hinsichtlich der Umsetzung von Flexibilität besteht – insbesondere in Bezug auf die Inbound-Logistik [Maa-2017a, S. 23 f.]. Die Belieferung erfolgt derzeit noch wenig flexibel, was sich wie folgt äußert: Die verwendeten Belieferungskonzepte werden bei Automobilherstellern zwischen drei und sechs Jahren beibehalten [Maa-2017a, S. 33 f.]. Eine Überprüfung der verwendeten Belieferungskonzepte erfolgt nur unregelmäßig. Dadurch wird nicht erkannt, ob eine Umstellung des Konzeptes aus Kostensicht erforderlich ist [Maa-2017a, S. 41 ff.]. Entsprechend wird in der Automobilindustrie heute noch nicht schnell auf die kontinuierlichen Veränderungen reagiert. Bestehende Forschungsansätze zum Thema Flexibilität adressieren insbesondere die Strukturierung und Klassifizierung verschiedener Flexibilitätsarten, wie z. B. Belieferungsflexibilität, Fertigungsflexibilität und Logistikflexibilität (vgl. [Tiw-2015; Duc-2003]). Bei Betrachtung einzelner Flexibilitätsarten wird überwiegend die Messung und Bewertung von Flexibilität untersucht (vgl. [Mer-2011; Puj-2004]). Somit fehlen konkrete Ansätze zur Verwendung und Einführung von Flexibilität in der Inbound-Logistik. Um diese Ansätze entwickeln zu können, sind verschiedene Aspekte zu untersuchen: z. B. die Umstände, unter denen das Belieferungskonzept umgestellt werden sollte, das Erkennen von Bauteilen mit Umstellbedarf oder die Identifikation des kostenoptimalen Logistikkonzeptes. Zudem ist die Einführung von Flexibilität in der Regel mit Kosten verbunden [Nem-2005, S. 945]. Daher stellt sich die Frage nach der Bewertung der Zahlungsbereitschaft für einen höheren Flexibilitätsgrad in der Inbound-Logistik. Für die Verwendung und Einführung von Flexibilität in der Inbound-Logistik sind somit Maßnahmen zur Steigerung der Belieferungsflexibilität zu identifizieren und deren Kosten und Nutzen zu bewerten.

## 1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die Ausgangssituation und Problemstellung verdeutlichen den bestehenden Forschungs- und Handlungsbedarf in Bezug auf umsetzungsorientierte und planerische Ansätze für Flexibilität in der Inbound-Logistik. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Belieferungsflexibilität wird in der flexiblen Umstellung der Logistikkonzepte in der Inbound-Logistik gesehen. Flexible Umstellung bedeutet, dass die verwendeten Logistikkonzepte schnell und aufwandsarm innerhalb eines vordefinierten Handlungsspielraumes aufgrund von auftretenden Veränderungen angepasst werden können (vgl. u. a. [Upt-1994; Gol-2000; Wie-2007]). Den vordefinierten Handlungsspielraum bilden die verfügbaren Logistikkonzepte der Inbound-Logistik eines Automobilherstellers, z. B. Belieferungskonzepte wie JIT oder JIS und Transportkonzepte wie Milkrun oder Direkttransport. Auftretende Veränderungen sind Änderungen bekannter Einflussfaktoren, die eine negative Auswirkung auf die Kosteneffizienz des aktuellen Logistikprozesses besitzen können (wie z. B. eine Erhöhung der Variantenzahl, die sich negativ auf die Lagerhaltungskosten auswirkt). Eine flexible Umstellung der Logistikkonzepte soll demnach dann erfolgen, wenn aufgrund einer Veränderung der Einflussfaktoren das ursprüngliche Logistikkonzept nicht mehr das kosteneffizienteste Konzept ist. Damit die Umstellung von Logistikkonzepten nur dann erfolgt, wenn durch die Umstellung die Logistikkosten gesenkt und die Umstellkosten mindestens kompensiert werden, bedarf es einer entsprechenden Steuerung. Unter Steuerung wird die zielgerichtete Beeinflussung bestimmter Vorgänge verstanden, sodass diese in beabsichtigter Weise ablaufen [Lun-2013, S. 2; Dud-2017c]. Das Ziel dieser Arbeit ist somit die Entwicklung eines Steuerungskonzeptes für eine flexibel konfigurierbare Inbound-Logistik in der Automobilindustrie, um trotz auftretender Veränderungen weiterhin kosteneffiziente Logistikprozesse gewährleisten zu können. Ein solches Konzept steuert, bei welchen Veränderungen, Bauteilen oder Transportrelationen Logistikkonzeptumstellungen zu erfolgen haben, um weiterhin einen kosteneffizienten Inbound-Logistikprozess sicherzustellen. Aus der genannten Zielsetzung lässt sich folgende Fragestellung ableiten, welche es im Verlauf dieser Arbeit zu beantworten gilt:

### **Forschungsleitende Fragestellung**

*Wie ist eine Steuerung zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie zu gestalten, sodass auf relevante Veränderungen schnell und aufwandsarm reagiert werden kann, um dadurch kosteneffiziente Logistikprozesse gewährleisten zu können?*

Das vorrangige Ziel des zu entwickelnden Steuerungskonzeptes ist es somit die Kosteneffizienz der Inbound-Logistik zu steigern. Weiterhin soll der Bedeutung von Flexibilität Rechnung getragen werden, indem das Steuerungskonzept praxisnah und umsetzungsorientiert entwickelt wird. Dazu wird die Bedeutung von Flexibilität soweit detailliert, dass sich konkrete Maßnahmen zur Flexibilitätssteigerung ableiten lassen. Das zu entwickelnde Steuerungskonzept stellt somit eine wesentliche Erweiterung des Forschungsfeldes von Flexibilität in der Logistik dar.

### **1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit**

Um die beschriebene Zielsetzung zu erreichen und die Forschungsfrage zu beantworten, wird in mehreren Schritten vorgegangen. Die Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Das aktuelle Kapitel 1 bildet die Einleitung der Arbeit. Nach der Beschreibung der Ausgangssituation und der Problemstellung in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie ist die Zielsetzung mit der forschungsleitenden Fragestellung dargelegt.

Kapitel 2 stellt den aktuellen Stand der Forschung und Technik dar. In einem ersten Schritt werden die Grundlagen der Inbound-Logistik der Automobilindustrie erläutert. Hier wird der Betrachtungsgegenstand der Inbound-Logistik definiert und abgegrenzt. Weitere logistische Begriffsdefinitionen, wie z. B. Sourcing- und Belieferungskonzepte, vervollständigen den Grundlagenteil. Basierend auf der beschriebenen Problemstellung wird im zweiten Schritt der Stand der Forschung zu Flexibilität im Supply Chain Management (SCM) und in der Logistik adressiert. Flexibilitätsdefinitionen werden erläutert, für diese Arbeit relevante Forschungsansätze werden diskutiert und der bestehende Forschungsbedarf wird abgeleitet. Der Stand der Technik wird anhand einer Studie zu Flexibilität in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie dargestellt. Die Studie bestätigt die aktuell geringe Flexibilität in der Inbound-Logistik und untermauert den Forschungs- und Handlungsbedarf, die Flexibilität in diesem Logistikbereich zu steigern. Im letzten Schritt werden bestehende Planungsansätze der Inbound-Logistik erläutert und hinsichtlich ihrer Eignung als Planungsansatz für das Steuerungskonzept diskutiert. Zunächst werden Ansätze der Materialklassifikation untersucht, mit deren Hilfe Bauteile identifiziert werden sollen, bei denen eine flexible Umstellung der Logistikkonzepte erforderlich erscheint. Anschließend werden Methoden zur Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten diskutiert. Es wird zwischen qualitativen und quantitativen Ansätzen unterschieden. Abschließend werden Investitionsrechenverfahren vorgestellt, die für die Entscheidungsbewertung von Logistikkonzeptumstellungen und Fle-

<b>Einleitung</b>	<b>1 Motivation, Zielsetzung, Aufbau der Arbeit</b>		
<b>Stand der Forschung und Technik</b>	<b>2 Grundlagen der Automobillogistik</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Abgrenzungen und Definitionen von Begrifflichkeiten</li> </ul>	<b>Stand der Forschung und Technik zu Flexibilität</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Definitionen und Forschungsansätze</li> <li>– Studie zu Flexibilität in der Automobillogistik</li> </ul>	<b>Planungsansätze und Forschungsfragen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Materialklassifikation</li> <li>– Logistikkonzeptauswahl</li> <li>– Investition in Flexibilität</li> </ul>
<b>Überblick über Steuerungskonzept</b>	<b>3 Konzeptioneller Rahmen des Steuerungskonzeptes</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Anforderungen an das Forschungsergebnis</li> <li>– Kontext und Zusammenhang der Planungsbausteine des Steuerungskonzeptes</li> </ul>		
<b>Planungsbausteine des Steuerungskonzeptes</b>	<b>4 Grenzbauteil-identifikation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Einflussfaktoren</li> <li>– Grenzwerte</li> <li>– Uni- und Multivariate Analysemethoden</li> </ul>	<b>5 Optimale Logistikkonzeptauswahl</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Optimierungsszenarien</li> <li>– Prozesskosten</li> <li>– Modellformulierung</li> </ul>	<b>6 Flexible Umstellung des Inbound-Prozesses</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Umstellkosten/-dauer</li> <li>– Flexibilisierungsmaßnahmen</li> <li>– Entscheidungsmodell</li> </ul>
<b>Evaluation</b>	<b>6 Anwendungsbeispiele in der industriellen Praxis</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Erprobung des Steuerungskonzeptes in der Nutzfahrzeugindustrie</li> <li>– Bewertung und Reflexion des Lösungsansatzes</li> </ul>		
<b>Fazit</b>	<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>		

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

xibilisierungsmaßnahmen in Frage kommen. Aus dem Stand der Forschung und Technik werden drei Forschungsfragen abgeleitet, deren Beantwortung dazu beiträgt, die übergeordnete forschungsleitende Fragestellung zu beantworten.

In Kapitel 3 erfolgt die konzeptionelle Entwicklung des gesamten Steuerungskonzeptes. Dazu werden zunächst die Anforderungen an das Forschungsergebnis aufgestellt. Anschließend wird der allgemeine Wirkungsablauf der Steuerung auf den planerischen Kontext der Inbound-Logistik übertragen. Das Steuerungskonzept wird durch einen Entscheidungsbaum strukturiert, der sich in drei Planungsbausteine unterteilen lässt. Die Planungsbausteine gilt es in den folgenden Kapiteln 4 bis 6 zu entwickeln.

Mit Hilfe des ersten Planungsbausteins (vgl. Kapitel 4) ist festzustellen, für welche Bauteile eine flexible Umstellung des Logistikkonzeptes von Belang ist. Aufgrund der großen Anzahl an Bauteilen und der herrschenden Variantenvielfalt in der Automobilindustrie wäre der Aufwand für die aktive Steuerung aller Bauteile eines OEM sehr hoch. Zudem wird ei-



ne Umstellung des Logistikkonzeptes nicht bei jedem Bauteil eine Kosteneinsparung nach sich ziehen, sodass der Steuerungsaufwand vornehmlich für Bauteile mit hohem Kostenpotenzial zu rechtfertigen ist. Zusätzlich sind nicht alle Bauteile von Veränderungen (z. B. im Bedarf oder der Variantenanzahl) geprägt, sodass für diese Bauteile ebenfalls keine flexible Logistikkonzeptumstellung, sondern vielmehr eine einmalige und statische Optimierung erforderlich ist. Der erste Planungsbaustein liefert somit eine Methode zur Identifikation von Bauteilen mit potenziellem Bedarf hinsichtlich der Logistikkonzeptumstellung. Die Methode basiert auf verschiedenen zuvor identifizierten Einflussfaktoren (z. B. Bauteilgröße). Für jeden Einflussfaktor werden Grenzwerte bestimmt, ab denen ein Logistikkonzept gegenüber einem anderen zu bevorzugen ist. Mit Hilfe von statistischen univariaten und multivariaten Analysemethoden werden Grenzbauteile (d. h. Bauteile, die gemäß ihrer Eigenschaften potenziell im falschen Logistikkonzept sind) identifiziert.

Der zweite Planungsbaustein ist ein Optimierungsmodell, das die integrierte Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten auf Basis der optimalen Logistikprozesskosten ermöglicht (vgl. Kapitel 5). Bestehende Ansätze zur Auswahl von Belieferungskonzepten sind eher qualitativ statt quantitativ – z. B. sollten großvolumige Bauteile lagerlos angeliefert werden (vgl. u. a. [Klu-2010; Ihm-2006; VDA 5010]). Die Auswahl von Transportkonzepten hingegen stellt ein breit untersuchtes Forschungsfeld mit kostenbasierten Optimierungsansätzen dar (vgl. z. B. [Sch-2010b; Kem-2009]). Zur Entwicklung des Optimierungsmodells werden zunächst die betrachteten Optimierungsszenarien festgelegt. Anschließend wird der Inbound-Prozess je nach Logistikkonzept in seine Bestandteile zerlegt, um so die relevanten Prozesskosten der Inbound-Logistik zu bestimmen. Mit Hilfe der definierten Prozesskosten wird dann das Optimierungsmodell formuliert. Das Modell soll die Kosten je Bauteil für die möglichen Logistikkonzepte ausweisen, sodass das günstigste Logistikkonzept gewählt werden kann.

Im dritten Planungsbaustein ist eine Entscheidung über die Umstellung von Logistikkonzepten zu treffen (vgl. Kapitel 6). Um eine Umstellentscheidung treffen zu können, werden zunächst die Aktivitäten eines Umstellprozesses identifiziert. Anschließend werden die einzelnen Aktivitäten hinsichtlich ihrer Kosten und Dauern bewertet. Um potenzielle zukünftige Umstellungen zu begünstigen, wird ein Vorgehen zur Identifikation von Flexibilisierungsmaßnahmen beschrieben. Die anfallenden Kosten und resultierenden Nutzen aus den Flexibilisierungsmaßnahmen sind ebenfalls zu quantifizieren. Basierend auf Methoden der Investitionsrechnung wird dann ein Entscheidungsmodell für Logistikkonzeptumstellungen sowie deren Flexibilisierung hergeleitet. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich verschiedene

Entscheidungen (z. B. ob eine Umstellung erfolgen oder ob in eine Flexibilisierungsmaßnahme investiert werden sollte) abbilden.

In Kapitel 7 erfolgt die Evaluation des Steuerungskonzeptes. Die Anwendbarkeit des Steuerungskonzeptes sowie dessen Ergebnisqualität wird am Fallbeispiel eines deutschen Nutzfahrzeugherstellers geprüft. Dazu werden die drei entwickelten Planungsbausteine angewendet und anschließend kritisch reflektiert.

Kapitel 8 bildet den Schluss dieser Arbeit. Zunächst erfolgt eine Zusammenfassung des Steuerungskonzeptes und von dessen Planungsbausteinen. Anschließend wird aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Ausblick auf zukünftigen Forschungs- und Handlungsbedarf abgeleitet.

## 2 Stand der Forschung und Technik

---

Das vorliegende Kapitel stellt den für diese Arbeit relevanten Stand der Forschung und Technik dar. Es ist in vier Teile gegliedert. Zunächst werden die Grundlagen der Automobillogistik erläutert (Kapitel 2.1), gefolgt vom Forschungsstand zu Flexibilität in der Logistik (Kapitel 2.2). Anschließend wird der Stand der Technik beschrieben. Eine Online-Befragung in der Automobilindustrie zeigt den Handlungsbedarf zu Flexibilität in der Inbound-Logistik auf (Kapitel 2.3). Danach wird auf bestehende Planungsmethoden in der Inbound-Logistik eingegangen (Kapitel 2.4). Daraus werden die offenen Forschungsfragen in Bezug auf die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet (vgl. Kapitel 1.2).

### 2.1 Grundlagen der Automobillogistik

#### 2.1.1 Logistik und Supply Chain Management

*Logistik* wird von der Bundesvereinigung Logistik (BVL) definiert als „die ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Informations- und Güterflüsse“ [Bun-2017a]. Logistische Systeme stellen eine optimale Versorgung mit Materialien, Informationen, Modulen und Endprodukten innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend mit Lieferanten und Kunden sicher [Bun-2017a]. Im Zusammenhang mit Logistik tritt häufig der Begriff *Supply Chain Management (SCM)* auf. SCM umfasst „das Management aller logistischen Vorgänge und Funktionen innerhalb einer Lieferkette (englisch: *supply chain*) vom Lieferanten bis zum Verbraucher mit dem Ziel, den Kundennutzen effizient zu steigern und die Kommunikation emergent zu gestalten“ [ten-2008, S. 281]. SCM beinhaltet folglich das Management von vor- und nachgelagerten Beziehungen mit Lieferanten und Konsumenten, um einen überlegenen Wert für den Konsumenten zu geringeren Gesamtkosten der Supply Chain (SC) zu schaffen [Chr-2005, S. 5]. Im SCM erfolgt somit die Planung und Steuerung von gesamtheitlichen Wertschöpfungsketten [Bun-2017b], wodurch dieser Ausdruck häufig als Synonym für die Logistik verwendet wird [Coo-1997, S. 1].

Die Aufgaben der Logistik lassen sich durch die „sieben R's“ beschreiben: Die Logistik soll „Das *richtige* Produkt in der *richtigen* Menge in der *richtigen* Qualität am *richtigen* Ort zur *richtigen* Zeit zu den *richtigen* Kosten für den *richtigen* Kunden“ [Gle-2008, S. 5] zur Verfügung zu stellen. Das dabei verfolgte übergeordnete Ziel der Logistik ist die Effizienz. Effizienz liegt vor, wenn die Kosten für logistische Prozesse minimal sind und die Leistungen innerhalb dieser Prozesse maximal sind. Um die Effizienz beurteilen zu können, ist die

ganzheitliche Betrachtung von Kosten und Leistungen eines Logistiksystems oder einer Logistikkette notwendig [Arn-2008, S. 7]. Die logistische Leistung wird durch den Lieferservice ausgedrückt, welcher mittels der Lieferzeit, -zuverlässigkeit, -qualität und -flexibilität bewertet wird [Pfo-2010, S. 35 ff.]. Die Logistikkosten ergeben sich aus den unterschiedlichen Logistikprozessen. Es werden beispielsweise Transportkosten für externe Transporte oder Lagerhaltungskosten unterschieden [Arn-2008, S. 8].

Bei produzierenden Unternehmen lässt sich die Unternehmenslogistik in vier Logistiksysteme nach den Phasen des Materialflusses unterteilen: Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik [Fot-2017, S. 1–6; Pfo-2010, S. 16 ff.; Ihm-2006, S. 15 ff.]. Dies ist schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt.

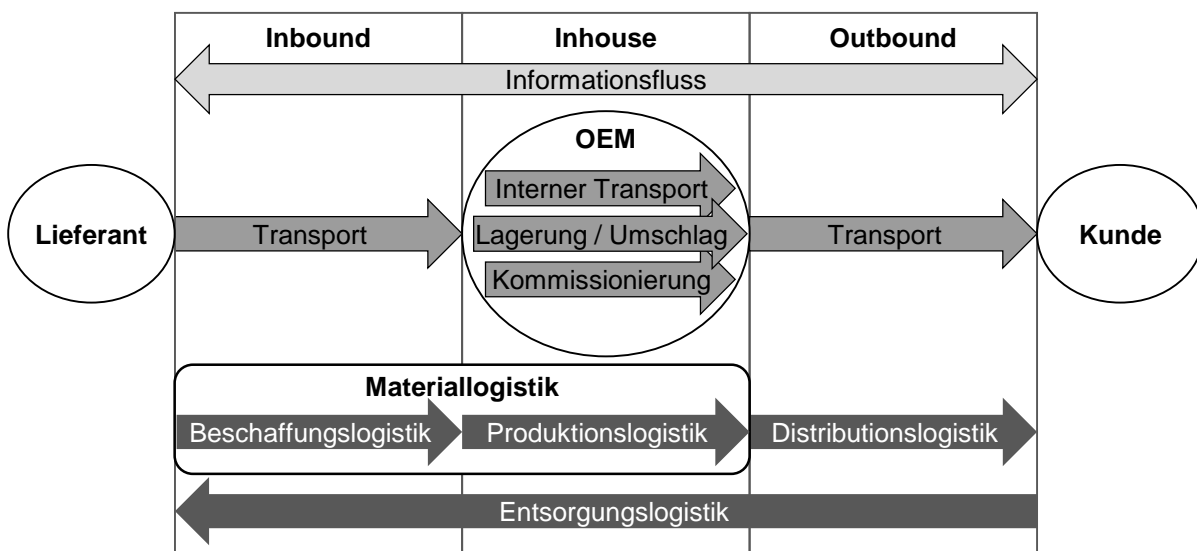


Abbildung 2-1: Abgrenzung verschiedener Logistiksysteme der Unternehmenslogistik (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Fot-2017, S. 1–6; Pfo-2010, S. 19; Arn-2008, S. 5; Ihm-2006, S. 17])

In der ersten Phase des Materialflusses werden Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Kaufteile, Ersatzteile und Handelswaren von den Lieferanten am Beschaffungsmarkt zum Original Equipment Manufacturer (OEM) geliefert. Dabei kann das Material direkt oder über verschiedene Zwischenstufen, wie einem Zulieferungs- oder Beschaffungslager, zum OEM gelangen. Diese Phase entspringt dem Beschaffungsmarkt, weshalb das entsprechende Logistiksystem auch Beschaffungslogistik (oder Versorgungslogistik) genannt wird. Die Produktionslogistik stellt die zweite Phase des Materialflusses in der Unternehmenslogistik dar. In dieser Phase erfolgen die unternehmensinterne Lagerung, der interne Transport und die Bereitstellung der Materialien für den Produktionsprozess. Halbfertigfabrikate aus der Produktion müssen unter Umständen in Lagern zwischenpuffert werden. Die Beschaffungs- und Produktionslogistik werden zusammen als Materiallogistik bezeichnet. In der dritten

Phase des Materialflusses werden die aus dem Produktionsprozess entstandenen Erzeugnisse über ein Absatzlager und ggf. regionale Auslieferungslager an die Kunden geliefert. Eine direkte Auslieferung an die Kunden kann auch erfolgen. Diese Phase wird als Distributionslogistik bezeichnet. Die vierte und letzte Phase stellt die Entsorgungslogistik dar. Hier fließt der Güterstrom in die entgegengesetzte Richtung. Es wird sichergestellt, dass zurückgegebene Waren (Retouren), Behälterleergut und Verpackungen, Sekundärroh- und Abfallstoffe oder zu recycelnde Produkte effizient an den Entsorgungsmarkt gesendet werden [Pfo-2010, S. 16 f.; Arn-2008, S. 4 f.; Ihm-2006, S. 15 f.].

In der Automobillogistik werden die Beschaffungslogistik als Inbound-Logistik (englisch: *inbound logistics*), die Produktionslogistik als Inhouse-Logistik (englisch: *in-house logistics*) und die Distributionslogistik als Outbound-Logistik (englisch: *outbound logistics*) bezeichnet (vgl. z. B. [Gün-2015; Prz-2007; Göp-2013a, S. 102]). Diese Terminologien werden daher im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet. Der Fokus dieser Arbeit liegt – wie initial erläutert – auf der Inbound-Logistik. Da Prozesse in der Logistik gesamtheitlich zu betrachten sind [Arn-2008, S. 7], ist es notwendig, auch die Schnittstellen mit der Inhouse-Logistik zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die grundlegenden Versorgungsprozesse der Materiallogistik erläutert.

### 2.1.2 Versorgungsprozesse der Materiallogistik

In Abbildung 2-2 sind die sechs Bausteine der taktischen Materiallogistik dargestellt. In der Inbound-Logistik gibt es die Sourcing-Konzepte, die Belieferungskonzepte und die Transportkonzepte. Interner Umschlag, interne Transportkonzepte sowie die Bereitstellarten sind Bausteine der Inhouse-Logistik (vgl. u. a. [Klu-2010, S. 289 ff.; VDA 5010; Bop-2007, S. 352]). Operative Bausteine zur Abwicklung des Prozesses (z. B. Materialabrufe und Steuerungslogiken) werden an dieser Stelle vernachlässigt. Grund hierfür ist der taktische Planungshorizont der Zielsetzung, die grundsätzlich die Überprüfung der Belieferung erfordert und nicht die Optimierung der operative Steuerung verlangt. Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine entlang des Materialflusses beschrieben.

Inbound-Logistik			Inhouse-Logistik		
Sourcing-Konzepte	Belieferungskonzepte	Transportkonzepte	Interner Umschlag	Interne Transportkonzepte	Bereitstellarten

Abbildung 2-2: Bestandteile der taktischen Materiallogistik (eigene Darstellung)

### 2.1.2.1 Konzepte der Inbound-Logistik

Die Inbound-Logistik wird aufgeteilt in die vertragliche und die physische Materialbeschaffung. Die vertragliche Materialbeschaffung wird i. d. R. durch die Einkaufsabteilung eines Unternehmens durchgeführt. Die verschiedenen Sourcing-Konzepte bieten dabei den Handlungsspielraum des Einkaufs. Die Möglichkeiten der physischen Materialbeschaffung werden durch die Belieferungs- und Transportkonzepte definiert [Ihm-2006, S. 275].

#### Sourcing-Konzepte

In der vertraglichen Beschaffung werden unterschiedliche Sourcing-Konzepte (oder Sourcing-Strategien) angewendet [Ihm-2006, S. 275]. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, können Sourcing-Konzepte in fünf Kategorien eingeteilt werden.

<b>Wertschöpfungsorientiert</b>	External Sourcing		Internal Sourcing			
<b>Anzahl an Bezugsquellen</b>	Single Sourcing		Dual Sourcing		Multiple Sourcing	
<b>Materialbezogen</b>	Modular / System Sourcing			Unit / Component Sourcing		
<b>Geographische Lage der Bezugsquellen</b>	Local Sourcing		Domestic Sourcing		Global Sourcing	
<b>Incoterms</b>	EXW	FCA	DAP	DDU	DDP	etc.

Abbildung 2-3: Sourcing-Konzepte (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Ihm-2006, S. 276; Göp-2013a, S. 199])

Bei wertschöpfungsorientierten Sourcing-Konzepten wird entschieden, ob der Lieferant Produktions- und Montagetätigkeiten am eigenen Standort (External) oder am Standort des Abnehmers (Internal) durchführt. Bei der Anzahl der Bezugsquellen ist festzulegen, von wie vielen Lieferanten ein bestimmtes Material bezogen werden soll: von einem Lieferanten (Single), von zwei Lieferanten (Dual) oder von mehreren Lieferanten (Multiple). Die dritte Kategorie betrifft die zu beschaffenden Materialien selbst. Es wird entschieden, ob Einzelteile (Unit/Component) oder komplexe Systeme und einbaufertige Funktionsgruppen (Modular/System) beschafft werden sollen. Bei der geographischen Lage der Bezugsquelle werden drei raumbezogene Sourcing-Konzepte unterschieden: Lieferanten, die sich in räumlicher Nähe zum Abnehmer befinden (Local), die im gleichen Land wie der Abnehmer angesiedelt sind (Domestic) und die weltweit verteilte Produktionsstandorte besitzen (Global) [Wan-2014, S. 171 ff.; Göp-2013b, S. 199; Ihm-2006, S. 275 f.].

Eine wichtige Aufgabe des Einkaufs ist die Festlegung der Lieferbedingungen, der sogenannten International Commercial Terms (Incoterms), d. h. der internationalen Handels-

klauseln. Die Incoterms sind standardisierte Regeln für die Zuordnung der Transportkosten zu Lieferant und Abnehmer sowie für den Gefahrenübergang, d. h. wo und wann das Eigentum vom Verkäufer auf den Käufer übergeht. Incoterms sind wichtig, da sie die Basis für die physische Materialbeschaffung bilden. Die für die Automobilindustrie relevantesten Incoterms sind Ex Works (EXW), Free Carrier (FCA), Delivered At Place (DAP), Delivered Duty Unpaid (DDU) und Delivered Duty Paid (DDP). Bei EXW ist der OEM verpflichtet, die Lieferung direkt beim Lieferanten abzuholen, sodass der Gefahrenübergang beim Lieferanten stattfindet. Bei FCA findet der Gefahrenübergang statt, wenn der Lieferant die Ladung an einen Spediteur übergibt. Der OEM trägt die Frachtkosten für den Haupttransport. Bei den Incoterms DAP, DDU und DDP handelt es sich um Ankunfts-klauseln. Bei DAP trägt der Verkäufer sämtliche Kosten bis zum Bestimmungsort. Der Käufer trägt die Kosten und die Verantwortung für die Entladung. Bei den Incoterms DDU und DDP trägt der Lieferant die Frachtkosten. Die beiden Incoterms werden hinsichtlich der Übernahme von Zoll- und Steuergeldern differenziert: Bei DDU sind die Zollkosten vom OEM und bei DDP vom Lieferanten zu tragen [Klu-2010, S. 102; Wan-2014, S. 144 ff.; Sch-2017b, S. 303 ff.].

### Belieferungskonzepte

Durch das Belieferungskonzept wird der Logistikprozess vom Lieferanten zum OEM festgelegt [Klu-2010, S. 289]. Für den Begriff Belieferungskonzept existiert eine Vielzahl an Synonymen, wie z. B. Beschaffungsformen [Ihm-2006, S. 272], Standardanlieferkonzepte [Klu-2010, S. 289] oder Prinzipien der externen Materialbereitstellung [Pfo-2010, S. 172]. Es werden grundsätzlich zwei Konzepte unterschieden: Bedarfsdeckung mit und ohne Vorratshaltung. Ersteres bezieht sich auf lagerhaltige und letzteres auf lagerlose Belieferungskonzepte [Klu-2010, S. 289]. Die gängigsten Belieferungskonzepte sind in Abbildung 2-4 aufgeführt und werden im Folgenden kurz erläutert. Basis hierfür ist die vom Verband der Automobilindustrie (VDA) herausgegebene Empfehlung VDA-5010 [VDA 5010].

Lagerhaltige Belieferung		Lagerlose Belieferung		
n-stufige Lagerhaltung	1-stufige Lagerhaltung	JIT-Belieferung	JIS-Belieferung	Direktbelieferung

Abbildung 2-4: Belieferungskonzepte (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Klu-2010, S. 289; VDA 5010, S. 10 f.]

Bei den lagerhaltigen Belieferungskonzepten können mehrere Lagerstufen oder nur eine Lagerstufe zwischen Lieferanten und OEM liegen. Die Aufgabe eines Lagers besteht im Bevorraten, Puffern und Verteilen von Gütern. Aus logistischer Sicht besitzt ein Lager zudem die Funktion unregelmäßige Bedarfsmengen auszugleichen, sodass auch bei Schwankun-

gen die Produktion nicht unterbrochen wird [Klu-2010, S. 308]. Die Dispositionsverantwortung kann dabei sowohl beim Lieferanten als auch beim Abnehmer liegen. Ebenso kann der Eigentumsübergang sowohl beim Lieferanten als auch beim Abnehmer erfolgen. I. d. R. liegt die Verantwortung beim Abnehmer, weshalb auch von Customer Managed Inventory (CMI) gesprochen wird. Beim Vendor Managed Inventory (VMI) besitzt der Lieferant die Verantwortung für die Disposition. Dazu muss der Lieferant vollständige Transparenz über die Bestände beim Abnehmer haben [Arn-2008, S. 271; Wan-2014, S. 639]. Eine Erweiterung des VMI stellt das Konsignationslager dar. Das Konsignationslager ist ein physisches Lager, das dem Lieferanten durch den Abnehmer zur Verfügung gestellt wird. Die Bestände im Konsignationslager werden durch den Lieferanten verantwortet und sind dessen Eigentum. Der Abnehmer besitzt jedoch uneingeschränkten Zugriff auf die Bestände. Durch dieses Konzept spart der Abnehmer Bestellkosten und Kapitalbindungskosten [Wan-2014, S. 312]. Da in jeder Lagerstufe Kosten verursacht werden, z. B. durch zusätzliche Kapitalbindung oder durch die Verwaltung von Beständen, sind aus Kostengesichtspunkten mehrere Lagerhaltungsstufen zu vermeiden [VDA 5010, S. 5].

Zu den lagerlosen Belieferungskonzepten gehören die Konzepte Just-in-Time (JIT), Just-in-Sequence (JIS) und Direktbelieferung. Die Steuerung von JIT und JIS erfolgt über einen bedarfsgesteuerten Lieferabruf und die Steuerung der Direktbelieferung über einen verbrauchsgesteuerten Lieferabruf [Klu-2010, S. 299 ff.]. Bedarfsgesteuerte Abrufe entsprechen dem Pull-Prinzip. Ausgehend von der Programmplanung der Fahrzeugproduktion werden die deterministischen Materialbedarfe, welche an den Verbauorten benötigt werden, ermittelt. Der verbrauchsgesteuerte Abruf entspricht dem Push-Prinzip. Hier lösen nachgelagerte logistische Stufen die Abrufe bei den vorgelagerten logistischen Stufen immer dann aus, wenn das entsprechende Material verbraucht wurde [Ihm-2006, S. 186 f.]. Die Konzepte JIT und JIS verfolgen das Ziel Verschwendung zu vermeiden, indem Lagerbestände und Kapitalbindung minimiert, Handhabungsschritte reduziert sowie Durchlaufzeiten verkürzt werden [VDI 2512, S. 14]. Bei einer JIT-Belieferung werden Materialien und Komponenten sortenrein und lagerlos genau zu dem Zeitpunkt angeliefert, zu welchem sie an der Montagelinie benötigt werden [Bag-1988, S. 90; VDI 2512, S. 3]. JIS stellt eine Erweiterung von JIT dar. Bei diesem Konzept sind die zu liefernden Materialien in den Ladungsträgern entsprechend der Produktionssequenz sortiert [VDI 2512, S. 3; Wag-2012, S. 53]. In beiden bedarfsgesteuerten Konzepten erfolgt die Anlieferung beim OEM über einen Trailer-Yard oder Lieferantenpark zum Trailer-Dock oder direkt zum Trailer-Dock. Ein Trailer-Yard stellt einen Puffer für Lastkraftwagen (Lkw)-Auflieger dar, der sich auf dem Gelände des OEM oder in unmittelbarer Nähe befindet. Ein Trailer-Dock ist eine Entladestelle für Lkws, die sich



in direkter Nähe des Verbauortes befindet [Klu-2010, S. 274 ff.]. In der Automobilindustrie entstehen immer mehr Lieferantenparks, d. h. einer Ansammlung von Lieferanten in unmittelbarer Nähe des Fertigungsstandortes des OEM. Solche Lieferantenparks sind aufgrund der geringen Distanz zum Abnehmer und den damit einhergehenden kürzeren Reaktionszeiten besonders vorteilhaft für eine lagerlose Belieferung [Ihm-2006, S. 305]. Sowohl bei einer JIT- als auch bei einer JIS-Belieferung ist eine enge Kooperation und Abstimmung zwischen Lieferanten und OEM erforderlich [Klu-2010, S. 299]. Nachteile der lagerlosen Belieferung liegen im hohen Steuerungsaufwand und den hohen Transportkosten aufgrund höherer Anlieferfrequenzen bei gleichzeitig geringeren Bestellmengen [Fot-2017, S. 2–17; Bag-1988, S. 90]. Die verbrauchsgesteuerte Direktbelieferung ist eine kontinuierliche Anlieferung direkt am Verbauort, wobei der Materialverbrauch des Abnehmers den Anlieferrhythmus bestimmt. Die Anlieferung erfolgt in sortenreinen Standardbehältern. Der Handlingsaufwand wird reduziert, da beispielsweise Wareneingangsbuchungen und -prüfungen entfallen [Klu-2010, S. 305 f.].

### **Transportkonzepte**

Ein Transport ist die räumliche Überbrückung von Transportgütern mit Hilfe des Einsatzes von Transportmitteln [Pfo-2010, S. 149 f.]. Bei den Transporten der Inbound-Logistik handelt es sich um außerbetriebliche Transporte, da der Transport vom Lieferanten zum OEM oder zwischen verschiedenen Werken des OEM stattfindet [Pfo-2010, S. 149 f.; Boy-2015, S. 111 f.]. Ein Transportkonzept beinhaltet die Beschreibung des Transportprozesses, die ggf. notwendigen Logistikdienstleistungen (z. B. Materialumschlag in einem Hub) sowie die Definition des Transportmittels [Pfo-2010, S. 150]. Der Transportprozess definiert die Ablauforganisation des Transportes und somit die Transportkette vom Sender (Quelle) zum Empfänger (Senke). Die Transportkette kann grundsätzlich in die drei Bestandteile Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf eingeteilt werden. Der Vorlauf verbindet die Quelle mit einem Umschlagpunkt, der Hauptlauf verbindet zwei Umschlagpunkte miteinander und der Nachlauf ist der Verteilerverkehr vom letzten Umschlagpunkt zur Senke [Gle-2008, S. 68]. Das Transportmittel setzt sich aus Verkehrsträger (Straßengüter-, Schienengüter-, Luftverkehr, Schifffahrt) und den dazugehörigen Verkehrsmitteln (Lkw, Eisenbahnwaggons, Flugzeuge, Binnen- und Seeschiffe) zusammen [Gle-2008, S. 40].

In der Automobilindustrie ist der Lkw das Standardtransportmittel [Boy-2015, S. 111]. Insgesamt werden in Deutschland 73 % des Güterverkehrs mit dem Lkw transportiert, sodass dieser das Rückgrat des Güterverkehrs in Deutschland bildet [VDA-2014, S. 106]. Grund hierfür ist die Flexibilität des Lkw, Waren überall einsammeln und ausliefern zu können. Ei-

ne Be- und Entladung kann direkt beim Sender bzw. Empfänger erfolgen. Anstrengungen den Güterverkehr auf das Schienennetz zu verlagern sind immer wieder gescheitert. Dies ist u. a. auf die Kostenstruktur des Schienenverkehrs zurückzuführen, bei welcher Transportmengen von unter 300 Tonnen pro Transport unwirtschaftlich sind [VDA-2014, S. 106]. Schiffe, Flugzeuge und Güterzüge sind zwar wichtige Transportmittel für die immer globaler werdende Inbound-Logistik, allerdings gibt es bei der Verwendung dieser Transportmittel meist wenig Alternativen und somit keine Flexibilität in der Wahl des Transportmittels (z. B. müssen schwere Bauteile aus China immer mit dem Schiff geliefert werden). Schiffe, Flugzeuge und Güterzüge können vielmehr als ergänzende Transportmittel für große Transportmengen und weite Strecken angesehen werden [VDA-2014, S. 106]. In der Automobilindustrie findet jedoch vermehrt eine produktionssynchrone Belieferung statt. Diese Lieferungen erfolgen in kleinen Mengen und hohen Frequenzen, sodass sich der Lkw als Transportmittel anbietet. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Lkw als Transportmittel fokussiert. Die anderen Transportmittel werden von der Betrachtung ausgeschlossen, da sie in den meisten Fällen keine Alternative zum Lkw darstellen.

In der Automobillogistik werden drei Transportkonzepte unterschieden: Direkttransport (oder Direktrelation), Hub-and-Spoke (oder Sammelgut-Transporte oder Gebietsspedition (GS)) und Milkrun (oder Sammelrundtour-Transporte) [VDA 5010, S. 39 f.; Klu-2010, S. 224]. Diese Transportkonzepte sind in Abbildung 2-5 schematisch dargestellt.

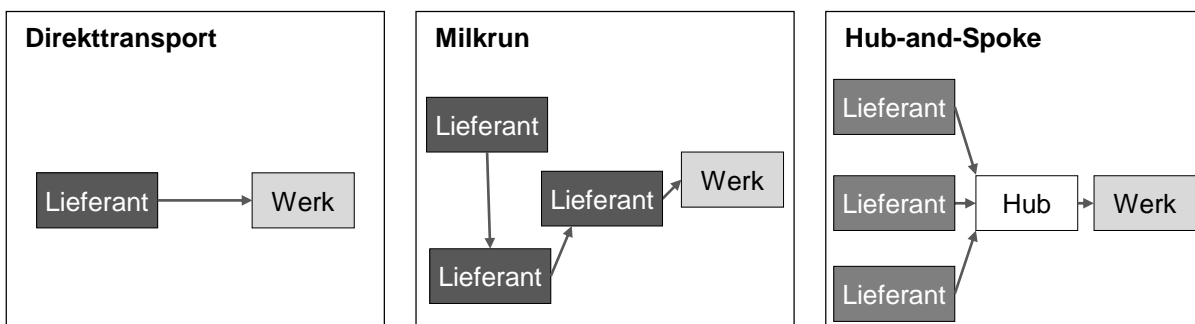


Abbildung 2-5: Transportkonzepte (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Klu-2010, S. 224; VDA 5010, S. 40 f.]

Der Direkttransport ist eine einstufige Transportkette, bei welcher das Material ohne Umschlag direkt vom Lieferanten zum Empfänger transportiert wird. Bei Komplettladungen (englisch: *full truck load, FTL*) (d. h. vollständiger Ausnutzung der Lkw-Kapazität) stellen Direkttransporte die kostengünstigste Transportvariante dar, was auf die degressiven Frachttarife zurückzuführen ist. Eine Voraussetzung für die Nutzung von Direkttransporten sind daher hohe Transportvolumina und konstante Anlieferfrequenzen [Klu-2010, S. 222].

Das Konzept des Milkruns erfolgt analog zum Konzept vom englischen Milchmann: die frische Milch wird in einer festgelegten Route täglich ausgeliefert und die leere Milchflaschen werden direkt eingesammelt [Klu-2010, S. 225]. Ein Milkrun wird bei geringeren Liefervolumina benutzt. Bei diesem Transportkonzept werden Teilladungen von verschiedenen Lieferanten in geographischer Nähe in einer festgelegten Reihenfolge zu einer Komplettlading zusammengefasst. Die Transportkosten eines Milkruns ergeben sich aus dem Tarif für eine Komplettlading und der entstehenden Stoppkosten. Nach dem Einsammeln der Teilladungen kann ein Umschlagpunkt eingesetzt werden (Vorlauf-Milkrun) oder ein Direkttransport zum OEM stattfinden (Hauptlauf-Milkrun) [Klu-2010, S. 225; Sch-2017b, S. 307 f.]. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Milkruns ist eine hohe Prozessstabilität, damit die Auslastung des Milkruns gewährleistet werden kann [VDA 5010, S. 39].

Beim Hub-and-Spoke-Konzept werden zunächst die Teilladungen unterschiedlicher Lieferanten in einem Vorlauf eingesammelt. Die Teilladungen werden in einem oder mehreren Umschlagpunkten konsolidiert und umgeladen. Anschließend erfolgt der Transport auf dem Haupt- oder ggf. Nachlauf zum Empfänger [Klu-2010, S. 227]. In der Automobilindustrie wird das Hub-and-Spoke-Konzept häufig mittels eines Gebietsspeditionswesens umgesetzt. Dabei ist der Gebietsspediteur für die Lieferanten in einer geographisch abgegrenzten Region verantwortlich und konsolidiert die Einzellieferungen zu einer Sammellieferung. Welche Lieferungen der Gebietsspediteur konsolidiert obliegt seinem Verantwortungsbereich. Durch die Sammellieferungen können die Transportkosten gesenkt, die Transportauslastungen gesteigert und gleichzeitig die Anlieferfrequenzen beibehalten werden. Gebietsspediteure werden häufig bei zunehmender Lieferantenzahl und steigender Anzahl zu beschaffender Materialien eingesetzt [Sch-2017b, S. 310 f.; Con-2012, S. 1 f.].

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Inbound-Logistik liegt, wird der Begriff Transportkonzept synonym für außerbetriebliche Transportkonzepte verwendet. Innerbetriebliche Transporte (vgl. Kapitel 2.1.2.2) werden explizit als solche ausgewiesen. Die Kombination aus Belieferungs- und Transportkonzept wird in dieser Arbeit als Logistikkonzept bezeichnet.

### **2.1.2.2 Konzepte der Inhouse-Logistik**

In der Inhouse-Logistik werden drei Bausteine zur Materialbeschaffung und -bereitstellung unterschieden: Interner Umschlag, interne Transportkonzepte und Bereitstellarten. Da diese Arbeit die Inbound-Logistik fokussiert, werden an dieser Stelle die Inhouse-Konzepte vorgestellt, die für die Prozessbetrachtung der Inbound-Logistik von Bedeutung sind.

### **Interner Umschlag**

In der Inhouse-Logistik erfolgt der Materialumschlag im Wareneingang (WE), im Lager sowie im Supermarkt. Der WE bildet die Schnittstelle zwischen der außerbetrieblichen Inbound-Logistik und der innerbetrieblichen Inhouse-Logistik [Klu-2010, S. 204]. Im WE werden Lieferungen angenommen und die gelieferten Materialien werden systemisch vereinnahmt. Zudem erfolgt eine Überprüfung der tatsächlichen Lieferung mit dem Lieferschein sowie eine Qualitätskontrolle auf äußerliche Schäden. Nach Eingabe der Materialien im Dispositionssystem werden diese i. d. R. zum Lager weitergeleitet [Ihm-2006, S. 282]. In einem Lager werden Materialien, Halbfertigfabrikate und Endprodukte aufbewahrt und ggf. zur Weiterverarbeitung bereitgehalten. Die Herausforderung besteht darin, die unterschiedlichen Anlieferfrequenzen und Auslagerfrequenzen abfedern zu können. Das Ziel eines Unternehmens ist es durch die Optimierung und Abstimmung der Schnittstellenprozesse die Lagerbestände und Handlungsschritte zu minimieren. Bei einem Automobilhersteller kommen unterschiedliche Lagersysteme und Lagerstufen zum Einsatz, welche nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden können. Beispielsweise gibt es Pufferlager an der Montagelinie oder Wareneingangslager, die sich hinsichtlich der Entfernung zum Verbauort unterscheiden [Klu-2010, S. 207]. Supermärkte sind i. d. R. produktionsnahe Logistiksysteme, z. B. bestehend aus Regalen oder freien Flächen. In Supermärkten erfolgt die Kommissionierung von Bauteilen. Das bedeutet, eine bestehende Gesamtmenge von Bauteilen wird aufgelöst und zu neuen Teilmengen gemäß eines Auftrags zusammengestellt [Fot-2017, S. 4–36; Klu-2010, S. 191 ff.]. In Supermärkten werden Materialien somit portioniert, sortiert und sequenziert, um diese anschließend anforderungsgerecht und produktionssynchron an der Montagelinie bereitstellen zu können [Klu-2010, S. 197].

### **Interne Transportkonzepte**

Interne Transportkonzepte definieren die innerbetrieblichen Transporte, d. h. die Transportprozesse innerhalb eines Unternehmens [Gle-2008, S. 40]. In der Automobilindustrie sind die wichtigsten internen Transportmittel Gabelstapler, Fahrerloses Transportsystem (FTS) und Routenzüge. Gabelstapler werden primär für das Handling einzelner Paletten und Behälter, für die Be- und Entladung von Lkws und die Ein- und Auslagerung im Lager eingesetzt [Klu-2010, S. 183]. Bei vermehrter Bereitstellung kleinerer Mengen in höherer Frequenz und bei schlechter Auslastung nimmt der Staplerverkehr zu, sodass ein erhöhtes Sicherheitsrisiko entsteht und Stapler somit weniger vorteilhaft sind [Klu-2010, S. 183 f.]. Eine weitere Möglichkeit Materialien direkt zum Bereitstellort zu befördern, sind vollautomatisierte Fördersysteme, wie FTS [Gün-2013, S. 181]. Um die nachteiligen Effekte beim Staplerverkehr auszugleichen werden Schleppzug-Transporte eingesetzt [Klu-2010, S. 274]. Dabei

werden mehrere Lastanhänger hintereinandergeschaltet. Diese Lastanhänger werden entweder durch einen manuell bedienten Schlepper (Routenzug) oder durch ein FTS zum Bereitstellort bewegt. Die Route eines Schleppzugs funktioniert wie folgt: An einem zentralen Punkt wird der Schleppzug beladen. Anschließend werden mehrere Haltestellen angefahren, um volle Behälter abzuladen und leere Behälter einzusammeln. Dazu wird meist ein Zwei-Behälter-Prinzip verwendet – d. h. am Montageband stehen immer zwei Behälter eines Materials und sobald einer leer ist, wird dieser durch den Schleppzug ausgetauscht [Gün-2013, S. 96 ff.; Klu-2010, S. 184 ff.].

### **Bereitstellarten**

Bei der Bereitstellung am Montageband werden drei Arten unterschieden: Sortenreine Bereitstellung (englisch: *line-stocking, continuous supply, bulk feeding*), Set-Bildung für mehrere Bauteile je Fahrzeug (englisch: *kitting*) und Sequenzbildung für ein Bauteil für mehrere Fahrzeuge [Bop-2007, S. 352]. Die sortenreine Bereitstellung ist die einfachste Bereitstellart. Die Bauteile werden i. d. R. in den gleichen Mengen und Behältern, wie sie vom Lieferanten geliefert werden, an der Montagelinie bereitgestellt. Sortenreine Behälter enthalten mehrere Einheiten desselben Bauteils. Eine Bereitstellung erfolgt häufig nach dem Zwei-Behälter-Prinzip (vgl. Zwei-Behälter-Prinzip bei Schleppzug-Transport). Der Nachteil dieser Bereitstellart besteht im großen Platzbedarf an der Montagelinie. Da für jede Bauteilvariante ein eigener sortenreiner Behälter an der Montagelinie steht, können die Laufwege des Werkers lang werden, wenn er das richtige Bauteil für ein bestimmtes Fahrzeug finden muss [Lim-2015, S. 47]. Bei der Set-Bildung werden mehrere Bauteile für ein einziges Fahrzeug in einem heterogenen Set gruppiert und in einen speziellen Set-Behälter gelegt. Im Gegensatz zur sortenreinen Bereitstellung erfordert die Set-Bildung vorgelagerte Pufferflächen, wie z. B. einen Supermarkt, wo die Sets gebildet werden. Die Sets werden entsprechend der Produktionsreihenfolge an die Montagelinie geliefert. Weiterhin kann zwischen stationären und fahrenden Sets unterschieden werden. Stationäre Sets werden an einen bestimmten Arbeitsplatz geliefert, an welchem sie auch verbaut werden. Fahrende Sets werden an die erste Station eines Montageabschnitts geliefert und bewegen sich dann mit dem zu fertigenden Produkt [Cap-2015a, S. 976 f.]. Der wesentliche Nachteil eines Fahrzeug-Sets besteht im zusätzlichen Handlungsaufwand zur Bildung dieses Sets. Allerdings kann durch ein Set Platz an der Montagelinie gespart werden. Für den Werker ergibt sich ebenfalls ein Zeitersparnis, da dieser nicht mehr nach den richtigen Teilen suchen muss und kürzere Wegezeiten vorliegen [Lim-2015, S. 47]. Sequenzbildung stellt eine besondere Form von stationären Sets dar. Die Varianten eines Bauteils werden entsprechend der Produktionsreihenfolge sortiert, d. h. in der Reihenfolge wie sie an der Montagelinie

benötigt und verbaut werden [Sal-2015, S. 1450]. Eine Sequenzierung kann sowohl intern, auf Puffer- oder Kommissionierflächen, als auch extern, gemäß einer JIS-Belieferung, erfolgen. Die Auswahl der Bereitstellart richtet sich nach den Anforderungen der Montagelinie. Je nach Bereitstellart können unterschiedliche Behälterkonzepte erforderlich sein. Das Behälterkonzept ist durch die Logistikplanung zu definieren [Bop-2007, S. 351]. Auf detaillierte Ausführungen zu Behälterkonzepten sei an dieser Stelle verzichtet.

### **2.1.3 Prinzipien der schlanken Automobillogistik**

Im Folgenden werden die Prinzipien der Automobillogistik, die u. a. die Grundlage für die Anforderungen an das zu entwickelnde Steuerungskonzept bilden, beleuchtet. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Produktion von Automobilen durch die Einführung der Massenproduktion von Henry Ford revolutioniert. Durch die Einführung des Fließbands konnten Material- und Betriebsmittelbereitstellung sowie die Arbeitsweise optimiert werden. Es wurden Transport- und Wegezeiten minimiert und der Arbeitstakt an der Produktionslinie synchronisiert [Dom-2015a, S. 10 ff.]. In den 1940er Jahren wurde die Automobilproduktion erneut revolutioniert: Der japanische Markt kämpfte zu dieser Zeit mit einer geringen Nachfrage, sodass die Automobilproduktion in kleinen Losgrößen und mit niedrigen Beständen arbeiten musste. Infolgedessen entwickelte der japanische Automobilhersteller Toyota das Toyota-Produktionssystem (TPS) [Dom-2015a, S. 13 f.]. Das TPS gilt als Ursprung von *Lean Production* (deutsch: *Schlanke Produktion*) [Wom-2004, S. 15; Lik-2004, S. 7]. Das Ziel vom TPS ist die Minimierung der Durchlaufzeit von Kundenaufträgen bei gleichzeitiger Vermeidung von verschiedensten Arten von Verschwendung [Dom-2015a, S. 16]. Als Verschwendung werden nicht wertschöpfende Aktivitäten (wie z. B. Wartezeiten oder Bestände) bezeichnet, die es zu vermeiden und zu eliminieren gilt. Diese *Lean Thinking* (deutsch: *schlankes Denken*) Philosophie stellt ein Kernelement vom TPS und von schlanken Produktionssystemen dar [Lik-2004, S. 7; Ōno-2009, S. 35]. Der Erfolg von Toyota liegt jedoch nicht in der Umsetzung von einzelnen Maßnahmen, sondern in den auf das Gesamtsystem ganzheitlich abgestimmten Methoden. Dies umfasst die Gestaltung von Prozessen mit einer kundenorientierten Ausrichtung. In Deutschland hat sich in diesem Zuge der Begriff Ganzheitliches Produktionssystem (GPS) etabliert. Dabei handelt es sich um ein unternehmensspezifisches Produktionssystem, welches Aspekte von Lean Production anwendet [Dom-2015a, S. 19]. Ein GPS ist dabei so gestaltet, dass es unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, organisatorischen und personellen Aspekten zu einem ganzheitlichen Optimum gelangt [VDI 2870-1, S. 2]. In der Automobilindustrie wird die Umsetzung eines GPS von den meisten großen OEMs angestrebt [Ruh-2016, S. 253; Dör-2017, S. 14].

Diese ganzheitliche und schlanke Denkweise in der Produktion gilt gleichermaßen für die Logistik. Es hat sich der Ausdruck *Lean Logistics* (deutsch: *Schlanke Logistik*) etabliert. Ziel der schlanken Logistik ist eine „synchronisierte, flussorientierte und getaktete Logistik, die sich retrograd und ziehend am Kundenbedarf ausrichtet“ [Klu-2010, S. 254]. Aufgrund der großen Bedeutung werden die grundlegenden acht Prinzipien schlanker Logistiksysteme (Synchronisation, Takt, Fluss, Pull, Standard, Stabilität, Integration und Perfektion) kurz vorgestellt [Klu-2010, S. 256 ff.]:

1. *Synchronisation* bedeutet, dass die Materialströme vom Verbauort zum Lieferanten aufeinander abgestimmt sind. Um dies zu gewährleisten, erfolgt die Planung ausgehend vom Kunden. Die Anforderungen des Kunden sind bei der weiteren Planung bis zum Lieferanten stets zu berücksichtigen. Dieses Planungsvorgehen der Logistik ist unter dem Namen *Line-Back-Prinzip* bekannt [Kle-2013, S. 130].
2. *Takt* meint, dass der Rhythmus zur Durchführung von Logistikaktivitäten auf den Kundentakt abzustimmen ist. Der Kundentakt entspricht der mittleren zeitlichen Differenz zwischen der Fertigstellung zweier Kundenaufträge [Bop-2013a, S. 150 f.].
3. Beim *Fluss-Prinzip* wird eine optimale Verknüpfung aller wertschöpfenden Aktivitäten und somit ein stetiger Produktionsfluss angestrebt. Dies erfordert eine optimale Abstimmung der Logistikprozesse [Klu-2010, S. 256]. Bei einer flussoptimierten Wertschöpfungskette liegt ein One-Order-Flow – analog zu einem One-Piece-Flow in der Produktion – vor. Dabei soll die Bearbeitung und Weiterleitung eines jeden Kundenauftrags einzeln stattfinden [Bop-2013a, S. 153], sodass im Materialfluss keine Unterbrechungen, z. B. durch Wartezeiten, entstehen [Lik-2004, S. 7].
4. *Pull* besagt, dass der vorgelagerte Prozess immer das tun sollte, was der nachgelagerte Prozess verlangt [Lik-2004, S. 24]. Das bedeutet, es werden immer nur so viele Fahrzeuge produziert und soviel Material geliefert, wie es der Kundenbedarf erfordert (bedarfssynchrone Produktion). Das Pull-Prinzip bildet somit die Basis des JIT-Konzeptes [Lik-2004, S. 23]. Weiterhin ist das Pull-Prinzip eng mit der in der Automobilindustrie verbreiteten Fertigungsstrategie Build-To-Order (BTO) verknüpft. Bei dieser Strategie werden Fahrzeuge erst geplant und produziert, wenn konkrete Kundenaufträge vorliegen [Klu-2010, S. 361 f.]. Charakteristisch für eine BTO-Produktion sind daher kurze Fertigungsdurchläufe und ein hohes Reaktionsvermögen auf Kundenbedürfnisse [Cor-2007, S. 585 f.].
5. *Standard* meint die Standardisierung von Logistikprozessen im Sinne einer Vereinheitlichung und Vereinfachung. Dies gilt für alle relevanten Bereiche der Logistikpla-

nung (z. B. Lager-, Transport-, Behälterplanung). Damit standardisierte Prozesse eine anhaltend hohe Qualität aufweisen, gilt es die entwickelten Standards kontinuierlich zu überprüfen und zu verbessern. Im Rahmen des Lean Thinking wird auch von *Kai-zen* (deutsch: *Verbesserung*) gesprochen [Klu-2010, S. 258; Wom-2004, S. 38].

6. *Stabilität* stellt ein Prinzip dar, welches insbesondere durch die Einhaltung der bisher genannten fünf Prinzipien erreicht wird. Prozesse werden als stabil bezeichnet, wenn sie trotz hoher Dynamik und auftretenden Veränderungen beständig sind. Stabile Logistiksysteme sind unerlässlich, um kosteneffizient und leistungsstark mit der vorherrschenden Dynamik in der Automobilindustrie umgehen zu können. Durch Stabilität kann die Planbarkeit erhöht und die Störungsanfälligkeit reduziert werden. Zudem gilt eine Verbindung von Stabilität mit Flexibilität als besondere Stärke einer schlanken Logistik [Klu-2010, S. 258 f.].
7. Das Prinzip der *Integration* dient dazu, die Durchlaufzeiten der Logistikaktivitäten zu optimieren. Dies geschieht durch die Schaffung von integrativen Prozessen. Integrative Prozesse sind stark ineinandergreifende Prozesse mit wenigen Schnittstellen. Da Schnittstellen i. d. R. Wartezeiten generieren und den Ressourcenaufwand steigern, besteht der Fokus der Integration in einer durchgängigen und schnittstellenreduzierten Logistik [Klu-2010, S. 259].
8. Das Streben nach *Perfektion* meint die Zielsetzung perfekter Logistikabläufe. In einem dynamischen Umfeld, wie dem der Automobilindustrie, müssen Fehler demnach frühzeitig erkannt und an der Ursache behoben werden. Das Prinzip der Perfektion steht in engem Zusammenhang mit dem Standard-Prinzip: Aus den erkannten Fehlern müssen die entwickelten Standards permanent verbessert und optimiert werden. Perfektion liegt dann vor, wenn keine Aktivitäten weggelassen werden können, ohne dass der Kundennutzen verringert wird [Klu-2010, S. 259].

Die Prinzipien der schlanken Logistik finden bei vielen Automobilherstellern heute bereits Anwendung. Im Volkswagenkonzern erfolgte die Umsetzung der Prinzipien im Rahmen des Projektes *Neues Logistikkonzept (NLK)*. Zielsetzung des Projektes war die zukunfts- und wertschöpfungsorientierte Ausrichtung aller Konzernwerke. Dabei wurden für die Hauptsäulen des neuen Logistikkonzeptes, Takt, Fluss, Pull und Perfektion, konkrete Konzeptelemente im Inhouse- und Inbound-Bereich definiert. Der Takt soll durch getaktete Routenverkehre in der Produktion sowie durch feste Lkw-Fahrpläne in der Anlieferung sichergestellt werden. Das Fluss-Prinzip soll im Inhouse-Bereich durch eine sequenzierte Bereitstellung an der Montagelinie sowie im Inbound-Bereich durch hohe Anlieferfrequenzen erreicht wer-



den. Weiterhin sollen interne Materialabrufe entsprechend des Produktionsfortschritts, d. h. verbrauchsgesteuert, erfolgen. Abrufe an die Lieferanten sollen zusätzlich bedarfsorientiert erfolgen, um das Pull-Prinzip zu erfüllen. Perfektion soll in der Inhouse-Logistik durch eine gezielte Visualisierung von Fehlervermeidung und in der Inbound-Logistik durch kontrollierte Bereitstellung der Materialien beim Lieferanten erreicht werden [Sch-2017a, S. 24 f.].

Zusätzlich zu den Hauptsäulen besitzt das NLK fünf grundlegende Bausteine, die bei der Gestaltung der Logistik ebenfalls zu berücksichtigen sind: Nivellierte und geglättete Prozesse, konsequente Eliminierung von Verschwendung, Standardisierung, Arbeitsorganisation und Umweltschutz. Nivellierte und geglättete Prozesse sollen die Produktion an den tatsächlich vorliegenden Tagesbedarf anpassen. Dadurch sollen die Abrufmengen bei den Lieferanten sowie die Transporte von den Lieferanten geglättet und somit stabile Prozesse erreicht werden. Die Eliminierung von Verschwendung als oberste Maxime der Lean-Philosophie sowie die Standardisierung wurden oben bereits erläutert. Die Arbeitsorganisation hat zum Ziel, dass ebenfalls Arbeitsabläufe standardisiert werden, um Abweichungen vom Regelprozess schnell identifizieren zu können. Der Umweltschutz verfolgt das Ziel die Lkws bei der Belieferung von Bauteilen optimal auszulasten [Sch-2017a, S. 25 f.]. Denn Leerfahrten und halbvolle Fahrten gelten als „Inkarnation der Verschwendung“ aufgrund der entstehenden Schadstoffemissionen und der Nutzung der knappen Verkehrsinfrastruktur, ohne dass eine resultierende Gegenleistung erzielt wird [Bre-2010, S. 181].

## **2.2 Forschungsstand zu Flexibilität in der Logistik**

Zunächst liegt der Fokus auf den verschiedenen Flexibilitätsdefinitionen sowie abzugrenzenden Begriffen (Kapitel 2.2.1). Anschließend wird ein Überblick über das Forschungsfeld von Flexibilität durch die Vorstellung ausgewählter Forschungsansätze gegeben (Kapitel 2.2.2). Das Kapitel endet mit einer Diskussion des Forschungsstandes und einer Einordnung der vorliegenden Arbeit in das Forschungsfeld (Kapitel 2.2.3).

### **2.2.1 Definitionen im Kontext von Flexibilität**

Im deutschen Sprachgebrauch wird unter Flexibilität neben Biegsamkeit und Elastizität auch ein flexibles und anpassungsfähiges Verhalten verstanden [Dud-2017a]. Dieses Verständnis von Flexibilität ist in ähnlicher und detaillierterer Form in der wissenschaftlichen Literatur zu finden. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zum Thema Flexibilität sind

vielfältig und existieren seit fast einem Jahrhundert in verschiedenen Untersuchungsgebieten. Bereits in den 1920er Jahren wurde Flexibilität im wirtschaftlichen Kontext betrachtet, gefolgt von organisatorischer Flexibilität und Flexibilität im Fertigungsumfeld [Set-1990, S. 290]. Eine einheitliche und prägnante Definition von Flexibilität ist jedoch selten in der Literatur auffindbar. Grund hierfür ist, dass Flexibilitätsdefinitionen häufig auf die speziell vorliegende Situation oder das Problem zugeschnitten sind [Upt-1994, S. 73]. Eine weitere Begründung für die Vielfalt an Definitionen stellt die multidimensionale sowie polymorphe Eigenschaft von Flexibilität dar [Gol-2000, S. 373]. Das bedeutet, Flexibilität kann in verschiedenen Formen und in unterschiedlichen Zusammenhängen existieren [Eva-1991, S. 73]. Eine allgemeine Definition beschreibt Flexibilität als die Fähigkeit etwas zu ändern oder auf etwas zu reagieren, sodass lediglich geringe Einbußen hinsichtlich Zeit, Aufwand, Kosten oder Performance entstehen [Upt-1994, S. 73]. Andere allgemeine Definitionen besagen, dass Flexibilität die Kompetenz ist sich anzupassen [Gol-2000, S. 373] oder dass Flexibilität die Fähigkeit einer Organisation ist, schnell und routiniert in vordefinierten Situationen von einer Funktion zur nächsten zu wechseln [Vok-1998, S. 166].

### **Flexibilität in unterschiedlichen Untersuchungsgebieten**

Im Operations Management wurde in der Vergangenheit vielfach die Flexibilität von Produktions- und Fertigungssystemen untersucht. Die ersten Definitionen von Fertigungsflexibilität (englisch: *manufacturing flexibility*) liefern u. a. *Slack*, *Gerwin* und *Upton*. Die Schwierigkeit einer eindeutigen Flexibilitätsdefinition liegt darin, dass diese häufig vom betrachteten Einzelfall abhängt [Upt-1994, S. 73]. Gemäß *Slack* ist ein Fertigungssystem flexibler als ein anderes, wenn dieses eine größere Bandbreite an Fertigungsoptionen (z. B. Produktvarianten, verschiedene Qualitätslevel) aufweist [Sla-1983, S. 7]. Laut *Upton* ist Flexibilität die Fähigkeit mit geringen Einbußen hinsichtlich Zeit, Aufwand, Kosten oder Leistung etwas zu verändern oder auf etwas zu reagieren [Upt-1994, S. 73]. Die multidimensionale Eigenschaft von Flexibilität hat dazu geführt, dass innerhalb der Fertigungsflexibilität verschiedene Flexibilitätstypen definiert wurden [See-2013, S. 3416]. *Browne et al.* präsentieren acht unabhängige Flexibilitätstypen (u. a. Maschinenflexibilität, Produktionsflexibilität, Prozessflexibilität), um flexible Fertigungssysteme besser charakterisieren zu können [Bro-1984, S. 114 f.]. *Gerwin* definiert sieben Dimensionen der Fertigungsflexibilität, darunter Produktmix-Flexibilität oder Mengenflexibilität [Ger-1993, S. 398]. *Sethi und Sethi* stellen fest, dass es mindestens 50 verschiedene Arten von Flexibilität gibt [Set-1990, S. 289]. Aus diesem Grund wurden in der Literatur verschiedene Klassifizierungsschemen und Hierarchiestrukturen entwickelt. In Summe gestaltet sich das Forschungsfeld der Fertigungsflexibilität dadurch komplex und unstrukturiert [See-2013, S. 3416]. Für eine ausführlichere

Darstellung von Fertigungsflexibilität sei an dieser Stelle auf die verschiedenen Literaturübersichten verwiesen (vgl. z. B. [Ton-1998; Vok-2000; Bea-2000; Jai-2013]).

Im Kontext des SCM wird Flexibilität ebenfalls untersucht. Im Unterschied zur Fertigungsflexibilität wird Supply Chain Flexibilität (englisch: *supply chain flexibility*) erst seit der Jahrhundertwende fokussiert. Dennoch liegen auch für diese Flexibilität verschiedenste Definitionen vor. Autoren auf diesem Gebiet sind u. a. *Vickery et al.*, *Christopher*, *Prater et al.*, *Duclos et al.* und *Christopher und Holweg* [Vic-1999; Chr-2000; Pra-2001; Duc-2003; Chr-2011]. Allgemein lassen sich flexible Lieferketten bei Lieferstörungen und Nachfrageänderungen effektiv anpassen, sodass gleichzeitig das Servicelevel für Kunden beibehalten wird [Ste-2007, S. 686]. Laut dem *APICS Dictionary* ist eine SC dann flexibel, wenn sie die auftretenden Risiken von Nachfrageschwankungen, Unsicherheiten in der Vorlaufzeit und der Beschaffungszeit, Variation in der Lieferbeständigkeit und steigendes oder sinkendes Produktionsvolumen neutralisieren oder entschärfen kann [Bla-2008, S. 52]. Eine kundenorientiertere Definition besagt, dass Supply Chain Flexibilität alle Arten von Flexibilität umfasst, die eine direkte Auswirkung auf den Endkunden haben. Dazu zählen beispielsweise die Produktflexibilität, die Mengenflexibilität und die Distributionsflexibilität [Vic-1999, S. 16 f.]. Entsprechend der verschiedenen Flexibilitätsarten in Fertigungssystemen sind somit für die Lieferkette ebenfalls spezifische Flexibilitätsarten, -dimensionen und -komponenten definiert worden [See-2013, S. 3416 f.]. Laut *Duclos et al.* ist die Voraussetzung für eine flexible Supply Chain, dass ebenfalls Flexibilität bei und zwischen den Teilnehmern der Lieferkette existiert. Es werden daher sechs Flexibilitätsarten unterschieden: Betriebssystemflexibilität, Marktflexibilität, Logistikflexibilität, Belieferungsflexibilität, Organisationsflexibilität und Informationssystemflexibilität [Duc-2003, S. 450 f.]. Detailliertere Ausführungen zum Thema Supply Chain Flexibilität liefern verschiedene Literaturüberblicke (vgl. z. B. [Gol-2000; Ste-2007; Win-2009; See-2013; Tiw-2015; Pfe-2016]). Zusammenfassend lässt sich das Forschungsfeld Flexibilität als komplex und heterogen charakterisieren, da es diverse Flexibilitätsarten und Strukturierungsansätze aufweist [See-2013, S. 3417].

### **Abgrenzung verwandter Begrifflichkeiten**

Nach der Flexibilitätsdefinition, erfolgt nun eine Abgrenzung zu verwandten Begrifflichkeiten. Im Bereich der Fertigung wurde Flexibilität diversen Begriffen, wie z. B. Wandlungsfähigkeit oder Agilität, gegenübergestellt. Dazu hat *Wiendahl* ein Schalenmodell entwickelt, welches die Hierarchien der Veränderlichkeit in der Fabrik darstellt [Wie-2002, S. 126]. Das Schalenmodell ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

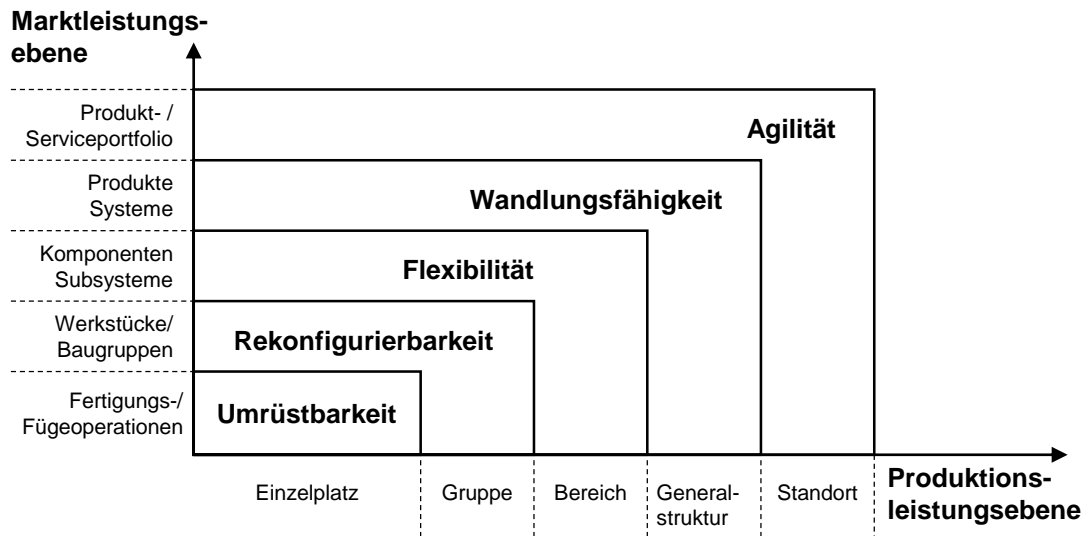


Abbildung 2-6: Schalenmodell zur Veränderlichkeit in der Fabrik (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Wie-2002, S. 126])

Der schalenmäßige Aufbau bedeutet, dass ein Begriff auf einer höheren Ebene sämtliche Begriffe darunter einschließt. So kann z. B. eine Fabrik nur dann wandlungsfähig sein kann, wenn sie flexible und rekonfigurierbare Elemente enthält [Nyh-2007, S. 288]. Die Begriffe Umrüstbarkeit und Rekonfigurierbarkeit umfassen operative Fähigkeiten. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sind auf der taktischen Ebene angesiedelt. Bei Agilität handelt es sich um eine strategische Eigenschaft. Auf der untersten Ebene befindet sich die Umrüstbarkeit. Diese beschreibt im Fertigungsumfeld die operative Fähigkeit die Arbeitsoperationen eines einzelnen Arbeitsplatzes für bekannte Werkstückfamilien kurzfristig, schnell und mit minimalem Aufwand umzustellen. Die Umstellung kann dabei automatisch oder manuell erfolgen und findet reaktiv statt. Der Begriff Rekonfigurierbarkeit meint die operative Fähigkeit, Montage- oder Fertigungssysteme mit geringem Aufwand und kurzer Verzögerung durch das Hinzufügen oder Entfernen funktioneller Elemente auf eine definierte Anzahl an Werkstücken oder Baugruppen umstellen zu können [Wie-2002, S. 127]. Flexibilität ist die taktische Fähigkeit in vertretbar kurzer Zeit und mit angemessenem Aufwand die Produktionsprozesse auf die Fertigung einer neuen Komponentenfamilie umzustellen, indem Fertigungsprozesse, Materialflüsse und Logistikfunktionen angepasst werden [Wie-2002, S. 127]. Die Wandlungsfähigkeit stellt die taktische Fähigkeit dar, die Produktionskapazität einer gesamten Fabrikstruktur anzupassen oder auf andere neue Produktfamilien umzustellen. Dies erfordert Eingriffe in die Infrastruktur bestehender Systeme sowie in die vorhandenen Prozessabläufe. Dadurch ist ein Planungsvorlauf notwendig, damit die tatsächliche Anpassung in relativ kurzer Zeit erfolgen kann [Wie-2007, S. 786]. Ein flexibles System ist bei auftretenden Störgrößen somit nur innerhalb bestehender Grenzen – so

genannter Flexibilitätskorridore – anpassbar. Bei einem wandlungsfähigen System werden diese Flexibilitätskorridore verschoben. Dadurch kann auch auf größere Veränderungen, welche durch Flexibilität nicht mehr handhabbar sind, effizient reagiert werden [Özs-2012, S. 608]. Auf der obersten Ebene des Schalenmodells ist die Agilität angeordnet. Darunter wird die Veränderung des gesamten Produktportfolios zur Erschließung neuer Märkte sowie die Restrukturierung der gesamten Supply Chain verstanden [Nyh-2007, S. 288]. Anders ausgedrückt, ist Agilität die Eigenschaft von Unternehmen auf Marktbedürfnisse besser und schneller reagieren zu können [Chr-2000, S. 37]. Ein agiles Unternehmen kann sich an jede unerwartete Änderung der Umwelt schnell und effizient anpassen [Gan-2009, S. 410].

Wird die Logik des Schalenmodells auf die Inbound-Logistik übertragen, so entspricht die Umrüstbarkeit der Anpassung von konkreten Lieferparametern (z. B. Losgröße, Abrufmengen). Rekonfigurierbarkeit bedeutet beispielsweise, dass neue Bauteilvarianten zu einer bestehenden Liefergruppe hinzugefügt werden. Flexibilität umfasst die Fähigkeit die verwendeten Logistikkonzepte auf andere verfügbare Logistikkonzepte umzustellen. Wandlungsfähigkeit dagegen bedeutet die Erweiterung bestehender Logistikkonzepte um neue Logistikkonzepte (z. B. Einführung von Milkruns, wenn bisher keine Milkruns verwendet wurden). Unter Agilität fallen Produktionsstandortentscheidungen und Sourcing-Entscheidungen, die Auswirkungen auf das gesamte Liefernetzwerk besitzen.

### **Logistikspezifische Flexibilitätsarten**

Ein Unternehmen kann in mancher Hinsicht flexibel und in Bezug auf andere Aspekte weniger flexibel sein. Demzufolge gibt es nicht nur eine einzige Flexibilitätsart, sondern eine Vielzahl an Flexibilitätsarten, welche in Wechselwirkungen zueinander stehen. Aus diesem Grund existieren zahlreiche Ansätze, die sich mit der Strukturierung und Klassifizierung von Supply Chain Flexibilität auseinandersetzen. Es herrscht Einigkeit über die Tatsache, dass sich Supply Chain Flexibilität aus mehreren Flexibilitätsarten zusammensetzt (vgl. z. B. [Tiw-2015; Duc-2003; Puj-2004; Swa-2006; Ste-2007; Gos-2010]). Die Strukturierung von Supply Chain Flexibilität erfolgt meist nach Funktionen innerhalb der Lieferkette, wie z. B. Belieferung, Produktion und Distribution. Die Arbeiten zur Strukturierung und Klassifizierung von Supply Chain Flexibilität unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl an betrachteten Flexibilitätsarten. Eine zentrale Erkenntnis ist, dass der Grad der Supply Chain Flexibilität vom Grad der untergeordneten Flexibilitätsarten abhängt [Duc-2003, S. 450]. Abbildung 2-7 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen verschiedenen Flexibilitätsarten der Supply Chain Flexibilität sowie ihre jeweilige Zuordnung zu einem Lieferkettenabschnitt.

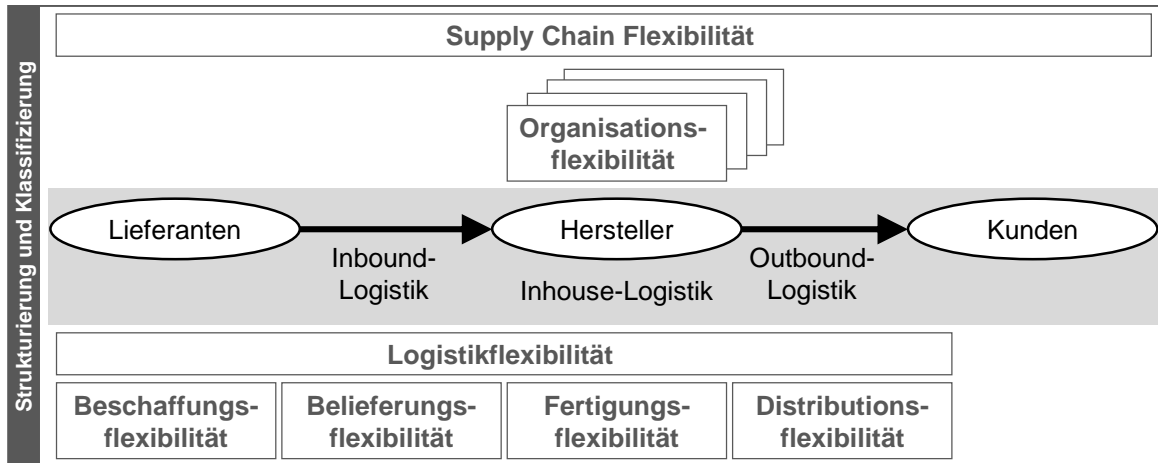


Abbildung 2-7: Exemplarische Strukturierung von Supply Chain Flexibilität (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Duc-2003, S. 451; Tiw-2015, S. 772])

Aufgrund der Vielzahl an Flexibilitätsarten ist es wichtig festzulegen, in welchem Bereich der Lieferkette die Flexibilität gesteigert werden soll [Sua-1995, S. 31]. Da diese Arbeit die Inbound-Logistik fokussiert, wird im Folgenden detaillierter auf die Flexibilitätsarten Logistikflexibilität, Beschaffungsflexibilität und Belieferungsflexibilität eingegangen. Alle drei Flexibilitätsarten sind der Supply Chain Flexibilität hierarchisch untergeordnet. Zudem lassen sich die Beschaffungs- und Belieferungsflexibilität der Logistikflexibilität zuordnen. Auch für diese Flexibilitätsarten gibt es keine einheitlichen Definitionen. Die Tabellen 2-1, 2-2 und 2-3 geben einen Überblick über verschiedene Definitionen häufig zitierten Autoren. Falls erforderlich, wurden die Definitionen aus dem Englischen frei übersetzt.

Tabelle 2-1: Definitionen von Logistikflexibilität

Quelle	Definition
[Duc-2003, S. 451], [Lum-2005, S. 2700]	Logistikflexibilität ist die Fähigkeit Produkte kosteneffektiv zu empfangen und zu liefern, auch wenn sich Lieferquellen oder Kundensenken ändern (z. B. Standortwechsel, Globalisierung).
[Sán-2005, S. 684]	Logistikflexibilität bezieht sich auf die unterschiedlichen Logistikstrategien, die angewendet werden, um entweder ein Produkt in den Markt zu bringen oder eine Komponenten vom Lieferanten einzukaufen.
[Zha-2005, S. 75]	Logistikflexibilität ist die Fähigkeit schnell und effizient in der Lieferung, der Unterstützung und im Service von Inbound und Outbound auf Kundenwünsche zu reagieren.
[Tiw-2015, S. 781]	Ein flexibles Logistiksystem ermöglicht Flexibilität im Gesamtsystem, indem geeignete Transportmodi zu sinnvollen Kosten bei sich ändernden externen Umfeldbedingungen verwendet werden.

Logistikflexibilität (englisch: *logistics flexibility*) bezieht sich auf alle Prozesse der Logistik – von externen Inbound-Transporten über Verteilzentren und Outbound-Transporten bis hin zum Endkunden. Die Logistikkapazitäten sollen so vorgehalten werden, dass Schwankun-

gen in der Nachfrage abgedeckt, eine große Produktvielfalt gesteuert und kundenindividuelle Produkte an den Endkunden geliefert werden können [Duc-2003, S. 452]. Beschaffungsflexibilität (englisch: *procurement/sourcing/purchasing flexibility*) ist stärker fokussiert und bezieht sich auf die Beziehung zwischen dem Hersteller und seinen Lieferanten. Die Beziehung sollte kooperativ sein, d. h. mit einem fokussierten Informationsaustausch sowie einer regelmäßigen Kommunikation [Jaf-2015, S. 950]. Da bei der Beschaffungsflexibilität insbesondere die Zusammenarbeit mit den Lieferanten adressiert wird und weniger die physische Materialbelieferung, ist diese Flexibilitätsart nicht Fokus dieser Arbeit.

Tabelle 2-2: Definitionen von Beschaffungsflexibilität

Quelle	Definition
[Swa-2006, S. 174]	Beschaffungsflexibilität ist definiert, als das Vorhandensein einer Menge an Optionen und die Fähigkeit des Beschaffungsprozesses diese Optionen effektiv zu nutzen, sodass auf geänderte Anforderungen bezogen auf die gelieferten oder eingekauften Komponenten reagiert werden kann.
[Yi-2011, S. 274]	Beschaffungsflexibilität ist definiert als das Vorhandensein von Quellen mit geeignetem Material und Services sowie die Fähigkeit einen effektiven Beschaffungsprozess durchzuführen, welcher auf sich ändernde Anforderungen reagiert.
[Gos-2010, S. 12]	Beschaffungsflexibilität ist die Fähigkeit das Supply Chain Netzwerk zu rekonfigurieren, indem neue Lieferanten hinzugefügt oder bestehende Lieferanten gekündigt werden.
[Jaf-2015, S. 950], [Zha-2005, S. 75]	Beschaffungsflexibilität ist die Fähigkeit eine Vielfalt an Materialien und Lieferungen schnell und performance-effektiv durch kooperative Beziehungen mit den Lieferanten bereitzustellen.

Belieferungs- und Lieferflexibilität (englisch: *supply flexibility*) hingegen beziehen sich stärker auf den physischen Materialfluss von Lieferanten zu Herstellern. In diesem Fall werden die Hersteller auch als Kunden der Lieferanten verstanden. Tabelle 2-3 zeigt, dass unterschiedliche Auslegungen dieser Flexibilitätsart existieren: Das Verständnis von *Duclos et al.* ähnelt der Definition von Beschaffungsflexibilität, bei der es auf die Beziehung zu den Lieferanten ankommt. Unternehmen müssen beispielsweise entscheiden, ob sie befristete Verträge mit den Lieferanten eingehen oder ob sie auf strategische Partnerschaften setzen und langfristige Verträge festlegen [Duc-2003, S. 452]. Laut *Zhang et al.* kann mittels der Belieferungsflexibilität eine große Menge an Inbound-Materialien auf vielfältige Weise an die Produktion geliefert werden. Hiervon sind die informationsintensiven Prozesse Inbound-Transport, Lagerhaltung und Bestandsüberwachung betroffen [Zha-2005, S. 74 f.]. Belieferungsflexibilität wird als Kompetenz betrachtet, da es sich um eine interne Stärke des Herstellers handelt, welche für den Endkunden nicht sichtbar ist. Die Bedeutung dieser Flexibilitätsart ist dennoch enorm, da sich die Qualität des Inbound-Transports (z. B. gemessen

Tabelle 2-3: Definitionen von Belieferungs- und Lieferflexibilität

Quelle	Definition
[Zha-2005, S. 75]	Belieferungsflexibilität stellt die Fähigkeit dar eine Vielfalt an Inbound-Materialien und Lieferungen für die Produktion schnell und effektiv zu liefern.
[Duc-2003, S. 451], [Lum-2005, S. 2700], [Cor-2007, S. 575]	Belieferungsflexibilität ist die Fähigkeit die Supply Chain zu rekonfigurieren und die Belieferung eines Produkts entsprechend der Kundennachfrage zu ändern.
[Men-2007, S. 1117]	Belieferungsflexibilität ist die Fähigkeit der Beschaffungsfunktion auf sich ändernde Anforderungen – bezogen auf eingekaufte Komponenten, Mengen, Mix und Lieferzeit – in einer zeit- und kosteneffektiven Art zu reagieren.
[Lia-2010, S. 8]	Belieferungsflexibilität ist definiert als das Ausmaß der Reaktionsfähigkeit, durch die Nutzung von lieferantenspezifischen Fähigkeiten sowie von Fähigkeiten bzgl. der gemeinschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Organisationen. Es wird die Lieferantenflexibilität und die Liefernetzwerkflexibilität unterschieden.
[Arn-2008, S. 8]	Lieferflexibilität ist die Fähigkeit auf Kundenwünsche hinsichtlich der Art der Auftragserteilung, der Liefermodalität (z. B. Verpackung, Ladungsträger, Transportmittel, Tageszeit) und der Information über laufende Aufträge einzugehen.
[Pfo-2010, S. 37]	Unter Lieferflexibilität ist zu verstehen, ob das Auslieferungssystem des Lieferanten es gestattet auf besondere Bedürfnisse des Kunden einzugehen oder ob sich der Kunde mit seiner Beschaffungslogistik nach starr vorgegebenen Regeln der Distributionslogistik des Lieferanten zu richten hat.

an der Anlieferfrequenz, den Transportkosten, oder der Fehlteil- und Schadenshäufigkeit) auf Lager- und Fehlbestände beim Hersteller, auf Produktionsstillstände und auf die Auslastung des Logistikequipments für die Materialhandhabung auswirkt [Zha-2005, S. 74].

Vor dem Hintergrund, dass sich stetig verändernde Gegebenheiten (z. B. Bedarfsänderungen) zu Ineffizienzen in der Inbound-Logistik führen können, wird in der vorliegenden Arbeit ein besonderes Augenmerk auf den physischen Materialfluss vom Lieferanten zum Hersteller gelegt. In dieser Arbeit wird daher folgende Definition der Belieferungsflexibilität zugrunde gelegt (in Anlehnung an [Vok-1998; Wie-2007; Duc-2003; Zha-2005]):

#### **Definition Belieferungsflexibilität**

*Belieferungsflexibilität ist die Fähigkeit, die bestehenden Inbound-Logistikkonzepte – bei sich verändernden Gegebenheiten – schnell und mit geringem monetären Aufwand innerhalb eines vordefinierten Handlungsspielraumes umzustellen, sodass eine effiziente Belieferung sichergestellt wird.*



Flexibilität sollte immer im Kontext der Attribute *Effizienz* und *Zeit* betrachtet werden. Da die Logistik einem stetig zunehmenden Kostendruck ausgesetzt ist [Sch-2016, S. 13], wird Effizienz in diesem Fall als Kosteneffizienz interpretiert. Die Umstellung der Logistikkonzepte sollte entsprechend mit geringem monetären Aufwand erfolgen. Neben den Kosten spielt die Zeitkomponente eine wichtige Rolle. Unter dem Adjektiv *schnell* wird die Anpassung innerhalb eines kurzen Zeitraums verstanden. Die beiden Attribute Effizienz und Zeit stehen jedoch in einer Wechselbeziehung zur Flexibilität. Eine Steigerung der Flexibilität kann Zielkonflikte bei den Attributen verursachen, wie z. B. eine Erhöhung der Kosten oder zeitliche Verzögerungen [Chr-1996, S. 581].

Aufbauend auf der erfolgten Strukturierung und Klassifizierung von Supply Chain Flexibilität wurden zahlreiche Ansätze zu ihrer Bewertung und Messung entwickelt (vgl. z. B. [Mer-2011; Puj-2004]). Um eine Bewertung zu ermöglichen, ist es notwendig die Hebel der verschiedenen Flexibilitätsarten zu identifizieren – d. h. herauszufinden, wie Flexibilität erreicht oder gesteigert werden kann. Hebel, die die Belieferungsflexibilität steigern, liegen laut *Mendonça Tachizawa und Thomsen* im Handlungsspielraum der Beschaffung. Beispielsweise kann sich ein Single-Sourcing kombiniert mit Hauptlieferanten vorteilhaft auf die Belieferungsflexibilität auswirken [Men-2007, S. 1118 f.]. Weitere Hebel der Belieferungsflexibilität können die Anzahl an qualifizierten Lieferanten für ein Bauteil, die Anzahl alternativer Transportmodi oder die Reaktionsfähigkeit von Lieferanten sein [Puj-2004, S. 83]. Eine Auswahl an Hebeln der Belieferungsflexibilität ist in Tabelle 2-4 dargestellt. Da die Hebel nicht immer im Handlungsspielraum der Beschaffung liegen, ist zusätzlich der verantwortliche Bereich für den jeweiligen Hebel in der Tabelle eingetragen. Die Entscheidung für ein Single- oder ein Multiple-Sourcing liegt beispielsweise in der Verantwortung der Beschaffung. Die Lieferanten sind verantwortlich für ihre eigenen Fähigkeiten, wie z. B. verfügbare zusätzliche Lieferkapazität. Die Logistik des Herstellers verantwortet die Prozesse der physischen Materialflüsse sowie die Bestände im eigenen Unternehmen.

Doch allein die Messung und Bewertung von Belieferungsflexibilität steigert diese nicht. Dazu ist die Fragestellung, wie Belieferungsflexibilität in der industriellen Praxis umgesetzt werden kann, zu untersuchen. Im Folgenden wird daher analysiert, ob bestehende Forschungsansätze dieser Fragestellung nachgehen. Insgesamt existieren nur wenige Forschungsarbeiten, die die Hebel zur Steigerung der Belieferungsflexibilität betrachten. Die meisten der identifizierten Hebel liegen zudem im Handlungsspielraum der Lieferanten oder der Beschaffung. In der Logistik werden nur wenige Hebel der Belieferungsflexibilität genannt – doch genau diese Hebel sind durch den OEM beeinflussbar. Beispielsweise kann

Tabelle 2-4: Hebel der Belieferungsflexibilität (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Puj-2004; Men-2007])

Hebel der Belieferungsflexibilität	Lieferanten	Beschaffung	Logistik	Quelle
Single-Sourcing vs. Multiple-Sourcing		X		[Puj-2004, S. 83]
Global Sourcing vs. Domestic Sourcing		X		[Jin-2004, S. 1293]
Lieferantenauswahl		X		[Men-2007, S. 1119]
Lieferantenwechselkosten	X	X		[Puj-2004, S. 83]
Langfristige Beziehung mit Lieferanten	X	X		[Men-2007, S. 1126]
Lieferantenfähigkeit, verschiedene Materialien für den Hersteller zu produzieren	X			[Puj-2004, S. 83]
Verfügbare zusätzliche Lieferkapazität der Materialien	X	X		[Puj-2004, S. 83]
Lieferantenentwicklung und -zertifikate sowie Lieferanten Qualitätsmanagement Programme	X			[Zsi-2003, S. 18]
Lieferant kann Expresslieferungen zu geringen Kosten abwickeln	X			[Puj-2004, S. 83]
Reaktionsfähigkeit der Lieferanten	X			[Puj-2004, S. 83]
Übermittlung von Prognosen an Lieferanten			X	[Men-2007, S. 1126]
Technisch und ökonomisch sinnvoll verschiedene Materialien in einer Transportladung zu bündeln	X		X	[Puj-2004, S. 83]
Anzahl alternativer Transportkonzepte			X	[Puj-2004, S. 83]
Bestandspuffer			X	[Men-2007, S. 1126]

der OEM entscheiden, welche Transportkonzepte für die Inbound-Transporte verwendet werden sollen. Die Hebel werden jedoch meist nur dafür verwendet, die Belieferungsflexibilität zu bewerten. Auf die Umsetzung der Hebel wird nicht eingegangen. Damit bleibt z. B. unklar, wieviele und welche Transportkonzepte die Belieferungsflexibilität tatsächlich steigern. Bei dem Hebel Lieferantennetzwerk wurde beispielsweise erkannt, dass ein großes Lieferantennetzwerk die Belieferungsflexibilität erhöht. Dies geschieht allerdings nur dann, wenn ein Lieferantenwechsel geringe Kosten verursacht [Men-2007, S. 1131 f.]. Wie die Kosten für einen Lieferantenwechsel verringert werden können, wurde anschließend nicht untersucht. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bestehende Forschungsansätze verschiedene Hebel identifizieren um Belieferungsflexibilität zu bewerten. Die taktische Umsetzung und die Wirkungsweise der Hebel wird nicht untersucht. Hebel zur Steigerung der Belieferungsflexibilität, welche im Handlungsspielraum der Logistik des OEM liegen, werden meist vernachlässigt, da die Beziehung zwischen Beschaffung und Lieferanten im Fokus steht. Für den OEM sind daher verschiedene Fragestellungen hinsichtlich der Belieferungsflexibilität noch nicht beantwortet: Unter welchen Umständen sollte die Belieferungs-

flexibilität gesteigert werden? Wie kann die Belieferungsflexibilität gesteigert werden? Zu welchen Zeitpunkten ist die Steigerung der Flexibilität sinnvoll?

### 2.2.2 Forschungsansätze zu Flexibilität in der Logistik

Im Folgenden werden ausgewählte Forschungsbeiträge vorgestellt, die sich thematisch mit der Logistik- oder Belieferungsflexibilität, mit Flexibilität in der Automobillogistik oder in Logistikstrukturen beschäftigen. Ziel ist es herauszufinden, ob Untersuchungen zur Einführung und Steigerung von Belieferungsflexibilität in der Industrie existieren. Tabelle 2-5 strukturiert die im Folgenden beschriebene Literatur.

*Küber et al.* stellen eine Methode vor, die bei der strategischen Entscheidung zwischen Flexibilität, wirtschaftlicher Effizienz und der Gestaltung der Montage- und Intralogistikprozesse in der Automobilindustrie unterstützt. Es liegt die These zugrunde, dass für Prozesse, die in der Lage sind, auf Veränderungen zu reagieren, kein Optimum von Flexibilität und Effizienz erreicht werden kann. Dies ist auf die Interdependenzen zwischen den verschiedenen Montage- und Intralogistikprozessen sowie auf den Trade-Off zwischen Flexibilität und Effizienz zurückzuführen. Als Lösung wird ein strategisches Entscheidungsquadrat (englisch: *strategic decision square*) präsentiert, welches die Interdependenzen aufzeigen soll, so dass es als Planungstool genutzt werden kann. Für verschiedene Szenarien zur Gestaltung der Montage- und Logistikprozesse werden die Prozesskosten gegenübergestellt. Anschließend wird die Entwicklung dieser Prozesskosten bei Veränderung der Flexibilitätstreiber (Modellmix-, Derivate-, Mengenänderung) untersucht. Auf dieser Basis kann entschieden werden, welches Szenario für welche Entwicklung am besten geeignet ist [Küb-2016].

Die Arbeit von *Zhang et al.* analysiert den Zusammenhang zwischen Logistikflexibilität und Kundenzufriedenheit. Dazu wird zunächst der Begriff Logistikflexibilität in Kompetenzen und Fähigkeiten unterteilt. Die Belieferungsflexibilität und die Beschaffungsflexibilität stellen flexible Logistikkompetenzen dar. Die Distribution und das Nachfragemanagement sind flexible Logistikfähigkeiten. Anschließend findet eine Befragung von 3.000 produzierenden US-Unternehmen statt, welche über die Society of Manufacturing Engineers (SME) kontaktiert wurden. Aus dieser Befragung ergeben sich folgende Implikationen für Manager: Die Kundenzufriedenheit kann durch die Entwicklung von Logistikflexibilität erhöht werden. Kunden wertschätzen eher sichtbare Fähigkeiten, wie Distributionsflexibilität und Flexibilität im Nachfragemanagement. Nicht direkt ersichtliche Kompetenzen, wie die Belieferungs- und Beschaffungsflexibilität, die den Fertigungsprozess unterstützen, sind jedoch notwen-

Tabelle 2-5: Forschungsmatrix – Strukturierung der vorgestellten Ansätze

Kriterien zur Einordnung der Literatur	[Küb-2016]	[Zha-2005]	[Özs-2012]	[Duc-2003]	[Cor-2007]	[Men-2007]	[Puj-2004]	[Lia-2010]	vorliegende Arbeit
<b>Untersuchungsgegenstand</b>									
Fertigungsflexibilität	X				X		X		
Supply Chain Flexibilität				X			X		
Logistikflexibilität	X	X		X	X				
Belieferungsflexibilität				X	X	X	X	X	X
Wandlungsfähigkeit			X						
Andere Flexibilitätsarten				X	X		X		
<b>Lieferkettenabschnitt</b>									
Lieferant			X	X					
Inbound-Logistik		X	X	X		X	X		X
Inhouse-Logistik	X		X	X					
Produktion	X			X			X		
Outbound-Logistik		X	X	X			X		
<b>Forschungsziel</b>									
Strukturierung/Klassifizierung		X		X				X	
Messung/Bewertung		X			X	X	X	X	
Vorgehen/Planung	X		X						X
<b>Planungshorizont (falls vorhanden)</b>									
Operativ & kurzfristig									
Taktisch & mittelfristig									X
Strategisch & langfristig	X		X			X	X		
<b>Betrachtete Industrie</b>									
Produzierende Industrie		X	X	X	X	X	X	X	
Automobilindustrie	X					X			X
<b>Berücksichtigung von Trade-Offs (falls vorhanden)</b>									
Qualität									
Effizienz	X								X
<b>Forschungsdesign</b>									
Empirisch/Interview		X				X		X	
Fallstudie					X		X		X
Analytisch					X				X
Konzeptionell	X	X	X	X			X		X

dig für die Entwicklung der flexiblen Logistikfähigkeiten. Kunden sind trotzdem nicht dazu bereit, mehr für die Belieferungs- und Beschaffungsflexibilität zu bezahlen [Zha-2005].

Özsahin *et al.* untersuchen wandlungsfähige Logistikstrukturen. Diese Arbeit folgt der Logik des beschriebenen Schalenmodells (vgl. Kapitel 2.2.1). Die bestehende Flexibilität eines Logistiksystems ist nicht ausreichend, um auf bestimmte Einflussfaktoren angemessen zu reagieren. Es müssen daher wandlungsfähige Logistikstrukturen vorgehalten werden, um Einbußen von Wettbewerbsvorteilen, durch zu langsames reaktives Verhalten, vorbeugen zu können. Es wird eine Vorgehensmethode mit fünf Phasen beschrieben, mit welcher wandlungsfähige Logistikstrukturen konfiguriert und bewertet werden können. Die fünf beschriebenen Phasen sind die Strukturanalyse, die Umfeldanalyse, die Erfüllungsanalyse, die Bewertungsanalyse und die Fähigkeitsanalyse, wobei die Umfeld- und Erfüllungsanalyse den analytischen Kern darstellen. In der Umfeldanalyse sollen logistikrelevante Einflussfaktoren und Wandlungstreiber identifiziert werden. Das Ziel der Erfüllungsanalyse ist die Erarbeitung von alternativen Logistikstrukturen, in welche das Logistiksystem beim Eintreten der Wandlungstreiber und Einflussfaktoren gewandelt werden soll. Es wird vorgeschlagen die erarbeiteten Lösungsalternativen mittels Simulationsmodellen hinsichtlich der logistischen Zielerfüllung zu bewerten. Für zukünftige Arbeiten planen die Autoren die Anwendung der entwickelten Vorgehensmethode in der Textilindustrie [Özs-2012].

Duclos *et al.* zielen darauf ab Supply Chain Flexibilität mit ihren untergeordneten Flexibilitätsarten zu strukturieren, da vorangegangene Arbeiten meist nur einen ausgewählten Aspekt von Supply Chain Flexibilität, wie z. B. die flexible Lieferantenauswahl, fokussieren. Es werden sechs Komponenten von Supply Chain Flexibilität identifiziert: Marktflexibilität, Logistikflexibilität, Belieferungsflexibilität, Organisationsflexibilität und Informationssystemflexibilität. Die einzelnen Flexibilitätsarten werden beschrieben und diskutiert. Aus dieser Arbeit resultiert der Forschungsbedarf herauszufinden, ob diese Flexibilitätsarten in der Praxis relevant sind. Weiterhin wird vorgeschlagen Fallstudien in verschiedenen Industrien durchzuführen, um Wissen über die Entstehungsweise sowie die Wirkungsweise der verschiedenen Flexibilitätsarten zu erlangen [Duc-2003].

In der Arbeit von Coronado und Lyons wird die Betriebsflexibilität in industriellen Supply Chains bei einer Build-To-Order-Fertigung bewertet. Die vorgeschlagenen Methoden der Wertstromanalyse und des Scorecard-Tools erweisen sich als effektive Methoden zur Bewertung der Betriebsflexibilität. Mit Hilfe einer Wertstromanalyse (englisch: *value stream mapping*) werden Material- und Informationsflüsse entlang der Lieferkette identifiziert. Dadurch können die Positionen in der Lieferkette aufgedeckt werden, an denen Lagerbestände liegen. Weiterhin werden wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Aktivitäten in der gesamten Supply Chain offengelegt. Aus den Ergebnissen lassen sich Aussagen bzgl. wei-

terer Flexibilitätsdimensionen, wie z. B. Logistikflexibilität oder Belieferungsflexibilität, ableiten. In einer industriellen Fallstudie wird eine geringe Flexibilität in der Logistik und in der Belieferung identifiziert [Cor-2007]. Maßnahmen zur Verbesserung der Flexibilität werden jedoch nicht genannt.

*Mendonça Tachizawa und Thomsen* führen eine explorative Studie durch, indem sie Fallstudien von sieben produzierenden spanischen Unternehmen unterschiedlicher Industrien analysieren. Es werden die Forschungsfragen untersucht, warum Unternehmen Belieferungsflexibilität brauchen (Treiber) und wie sie Belieferungsflexibilität steigern können (Quellen). Zudem wird die Beziehung zwischen diesen Treibern und Quellen untersucht. In Interviews mit den Unternehmen wurden interne Treiber (z. B. unsicherer Produktionsplan, JIT-Belieferung) und externe Treiber (z. B. Nachfrageschwankungen, geringe Prognosequalität) identifiziert. Quellen und somit Strategien zur Steigerung der Belieferungsflexibilität sind eine verbesserte Lieferantenreaktion und eine flexible Beschaffung. Eine verbesserte Lieferantenreaktion wird beispielsweise dadurch erreicht, dass Lieferanten auf kurzfristige Produktionsprogrammänderungen effizient reagieren können oder dass Lieferanten in der Lage sind in kleinen Losen zu produzieren. Wichtige Bestandteile dieser Strategie sind das Single-Sourcing (d. h. das betroffene Material wird von nur einem Lieferanten bezogen), die geographische Nähe zum Lieferanten, die Lieferantenauswahl basierend auf der Flexibilität, interne Kollaborationen zwischen Beschaffungs- und Produktionsbereichen und die Prozessintegration von Logistikdienstleistern. Die Strategie einer flexiblen Beschaffung bedeutet das Vorhalten eines großen Lieferantenpools, sodass das Lieferantennetzwerk kontinuierlich und entsprechend der aktuellen Gegebenheiten rekonfiguriert werden kann. Hier liegt die Quelle der Flexibilität bei den Herstellern, die in der Lage sein müssen, schnell und mit geringen Kosten die Lieferkette durch Lieferantenwechsel neu zu gestalten. Die Ergebnisse der Studie implizieren, dass die Kosten für die Lieferantensuche und den Lieferantenwechsel ausschlaggebend für die Strategie der Belieferungsflexibilität sind: je höher diese Kosten sind, desto eher wird die Strategie einer verbesserten Lieferantenreaktion statt einer flexiblen Beschaffung verfolgt [Men-2007].

In der Arbeit von *Pujawan* wird ein generalisiertes Rahmenmodell entwickelt, mit dessen Hilfe die Supply Chain Flexibilität eines Unternehmens bewertet werden kann. Dieses Modell soll Supply Chain Managern dabei helfen herauszufinden, wie stark der tatsächliche Flexibilitätsgrad in den unterschiedlichen Dimensionen der Supply Chain Flexibilität vom gewünschten Flexibilitätsgrad abweicht. Das Bewertungsmodell ist theoretisch konzipiert und die praktische Anwendbarkeit wird anschließend in einer Fallstudie getestet. Es wird

vorgeschlagen Supply Chain Flexibilität in die vier Supply Chain Funktionen Beschaffung, Produktentwicklung- und -gestaltung, Fertigung und Produktion sowie Distribution aufzuteilen. Für jede dieser Funktionen soll die Flexibilität separat bewertet werden. Dies erfolgt über sieben interne und externe Flexibilitätstreiber (z. B. Lieferunsicherheit, Produktlebenszyklus oder Auftragsstabilität) und deren Auswirkung auf die vier Supply Chain Funktionen. Die Flexibilitätstreiber und die Auswirkungen werden durch ein Punktesystem miteinander verrechnet und ergeben so für jedes Element innerhalb einer Supply Chain Funktion einen gewünschten und einen aktuellen Punktwert. Elemente der Belieferungsflexibilität stellen beispielsweise die Anzahl an qualifizierten Lieferanten für ein Material oder die Anzahl an Transportmodi zur Anlieferung der Materialien dar [Puj-2004].

*Liao et al.* untersuchen in einer empirischen Studie verschiedene Hypothesen bzgl. des Zusammenhangs von Supply Chain Management, Supply Chain Performance und Belieferungsflexibilität, welche sich wiederum in Liefernetzwerkflexibilität und Lieferantenflexibilität aufteilen lässt. Es werden Daten mittels einer webbasierten Methode von Unternehmen aus sechs verschiedenen Industrien erhoben. Es wird eine bestätigende Faktoranalyse (englisch: *confirmatory factor analysis*) durchgeführt, welche die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Variablen untersucht. Anschließend werden verschiedene Hypothesen getestet. Es wird eine positive Beziehung zwischen Supply Management Methoden und der Liefernetzwerkflexibilität nachgewiesen. Weiterhin haben die Lieferantenauswahl, die Lieferantenentwicklung sowie Lieferantenallianzen einen direkten, stark positiven Effekt auf die Lieferantenflexibilität. Zudem kann sowohl ein höheres Level an Lieferantenflexibilität und als auch ein höheres Level an Liefernetzwerkflexibilität zu einer verbesserten Supply Chain Performance führen. Die Arbeit liefert folgende Implikationen für die Industrie: Die vorhandene Lieferantenbasis sollte nicht per se reduziert werden. Lieferanten, die bereit und fähig sind mit Veränderungen umzugehen, sollten behalten werden. Zudem sollte die Sourcing-Strategie angepasst werden, um flexibler zu werden [Lia-2010].

### **2.2.3 Diskussion der Literaturrecherche und Einordnung der Arbeit**

Aktuelle Forschungsansätze beschäftigen sich häufig mit konzeptionellen Rahmenmodellen, Vorgehensmethoden oder der Bewertung und Messung von Flexibilität. Konzeptionelle Rahmenmodelle liefern eine strukturierte Einordnung und ein einheitliches Verständnis über die verschiedenen Flexibilitätsbegriffe (vgl. [Duc-2003; Zha-2005]). Existierende Vorgehensmethoden sind generischer Natur. Sie schlagen vor, in welcher Art und Weise vorgegangen werden sollte, um beispielsweise wandlungsfähige Logistikstrukturen zu erhalten

(vgl. [Özs-2012]). Arbeiten zur Bewertung von Flexibilität identifizieren, an welchen Stellen in der Supply Chain wenig Flexibilität vorliegt und welche Flexibilitätsart gesteigert werden sollte (vgl. [Cor-2007]). In Summe fehlt es jedoch an konkreten Vorschlägen zur Ausgestaltung und Umsetzung flexibler Logistik- und Belieferungsstrukturen. Die Identifikation des Flexibilitätsbedarfs allein reicht nicht, um die Belieferung effizienter zu gestalten. Es sind konkrete Umsetzungsmaßnahmen zu identifizieren, um ebendiese Potenziale heben zu können. Zudem existieren keine Forschungsansätze in Bezug auf die Belieferungsflexibilität der Automobilindustrie. Die strategische Planungsmethode von *Küber et al.* beschäftigt sich lediglich mit den Montage- und Intralogistikprozessen dieser Industrie.

Forschungsbedarf bzgl. der Umsetzung von Flexibilität wurde ebenfalls in der Literatur identifiziert: Bei der Fertigungsflexibilität fehlt es an Maßnahmen und konzeptionellen Rahmenmodellen zur Implementierung im Unternehmen [Jai-2013, S. 5966]. Ebenso besteht bei der Belieferungsflexibilität Handlungsbedarf hinsichtlich der Entstehungsweise und Wirkungsweise in der Praxis [Duc-2003, S. 455]. Weiterhin basieren die meisten Untersuchungen zu Logistikflexibilität auf quantitativen Umfragen gefolgt von qualitativen Fallstudien. Es wird empfohlen darüber hinaus andere und neue Forschungsmethoden auf Industriebeispiele anzuwenden [Jaf-2015, S. 962]. Ein wesentlicher Forschungsbedarf besteht zudem in der Berücksichtigung der entstehenden Kosten aufgrund der Einführung von Flexibilität sowie des resultierenden Nutzens. Hier sind Bewertungsmodelle erforderlich, die den Mehrwert von Flexibilität darstellen [Tiw-2015, S. 783 f.; Jai-2013, S. 5966].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Belieferungsflexibilität ein wichtiges Forschungsgebiet darstellt. Bisherige Untersuchungen basieren meist auf Interviews und Fallstudien, aus denen konzeptionelle Rahmen-, Vorgehens- oder Bewertungsmodelle entwickelt wurden. Es besteht somit der Bedarf, dieses Forschungsgebiet zusätzlich mit analytischen Methoden und quantitativen Modellen zu untermauern. Weiterhin sollte die Umsetzung und Implementierung von Belieferungsflexibilität in der Industrie stärker fokussiert werden. Zum einen gilt es Maßnahmen zu identifizieren, die die Flexibilität steigern. Zum anderen sind Bewertungsverfahren erforderlich, mit deren Hilfe die Kosten aus den Flexibilisierungsmaßnahmen dem Nutzen aus der gesteigerten Flexibilität gegenübergestellt werden können. Nur so lässt sich der existierende Trade-Off zwischen Flexibilität und Kosten bei der Implementierung von Belieferungsflexibilität berücksichtigen. Die genannten Aspekte werden in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt. Entsprechend ist diese Arbeit in Tabelle 2-5 in das Forschungsfeld von Flexibilität eingeordnet. Das Forschungsfeld soll um ein Steuerungskonzept für Belieferungsflexibilität in der Inbound-Logistik erweitert werden. Der



Planungshorizont umfasst die taktischen Ebenen, d. h. es werden mittelfristige Anpassungen in der Belieferung betrachtet. Als konkretes Element der Belieferungsflexibilität wird die Umstellung von Inbound-Logistikkonzepten, d. h. Transport- und Belieferungskonzepten, betrachtet. Dabei soll der Zielkonflikt zwischen Flexibilität und Effizienz berücksichtigt werden. Weiterhin soll das Konzept für die Automobilindustrie entwickelt werden, da hier eine hohe Dynamik herrscht und eine Vielzahl an Logistikkonzepten verwendet werden.

## **2.3 Studie zur Flexibilität der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie**

Im Folgenden wird die Praxisrelevanz von Belieferungsflexibilität anhand der Studie von *Maas und Fottner* aufgezeigt [Maa-2017a]. Zunächst wird auf die Rahmenbedingungen und Zielsetzung eingegangen, gefolgt von den wesentlichen Erkenntnissen der Studie. Abschließend werden diese Erkenntnisse diskutiert und der Handlungsbedarf wird im Abgleich mit dem zuvor identifizierten Forschungsbedarf zu Flexibilität zusammengefasst.

### **2.3.1 Zielsetzung und Rahmendaten der Studie**

Anlass der Studie war die Ungewissheit darüber, ob Flexibilität in der Automobillogistik als wichtig erachtet wird und wie flexibel die Inbound-Logistik in der Automobilindustrie ist. Zudem fehlte es an konkreten Umsetzungsmaßnahmen zur Steigerung der Flexibilität in der Inbound-Logistik. Die Studie verfolgt vier wesentliche Ziele: Erstens die Identifikation des Umsetzungsstands von Flexibilität in der Automobillogistik allgemein; zweitens die Ermittlung des aktuellen Vorgehens zur Konfiguration der Inbound-Logistik in Bezug auf die Belieferungskonzepte; drittens die Untersuchung des flexiblen Einsatzes von Belieferungskonzepten; viertens das Ableiten des zukünftigen Handlungsbedarfs in Bezug auf die Flexibilität in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie [Maa-2017a, S. 13 f.].

Für diese explanative Studie wurde eine quantitative Online-Befragung durchgeführt. Zielgruppe der Befragung waren Logistiker der Automobilindustrie, d. h. Lieferanten, Automobilhersteller und Unternehmensberater der Automobillogistik. Die resultierende Stichprobe ist nicht repräsentativ, da unklar ist, inwiefern sie die tatsächliche Population von Logistikern in der Automobilindustrie widerspiegelt. Von einer Verallgemeinerung der Ergebnisse muss daher abgesehen werden. Dennoch können mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse aufgestellte Theorien belegt und Hypothesen bestätigt werden [Maa-2017a, S. 7 ff.]. Die

Online-Befragung wurde von insgesamt 109 Teilnehmern vollständig beantwortet. Davon repräsentieren 72 % der Teilnehmer die Ansichten von Automobil- und Nutzfahrzeugherstellern, 18 % vertreten die Lieferantensichtweise und 2 % der Teilnehmer sind Logistikberater. Mit 84 % ist ein Großteil der Studienteilnehmer in der Logistik tätig. 41 % der Teilnehmer arbeiten seit zwei bis sechs Jahren in ihrer aktuellen Position. Zudem sind 52 % der Teilnehmer Fachangestellte und 26 % der Teilnehmer sind Teamleiter. Die Struktur der Stichprobe beinhaltet somit eine große Bandbreite an Logistikexperten, sodass die gewonnenen Ergebnisse als aussagekräftig und fundiert eingestuft werden [Maa-2017a, S. 19 ff.].

### 2.3.2 Wesentliche Erkenntnisse der Studie

Die aus der Studie gewonnenen Erkenntnisse sind in Abbildung 2-8 zusammengefasst. Die Erkenntnisse lassen sich in drei Kategorien gemäß der vorgestellten Zielsetzung der Studie aufteilen: Umsetzungsstand von Flexibilität in der Automobillogistik, Vorgehen zur Konfiguration der Inbound-Logistik und flexibler Einsatz von Belieferungskonzepten.

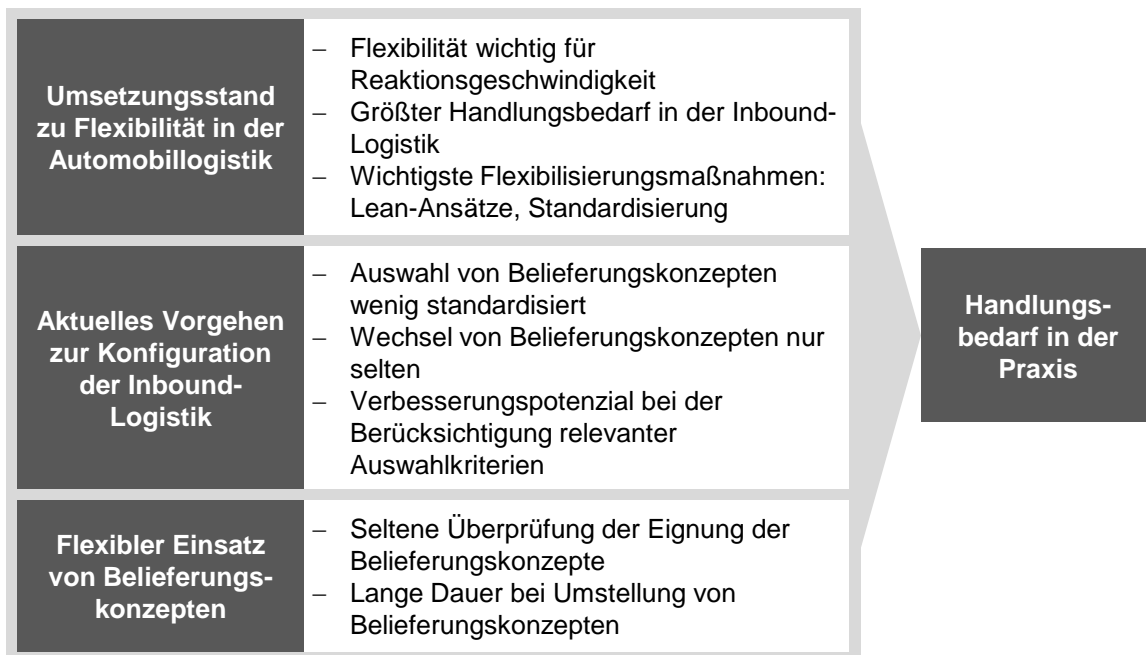


Abbildung 2-8: Haupterkenntnisse der Praxisstudie von Maas und Fottner [Maa-2017a]

Bezüglich des Umsetzungsstandes von Flexibilität wird deutlich, dass Flexibilität als wichtige und notwendige Eigenschaft eingestuft wird, da sie insbesondere bei Nachfrageänderungen der Kunden und bei Lieferstörungen die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Weitere Vorteile von Flexibilität werden in der Bewältigung der Variantenvielfalt und in der Lieferzuverlässigkeit gesehen. Flexibilität wird für die drei Logistikbereiche Inbound, Inhouse und

Outbound im Durchschnitt als sehr relevant eingestuft. Die tatsächlich vorliegende Flexibilität der drei Logistikbereiche wird jedoch für alle geringer eingeschätzt. Die größte Differenz zwischen der Soll- und Ist-Flexibilität weist dabei die Inbound-Logistik auf. Als Maßnahmen zur Steigerung der Flexibilität werden vor allem Maßnahmen zur Standardisierung, die Umsetzung von Lean-Ansätzen, die Verringerung von Wiederbeschaffungszeiten und die Transparenz von Warenströmen genannt [Maa-2017a, S. 23 ff.].

Bei dem aktuellen Vorgehen zur Konfiguration der Inbound-Logistik geht es insbesondere um die Auswahl und Dauer der Beibehaltung von Belieferungskonzepten. Die Ergebnisse der Studie weisen ein wenig einheitliches Bild hinsichtlich des Standardisierungsgrades bei der Auswahl der Belieferungskonzepte auf. Deutlich wird, dass die Auswahl nicht über alle Bauteile standardisiert erfolgt. Über die Hälfte der durchführenden Logistikplaner geben an, dass die Auswahl nur für einige Bauteile oder Bauteilgruppen standardisiert und für die restlichen Bauteile individuell erfolgt. Weiterhin werden Belieferungskonzepte selten gewechselt. Bei 34 % der Automobilhersteller beträgt die durchschnittliche Beibehaltung der Belieferungskonzepte drei bis sechs Jahre. Bei 11 % beträgt sie über sechs Jahre. Einen weiteren Untersuchungsaspekt stellen die Kriterien zur Auswahl der Belieferungskonzepte dar. Die Verbrauchsschwankungen, die Anzahl an Varianten sowie die Bereitstellform am Montageband sollten bei der Auswahl des Belieferungskonzeptes am stärksten berücksichtigt werden. Weitere Kriterien – sortiert nach ihrer Relevanz – sind Abrufschwankungen, Liefertreue, Lieferantenstandort, Bedarfsschwankungen, Trailerreichweite, Jahresbedarf, Bauteilgröße, Sourcing-Strategie, Bauteilgewicht und Einkaufspreis. Keines der Kriterien wird aktuell bereits so stark bei der Belieferungskonzeptauswahl berücksichtigt wie es sollte. Das bedeutet, es besteht Verbesserungspotenzial bei der Berücksichtigung der Kriterien im Auswahlprozess. Zusätzlich liefert die Studie Erkenntnisse bezüglich der Restriktionen, die die Auswahl der Belieferungskonzepte beeinträchtigen. Verfügbare Flächen der Inhouse-Logistik, wie Lager-, Bereitstell- oder Kommissionierflächen, haben häufig einen Einfluss auf das gewählte Belieferungskonzept [Maa-2017a, S. 31 ff.].

Zum flexiblen Einsatz von Belieferungskonzepten liefert die Studie folgende Erkenntnisse: Die Überprüfung der Belieferungskonzepte erfolgt bei den meisten Teilnehmern in unregelmäßigen Abständen oder nur bei Bedarf. Das gilt insbesondere für die Teilnehmer, bei denen die Belieferungskonzepte länger als drei Jahre beibehalten werden. Bei mehr als der Hälfte der Teilnehmer erfolgt die Auswahl der Bauteile, deren Belieferungskonzept es zu überprüfen gilt, erfahrungsbasiert. In 37 % der Fälle werden die zu überprüfenden Bauteile kennzahlenbasiert ausgewählt. Eine Überprüfung erfolgt bei den wenigsten in festen

Zeitintervallen: Bei 6 % findet die Überprüfung monatlich bis halbjährlich und bei 10 % jährlich statt. Eine Ursache hierfür sind die wenig verfügbaren Standards bei der Auswahl der Belieferungskonzepte. Bei Automobilherstellern führen neue Bauteilvarianten, die Veränderung der Bereitstellform am Montageband sowie ein Lieferantenwechsel am häufigsten zu einer Überplanung der Belieferungskonzepte. Die Lieferanten geben an, dass die Veränderung der Sourcing-Strategie, eine Änderung in den Verbrauchsschwankungen sowie eine schlechtere Lieferzuverlässigkeit am häufigsten die Überplanung der Belieferungskonzepte veranlassen. Die durchschnittliche Umstelldauer der Belieferungskonzepte ist bei den Automobilherstellern länger als bei den Lieferanten: Bei 51 % der Automobilhersteller dauert die Umstellung länger als drei Monate, bei 19 % sogar länger als sechs Monate. Bei 40 % der Lieferanten dauert eine Umstellung ein bis drei Monate und bei 45 % der Lieferanten dauert die Umstellung länger als drei Monate. Den größten Einfluss auf die Umstelldauer hat die Befähigung des Lieferanten das neue Belieferungskonzepte anwenden zu können. Damit verbunden ist die Festlegung vertraglicher Rahmenbedingungen mit dem Lieferanten, wodurch die Umstelldauer ebenfalls verlängert wird [Maa-2017a, S. 41 ff.].

In der Studie wird abschließend empfohlen, zukünftig zwei Fragestellungen nachzugehen: Wie kann die Steigerung der Belieferungsflexibilität in der Inbound-Logistik operativ erreicht werden und wie kann die Umstellung von Belieferungskonzepten schneller und kostengünstiger erfolgen? Wie kann entschieden werden, für welche Bauteile und unter welchen Umständen in Belieferungsflexibilität investiert werden sollte? Es sollen somit konkrete Maßnahmen entwickelt werden, damit die Umstellung von Belieferungskonzepten flexibler wird. Zudem sollen die Kosten dieser Maßnahmen dem resultierenden Nutzen aus der gewonnenen Flexibilität gegenübergestellt werden.

### **2.3.3 Zusammenfassung – Handlungsbedarf in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie**

An dieser Stelle werden die Erkenntnisse zum Handlungsbedarf resultierend aus dem Stand der Forschung und Technik zusammengefasst und der Betrachtungsfokus dieser Arbeit wird geschärft. Die Erkenntnisse sind in Abbildung 2-9 dargestellt.

Die Automobilindustrie mit ihren innovativen Produkten ist geprägt durch kurze Produktlebenszyklen, eine hohe Variantenvielfalt und sinkende Wertschöpfungstiefe. Die Inbound-Logistik ist einem steigenden Kostendruck und häufigen Veränderungen in Bezug auf das

Kapitel	Thema	Zusammenfassung
1	<b>Ausgangssituation und Problemstellung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Herausforderungen und Veränderungen in der Automobilindustrie</li> <li>– Inbound-Logistik muss flexibel auf Veränderungen reagieren können</li> </ul>
2.2.1	<b>Betrachtungsfokus von Flexibilität in der Literatur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Es gibt eine Vielzahl an Flexibilitätsarten</li> <li>– Für die physische Inbound-Logistik ist die Belieferungsflexibilität relevant</li> <li>– Hebel der Belieferungsflexibilität steigern diese</li> </ul>
2.2.2	<b>Forschungsansätze zu Flexibilität in der Logistik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fokus bei der Untersuchung von Flexibilität ist die Klassifizierung und Bewertung</li> <li>– Umsetzung und Steigerung von Flexibilität nicht betrachtet</li> <li>– Handlungsspielraum der Logistik bei Belieferungsflexibilität selten berücksichtigt</li> </ul>
2.3	<b>Handlungsbedarf in der Praxis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Eine Möglichkeit der Logistik zur Steigerung der Belieferungsflexibilität: Flexible Umstellung der Inbound-Logistikkonzepte</li> <li>– Umstellungen in der Automobilindustrie bislang wenig flexibel</li> </ul>

Abbildung 2-9: Zwischenfazit zum Stand der Forschung und Technik

Lieferantennetzwerk ausgesetzt, welches wiederum dem Einfluss der Globalisierung unterliegt. Flexibilität stellt eine Lösungsalternative dar, um in einem dynamischen und ungewissen Marktumfeld erfolgreich bestehen zu können. Die Studie von *Maas und Fottner* zeigt, dass in der Automobilindustrie insbesondere die Inbound-Logistik Steigerungspotenzial hinsichtlich Flexibilität aufweist [Maa-2017a, S. 51], wodurch der Betrachtungsfokus dieser Arbeit bestätigt wird. Flexibilitätsarten der Inbound-Logistik sind die Beschaffungsflexibilität und die Belieferungsflexibilität, welche der Logistikflexibilität zuzuordnen sind. Die Beschaffungsflexibilität beschäftigt sich mit der Zusammenarbeit zwischen OEM und Lieferanten. Die Belieferungsflexibilität umfasst den physischen Materialfluss vom Lieferanten zum OEM. Häufig werden diese beiden Flexibilitätsarten jedoch miteinander vermischt. Die Belieferungsflexibilität wird in der Literatur selten betrachtet. Ebenso wenig Beachtung finden die Hebel zur Steigerung der Belieferungsflexibilität sowie deren Umsetzung und Implementierung in der Praxis. Ein Hebel der Belieferungsflexibilität ist die Umstellung von Inbound-Logistikkonzepten. Die Praxisstudie in der Automobilindustrie hat gezeigt, dass Belieferungskonzepte heute über einen langen Zeitraum beibehalten und selten überprüft und umgestellt werden. Durch die seltene Überprüfung kann nicht schnell auf Veränderungen der Einflussfaktoren reagiert werden. Aufgrund der Veränderungen sind die verwendeten Logistikkonzepte ggf. nicht kosteneffizient. Die lange Umstelldauer steht im Widerspruch zur Flexibilitätsdefinition, die eine schnelle und aufwandsarme Anpassung fordert. Entsprechend besteht Handlungsbedarf bezüglich der Implementierung und Umsetzung

von Belieferungsflexibilität. In dieser Arbeit wird daher die flexible Umstellung von Inbound-Logistikkonzepten untersucht. Es ergeben sich folgende praxisrelevante Fragestellungen:

- Für welche Bauteile sollte die Belieferungsflexibilität gesteigert werden?
- Bei welchen Veränderungen sollten welche Logistikkonzepte umgestellt werden?
- Wie wird das richtige Logistikkonzept ausgewählt?
- Durch welche Maßnahmen kann die Umstellung von Logistikkonzepten flexibler gestaltet werden und welche Kosten werden dadurch verursacht?
- Wie kann die Entscheidung zur Steigerung der Belieferungsflexibilität, d. h. zur Umsetzung der Maßnahmen, getroffen werden?

Für die Beantwortung dieser Fragen wird zunächst geprüft, welche Methoden die Literatur bereitstellt. Im Folgenden werden daher bestehende Planungsmethoden vorgestellt.

## 2.4 Planungsmethoden zur Konfiguration einer flexiblen Inbound-Logistik

In diesem Kapitel werden Methoden zur Planung der Inbound-Logistik vorgestellt. Eine Übersicht über die Inhalte dieses Kapitels bietet Abbildung 2-10. Zunächst werden bestehende Ansätze der Materialklassifikation beschrieben (Kapitel 2.4.1). Ziel der Materialklassifikation ist die Gruppierung von Materialien entsprechend ihrer Eigenschaften. Danach werden Methoden erläutert, mit deren Hilfe die Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten erfolgt (Kapitel 2.4.2). Abschließend werden Verfahren beschrieben, mit deren Hilfe wirtschaftliche Entscheidungen getroffen werden können (Kapitel 2.4.3). In jedem Kapitel wird der Forschungsbedarf in Bezug auf die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet, so dass drei Forschungsfragen resultieren.

Kapitel	Thema	Fragestellung
2.4.1	Ansätze der Materialklassifikation	Welche Methoden existieren für die Klassifikation von Bauteilen und Materialien?
2.4.2	Auswahlmethoden von Logistikkonzepten	Mittels welcher Methoden werden Belieferungs- und Transportkonzepte ausgewählt?
2.4.3	Investitionsentscheidungen bei Flexibilität	Wie kann entschieden werden, ob eine Investition in Flexibilität erfolgen sollte?

Abbildung 2-10: Struktur des Kapitels über Planungsmethoden zur Konfiguration einer flexiblen Inbound-Logistik

## 2.4.1 Ansätze der Materialklassifikation

Verschiedene Materialien können einen unterschiedlichen Grad an Belieferungsflexibilität benötigen [Men-2007, S. 1117]. Beispielsweise werden Normteile, wie z. B. Schrauben, bei vorliegender Nachfrage immer benötigt, wohingegen variantenspezifische Bauteile, wie z. B. in bestimmten Farben lackierte Türen, von kundenindividuellen Nachfragen abhängen. Entsprechend sollte nur dann in Flexibilität investiert werden, wenn diese auch benötigt wird [Küb-2016, S. 559]. In diesem Kapitel werden daher verschiedene Methoden, um Materialien zu klassifizieren, d. h. um Bauteile mit ähnlichen Eigenschaften zu gruppieren, herausgearbeitet. Dazu werden zunächst klassische Verfahren der Materialklassifikation erläutert und anschließend multivariate statistische Methoden beschrieben. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer kurzen Diskussion der dargestellten Materialklassifikationsansätze, aus welcher die erste Forschungsfrage für diese Arbeit abgeleitet wird.

### 2.4.1.1 Typische Klassifizierungsansätze in der Materiallogistik

Zu den klassischen Verfahren der Materialklassifikation zählen die ABC-Analyse und die XYZ-Analyse [Ban-1999, S. 914]. Weiterhin lassen sich diese beiden Methoden kombinieren und um zusätzliche Kriterien erweitern.

#### **ABC-Analyse**

Die ABC-Analyse stellt eine Methode dar, um Materialien nach ihrer Werthäufigkeit zu sortieren. Dazu wird die Werthäufigkeitsverteilung aller Materialien bestimmt. Diese Werthäufigkeitsverteilung sagt aus, wie groß der Anteil einzelner Materialien am Gesamtwert aller in einem bestimmten Zeitraum verbrauchten Materialien ist. Es wird von ABC-Analyse gesprochen, wenn die vorliegende Werthäufigkeitsverteilung in die drei Gruppen A-, B- und C-Teile unterteilt wird [Tem-2008, S. 8 f.]. Grundsätzlich lässt sich diese Methode in vielen Bereichen der Materialwirtschaft anwenden, um unwesentliche Materialien von wesentlichen Materialien zu trennen [Wan-2014, S. 31]. In der Materiallogistik erfolgt die ABC-Klassifizierung häufig nach dem wertmäßigen Verbrauch, um daraus Empfehlungen für die Disposition und Bedarfsermittlung abzuleiten [Tem-2008, S. 8 ff.]. Bei der Klassifizierung von Materialien wurde festgestellt, dass bereits ein geringer Anteil von Materialien oft den größten Anteil des Wertumfangs (ca. 80 %) ausmacht [Wan-2014, S. 32 ff.]. Die Einteilung in die Gruppen A, B und C erfolgt daher häufig nach der 80%-15%-5%-Regel. Die Interpretation lautet dann wie folgt: A-Teile machen 80 % des wertmäßigen Verbrauchs aus, B-Teile besitzen 15 % am wertmäßigen Verbrauch und C-Teile weisen einen fünfprozentigen Anteil auf [Fot-2017, S. 3-10].

### **XYZ-Analyse**

Bei der XYZ-Analyse (oder RSU-Analyse) erfolgt die Klassifizierung der Materialien nach ihrem Bedarfsverlauf oder ihrer Verbrauchsstruktur. Es werden drei Teile-Arten unterschieden: X-Teile (oder R-Teile) haben einen regelmäßigen Bedarf. Y-Teile (oder S Teile) haben einen veränderlichen, trendförmigen oder saisonalen Bedarf. Z-Teile (oder U-Teile) besitzen einen sehr unregelmäßigen und sporadischen Bedarf [Tem-2008, S. 27]. Aufgrund der Bedarfs- oder Verbrauchsstruktur können Rückschlüsse auf die Vorhersagegenauigkeit getroffen werden: Bei X-Teilen ist die Vorhersagegenauigkeit hoch, bei Y-Teilen mittel und bei Z-Teilen niedrig [Wan-2014, S. 43]. Grundlage für die XYZ-Klassifizierung bildet der Variationskoeffizient des Materialbedarfs für eine bestimmte Betrachtungsperiode. Der Variationskoeffizient misst die relative Streuung einer Bedarfsreihe, indem die Standardabweichung durch den Mittelwert dividiert wird. Je nach Höhe des Variationskoeffizienten erfolgt die Einteilung in die drei Teilearten, wobei es keine festen Vorgaben für die Grenzen bei der Einteilung gibt. In der Literatur werden jedoch häufig die Grenzen 20 % und 50 % verwendet. Das bedeutet, dass X-Teile und Z-Teilen einen Variationskoeffizienten kleiner als 20 % bzw. größer als 50 % besitzen und dass der Variationskoeffizient bei Y-Teilen zwischen 20 % und 50 % liegt [Con-2012, S. 728]. *Conze et al.* haben die XYZ-Analyse weiterentwickelt, um bei der Teileklassifizierung die Schwankungen im Produktionsprogramm in der Nutzfahrzeugindustrie berücksichtigen zu können. Dazu wurden die Teilebedarfe normiert, um den Effekt der Produktionsprogrammschwankungen zu eliminieren. Im Ergebnis werden bei der Klassifizierung nur die Schwankungen berücksichtigt, welche durch die Zulieferteile selbst induziert werden [Con-2012, S. 729 f.].

### **Kombinierte ABC-XYZ-Analysen und Erweiterungen**

*Flores und Whybark* schlagen eine multikriterielle Analyse vor, indem zusätzlich zur ABC-Analyse weitere Kriterien (z. B. Kritikalität eines Bauteils, Vorlaufzeit eines Bauteils oder Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil obsolet wird) betrachtet werden. Die Betrachtung erfolgt mittels einer Matrix-Darstellung [Flo-1986, S. 45 f.]. Nach diesem Ansatz lassen sich auch die ABC- und die XYZ-Analyse kombinieren. Dabei entsteht eine Matrix mit neun unterschiedlichen Klassen. Durch die Betrachtung der beiden Eigenschaften Materialwertigkeit und Bedarfsverlauf liegt eine zweidimensionale Materialklassifizierung vor. Mittels Hilfe der ABC-XYZ-Analyse werden zweckmäßige Belieferungskonzepte festgelegt [Tem-2008, S. 28; Wil-2001, S. 194].

Andere Autoren erweitern die ABC-XYZ-Analyse um eine dritte Dimension. Beispielsweise können Bauteile zusätzlich nach ihrer Größe in die Klassen Groß (G), Mittel (M) und



Klein (K) unterteilt werden. Diese Analyse wird ABC-XYZ-GMK-Analyse genannt, und dient ebenfalls zur Bestimmung der Belieferungskonzepte. Durch die dritte Dimension entsteht ein Würfel mit 27 möglichen Materialgruppen. Eine veranschaulichende Darstellung des Würfels zeigt Abbildung 2-11. Die Berücksichtigung einer dritten Dimension soll bei der Wahl des Belieferungskonzeptes noch bessere Ergebnisse liefern [Ihm-2006, S. 296; Wan-2014, S. 47 f.]. Eine andere Möglichkeit besteht z. B. darin, die drei Kriterien Anzahl an Varianten, Teilwert und Logistikkomplexität (gemessen an der Teilegröße und der Fehlerquote des Teils) für die Belieferungskonzeptauswahl zu betrachten [Wag-2011, S. 5718]. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Kriterien hängt von der jeweiligen Situation ab. Bei einer Betrachtung von mehr als drei Kriterien kann die Anzahl an möglichen Materialgruppen unüberschaubar groß werden. Daher sind in diesem Fall andere analytische Ansätze erforderlich [Flo-1986, S. 45 f.].

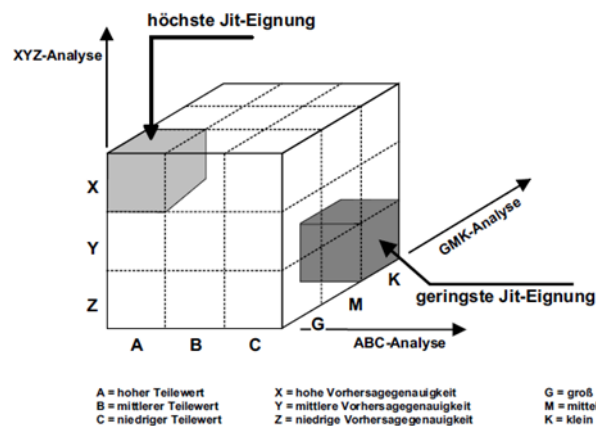


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der ABC-XYZ-GMK-Analyse [Ihm-2006, S. 296]

### 2.4.1.2 Klassifikation von multivariaten Datensätzen

Aufgrund der isolierten Betrachtung von Kriterien bei der ABC- und XYZ-Analyse können diese Methoden unzureichend sein. Insbesondere für die Ableitung der Belieferungskonzepte existieren neben dem Verbrauchswert und dem Verbrauchsverlauf viele weitere Kriterien [Ban-1999, S. 916]. Lösungsansätze zur gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer Kriterien stellen multivariate Analysemethoden dar [Ban-1999, S. 923].

### Clusteranalyseverfahren

Das Ziel von Clusteranalysen ist es, Untersuchungsobjekte so zu gruppieren, dass die einzelnen Gruppen (oder Cluster) möglichst homogen hinsichtlich bestimmter Merkmale sind. Weiterhin sollten die Unterschiede zwischen den verschiedenen Clustern möglichst groß sein, d. h. maximale Heterogenität zwischen den Gruppen [Bac-2016, S. 455; Sch-2010a,

S. 8]. Bei einer Clusteranalyse werden Proximitätsmaße zur Clusterbildung verwendet. Ein *Proximitätsmaß* ist eine Maßzahl für die Ähnlichkeit von zwei Objekten. Es werden Ähnlichkeitsmaße und Unähnlichkeitsmaße (oder Distanzmaße) unterschieden. Zwei Objekte sind sich umso ähnlicher, je größer der Wert des Ähnlichkeitsmaßes ist. Entsprechend gilt für einen hohen Wert des Distanzmaßes, dass sich Objekte sehr unähnlich sind. Ist das Distanzmaß gleich Null, sind die Objekte identisch [Eck-2016, S. 429; Bac-2016, S. 458]. Es existiert eine Vielzahl an Proximitätsmaßen (vgl. z. B. [Bac-2016, S. 459]). Die Wahl des richtigen Proximitätsmaßes hängt vom *Skalenniveau*<sup>1</sup> der Objekte und des verwendeten Clusteranalyseverfahrens ab [Cle-2015, S. 195; Bac-2016, S. 472; Sch-2010a, S. 28 f.].

Clusteranalysen gehören zu den explorativen Datenanalysen, d. h. sie führen eine erste Segmentierung von komplexen Datensätzen durch. Sie liefern somit keine Aussage über die Signifikanz der Unterschiede zwischen den ermittelten Clustern, sondern sollen lediglich Beziehungszusammenhänge und Strukturen aufdecken [Cle-2015, S. 190; Bac-2016, S. 15]. Die Ergebnisse einer Clusteranalyse können beispielsweise mit Hilfe der Diskriminanzanalyse überprüft werden [Bac-2016, S. 21]. Es gibt eine Vielzahl an Clusteranalyseverfahren. Einen Überblick über die verschiedenen Arten liefert Abbildung 2-12.

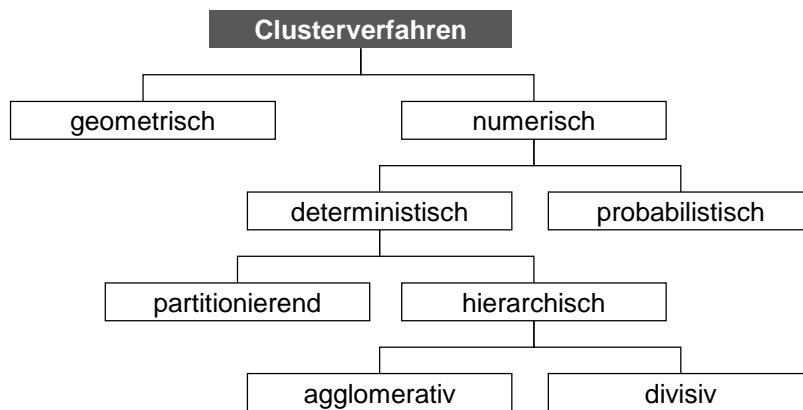


Abbildung 2-12: Übersicht über Clusteranalyseverfahren (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Eck-2016, S. 429])

Clusteranalyseverfahren werden grundsätzlich in geometrische und numerische Verfahren unterteilt. Bei geometrischen Verfahren wird eine Menge von Objekten mittels geometrischer Figuren und/oder grafischer Darstellungsformen klassifiziert. Bei numerischen Verfahren erfolgt die Klassifizierung anhand berechneter Distanzen zwischen den Objekten.

<sup>1</sup> Das Skalenniveau gibt an, wie gut die Ausprägungen eines Merkmals gemessen werden können. Es werden die vier Skalen Nominalskala, Ordinalskala, Intervallskala und Verhältnisskala unterschieden. Wenn Daten mindestens intervallskaliert sind, wird auch von einem *metrischen* Skalenniveau gesprochen [Bac-2016, S. 10 ff.].

Numerische Verfahren unterscheiden sich wiederum in deterministische und probabilistische Verfahren. Bei Ersteren erfolgt eine eindeutige Zuordnung (d. h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 1) eines jeden Objektes zu einem oder mehreren Clustern. Bei probabilistischen Verfahren hingegen werden Klassifizierungsobjekte mit Teilwahrscheinlichkeiten mehreren Clustern zugeordnet (z. B. liegt ein Objekt in Cluster A und B mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,6 bzw. 0,4) [Eck-2016, S. 428 ff.; Bac-2010, S. 18 ff.].

Deterministische Clusteranalyseverfahren werden unterteilt in hierarchische und partitionierende Verfahren. Bei partitionierenden Verfahren muss eine gewünschte Clusteranzahl vorab angegeben werden. Die Zuordnung der Klassifizierungsobjekte zu den Clustern folgt einer Minimierungs- oder Maximierungslogik bezogen auf ein bestimmtes Kriterium. Das bekannteste partitionierende Verfahren ist das k-means-Verfahren, welches die Varianz innerhalb der Cluster minimiert [Eck-2016, S. 441 ff.; Bac-2010, S. 19 f.]. Bei hierarchischen Clusteranalyseverfahren erfolgt eine schrittweise Vorgehensweise zur Ermittlung der Cluster. Sie können in agglomerative und divisive Verfahren unterschieden werden. Bei agglomerativen Clusteranalyseverfahren wird von der maximalen Anzahl an Clustern (entspricht der Anzahl an Objekten) ausgegangen. Die Cluster werden einer bestimmten Logik folgend (z. B. kleinste Distanz zwischen zwei Objekten zweier Cluster) nach und nach zu neuen Clustern zusammengefasst. Das divisive Verfahren geht in umgekehrter Reihenfolge vor: Ausgehend von einem großen Cluster wird dieses schrittweise in immer mehr Cluster zerlegt. Bei fehlendem Wissen bezüglich der Anzahl der Cluster wird in der Praxis meist das hierarchisch-agglomerative Verfahren eingesetzt [Eck-2016, S. 435; Bac-2010, S. 19 f.].

### **Support Vector Machine-Verfahren**

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifikation von Datensätzen bieten Support Vector Machine (SVM)-Verfahren. Bei Support Vector Machines (SVMs) handelt es sich um lernfähige Systeme, da bei ihnen eine Klassifizierung der Daten auf Basis von Trainingsdaten stattfindet [Hop-2014, S. 5]. Die fundamentale Idee von SVM ist, dass das Datenset in einem Vektorraum dargestellt wird, sodass Methoden der linearen Algebra und Geometrie angewendet werden können [Cri-2002, S. 34]. Das Ziel der Support Vector Klassifizierung ist die Identifikation einer Entscheidungsgrenze. Diese Entscheidungsgrenze wird auch separierende Hyperebene (englisch: *separating hyperplane*) genannt. Im zweidimensionalen Raum entspricht die Hyperebene einer Geraden. Daten, die auf der einen Seite der Hyperebene liegen, gehören in eine Gruppe und Daten, die auf der anderen Seite liegen, in eine zweite Gruppe. Die sogenannten Hilfsvektoren (englisch: *support vectors*) liegen immer direkt am Rand einer Klasse von Untersuchungsdaten. Die Hilfsvektoren werden

dafür genutzt die Hyperebene, welche die Klassen der Untersuchungsdaten separiert, zu identifizieren. Die Hilfsvektoren werden dabei so gewählt, dass die Spanne zwischen den einzelnen Hilfsvektoren maximal wird [Wil-2011, S. 293 f.; Ber-2008, S. 304 f.].

*Hoppenheit und Günthner* sowie *Hoppenheit* verwenden SVM, um Bestandsmaterial eines Zulieferers der Nutzfahrzeugindustrie hinsichtlich der Verbrauchsmenge und Verbrauchsfrequenz zu klassifizieren. Die Materialien sollen in die vier Klassen Schnelldreher, Mitteldreher, Langsamdreher und (Quasi-)Nichtdreher eingeteilt werden. Diese Methode wurde ausgewählt, da sie drei wesentliche Vorteile gegenüber anderen Methoden bietet: Mit Hilfe von SVM wird nicht nur der Materialdatensatz klassifiziert, sondern es werden konkrete Klassengrenzen ausgewiesen. Eine SVM ist um eine beliebige Anzahl an Materialeigenschaften erweiterbar. Erfahrungs- und Expertenwissen und bestehende Klassifizierungslogiken finden Berücksichtigung, da Trainingsdaten für das SVM-Verfahren benötigt werden [Hop-2014, S. 5 f.; Hop-2017, S. 127 ff.].

#### **2.4.1.3 Diskussion der Materialklassifikationsansätze**

Bestehende Ansätze zur Materialklassifikation fokussieren häufig nur eine, zwei oder maximal drei Bauteileigenschaften simultan. Es wurde jedoch erkannt, dass in manchen Fällen eine mehrdimensionale Betrachtung notwendig und sinnvoll ist – wie z. B. bei der Auswahl von Belieferungskonzepten. Die Praxisstudie von *Maas und Fottner* zeigt, dass für diese Auswahl mindestens sechs Auswahlkriterien stark zu berücksichtigen sind [Maa-2017a, S. 19]. Eine mehrdimensionale Betrachtung kann mit Hilfe multivariater Analysemethoden von Datensätzen erfolgen (vgl. z. B. die Anwendung von SVM-Verfahren zur Identifikation von Langsamdrehern [Hop-2017]). SVMs ermöglichen zudem die Identifikation von Grenzwerten zwischen den einzelnen Klassen. Für die Auswahl von Belieferungskonzepten wurden multivariate Analysemethoden bislang nicht angewendet. Entsprechend ist unklar, ab welcher Anzahl an Varianten beispielsweise eine JIS-Belieferung zu wählen ist (vgl. [Wag-2011, S. 5718]). Es erscheint jedoch sinnvoll solche Grenzwerte zu kennen, um bei auftretenden Veränderungen die Belieferung eines Bauteils proaktiv anpassen zu können.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Zielerreichung dieser Arbeit eine analytisch fundierte Methode zu entwickeln ist, mit deren Hilfe zum einen Bauteile identifiziert werden können, bei denen eine flexible Belieferung sinnvoll sein kann und zum anderen Grenzwerte aufzuzeigen, um auf Veränderungen der Einflussfaktoren proaktiv eingehen zu können. Keine der aufgeführten Methoden wird bislang eingesetzt, um Bauteile mit er-

höchtem Umstellbedarf der Logistikkonzepte zu identifizieren. Somit ergibt sich die erste Forschungsfrage dieser Arbeit:

### **Erste Forschungsfrage**

*Wie können die Bauteile analytisch identifiziert werden, bei denen Umstellungen der Inbound-Logistikkonzepte aufgrund von Veränderungen der Einflussfaktoren zu erwarten sind?*

## **2.4.2 Methoden zur Auswahl von Inbound-Logistikkonzepten**

Für die Auswahl geeigneter Belieferungskonzepte sind sowohl zahlreiche quantitative als auch qualitative Aspekte zu berücksichtigen [Ban-1999, S. 923]. In diesem Kapitel werden daher die am weitesten verbreiteten Methoden zur Auswahl der Inbound-Logistikkonzepte vorgestellt. Dazu wird zwischen qualitativen und quantitative Auswahlmethoden unterschieden. Das Kapitel endet mit der Herleitung der zweiten Forschungsfrage.

### **2.4.2.1 Qualitative Auswahlverfahren**

Zu qualitativen Auswahlverfahren gehören Methoden, die eine Auswahl von Logistikkonzepten zulassen, ohne dass Berechnungen erforderlich sind. Die qualitativen Auswahlverfahren werden in die Auswahl von Belieferungs- sowie Transportkonzepten unterteilt.

#### **Qualitative Auswahl der Belieferungskonzepte**

Für die qualitative Auswahl von Belieferungskonzepten werden die klassischen Ansätze der Materialklassifikation in Kombination mit zusätzlichen Kriterien verwendet [Wil-2001, S. 198]. Tabelle 2-6 fasst die in der Literatur häufig genannten Kriterien zur Auswahl der Belieferungskonzepte zusammen. Die unterschiedlichen Auswahlkriterien lassen sich den Kategorien Bauteil, Inbound oder Inhouse zuordnen. In der Literatur ist hauptsächlich beschrieben, unter welcher Voraussetzung eine JIT- und JIS-Belieferung jeweils möglich oder sinnvoll ist. Wenn Bauteile nicht für eine JIT- oder JIS-Belieferung geeignet sind, wird eine lagerhaltige Belieferung als Belieferungskonzept angenommen. Die betrachteten Kriterien (z. B. Bauteilpreis, Varianten, etc.) sind zwar quantitativ messbar, jedoch basiert die Belieferungskonzeptauswahl lediglich auf einer qualitativen Abschätzung der Kriterien (z. B. „Bauteile mit vielen Varianten sollten in JIS geliefert werden“).

Die bauteilspezifischen Kriterien werden am häufigsten zur Auswahl der Belieferungskon-

Tabelle 2-6: Kriterien für die qualitative Belieferungskonzeptauswahl

	Kriterium	Lagerhaltig	JIT / JIS	Quellen
<b>Bauteil</b>	Bauteilpreis	Niedrig	Hoch	[Ihm-2006, S. 296; Boy-2015, S. 110; Wag-2011, S. 5717; VDA 5010, S. 38; Thu-2007, S. I.5; Klu-2010, S. 301]
	Bauteilgewicht	Leicht	Schwer	[Klu-2010, S. 289; Con-2014, S. 2]
	Bauteilgröße/ Bauteilvolumen	Klein	Groß	[Klu-2010, S. 301; Ihm-2006, S. 296; VDA 5010, S. 38]
	Varianten	Wenige	Wenige / Viele	[Klu-2010, S. 171; Wag-2011, S. 5713; Thu-2007, S. I.5]
	Jahresbedarf	Gering	Hoch	[VDA 5010, S. 38; Klu-2010, S. 301; Thu-2007, S. I.5]
	Vorhersagegenauigkeit des Bedarfs	Schlecht	Gut	[Ihm-2006, S. 296; Thu-2007, S. I.5; VDA 5010, S. 38]
	Verbrauchs-/ Bedarfsstruktur	Unregelmäßig	Regelmäßig	[Klu-2010, S. 301; Wil-2001, S. 209; Thu-2007, S. I.5; Ihm-2006, S. 296]
<b>Inbound</b>	Sourcing-Strategie	Multiple	Single	[Klu-2010, S. 301; Wan-2014, S. 188; Wil-2001, S. 156]
	Transportweg/ Entfernung zum Lieferanten	Lang	Kurz	[Swa-2007, S. 331; Wan-2014, S. 188; Thu-2007, S. I.5; VDA 5010, S. 5]
	Perlenkettenstabilität	–	Hoch	[Klu-2010, S. 304; Mei-2013, S. 299; VDA 5010, S. 5]
	Qualitätssicherung	–	Hoch	[Wil-2001, S. 156; Wan-2014, S. 189; Mei-2013, S. 301]
	Lieferzuverlässigkeit/ Lieferantenfähigkeit	–	Hoch	[Wil-2001, S. 156; Wan-2014, S. 189; Mei-2013, S. 301]
<b>Inhouse</b>	Lagerflächen	Verfügbar	Begrenzt	[Wil-2007, S. 105; Klu-2010, S. 299]
	Bereitstellflächen	Verfügbar	Begrenzt	[Wil-2007, S. 105; Klu-2010, S. 299; VDA 5010, S. 37]
	Trailer-Yard/ Dock-Plätze	Begrenzt	Verfügbar	[Wil-2007, S. 105; Klu-2010, S. 299]

zepte herangezogen. Eine verbreitete Auswahlmethode stellt die ABC-XYZ-GMK-Analyse (vgl. Abbildung 2-11 in Kapitel 2.4.1.1) dar [Ihm-2006, S. 296; Wan-2014, S. 47]. Bauteile sollten beispielsweise in JIT geliefert werden, wenn es sich um große Bauteile handelt, deren Bedarf gut vorhersehbar sowie ausreichend hoch ist und eine regelmäßige Struktur aufweist [Ihm-2006, S. 296; VDA 5010, S. 38]. Hintergrund ist, dass große und teure Bauteile besonders viel Fläche im Lager einnehmen und eine große Kapitalbindung verursachen. Um die Kosten gering zu halten, wird für diese Teile eine lagerlose Belieferung empfohlen [Klu-2010, S. 301]. Eine JIS-Belieferung ist nur sinnvoll, wenn das Bauteil zusätzlich zu den genannten JIT-Bauteileigenschaften viele Variantenausprägungen besitzt.

Durch die JIS-Belieferung können die Handlingskosten für die Sequenzierung ausgelagert und Bereitstellflächen an der Montagelinie eingespart werden [Thu-2007, S. I. 5; Klu-2010, S. 102].

Neben den bauteilspezifischen Kriterien sind bestimmte Inbound-Spezifika (wie z. B. Transportweg, Sourcing-Strategie) zu berücksichtigen. JIT-/JIS-Bauteilen sollten idealerweise von nur einem Lieferanten (d. h. Single Sourcing) bezogen werden [Klu-2010, S. 301]. Der Transportweg bezieht sich indirekt auf den verfügbaren Zeithaushalt (d. h. die Zeitspanne zwischen Abruf und frühestem Verbrauchszeitpunkt) für die Anlieferung. Für eine JIT-/JIS-Belieferung sollte der Zeithaushalt ausreichend groß sein, da die sequenzgenauen Lieferabrufe erst kurz vor dem Verbrauchszeitpunkt verschickt werden [VDI 2512, S. 9]. Lieferantenspezifische Kriterien sind die Qualitätssicherung und die Lieferzuverlässigkeit [Thu-2007, S. I.5; Fan-1993, S. 31 f.]. Qualität spielt insbesondere bei JIS-Belieferungen eine wichtige Rolle, da defekte Bauteile aufgrund der Heterogenität der Bauteile nicht ohne weiteres ersetzt werden können [Thu-2007, S. I.5]. Um hohe Ausfallraten zu vermeiden und aufgrund des häufig geringen Zeithaushalts für eine JIT-/JIS-Belieferung sollte die Qualitätssicherung beim Lieferanten statt am Einsatzort erfolgen [VDI 2512, S. 9].

Bei Betrachtung der Inhouse-Spezifika spielen die werksinternen Flächen eine wesentliche Rolle. Die verschiedenen Belieferungskonzepte erfordern unterschiedlich viel Platz, z. B. auf dem Trailer-Yard, im Lager oder an den Bereitstellflächen der Montagelinie. Insbesondere bei Platzmangel in den Lagern und in der Bereitstellzone wird häufig auf eine lagerlose JIS- oder JIT-Belieferung zurückgegriffen. Gibt es am Produktionsstandort eines OEM jedoch nur noch wenige Trailer-Yard- oder Dock-Plätze, dann wird auf eine lagerhaltige Belieferung ausgewichen [Klu-2010, S. 299; Wil-2007, S. 105].

Ergänzend zu den vorgestellten Kriterien wird in der *VDA-Empfehlung 5010* ein dreistufiges Vorgehen zur Festlegung der Belieferungskonzepte vorgeschlagen. Im ersten Schritt erfolgt die Zuordnung auf Basis übergeordneter Rahmenbedingungen (z. B. globale Beschaffung). Im zweiten Schritt erfolgt die Zuordnung anhand sogenannter Standardprüfkriterien, welche den bauteilspezifischen Kriterien aus Tabelle 2-6 entsprechen. Mit dem zweiten Schritt wird der Großteil der Teileumfänge zugeordnet. Im dritten und letzten Schritt werden die fehlenden Teile mit Hilfe von Zusatzkriterien (z. B. interne Flächenbedarfe) einem Belieferungskonzept zugeordnet. Es wird betont, dass die Zuordnung der Belieferungskonzepte häufig nicht trennscharf ist, sodass die finale Entscheidung durch den jeweiligen Planer zu treffen ist [VDA 5010, S. 37 f.]. Zusätzlich schlägt *Wildemann* die Verwendung von Fragebögen und ausführlichen Interviews vor, um die Festlegung der Belieferung von Bauteilen zu bestimmen [Wil-2001, S. 198 ff.].

### Qualitative Auswahl der Transportkonzepte

Für die Auswahl der Transportkonzepte schlägt die *VDA-Empfehlung 5010* einen Entscheidungsbaum vor, welcher in Abbildung 2-13 dargestellt ist. Die Zuordnungskriterien bei den Transportkonzepten sind Lieferhäufigkeit, Ladungsstruktur, Lieferantenstandort, Stabilität des Transportvolumens und Kombinierbarkeit der Volumina. Direkttransporte werden demnach bei regelmäßiger Lieferhäufigkeit und vollständiger Auslastung der Transporte durchgeführt. Hub-and-Spoke und GS sollten insbesondere bei unregelmäßiger Lieferhäufigkeit verwendet werden. Milkruns bieten sich an, wenn die Lieferhäufigkeit regelmäßig ist, aber nur Teilladungen oder Stückgüter transportiert werden. Zusätzlich müssen die Standorte der betroffenen Lieferanten zu einer sinnvollen Route zusammengeführt werden können und es muss eine ausreichende Stabilität des Transportvolumens und eine Kombinierbarkeit der Volumina vorliegen [VDA 5010, S. 41].

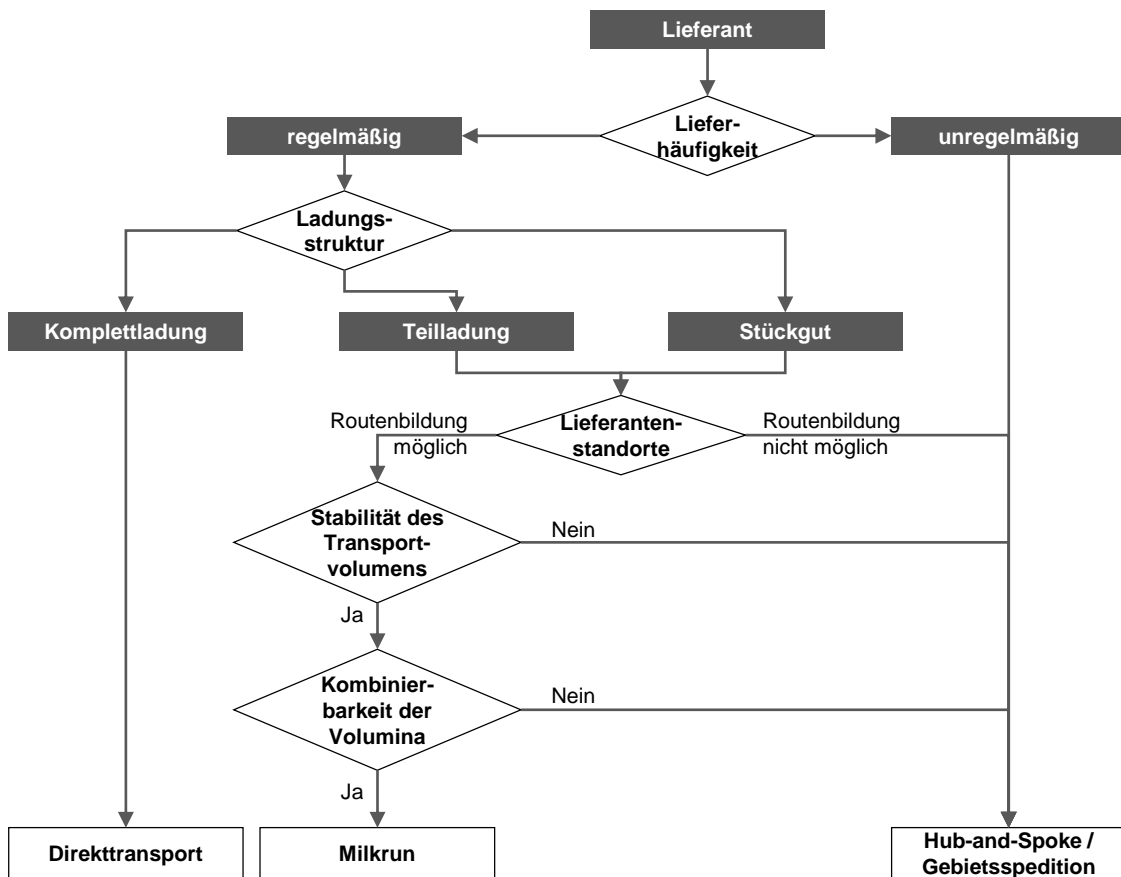


Abbildung 2-13: Entscheidungsbaum für die Auswahl des Transportkonzeptes (eigene Darstellung, in Anlehnung an [VDA 5010, S. 41])

#### 2.4.2.2 Quantitative Auswahlverfahren

Unter quantitativen Ansätzen werden Methoden verstanden, welche die Auswahl der Logistikkonzepte auf Basis der Optimierung ökonomischer Zielgrößen (z. B. Lager- und Bestellkosten) treffen [Ban-1999, S. 918]. Im Folgenden werden Forschungsansätze beschrie-



ben, welche die Auswahl von Belieferungs-, Bereitstellungs- oder Transportkonzepten auf Logistikkostenbasis durchführen. Da nur wenige quantitative Auswahlmethoden von Belieferungskonzepten existieren, werden Bereitstellkonzepte im Sinne des Line-Back-Prinzips gemeinsam mit den Belieferungskonzepten betrachtet.

### **Quantitative Ansätze zur Auswahl von Belieferungs- und Bereitstellkonzepten**

In Tabelle 2-7 ist eine Übersicht verschiedener Arbeiten zur quantitativen Auswahl von Belieferungs- und Bereitstellkonzepten dargestellt. Die Ansätze beziehen sich vor allem auf die Auswahl der Bereitstellkonzepte. Für die quantitative Auswahl von Belieferungskonzepten wurde lediglich die Arbeit von *Wagner und Silveira-Camargos* identifiziert. *Wagner und Silveira-Camargos* entwickeln ein kostenbasiertes Modell, um zu bewerten, unter welchen Umständen der Wechsel von einer JIT- auf eine JIS-Belieferung vorteilhaft ist. Dazu erfolgt zunächst die Identifikation der potenziellen JIS-Bauteile anhand der Eigenschaften Variantenvielfalt, Bauteilwert und Logistikkomplexität (umfasst Bauteilgröße und Fehlteilquote). Anschließend wird mittels eines prozesskostenbasierten Ansatzes bewertet, ob eine JIT- oder eine JIS-Belieferung kostengünstiger ist. Dazu wird eine Kostenfunktion der gesamten Logistikkosten aufgestellt, die die Kostenarten entlang des Materialflusses beinhaltet (z. B. Handlingskosten, Lagerhaltungskosten, etc.). Die Kostenfunktion variiert je nach Logistikkonzept. Beispielsweise fallen für die JIS-Belieferung Systemkosten in Form von initialen Investitionen an, sodass das Produktionssystem für eine JIS-Belieferung befähigt wird. Bei einer JIT-Belieferung entfallen diese Systemkosten, da diese Belieferungsform annahmegemäß bereits angewendet wird. Insgesamt liefert die Arbeit von *Wagner und Silveira-Camargos* einen wertvollen Beitrag für die Praxis, um eine kostenbasierte Entscheidung zwischen einer Belieferung in JIT und JIS zu treffen [Wag-2011].

Bei den anderen Beiträgen liegt der Fokus auf der Inhouse-Logistik und der Materialbereitstellung. Für einen ausführlichen Literaturüberblick über Bereitstellkonzepte sei an dieser Stelle jedoch auf die Arbeit von *Kilic und Durmusoglu* verwiesen [Kil-2015]. Die verwendeten Methoden sind vielfältig – von empirischen Studien und Fallbeispielen über konzeptionelle Modelle bis hin zu Entscheidungsmodellen und Optimierungsansätzen. Die Arbeit von *Limère et al.* liefert ein Optimierungsmodell, um zwischen einer Set-Bereitstellung oder einer sortenreinen Bereitstellung das kostenoptimale Konzept auswählen zu können. Beim Vergleich der beiden Konzepte werden die jeweiligen Vor- und Nachteile deutlich: Bei der Set-Bildung kann der Lagerbestand der entsprechenden Bauteile reduziert werden. Zusätzlich wird die Zeit, die der Werker benötigt, um das richtige Bauteil an der Montagelinie zu finden, verkürzt. Ein qualitativer Vorteil sind die verbesserten ergonomischen Konditionen,

Tabelle 2-7: Ausgewählte Beiträge zur quantitativen Auswahl von Bereitstell- und Belieferungskonzepten

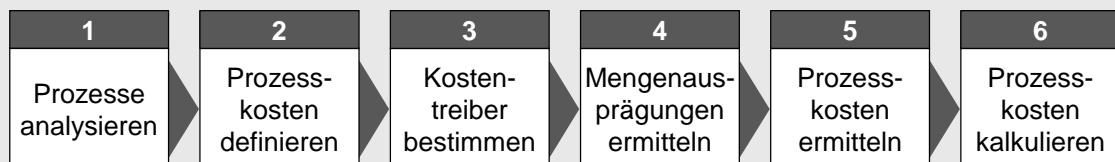
Quelle	JIS	JIT	Set-Bildung	Sortenrein	Andere	Methodischer Ansatz
[Boz-1992]			X	X		Konzept & Beschreibungsmodell
[Cap-2015a]			X	X	X	Optimierungsmodell
[Cap-2015b]			X			Beschreibungsmodell
[Cap-2015c]				X	X	Analytisches Planungsmodell
[Cap-2011]			X	X	X	Beschreibungsmodell & Fallstudie
[Han-2013]			X	X		Fallstudien & Interviews
[Kil-2012]			X	X		Optimierungsmodell
[Lim-2012]			X	X		Optimierungsmodell
[Lim-2015]			X	X		Entscheidungsmodell
[Sal-2015]			X	X	X	Empirische Studie
[Wag-2011]	X	X				Entscheidungsmodell

die ein Set gegenüber einer sortenreinen Bereitstellung bietet. Auf der anderen Seite entstehen zusätzliche Kosten bei der Zusammenstellung der Sets, da ein zusätzlicher Handhabungsschritt stattfindet. Ein weiterer qualitativer Nachteil ist die geringere Flexibilität, wenn Bauteile defekt sind oder sich die Produktionssequenz verändert. Im mathematischen Modell werden alle relevanten Prozesskosten (z. B. Pick-Kosten an der Montagelinie, interne Transportkosten, Set-Bildungs-Kosten, etc.) abgebildet – die qualitativen Aspekte werden vernachlässigt. Im Optimierungsmodell wird die Gesamtkostenfunktion minimiert. Das Optimierungsmodell wird anschließend anhand eines Fallbeispiels eines belgischen Automobilherstellers erfolgreich getestet [Lim-2012]. In einer weiterführenden Forschungsarbeit entwickeln *Limère et al.* ein Entscheidungsmodell für die Materialbereitstellung Set-Bildung und sortenrein, erweitert um die zurückgelegte Distanz des Werkers an der Montagelinie. Die Ergebnisse zeigen, dass die Reduktion der Wege des Werkers zu einer erhöhten Befürwortung der Set-Bildung führen. Die Autoren sehen viele Erweiterungsmöglichkeiten des Modells, z. B. indem der Betrachtungsrahmen des Modells auf die Supply Chain vom Lieferanten bis zur Montagelinie ausgeweitet wird [Lim-2015]. Insgesamt ist festzuhalten, dass zur Auswahl des optimalen Belieferungs- oder Bereitstellkonzeptes häufig ein prozesskostenbasierter Minimierungsansatz gewählt wird (vgl. [Cap-2015a; Lim-2012; Sal-2015]). Daher wird im folgenden Exkurs die Prozesskostenrechnung näher erläutert.

### Exkurs: Prozesskostenrechnung

Das Bestreben nach Effizienz hat auch in der Logistik den Trend der Prozesskostenrechnung ausgelöst [Lan-1992, S. 7]. Die *VDA-Empfehlung 5010* regt daher an, die Total Landed Cost (TLC) bei der Wahl der Belieferungs- und Transportkonzepte zu berücksichtigen, um kostenoptimale Anlieferprozesse sicherzustellen. Die TLC-Betrachtung berücksichtigt neben den Herstellkosten der Materialien sämtliche Kosten, welche entlang der Lieferkette (z. B. Lagerkosten, Transportkosten, Verpackungskosten, etc.) entstehen [VDA 5010, S. 8]. Die Kostenermittlung basierend auf einzelnen Prozessen wird als Prozesskostenrechnung (englisch: *activity based costing*) bezeichnet [Bec-2008, S. 213]. Ein Prozess ist definiert als eine Abfolge von Tätigkeiten bzw. Aktivitäten, die zueinander in Wechselwirkung stehen und dessen Durchführung ein Ergebnis generiert [VDI 2870-1, S. 6]. Prozessorientierte Kostenrechnungsverfahren sind für die Logistik als Querschnittsfunktion zwar geeignet, jedoch im Allgemeinen mit einem hohen Berechnungsaufwand verbunden. Daher werden sie nicht durchgängig in der Logistik eingesetzt [Klu-2010, S. 109 f.]. Mittels der Prozesskostenrechnung lassen sich Fragestellungen hinsichtlich der Effekte aus bestimmten Maßnahmen, wie z. B. der Umstellung auf eine JIT-Anlieferung, beantworten [VDI 3330, S. 17].

Der Ablauf der Prozesskostenrechnung lässt sich in sechs Schritte unterteilen:



Zunächst werden die Aktivitäten eines Prozesses analysiert, um den Prozess dann in Teilprozesse zu zerlegen. Im zweiten Schritt werden den Teilprozessen die Kosten zugeordnet, die durch die einzelnen Aktivitäten verursacht werden. Anschließend werden die Kostentreiber ermittelt, d. h. die Faktoren, welche die Prozesskosten maßgeblich beeinflussen. Im vierten Schritt sind die Mengenausprägungen der Kostentreiber zu bestimmen, damit im fünften Schritt die entsprechenden Prozesskosten ermittelt werden können. Die Prozesskosten werden in Kosten pro Prozessmengeneinheit ausgedrückt. Der letzte Schritt weist die einzelnen Prozesskosten den Produkten zu, sodass die Kosten je Produkt ausgewiesen werden können [Web-2012, S. 55 ff.].

### **Quantitative Ansätze zur Auswahl von Transportkonzepten**

Auf die Transportlogistik entfällt ein hoher Kostenanteil der gesamten Logistikkosten – aus diesem Grund ist die Transportlogistik vermutlich eines der am meisten untersuchten Gebiete im Wissenschaftsfeld Logistik [Bra-2013, S. 6742]. Die Arbeit von *Bravo und Vidal* liefert einen umfassenden Literaturüberblick zum Thema Transportoptimierung in der Supply Chain. Der Literaturüberblick ist strukturiert nach verschiedenen Aspekten (z. B. Modellcharakteristika, Supply-Chain-Entscheidung, verwendete Zielfunktion). Bei dem Aspekt Supply-Chain-Entscheidung wird beispielsweise in Standortentscheidungen und Entscheidungen bzgl. der Anzahl an Lieferungen unterschieden [Bra-2013]. Es fällt auf, dass im Literaturüberblick von *Bravo und Vidal* keine Supply-Chain-Entscheidung bzgl. der Belieferungs- und Transportkonzeptauswahl aufgeführt ist. Bereits 1989 identifizierte *McGinnis* jedoch den Forschungsbedarf, Optimierungsmodelle zur Transportkonzeptauswahl auf Unternehmen anzupassen, die eine JIT-Philosophie verfolgen [McG-1989, S. 44]. Denn vor dem Hintergrund einer zunehmenden Implementierung von JIT-Prozessen wird die Transportkonzeptauswahl immer komplexer [Mei-2008, S. 184]. *Meixell und Norbis* liefern daher einen umfassenden Literaturüberblick über die Auswahl von Transportkonzepten und von Spediteuren. Es lässt sich festhalten, dass mit 42 % ein Großteil der von *Meixell und Norbis* betrachteten Literatur mathematische Modelle als methodischen Ansatz verwenden [Mei-2008]. Bevor auf ausgewählte Beiträge zur Auswahl des kostenoptimalen Transportkonzeptes eingegangen wird, erfolgt eine Kurzeinführung in die mathematische Optimierung.

#### **Exkurs: Mathematische Optimierung**

Unter einem Modell wird eine idealisierte Abbildung eines realen Problems oder Systems verstanden. Im Bereich der Planung werden Modelle häufig aufgrund der Problemkomplexität abstrahiert, sodass irrelevante Aspekte vereinfacht werden, um sich auf die entscheidenden Aspekte fokussieren zu können. Es existiert eine Vielzahl an Modellen, die sich nach Einsatzzweck, Art der Information oder Art der Abstraktion unterscheiden können. Entscheidungs- und Optimierungsmodelle ermöglichen die Bewertung und Auswahl von Handlungsmöglichkeiten, sodass die optimale Lösung in Bezug auf eine Zielfunktion ausgewählt werden kann [Nyh-2008, S. 7; Arn-2008, S. 36 f.].

Eine der bekanntesten und in der betrieblichen Praxis eingesetzten Optimierungstechniken ist die *Lineare Optimierung* (englisch: *linear programming*) [Sta-2010, S. 427 f.]. Dabei wird eine Zielfunktion unter der Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen (in Form von Ungleichungen und/oder Gleichungen) minimiert oder maximiert.

Eine Eigenschaft von Optimierungsprobleme ist, dass sich jedes Maximierungsproblem in ein Minimierungsproblem überführen lässt und vice versa [Gri-2013, S. 26]. Die formale Schreibweise eines linearen Programms lautet [Bir-2011, S. 57]:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = c^T x & (2-1) \\ \text{s.t.} \quad & Ax \geq b, \\ & x \geq 0, \end{aligned}$$

wobei  $x$  der  $(n \times 1)$ -Entscheidungsvektor,  $c$  der  $(n \times 1)$ -Vektor mit den Zielfunktionskoeffizienten,  $A$  die  $(m \times n)$ -Technologiematrix und  $b$  die rechte Seite der Nebenbedingung in Form eines  $(m \times 1)$ -Vektors. Bei einem *deterministischen* Optimierungsmodell sind die Daten von  $c$ ,  $A$ , und  $b$  bekannt. Der Wert  $z$  soll minimiert werden, indem die optimale Lösung  $x^*$  aus dem *zulässigen Set*  $\{x \mid Ax \geq b, x \geq 0\}$  identifiziert wird. Der Vektor  $x^*$  ist genau dann die optimale Lösung, wenn für alle zulässigen  $x$  gilt:  $c^T x \geq c^T x^*$ . Die algebraische Lösung eines solchen Optimierungsmodells kann z. B. mit dem Simplex-Verfahren erfolgen [Sta-2010, S. 428], welches ursprünglich von *George B. Dantzig* (vgl. [Dan-1949; Dan-1955]) entwickelt wurde [Cot-2017, S. 1]. Für Erläuterungen zur Funktionsweise des Simplex-Verfahrens sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen (vgl. z. B. [Gri-2013, S. 315 ff.; Pap-2015, S. 155 ff.; Dit-2015, S. 54 ff.]).

Charakteristisch für ein lineares Optimierungsmodell ist, dass sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen lineare Funktionen sind und dass die Variablen nur nicht-negative, reelle Zahlenwerte annehmen dürfen. Besteht die Menge an zulässigen Lösungen ausschließlich aus ganzzahligen Variablen, so wird das Entscheidungsproblem als *ganzzahliges Optimierungsmodell* (englisch: *integer programming model*) bezeichnet. Beinhaltet das Modell sowohl ganzzahlige als auch reellwertige Variablen, wird von einem *gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell* (englisch: *mixed integer programming model*) gesprochen. Dürfen alle oder einige Variablen nur die Werte 0 oder 1 annehmen, handelt es sich um ein *binäres* bzw. *gemischt-binäres Modell* [Sta-2010, S. 427; Arn-2008, S. 37 f.]. Für lineare Optimierungsmodelle gilt, dass das zulässige Set konvex ist. Dadurch entspricht jedes lokale Minimum gleichzeitig einem globalen Minimum [Pap-2015, S. 17].

Neben den linearen Optimierungsmodellen gibt es die nicht-linearen Optimierungs-

modelle – d. h. Modelle, bei denen die Zielfunktion und/oder die Nebenbedingungen nicht linear sind. Für diese Modelle gibt es kein universelles Lösungsverfahren, sodass viele spezielle, meist numerische Verfahren zur Lösung nicht-linearer Modelle entwickelt wurden [Dom-2015b, S. 183 ff.; Alt-2002, S. 14]. Lineare Optimierungsmodelle sind daher wesentlich leichter zu lösen [Wil-2013, S. 21]. Viele logistische Entscheidungsprobleme lassen sich mit Hilfe von linearen oder gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodellen beschreiben und lösen [Arn-2008, S. 38].

Zusätzlich lassen sich Optimierungsmodelle hinsichtlich der Eingabedaten unterscheiden. Sind die Eingabedaten im Voraus bekannt, so handelt es sich um ein deterministisches Modell. Viele Variablen unterliegen jedoch einer gewissen Unsicherheit, sodass sie durch Zufallsvariablen und dazugehörige Wahrscheinlichkeiten modelliert werden. Dadurch wird berücksichtigt, dass zukünftig verschiedene Szenarien eintreten können. In diesem Fall handelt es sich um ein *stochastisches Optimierungsmodell*. Das Lösen von stochastischen Modellen ist weitaus komplexer, da weder die Zulässigkeit noch die Optimalität der Lösung eindeutig ist [Bir-2011, S. 55 ff.; Arn-2008, S. 39]. Es werden drei generelle Vorgehensweisen zur Lösung von stochastischen linearen Optimierungsmodellen unterschieden: *Expected-Value*-, *Wait-and-See*- und *Here-and-Now*-Lösung. Bei der *Expected-Value*-Lösung werden die stochastischen Variablen durch Erwartungswerte ersetzt – dies setzt voraus, dass die Verteilungen der Zufallsvariablen bekannt sind. Das entstehende lineare Modell wird dann als deterministisches Äquivalent des stochastischen linearen Optimierungsproblems bezeichnet [Mad-1960, S. 197 ff.]. Für detailliertere Ausführungen sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (vgl. z. B. [Kal-2011; Bir-2011]).

*Berman und Wang* stellen ein nicht-lineares ganzzahliges Problem auf, bei welchem die gesamten Transport- und Lagerhaltungskosten (im Werk sowie im Transit) minimiert werden. Ziel ist die Identifikation des optimalen Transportkonzeptes, wobei zwischen einem Direkttransport und einer Crossdock-Anlieferung auszuwählen ist – Milkrun wurde als Transportkonzept vernachlässigt. Das betrachtete Transportmittel ist ein Lkw und der Bedarf aller Produkte für jeden Produktionsstandort und von jedem Lieferanten ist konstant. Die Entscheidungsvariable ist somit binär – d. h. ein Produkt wird entweder direkt oder über ein Crossdock transportiert. Es ergibt sich ein nicht-lineares Problem, dessen Zielfunktion weder konvex noch konkav ist, sodass das Problem nur schwer lösbar ist. Daher wurden eine Heuristik sowie ein Branch-and-Bound-Algorithmus zur Lösung des Problems entwickelt.

Die Ergebnisse verschiedener durchgeführter, computergestützter Tests sind vielversprechend im Hinblick auf die Performance der Algorithmen [Ber-2006]. Nachteilig ist, dass bei dem Ansatz von *Berman und Wang* lediglich zwei Transportkonzepte modelliert werden.

*Kempkes et al.* optimieren die Inbound-Logistik eines OEM, indem sie das Transportkonzept durch die Identifikation der optimalen Bestellmenge auswählen. Es werden die Transportkonzepte Direkttransport (als Komplettladung), Gebietsspedition (GS) sowie Kurier-, Express- und Paketdienstleistung unterschieden. Das Konzept GS wird in Vor- und Hauptlauf (analog zu einem Hub-and-Spoke-Konzept) aufgeteilt. Dazu werden die Tarifkonditionen der beiden Abschnitte separat modelliert: Die Vorlaufkosten hängen vom Gewicht der Losgröße sowie von der Entfernung zum Lieferanten ab, während die Hauptlaufkosten konstant je angebrochene 100 kg zuzüglich eines Pauschalbetrags je Lkw sind. Die Autoren zeigen, dass das Verfahren der Economic Order Quantity (EOQ)<sup>2</sup> aufgrund der durchschnittlich betrachteten Nachfragen die gestaffelten Transportkosten nicht vollständig abbilden kann. Die Besonderheit der exakten Optimierung von *Kempkes et al.* besteht somit in der Modellierung der verschiedenen Tarifstufen. Bei dem Modell handelt es sich um ein gemischt-ganzzahliges Programm, das alle Transportmöglichkeiten mit den verschiedenen Tarifstufen kombiniert, basierend auf dem Capacitated-Lot-Sizing-Problem (CLSP)<sup>3</sup> – in Anlehnung an die Arbeit von *Reith-Ahlemeier* (vgl. [Rei-2002]). Die Optimierung erfolgt separat für jedes Transportkonzept. Basierend auf dem Kostenvergleich der Transportkonzepte mit der jeweils optimalen Bestellmenge wird das günstigste Transportkonzept ausgewählt. Das Modell beschreibt lediglich verbrauchsgesteuerte Lieferketten – ein Vorteil liegt jedoch in seiner hohen Erweiterbarkeit [Kem-2007].

*Schöneberg et al.* erweitern die Betrachtung der Tarifstufen in den Transportkonzepten (basierend auf dem Ansatz von *Kempkes* [Kem-2009]) um Anlieferungsprofile für den Hauptlauf. Ein Anlieferungsprofil stellt eine fixe Anlieferfrequenz je Lieferant – unter der Annah-

---

<sup>2</sup> Bei dem EOQ-Modell wird für ein Produkt mit konstanter Nachfrage die optimale Bestellmenge, unter Berücksichtigung der variablen und fixen Kosten, bestimmt [Sny-1973]. In der deutschsprachigen Literatur ist das EOQ-Modell auch unter dem Ausdruck *optimale Bestellmenge oder Losgröße* sowie *Andler'sche Formel* bekannt [VDI 2691; Fot-2017, S. 3-13]. Für eine Einführung zur Berechnung der optimalen Losgröße sei z. B. auf *Arnold und Furmans* verwiesen [Arn-2007, S. 174].

<sup>3</sup> Bei dem CLSP-Modell werden mehrere Produkte mit dynamisch schwankenden Bedarfen, unter der Berücksichtigung knapper Ressourcen, betrachtet. Das Modell wird in der Produktionsplanung zur Bestimmung des optimalen Produktionsloses eingesetzt [Tem-2008, S. 163 ff.; Alm-2015, S. 90 f.]. Allgemein kann mit Hilfe des Modells eine kombinierte Losgrößen- und Transportplanung abgebildet werden [Sam-2005]. Dabei wird entschieden, in welchen Losgrößen an welchen Produktionsstandorten produziert werden soll, indem Transport-, Lager- und Rüstkosten berücksichtigt werden. Für weitere Ausführungen siehe *Tempelmeier* [Tem-2008, S. 163 ff.].

me deterministischer Bedarfe – dar. Die Auswahl des richtigen Anlieferungsprofils erfolgt mittels eines gemischt-ganzzahligen Modells. Es wird gezeigt, dass durch die Wahl der Anlieferungsprofile sowohl ökonomische als auch ökologische Effekte erzielt werden: die Fahrzeugauslastung wird erhöht, sodass zum einen die Transportkosten und zum anderen Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen sinken [Sch-2010b].

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Bewusstseins für Nachhaltigkeit untersuchen immer mehr Arbeiten, ob und wie groß der Einfluss des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf die Wahl des Transportkonzeptes ist (vgl. z. B. [Hoe-2014; Ben-2013]). Andere Ansätze fokussieren neben der Wahl des optimalen Transportkonzeptes den operativen Verpackungsaspekt. Dazu werden verschiedene Packheuristiken entwickelt, mit deren Hilfe eine auslastungsoptimale Verpackung der Bauteile sichergestellt wird (vgl. z. B. [Coc-2006; Con-2014]).

#### **2.4.2.3 Diskussion der Auswahlmethoden von Logistikkonzepten**

Der Überblick über die vorgestellten Auswahlmethoden von Logistikkonzepten hat gezeigt, dass Belieferungskonzepte meist qualitativ, z. B. mittels ABC-XYZ-Analyse, ausgewählt werden. Eine quantitative Betrachtung bezüglich der Belieferungskonzepte wurde bislang wenig fokussiert (mit der Ausnahme [Wag-2011]). In der Inhouse-Logistik hingegen gibt es mehrere Ansätze, die das Bereitstellkonzept entsprechend der minimalen Prozesskosten auswählen. Die qualitative Auswahl von Transportkonzepten kann mittels eines Entscheidungsbaumes erfolgen [VDA 5010, S. 41]. Darüber hinaus existieren – im Gegensatz zur Belieferungskonzeptauswahl – umfangreiche, quantitative Untersuchungen in der Transportlogistik. Es gibt eine Vielzahl an Optimierungsansätzen mit unterschiedlichen Zielsetzungen (z. B. Auslastungsmaximierung, Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Bestimmung kostenoptimaler Anlieferfrequenzen). In Bezug auf die Auswahl der Transportkonzepte liefern *Kempkes et al.* einen interessanten Ansatz, indem sie die verschiedenen Tarifmodelle der Transportkonzepte berücksichtigen [Kem-2007]. Diesen Ansatz ergänzend wählen *Schöneberg et al.* das kostenoptimale Transportkonzept durch die Berücksichtigung verschiedener Anlieferfrequenzen [Sch-2010b]. Beide Ansätze wurden für die operative Steuerung der Inbound-Transporte entwickelt, sodass die Auswahl der Belieferungskonzepte nicht berücksichtigt wurde.

Auffällig ist, dass Belieferungs- und Transportkonzepte bislang nicht gemeinsam, sondern stets unabhängig voneinander ausgewählt werden. Gemäß des SCM-Gedankens sollte jedoch der Logistikprozess in seiner Gesamtheit betrachtet und geplant werden [Arn-2008, S. 7], um auftretende Trade-Offs berücksichtigen zu können. Beispielsweise soll ein JIS-



Prozess zu geringeren Lager- und Kapitalbindungskosten führen [Klu-2010, S. 301]. Unklar ist jedoch, ob diese Kostenreduktion so groß ist, dass sie höhere Kosten für die Sequenzierung und für den Transport rechtfertigen. Aus diesem Grund sollte die Auswahl der Belieferungs- und Transportkonzepte nicht getrennt voneinander erfolgen. Es ergibt sich folgende Fragestellung für diese Arbeit:

### **Zweite Forschungsfrage**

*Wie kann eine kostenoptimale integrierte Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten für Bauteile erfolgen?*

## **2.4.3 Investitionsentscheidung unter Berücksichtigung von Flexibilität**

Die Entscheidung, ob ein Logistikkonzept umgestellt werden sollte, kann einer Investitionsentscheidung gleichgesetzt werden. Eine Logistikkonzeptumstellung verursacht einmalige Kosten. Grundsätzlich sollte die Verwendung eines anderen Logistikkonzeptes zu geringeren Prozesskosten (im Vergleich zu dem ursprünglichen Logistikkonzept) führen. Eine Umstellung ist dann durchzuführen, wenn die Summe der erwarteten Prozesskosteneinsparungen in einem bestimmten Betrachtungszeitraum die Umstellkosten mindestens deckt. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, Entscheidungen bezüglich Logistikkonzeptumstellungen zu treffen und diese Umstellungen zu flexibilisieren. Flexibilität kann gewöhnlich durch einen Kostenzuschlag erworben werden. Die mit der Flexibilität verbundenen Trade-Offs sind deshalb vor der Umsetzung einer Flexibilisierungsmaßnahme zu analysieren [Tiw-2015, S. 781]. Dazu ist es erforderlich, den Nutzen aus der erworbenen Flexibilität zu bewerten, um die Flexibilitätskosten zu rechtfertigen [Nem-2005, S. 945]. Um Entscheidungen über Logistikkonzeptumstellungen und Flexibilitätsinvestitionen treffen zu können, werden im Folgenden verschiedene Investitionsrechenverfahren vorgestellt. Einen Überblick über verbreitete Investitionsrechenverfahren – unter Sicherheit und unter Unsicherheit – liefert Abbildung 2-15. Im Folgenden wird auf ausgewählte Verfahren näher eingegangen. Für detaillierte Einblicke sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (vgl. z. B. [Göt-2014; Bus-2015]).

### **2.4.3.1 Investitionsrechenverfahren unter Sicherheit**

Investitionsrechenverfahren unter Sicherheit gliedern sich in statische und dynamische Modelle. Diese Verfahren werden zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Investitionen angewendet. Die Vorteilhaftigkeit kann dabei sowohl *absolut* als auch *relativ* sein. Eine Inves-

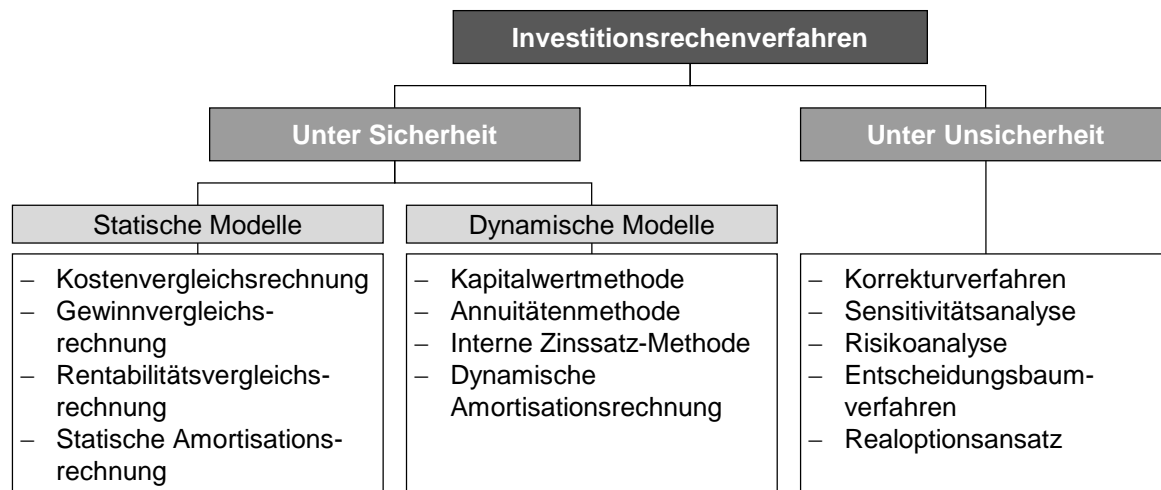


Abbildung 2-15: Übersicht der Investitionsrechenverfahren (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Göt-2014, S. 47; Hof-2008, S. 91])

tion ist absolut vorteilhaft, wenn sie gegenüber der Alternative Nichtstun vorzuziehen ist. Eine Investition ist relativ vorteilhaft, wenn sie gegenüber einer anderen Investitionsalternative vorzuziehen ist. Die einzige betrachtete Zielgröße dieser Modelle beschränkt sich auf eine monetäre Größe. Die Inputdaten für die Modelle lassen sich mit Sicherheit bestimmen. Die Nutzungsdauer der Investitionen ist festgelegt [Göt-2014, S. 55 f.].

### Statische Modelle

Statische Modelle betrachten grundsätzlich einen expliziten Zeitabschnitt, z. B. eine Periode der Nutzungsdauer oder eine hypothetische Durchschnittsperiode basierend auf dem gesamten Planungszeitraum (Ausnahme: statische Amortisationsrechnung). Das bedeutet, dass keine Berücksichtigung der sich verändernden Zahlungsströme über den Zeitverlauf erfolgt. Eine Anwendung dieser Modelle bietet sich insbesondere bei Entscheidungsproblemen mit wenigen Einflussgrößen, kurzen Laufzeiten und geringen Investitionsvolumina an. Die in Abbildung 2-15 aufgeführten statischen Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielgrößen. Bei der *Kostenvergleichsrechnung* werden Kosten (d. h. Personalkosten, Materialkosten, Abschreibungen, etc.) als Zielgröße berücksichtigt. Die Entscheidung fällt auf die Investitionsalternative mit den geringsten Kosten. Die *Gewinnvergleichsrechnung* hat als Zielgröße den durchschnittlichen Gewinn, der sich aus der Differenz aus Erlösen und Kosten ergibt. Es wird die Investitionsalternative mit dem größten Gewinn gewählt. Bei der *Rentabilitätsvergleichsrechnung* wird die Vorteilhaftigkeit einer Investition mit Hilfe der Kapitalrentabilität (englisch: *return on investment*) bewertet. Für die Berechnung der Rentabilität wird der durchschnittliche Gewinn zuzüglich der durchschnittlichen Zinsen zur durchschnittlichen Kapitalbindung ins Verhältnis gesetzt. Eine Investition wird durchgeführt, wenn eine

geforderte Mindestrentabilität erreicht wird. Bei mehreren Alternativen ist diejenige mit der höchsten Rentabilität zu wählen. Die *statische Amortisationsrechnung* unterscheidet sich zu den vorherigen Verfahren, da diese Methode keine einzelnen Zeitpunkte, sondern eine Zeitspanne berücksichtigt. Es wird die Zeitspanne berechnet, bis die Anschaffungskosten einer Investition durch die resultierenden Rückflüsse gedeckt sind. Als Entscheidungsregel gilt, dass das Investitionsobjekt mit der kürzesten Amortisationszeit zu wählen ist [Göt-2014, S. 57 ff.; Bus-2015, S. 22 ff.; Mül-2014, S. 365 ff.; Kru-2009, S. 31 ff.].

### Dynamische Modelle

Der Nachteil von statischen Verfahren besteht darin, dass die Zeitpunkte, zu denen Zahlungen anfallen, nicht berücksichtigt werden. Dynamische Modelle hingegen beziehen die zeitlichen Unterschiede einzelner Ein- und Auszahlungen mit ein. Eine Verknüpfung der in den unterschiedlichen Perioden anfallenden Zahlungen erfolgt durch die finanzmathematische Auf- oder Abzinsung mit einem Kalkulationszinssatz [Göt-2014, S. 73 f.; Hof-2008, S. 84 f.]. Da diese Verfahren den diskontierten Zahlungsstrom betrachten, werden sie auch als Discounted Cashflow (DCF)-Verfahren bezeichnet [Tri-1996, S. 1].

Eine der bekanntesten Methoden zur dynamischen Investitionsrechnung ist die *Kapitalwertmethode*. Der Kapitalwert (englisch: *net present value (NPV)*) entspricht der Summe aller auf einen bestimmten Zeitpunkt auf- oder abgezinsten Ein- und Auszahlungen, die aus einer Investition resultieren [VDI 6025, S. 28; Bus-2015, S. 55 f.; Göt-2014, S. 78]. Bei der Kapitalwertmethode gelten folgende zwei Akzeptanzregeln: Ein Investitionsobjekt ist absolut vorteilhaft, wenn der Kapitalwert größer als Null ist. Eine Investitionsalternative ist relativ vorteilhaft, wenn ihr Kapitalwert größer ist als der einer anderen Investitionsalternative [Bus-2015, S. 63 f.]. Der Bezugszeitpunkt des Kapitalwertes ist für den Vergleich der Vorteilhaftigkeit zweier Alternativen unerheblich, solange für beide Alternativen der gleiche Bezugszeitpunkt gewählt wird. Gewöhnlich wird jedoch der Zeitpunkt  $t = 0$  gewählt. In diesem Fall ergibt sich der Kapitalwert  $C_0$  aus dem *Barwert* (englisch: *present value*) einer Investition abzüglich der anfallenden Anschaffungsauszahlung [Bus-2015, S. 56; Hun-2015, S. 66 f.]:

$$C_0 = -a_0 + \sum_{t=1}^T \frac{c_t}{(1+r)^t} = -a_0 + \sum_{t=1}^T \frac{e_t - a_t}{(1+r)^t}, \quad (2-2)$$

wobei  $a_0$  die initiale Investition zum Zeitpunkt  $t = 0$ ,  $c_t$  der Zahlungsfluss (englisch: *cash flow*) in Periode  $t$ ,  $e_t$  die Einzahlungen in Periode  $t$ ,  $a_t$  die Auszahlungen in Periode  $t$ ,  $r$  der Kalkulationszinssatz und  $T$  die maximale Betrachtungsdauer der Investition ist.

Bei der *Annuitätenmethode* werden die in jeder Periode unterschiedlich hohen Zahlungen in Annuitäten überführt. Eine Annuität entspricht dem aus einer Investition resultierenden Einkommen, das entnommen werden kann, ohne dass sich das Vermögen des Investors verändert. Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Annuitätenmethode und der Kapitalwertmethode, d. h. Annuität und Kapitalwert lassen sich ineinander überführen [Bus-2015, S. 77; Göt-2014, S. 100 f.; Hof-2008, S. 92]. Bei der *internen Zinssatz-Methode* gilt es den Zinssatz zu bestimmen, bei welchem der Barwert einer Zahlungsreihe gleich Null ist. D. h. im Gegensatz zu den vorherigen Methoden wird bei dieser Methode nicht mit vorgegebenem Kalkulationszinssatz gerechnet. Eine Investition sollte dann durchgeführt werden, wenn der berechnete interne Zinssatz größer ist als der Kalkulationszinssatz [Göt-2014, S. 103 ff.; Hof-2008, S. 92]. Wie bei der statischen Amortisationsrechnung wird auch bei der *dynamischen Amortisationsrechnung* die Amortisationszeit (d. h. die Zeitspanne bis sich die Ein- und Auszahlungen ausgeglichen haben) berechnet. Der Unterschied besteht darin, dass bei der dynamischen Amortisationsrechnung die Zahlungsströme vor dem Kumulieren diskontiert werden [Göt-2014, S. 114 ff.; Hof-2008, S. 92]. Ein wesentlicher Kritikpunkt der beschriebenen Verfahren ist die Vernachlässigung von Unsicherheiten. Für die Berechnung werden also keine Erwartungswerte, sondern sichere Inputdaten angenommen [Mül-2014, S. 392]. Diese Annahme soll bei den folgenden Verfahren unter Unsicherheit aufgehoben werden.

#### **2.4.3.2 Investitionsrechenverfahren unter Unsicherheit**

Zu den Investitionsrechenverfahren unter Unsicherheit zählen ergänzende Verfahren (wie das Korrekturverfahren, die Sensitivitätsanalyse oder die Risikoanalyse), das Entscheidungsbaumverfahren sowie der Realloptionsansatz. Alle Verfahren basieren auf den zuvor diskutierten Methoden. Die Methoden unterscheiden sich in der Modellierungsart von Unsicherheit [Mül-2014, S. 481].

#### **Ergänzende Verfahren**

Die ergänzenden Verfahren sind immer auf bestimmte Investitionsrechenverfahren unter Sicherheit anzuwenden und stellen keine eigenständigen Methoden dar. Bei dem *Korrekturverfahren* erfolgt die Korrektur bestimmter Inputgrößen, indem diese mit Risikozuschlägen und -abschlägen verrechnet werden. Bei der Kapitalwertmethode können beispielsweise der Kalkulationszinssatz, der Betrachtungszeitraum und/oder die Zahlungsströme korrigiert werden. Unsicherheit wird berücksichtigt, indem geringere Zahlungsrückflüsse oder ein höherer Kalkulationszinssatz angesetzt werden, da daraus ein geringerer Kapitalwert resul-

tiert. Wesentliche Kritikpunkte sind die Subjektivität und pauschale Vorgehensweise dieses Verfahrens, die keine transparente und nachvollziehbare Berücksichtigung von Unsicherheit zulässt. Zudem erfolgt meist eine pessimistische Korrektur, sodass positive zukünftige Entwicklungen vernachlässigt werden [Göt-2014, S. 377; Mül-2014, S. 481 f.].

Bei *Sensitivitätsanalysen* wird untersucht, wie sich die Zielgröße bei vorgegebener Veränderung einzelner Inputgrößen verhält. Zusätzlich lassen sich Grenzwerte oder Wertkombinationen für die Inputgrößen ermitteln, die erforderlich sind, sodass die Zielgröße einen bestimmten Mindestwert erreicht. Dabei gibt es mehrere mögliche Vorgehensweisen, um die Inputparameter zu variieren [Göt-2014, S. 388 ff.; Mül-2014, S. 482 ff.]. Aufgrund ihres geringen Anwendungsaufwands stellen Sensitivitätsanalysen ein wertvolles Instrument zur Analyse von Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit dar. Nachteilig ist jedoch, dass bei Variation einer Inputgröße die anderen Größen konstant zu halten sind. Die zeitgleiche Variation mehrerer Inputgrößen ist zwar möglich, führt allerdings meist zu Interpretationsschwierigkeiten [Göt-2014, S. 399 f.].

Ein weiteres ergänzendes Verfahren ist die *Risikoanalyse*. Bei diesem Verfahren werden unsichere Inputgrößen mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert. Dazu werden diskrete oder kontinuierliche Verteilungstypen (z. B. Normalverteilung) je Inputgröße festgelegt und die Verteilungsparameter (z. B. Erwartungswert und Varianz) geschätzt. Mit Hilfe von Korrelationskoeffizienten lassen sich zusätzlich stochastische Abhängigkeiten zwischen zwei Inputgrößen berücksichtigen. Anschließend kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße (z. B. des Kapitalwertes) berechnet werden. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsfunktion lässt sich die Wahrscheinlichkeit ermitteln, mit welcher ein bestimmter Wert der Zielgröße eintritt. Ein Nachteil der Risikoanalyse ist, dass sie i. d. R. mit spezieller Software durchzuführen ist. Die Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Inputparameter und die Bestimmung der stochastischen Abhängigkeiten erweist sich zudem oftmals als problematisch aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit. Eingangsdaten unterliegen in diesem Fall subjektiven Einschätzungen und führen zu nicht nachvollziehbaren Ergebnissen [Göt-2014, S. 400 ff.; Mül-2014, S. 484 ff.]. Ein weiterer Nachteil ist, dass sowohl Sensitivitätsanalyse als auch Risikoanalysen meist keine eindeutigen Entscheidungsregeln liefern. Beide Verfahren geben verschiedene Ausprägungen der Zielgröße aus unter Berücksichtigung der Variation der Inputgrößen. Allerdings bleibt es dem Entscheidungsträger überlassen, auf Basis welcher Ausprägung der Inputgröße die Investitionsentscheidung getroffen wird [Hun-2015, S. 76 f.; Göt-2014, S. 400 ff.].

## **Entscheidungsbaumverfahren**

Im Gegensatz zu den Verfahren des vorherigen Abschnitts ist das Entscheidungsbaumverfahren als eigenständiges Verfahren einsetzbar. Dieses Verfahren ermöglicht es, sequentielle Entscheidungsprobleme abzubilden und gleichzeitig zustandsabhängige Folgeentscheidungen zu berücksichtigen [Hom-2001, S. 118]. Der Name des Verfahrens ergibt sich aus der Darstellung des Entscheidungsproblems in Form eines ungerichteten Graphen, der als Entscheidungsbaum bezeichnet wird [Göt-2014, S. 407]. Im Entscheidungsbaum werden endlich viele Umweltzustände mit zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten und Folgeentscheidungen abgebildet. Ein Entscheidungsbaum enthält somit Entscheidungsknoten, in denen eine Entscheidung zu treffen ist, Zufallereignisknoten, in denen zufällige Ereignisse zu bestimmten Wahrscheinlichkeiten eintreten können, sowie Ergebnisknoten, in denen eine Abfolge von Entscheidungen und Zufallereignissen endet. In einem Ergebnisknoten einer Periode kann zudem eine Folgeentscheidung erforderlich werden, aus der weitere Zufallereignisse und Ergebnisse resultieren können. Die Zielgröße von Entscheidungsbäumen bei Investitionsentscheidungen ist meist der erwartete Kapitalwert. Um diesen bestimmen zu können, sind zunächst für sämtliche Zustände die relevanten Inputgrößen und die Eintrittswahrscheinlichkeiten festzulegen. Gewählt wird die Abfolge von Entscheidungen, bei denen der erwartete Kapitalwert maximal wird. Für die Bestimmung der optimalen Entscheidungsstrategie wird das Roll-Back-Verfahren (d. h. ein rekursives Vorgehen beginnend bei der letzten Periode) angewendet [Göt-2014, S. 407 ff.; Blo-2006, S. 263 ff.; Lau-2014, S. 286 ff.]. Zusammenfassend eignet sich das Entscheidungsbaumverfahren für die Lösung flexibler Investitionsmodelle, da zukünftige Umweltszenarien und Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Die Anwendung erweist sich jedoch bei einer zu großen Anzahl an Entscheidungsalternativen und Umweltzuständen als problematisch, da Entscheidungsbäume schnell zu unübersichtlich werden und somit nicht mehr beherrschbar sind. Hinzu kommt der große Aufwand in der Datenbeschaffung. Ein weiterer Kritikpunkt stellt die Wahl eines geeigneten Kalkulationszinssatzes dar. Dieser müsste je Entscheidungsknoten variieren, da sich das systematische Risiko über den Zeitverlauf verändert. Die Berücksichtigung dieses Risikos würde jedoch die Komplexität in der Anwendung von Entscheidungsbaumverfahren steigern. Eine solche risikoadäquate Bewertung von verschiedenen Handlungsalternativen lässt sich beispielsweise durch optionspreistheoretische Ansätze realisieren [Hom-2001, S. 118; Göt-2014, S. 419 f.; Hun-2015, S. 91 f.].

## **Realoptionsansatz**

Die Bedeutung von Realoptionen hat in den vergangenen Jahren enorm zugenommen. Realoptionen gelten als fundamentales Instrument zur Bewertung von strategischen Inves-

titionsentscheidungen mit hohem Kapitaleinsatz in einem unsicheren Marktumfeld [Amr-2003, S. 3]. Managemententscheidungen weisen häufig eine gewisse Flexibilität auf, so dass nach Eintritt bestimmter Einflüsse die Handlungsstrategie so angepasst wird, dass negative Entwicklungen abgewendet und die Chancen aus positiven Entwicklungen genutzt werden können. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen traditionellen Investitionsrechenverfahren bieten Realoptionen die Möglichkeit genau diese Entscheidungsflexibilität abzubilden [Hom-1999, S. 121; Hom-2001, S. 113 f.; Tri-1996, S. 1 ff.].

Der Realoptionsansatz erweitert das Gebiet der Finanzoptionen um reale, nicht-finanzielle Vermögensgegenstände [Amr-2003, S. 6]. Allgemein stellt eine Option das Recht, nicht aber die Verpflichtung dar, zukünftigen Handlungen durchzuführen. Dadurch, dass die zukünftige Handlung nicht verpflichtend ausgeübt werden muss, entsteht die zuvor angesprochene Entscheidungsflexibilität. Optionen sind insbesondere dann von Bedeutung, wenn die zukünftigen Entwicklungen einer hohen Unsicherheit unterliegen. Denn eine Ausübung der Option erfolgt nur, wenn diese zu einem wirtschaftlichen Vorteil für den Entscheidungsträger führt. Eine Realoption nimmt somit immer einen positiven Wert oder den Wert Null an [Amr-2003, S. 5; Hom-1999, S. 123; Göt-2014, S. 420 f.]. Um den Wert einer Realoption zu bestimmen, können verschiedene Optionsbewertungsverfahren verwendet werden. Grundsätzlich werden analytische und numerische Verfahren unterschieden. Eine Übersicht der verschiedenen Verfahren liefern z. B. *Hommel und Lehmann* [Hom-2001, S. 124 ff.]. Zwei bekannte Verfahren sind das analytische *Black-Scholes-Modell* und das numerische *Binomialmodell*, das zu den *Lattice-Ansätzen* gehört [Göt-2014, S. 433]. Der Vorteil von den analytischen Verfahren ist die aufwandsarme Anwendung, da lediglich die Inputparameter in die entsprechenden Lösungsgleichungen einzusetzen sind. Ist das Anwenderverständnis allerdings gering, kann es unter Umständen sein, dass relevante Annahmen keine Berücksichtigung finden. Zudem führen die teilweise sehr restriktiven Modellprämissen der analytischen Verfahren dazu, dass eine Anwendung in der Praxis kaum möglich ist. Hingegen weisen die numerischen Lattice-Verfahren die Vorteile auf, dass die mathematischen Anforderungen an den Anwender gering sind und dass das Entscheidungsproblem transparent modelliert wird, sodass auch für Außenstehende die Bewertung der Option gut nachvollziehbar ist [Hom-2001, S. 125 f.].

Insgesamt können durch Realoptionen eine Vielzahl an Anwendungsfällen abgebildet werden. Daraus ergeben sich verschiedene Realoptionstypen. Eine *Umstelloption* (englisch: *option to switch*) ermöglicht beispielsweise dem Management, den Produktions-Mix anzupassen, sollten sich Nachfrage oder Preise ändern. Eine *Schließungsoption* (englisch:

*option to abandon*) kann z. B. verwendet werden, um bestimmte Aktivitäten permanent auszusetzen, wenn die Marktbedingungen dies erfordern [Göt-2014, S. 421; Tri-1996, S. 2 ff.]. Diese Beispiele sind nur zwei von vielen Realloptionstypen. Für detaillierte Ausführungen sei auf die entsprechende Literatur verwiesen. Neben den theoretischen Anwendungsfällen, die die Realloptionstypen abbilden, wurde der Einsatz von Realoptionen bereits in vielen Anwendungsfeldern – dazu gehören auch die Produktion und Logistik sowie das SCM – untersucht (vgl. z. B. [Nem-2003; Ben-2001; Wes-2015; Möl-2008; Abe-2006; Tib-2006]).

Der Realloptionsansatz birgt jedoch auch Umsetzungshürden: Zum einen wird die Umsetzung häufig durch fehlendes methodisches Verständnis des Entscheidungsträgers erschwert. Zum anderen kann sich die Bestimmung der erforderlichen Optionsparameter als schwierig gestalten. Diese Implementierungsschwierigkeiten sind dann gerechtfertigt, wenn der Optionspreis ausreichend hoch ist, was bei Investition mit einem hohen Unsicherheits- und Flexibilitätsgrad zu erwarten ist. Investitionen, die Flexibilität, aber eine geringe Unsicherheit aufweisen, wird das Entscheidungsbaumverfahren empfohlen. Investitionen mit geringer Flexibilität und hohen Unsicherheiten sollten durch Sensitivitätsanalysen in Verbindung mit der Kapitalwertmethode abgebildet werden. Unterliegen Investitionen weder Unsicherheit noch Flexibilität, kann auf die traditionellen dynamischen Modelle unter Sicherheit zurückgegriffen werden [Hom-1999, S. 129 f.; Hom-2001, S. 120 f.].

#### **2.4.3.3 Fazit zu Investitionsrechenverfahren in Bezug auf die Inbound-Logistik**

Traditionelle Verfahren der Investitionsrechnung besitzen den Nachteil weder Unsicherheit noch Flexibilität zu berücksichtigen. Hingegen sind Entscheidungsbaummodelle und Realloptionsansätze geeignet, um diesen Nachteilen entgegenzuwirken. Insbesondere der Vorteil von Realoptionen wurde in der Wissenschaft bereits erkannt und auf verschiedene Entscheidungsprobleme im Bereich des SCM und der Produktionsfertigung angewendet. Die finanzwirtschaftliche Bewertung von Entscheidungen bezüglich Logistikkonzeptumstellungen in der Inbound-Logistik wurde bislang allerdings nicht betrachtet. Somit ergibt sich folgende Fragestellung:

##### **Dritte Forschungsfrage**

*Wie können zukünftige Veränderungen und Flexibilisierungsmaßnahmen bei der Entscheidung zur Umstellung des Logistikkonzeptes in der Inbound-Logistik berücksichtigt werden?*



### 3 Konzeptioneller Rahmen des Steuerungskonzeptes

---

In diesem Kapitel wird die Struktur des zu entwickelnden Steuerungskonzeptes vorgestellt. Zunächst werden die Forschungsfragen und die Zielsetzung zusammengefasst. Danach werden die an das Steuerungskonzept gestellten Anforderungen definiert und erläutert. Abschließend wird das Steuerungskonzept in den Kontext der Inbound-Logistik eingeordnet und die Planungsbausteine des Steuerungskonzeptes werden beschrieben.

#### **Zusammenfassung des Forschungsbedarfs**

Aus der beschriebenen Ausgangssituation und Problemstellung (vgl. Kapitel 1), dem Forschungsstand zu Flexibilität in der Logistik (vgl. Kapitel 2.2) sowie der Praxisstudie in der Automobilindustrie (vgl. Kapitel 2.3) ergibt sich der Forschungsbedarf zur Entwicklung eines Steuerungskonzeptes zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik. Die forschungsleitende Fragestellung sowie die untergeordneten Forschungsfragen sind in Tabelle 3-1 konsolidiert aufgeführt.

*Tabelle 3-1: Forschungsleitende Fragestellung und untergeordnete Forschungsfragen*

---

Wie ist die Steuerung zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie zu gestalten, sodass auf relevante Veränderungen schnell und aufwandsarm reagiert werden kann, um dadurch kosteneffiziente Logistikprozesse gewährleisten zu können?	
1.	Wie können die Bauteile analytisch identifiziert werden, bei denen Umstellungen der Inbound-Logistikkonzepte aufgrund von Veränderungen der Einflussfaktoren zu erwarten sind?
2.	Wie kann eine kostenoptimale integrierte Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten für Bauteile erfolgen?
3.	Wie können zukünftige Veränderungen und Flexibilisierungsmaßnahmen bei der Entscheidung zur Umstellung des Logistikkonzeptes in der Inbound-Logistik berücksichtigt werden?

---

#### **3.1 Anforderungen an das Forschungsergebnis**

Eine Anforderung beschreibt die Eigenschaften und Fähigkeiten des zu entwickelnden Konzeptes, die für die Zielerreichung notwendig sind [Ebe-2010, S. 21]. Die verschiedenen Anforderungen an das Steuerungskonzept sind in drei Kategorien eingeteilt: inhaltliche, anwendungsorientierte und grundsätzliche Anforderungen der Logistik. Die im Folgenden beschriebenen Anforderungen sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Anforderungen an das zu entwickelnde Steuerungskonzept

---

**Inhaltliche Anforderungen**

- A1.** Standardisiertes und systematisches Vorgehen zur flexiblen Umstellung von Inbound-Logistikkonzepten in der Automobilindustrie
- A2.** Monetäre Zielgröße bei Bewertungen und Entscheidungen

---

**Anwendungsorientierte Anforderungen**

- A3.** Separate Nutzbarkeit der Einzelbestandteile des Steuerungskonzeptes
- A4.** Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit der Einzelbestandteile des Steuerungskonzeptes
- A5.** Transparenz und Nachvollziehbarkeit
- A6.** Praxistauglichkeit

---

**Grundsätzliche Anforderungen der Logistik**

- A7.** Einhaltung und Verfolgung der Logistikziele
  - A8.** Berücksichtigung der Lean-Prinzipien
  - A9.** Gesamtbetrachtung des Logistikprozesses
- 

**Inhaltliche Anforderungen**

**A1. Standardisiertes und systematisches Vorgehen:** Eine Anforderung an das Steuerungskonzept ist die standardisierte Vorgehensweise in Bezug auf die flexible Konfiguration der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie. Die Studie von *Maas und Fottner* hat gezeigt, dass bei der Umstellung von Belieferungskonzepten insbesondere im Hinblick auf die Überprüfung der Belieferungskonzepte Handlungsbedarf in der Automobilindustrie besteht [Maa-2017a, S. 41 ff.]. Eine regelmäßige Überprüfung birgt das Potenzial, Ineffizienzen frühzeitig zu identifizieren, um rechtzeitig planerisch eingreifen zu können. Damit der Aufwand der regelmäßigen Überprüfung und Planung in der Praxis handhabbar ist, sind standardisierte Methoden erforderlich. Denn mittels Standardisierung werden der Ablauf eines sich wiederholenden organisatorischen Vorgangs sowie die Verantwortlichkeiten für diesen Vorgang festgelegt [VDI 2870-1, S. 13].

**A2. Monetäre Zielgröße:** Ausgehend von der definierten Zielsetzung und dem Streben nach effizienten Logistikprozessen aufgrund des anhaltenden Kostendrucks in der Logistik [Sch-2016, S. 9; Göp-2013a, S. 11 ff.] soll das Steuerungskonzept auf monetären Zielgrößen basieren. Anhand dieser Zielgrößen sollen Entscheidungen getroffen und Bewertungen vorgenommen werden. Diese Anforderung ist insbesondere im Hinblick auf die Bewertung von Investitionen in Flexibilität relevant, da ein wesentlicher Forschungsbedarf in der

Trade-Off-Betrachtung zwischen Kosten und Nutzen von Flexibilität liegt.

### **Anwendungsorientierte Anforderungen**

**A3. Separierbarkeit:** Das Steuerungskonzept wird sich aus mehreren Bestandteilen zusammensetzen. Die einzelnen Bestandteile des Steuerungskonzeptes sollen in der Praxis separat einsetzbar sein. Dadurch wird Unternehmen die Möglichkeit geboten, die entwickelten Ansätze anzuwenden, auch wenn beispielsweise das übergeordnete Ziel der Flexibilisierung der Inbound-Logistik nicht angestrebt wird, dafür aber die Planung des Inbound-Prozesses verbessert werden soll.

**A4. Adaptierbarkeit:** Um unternehmensspezifische Besonderheiten berücksichtigen zu können, muss das Steuerungskonzept anpassbar und erweiterbar sein. Das bedeutet beispielsweise, dass die Anzahl der betrachteten Prozesse oder die berücksichtigten Einflussfaktoren auf die individuellen Unternehmensbedingungen angepasst werden können.

**A5. Transparenz und Nachvollziehbarkeit:** Damit die Entscheidungen für flexible Umstellungen von Logistikkonzepten im Unternehmen auch akzeptiert werden, ist ein hohes Maß an Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei der Entscheidungsfindung erforderlich. Denn je transparenter und nachvollziehbarer getroffene Entscheidungen sind, desto mehr steigt die Akzeptanz für eine Entscheidung [Eis-2003, S. 3 f.].

**A6. Praxistauglichkeit:** Die Praxisstudie zu Flexibilität in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie hat gezeigt, dass Handlungsbedarf hinsichtlich der Flexibilisierung der Inbound-Logistik besteht [Maa-2017a, S. 51]. Damit das Steuerungskonzept in der Praxis Anwendung findet, ist zusätzlich zu der bereits genannten Transparenz eine schnelle und einfache Anwendbarkeit (z. B. durch geeignete Werkzeuge und Tools) erforderlich. Dadurch soll der Aufwand des Methodeneinsatzes in einem wirtschaftlichen Verhältnis zum resultierenden Nutzen stehen [Irr-2014, S. 43]. Zur Praxistauglichkeit zählt außerdem, dass der Komplexitätsgrad der entwickelten Modelle angemessen sein muss. Das bedeutet zum einen, dass alle relevanten Wirkzusammenhänge in den Modellen realitätsnah abgebildet sind und zum anderen, dass die Modelle gleichzeitig handhabbar sind [Ada-1993, S. 4].

### **Grundsätzliche Anforderungen der Logistik**

**A7. Beachtung der Logistikziele:** Bei der Entwicklung des Steuerungskonzeptes ist darauf zu achten, dass die Ziele der Logistik gewahrt werden. Zu dem übergeordneten Ziel der Logistik gehört die Effizienz, ausgedrückt im Trade-Off der erbrachten Leistung zu be-

stimmten Kosten (vgl. Kapitel 2.1). Durch die Einhaltung von Anforderung A2 (Monetäre Zielgröße) sollte dem Kostenaspekt des Logistikziels automatisch Rechnung getragen werden. Die erbrachte Leistung der Logistikprozesse wird dabei als gegeben und mindestens gleichbleibend angenommen. Die Logistikleistung und -qualität soll durch das Steuerungskonzept somit nicht negativ beeinflusst werden.

**A8. Berücksichtigung der Lean-Prinzipien:** Für die Automobilindustrie spielen die Grundprinzipien der schlanken Logistik eine wesentliche Rolle (vgl. Kapitel 2.1.3). Entsprechend darf das zu entwickelnde Steuerungskonzept nicht im Widerspruch zu den acht Grundprinzipien der schlanken Logistik stehen. Im Idealfall wirkt das Steuerungskonzept positiv auf bestimmte Prinzipien, wie z. B. auf das Prinzip *Standard*, welches eine wesentliche Anforderung an das Steuerungskonzept darstellt (vgl. Anforderung A1).

**A9. Gesamtbetrachtung des Logistikprozesses:** Aufgrund der gesetzten Zielsetzung steht die Inbound-Logistik im Betrachtungsfokus. Dennoch ist es erforderlich den gesamten physischen Materialfluss vom Lieferanten bis zur Montagelinie zu betrachten, um der ganzheitlichen Sicht der Logistik gerecht zu werden [Arn-2008, S. 7]. Die Inbound-Logistik wird somit nicht isoliert betrachtet. Die Schnittstellenprozesse der Inhouse-Logistik werden ebenfalls berücksichtigt, sofern sie Einfluss auf das Ergebnis ausüben.

## 3.2 Wirkungsweise und Struktur des Steuerungskonzeptes

Im folgenden Kapitel wird zunächst das Verständnis für den Begriff der Steuerung geschärft und der Wirkungsablauf der Steuerung auf den Kontext der Inbound-Logistik übertragen (vgl. Kapitel 3.2.1). Anschließend wird die Funktionsweise des Steuerungskonzeptes beschrieben, um die weitere Struktur der Arbeit zu erläutern (vgl. Kapitel 3.2.2).

### 3.2.1 Wirkungsablauf zur Steuerung der Inbound-Logistik

In der Regelungstechnik bezeichnet Steuerung „die zielgerichtete Beeinflussung eines dynamischen Systems“ [Lun-2013, S. 2]. Unter einem System wird die Menge aus verschiedenen Elementen betrachtet, die miteinander in Beziehung stehen und in einem bestimmten Kontext als Ganzes betrachtet werden. Das bedeutet, ein System kann hinsichtlich einer bestimmten Zielsetzung, wie z. B. der Ausführung einer Funktion, definiert werden [DIN IEC 60050-351, S. 21]. Ein System wird als dynamisch bezeichnet, wenn dessen

wichtigste Kenngrößen sich im Zeitverlauf ändern können [Lun-2013, S. 2]. Charakteristisch für die Steuerung ist der offene Wirkungsablauf [DIN IEC 60050-351, S. 137]. Zur Veranschaulichung ist der Wirkungsablauf der Steuerung mit einer Störgrößenerfassung in Abbildung 3-1 dargestellt.

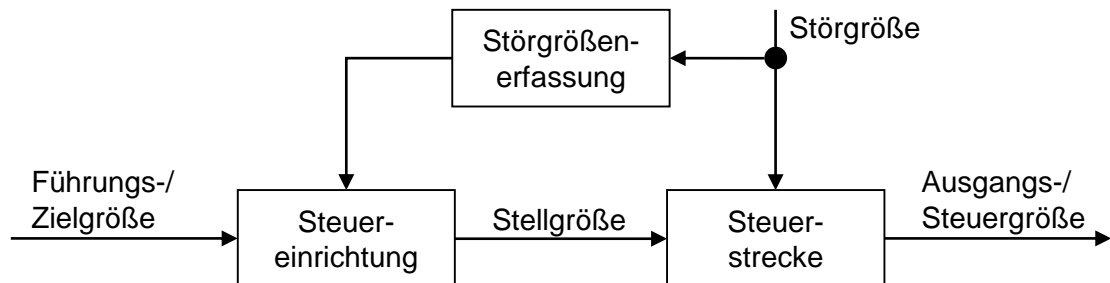


Abbildung 3-1: Wirkungsablauf der Steuerung (in Anlehnung an [Hei-2017, S. 220; Lun-2013, S. 9 f.]

Bei diesem Wirkungsablauf soll die Ausgangs-/Steuergröße so beeinflusst werden, dass sie der Zielgröße entspricht. Basierend auf der Ziel-/Führungsgröße entwickelt die Steuereinrichtung die Stellgröße. Die Stellgröße überträgt die steuernden Maßnahmen auf die Steuerstrecke. Dabei können Störgrößen auf die Steuerstrecke wirken, welche die Ausgangsgröße beeinträchtigen. Durch eine systematische Störgrößenerfassung und Meldung an die Steuereinrichtung finden die Störgrößen bei der Steuerung Berücksichtigung [Hei-2017, S. 219 ff.]. Da am Ende die Ausgangsgröße nicht mit der Zielgröße verglichen wird und somit kein Kreislauf entsteht, wird von einem offenen Wirkungsablauf oder einer Steuerkette gesprochen [DIN IEC 60050-351, S. 137; Hei-2017, S. 219].

Der beschriebene Wirkungsablauf der Steuerung lässt sich auf die Inbound-Logistik übertragen und ist in Abbildung 3-2 veranschaulicht. Die Steuerstrecke ist der Prozess der Inbound-Logistik, den es zielgerichtet zu beeinflussen gilt. Entsprechend ist der Inbound-Prozess das dynamische System. Die Ziel-/Führungsgröße ist die Effizienz der Inbound-Logistik. Die Ausgangsgröße des dynamischen Systems soll daher ebenfalls eine effiziente Inbound-Logistik sein. Wie eingangs erwähnt, unterliegt die Inbound-Logistik verschiedenen Einflüssen, wodurch die Effizienz des Prozesses beeinträchtigt werden kann, sodass eine erneute Planung des Prozesses ausgelöst wird. Zu diesen Einflüssen gehören z. B. die Produktänderungen, veränderte Lieferantenstrukturen oder strukturelle Maßnahmen beim OEM [Sch-2008a, S. 12 f.]. Diese Veränderungen der Einflussfaktoren entsprechen den Störgrößen, welche durch das Steuerungskonzept zu erfassen sind. Die Steuereinrichtung bestimmt mit Hilfe von Planungsbausteinen die Stellgrößen, die den Inbound-Prozess beeinflussen. Die Stellgrößen der Inbound-Logistik sind die Belieferungs- und Transportkonzepte sowie der Einsatz von Flexibilisierungsmaßnahmen, durch die die Umstellung der

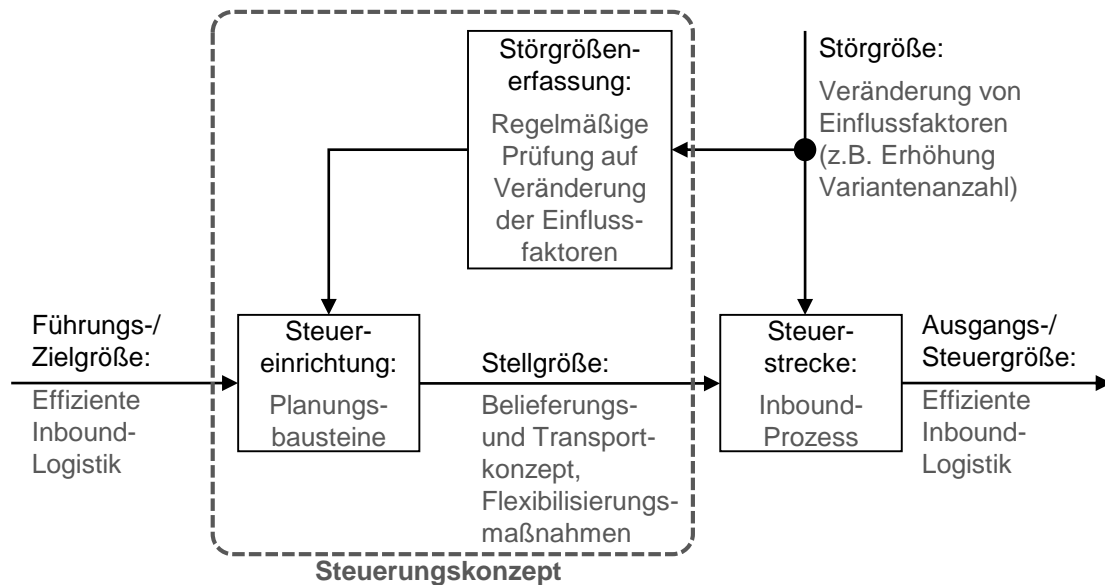


Abbildung 3-2: Wirkungsablauf zur Steuerung der Inbound-Logistik

Logistikkonzepte begünstigt wird. Das Steuerungskonzept für eine flexibel konfigurierbare Inbound-Logistik umfasst somit die Störgrößenerfassung sowie die durch die Steuereinrichtung zu bestimmende Stellgröße.

Da der Begriff Steuerung aus dem Gebiet der Regelungstechnik stammt, ist eine Abgrenzung zum Begriff Regelung an dieser Stelle sinnvoll. Regelung bezeichnet die Steuerung in einem geschlossenen Wirkungskreis [Lun-2013, S. 10]. Bei einem geschlossenen Wirkungskreis wird die durch die Stellgröße beeinflusste Ausgangsgröße eines Systems permanent erfasst und mit der Führungsgröße verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs wird die Stellgröße ggf. angepasst, um eine Angleichung der Ausgangsgröße an die Führungsgröße zu erzielen [DIN IEC 60050-351, S. 136; Lun-2013, S. 10]. Ähnlich diesem permanenten Ist-Soll-Vergleich bei der Regelung wird beim Konzept des Monitorings verfahren. Unter Monitoring wird allgemein die „systematische Erfassung, Beobachtung oder Überwachung eines Vorgangs oder Prozesses mit technischen Hilfsmitteln“ [Möh-2009, S. 75] verstanden. Folglich besteht die Aufgabe des Monitorings darin, Soll-Ist-Abweichungen mittels monetärer und nicht monetärer Kennzahlen innerhalb von Geschäftsprozessen zu bestimmen [Wil-2004, S. 80]. Für das SCM bedeutet das die Erfassung wesentlicher Kennzahlen (z. B. Bestände und Durchlaufzeiten), um damit die Prozesse entlang der Lieferkette managen zu können [ten-2008, S. 281]. Aufgrund der bestehenden Ähnlichkeit zwischen Monitoring und Regelung werden in der Literatur diese beiden Konzepte miteinander verknüpft (vgl. z. B. [Obo-2014]). In dieser Arbeit wird eine Steuerung und keine Regelung angestrebt, da kein Soll-Ist-Vergleich der Ausgangsgröße mit der Führungsgröße erfolgt. Denn dazu

müsste ein Vergleich der Ist-Kosten mit den Soll-Kosten der Inbound-Logistik erfolgen. Die Inbound-Logistikkosten hängen jedoch von vielen verschiedenen Faktoren ab (z. B. Anzahl produzierter Einheiten, nachgefragter Fahrzeugvarianten, Transportbündelungen, etc.), so dass eine plausible Schätzung des Soll-Wertes oftmals schwierig ist.

Flexibilität spielt bei dem Steuerungskonzept eine entscheidende Rolle. Denn nur wenn der Inbound-Prozess hinreichend flexibel ist, wird sich eine Umstellung der Belieferungs- und Transportkonzepte lohnen. Entsprechend ist die Entscheidung, ob in Flexibilisierungsmaßnahmen zu investieren ist, Bestandteil der zu bestimmenden Stellgröße. D. h. Flexibilität wird benötigt, damit eine wirtschaftliche Umstellung von Belieferungs- und Transportkonzepten möglich ist. Dieser Betrachtungsumfang ist abzugrenzen vom Flexibilitätsmanagement, welches sich allgemein mit der Ausgestaltung von Flexibilität in Systemen beschäftigt [Hoc-2004, S. 26; Nag-2003, S. 17]. Dies umfasst die Ermittlung von Flexibilitätsbedarfen und Flexibilitätspotenzialen. Wenn die Potenziale ausreichen, um die Bedarfe zu decken, so werden diese genutzt, um den angestrebten Flexibilitätsgrad zu erreichen [Pfe-2016, S. 26]. Während Flexibilitätsmanagement das übergeordnete Ziel verfolgt, das ausreichende Maß an Flexibilität zu bestimmen und zu implementieren [Dam-2002, S. 39], ist das primäre Ziel des Steuerungskonzeptes die Inbound-Logistik effizient zu konfigurieren. Falls dazu Flexibilisierungsmaßnahmen erforderlich sind, so werden diese verwendet, ohne dass ein Flexibilitätsgrad bestimmt oder das Delta zwischen Soll- und Ist-Flexibilität ermittelt wird.

### **3.2.2 Planungsbausteine als Steuereinrichtung**

Nachdem die Wirkungsweise des Steuerungskonzeptes der Inbound-Logistik beschrieben wurde, folgt nun die Detaillierung des Steuerungskonzeptes. Für eine effektive Steuerung ist die korrekte Planung eine wichtige Grundlage [Kle-2011, S. 2]. So kann mit Hilfe der Planung beispielsweise die optimale Konfiguration eines Systems bestimmt werden [Sch-2008b, S. 122]. Im Deutschen wird unter dem Verb „planen“ das Aufstellen eines Konzeptes oder die Erstellung eines Planes verstanden [Dud-2017b]. Allgemein wird Planung als „ein von Planern auf der Grundlage (zumeist) unvollkommener Informationen durchgeführter, grundsätzlich systematischer und rationaler Prozess zur Lösung von Entscheidungsproblemen unter Beachtung subjektiver Zielvorstellungen“ definiert [Kle-2011, S. 2]. Anders ausgedrückt, trifft Planung antizipierende Entscheidungen über zukünftige Zeitabschnitte unter der Berücksichtigung bestimmter Vorgaben, um wirtschaftliches Handeln sicherzustellen. Aufgrund unvollkommener Informationen ist Planung mit einer gewissen Unsicherheit über zukünftige Entwicklungen behaftet. D. h., sobald unerwartete Störungen auftreten,

sind reaktive und situative Entscheidungen zu treffen, um die Wirtschaftlichkeit weiterhin sicherzustellen [Bar-2011, S. 123 f.; Ada-1993, S. 20 ff.]. Aufgrund dieses Zusammenhangs zwischen Planung und Steuerung setzt sich die Steuereinrichtung des beschriebenen Steuerungskonzeptes aus drei Planungsbausteinen zusammen. Das Zusammenwirken der Planungsbausteine ist in Abbildung 3-3 anhand eines Entscheidungsbaums dargestellt.

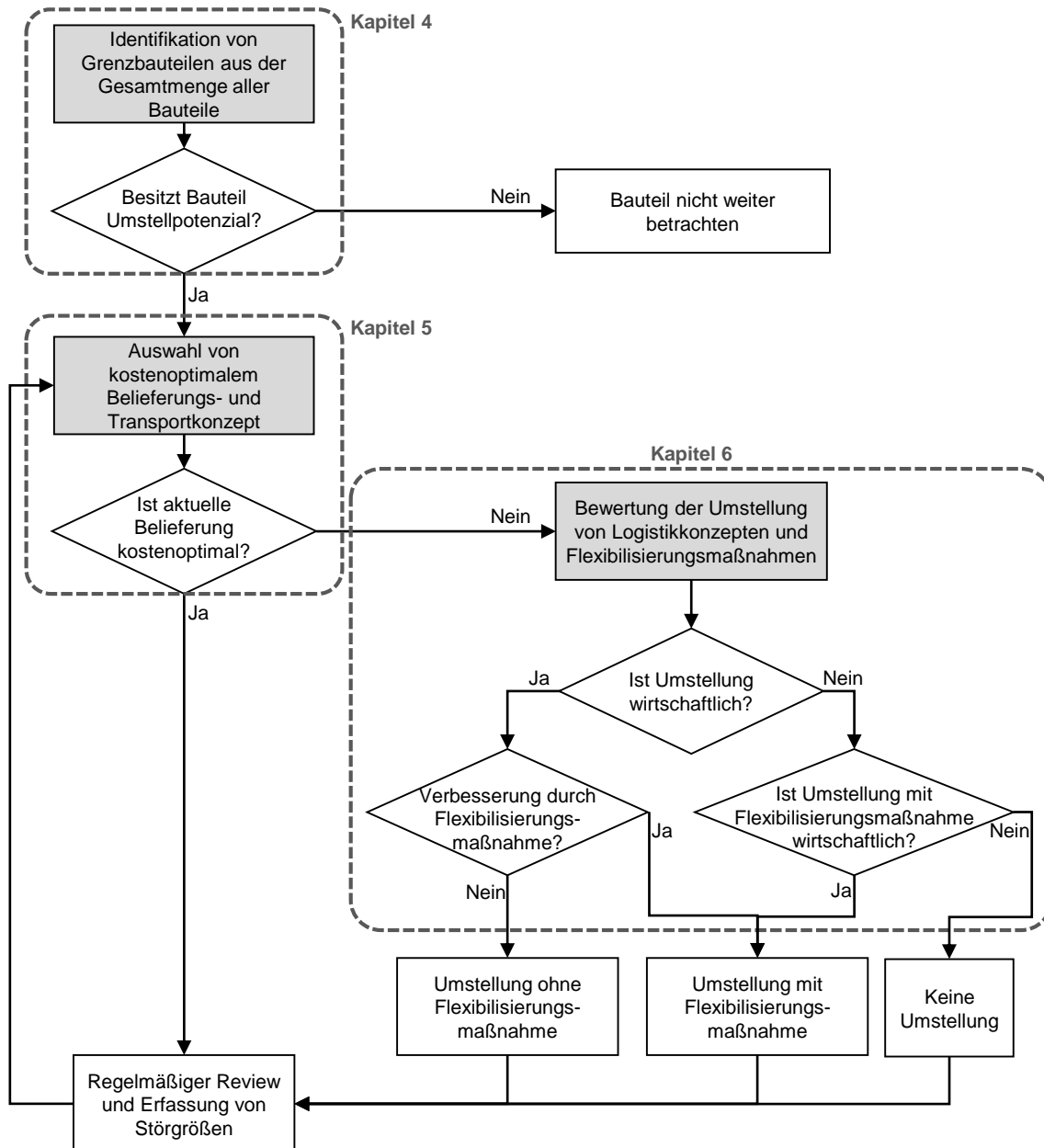


Abbildung 3-3: Planungsbausteine des Steuerungskonzeptes

Das Steuerungskonzept betrachtet zu Beginn alle Bauteile, die benötigt werden, um ein Fahrzeug zu produzieren. Im ersten Schritt sind aus dieser Gesamtmenge diejenigen Bauteile zu identifizieren, bei denen Umstellpotenzial (z. B. aufgrund von veränderten Einflussfaktoren – sprich Störgrößen im Wirkungsablauf) vorliegt. Umstellpotenzial bedeutet, dass



die Verwendung von anderen Logistikkonzepten unter Umständen effizienter ist. Bauteile mit Umstellpotenzial werden als Grenzbauteile bezeichnet. Für Grenzbauteile sollte regelmäßig geprüft werden, ob sich deren Einflussfaktoren so verändern, dass eine Umstellung der Logistikkonzepte erforderlich wird. Die Identifikation von Grenzbauteilen mit Umstellpotenzial entspricht dem ersten Planungsbaustein des Steuerungskonzeptes (vgl. Kapitel 4) und beantwortet die erste Forschungsfrage.

Im zweiten Planungsbaustein erfolgt die kostenoptimale Auswahl vom Belieferungs- und Transportkonzept für die ermittelten Grenzbauteile (vgl. Kapitel 5). Dieser Planungsbaustein beantwortet somit die zweite Forschungsfrage. Nach der Bestimmung der optimalen Konzepte wird geprüft, ob die aktuell verwendeten den optimalen Logistikkonzepten entsprechen. Falls dem so ist, werden Veränderungen der Einflussfaktoren dieser Bauteile regelmäßig geprüft und die kostenoptimale Logistikkonzeptauswahl wird bei einer Störgrößenerfassung wiederholt. Die auftretenden Veränderungen dienen somit als Auslöser für die Überprüfung der Eignung der Logistikkonzepte (vgl. Störgrößen und Störgrößenerfassung in Abbildung 3-2).

Entsprechen die aktuell verwendeten Logistikkonzepte nicht den kostenoptimalen Logistikkonzepten, ist zu prüfen, ob eine Umstellung auf die optimalen Logistikkonzepte wirtschaftlich ist. Stellt sich heraus, dass die Umstellung wirtschaftlich ist, wird im nächsten Schritt geprüft, ob die Umstellung bei dem Einsatz von Flexibilisierungsmaßnahmen (d. h. Maßnahmen, die mit initialer Investition die Kosten und Dauern von Umstellungen reduzieren) noch vorteilhafter wird. Falls dem so ist, erfolgt die Umstellung zu den optimalen Logistikkonzepten inklusive der Umsetzung der Flexibilisierungsmaßnahme. Andernfalls erfolgt lediglich die Umstellung ohne die Flexibilisierungsmaßnahme. Ist die Umstellung grundsätzlich nicht wirtschaftlich, wird im nächsten Schritt geprüft, ob die Umstellung durch die Einsatz einer Flexibilisierungsmaßnahme wirtschaftlich wird. Falls ja, wird die Umstellung mit der Flexibilisierungsmaßnahme realisiert. Falls nein, erfolgt keine Umstellung. Jeder der beschriebenen Fälle endet in der regelmäßigen Störgrößenerfassung. Der dritte Planungsbaustein wird in Kapitel 6 erarbeitet.



## 4 Identifikation von Grenzbauteilen mit Umstellpotenzial

Dieses Kapitel dient der Erarbeitung des ersten Planungsbausteins. Ziel ist die Identifikation von Bauteilen, die Umstellpotenzial bezüglich der Logistikkonzepte aufweisen. Die Identifikation solcher Bauteile spielt eine wichtige Rolle im Steuerungskonzept: Aufgrund der Vielzahl an Fahrzeugvarianten und der Komplexität eines Fahrzeugs, ist die Anzahl an Sachnummern (SNRs) an einem Produktionsstandort häufig sehr groß<sup>4</sup>. Bei einem Nutzfahrzeughersteller in München sind beispielsweise über 15.000 SNRs systemisch registriert [Maa-2016, S. 5]. Somit lässt sich weder für jede SNR einzeln die Effizienz der Inbound-Logistik regelmäßig überprüfen, noch kann die Inbound-Logistik für so viele SNRs permanent neu konfiguriert werden. Damit die Anwendbarkeit des Steuerungskonzeptes gewährleistet werden kann, müssen daher die wesentlichen Bauteile fokussiert werden.

Die Grundidee der Identifikationsmethode besteht darin, anhand bestimmter Einflussfaktoren und ihrer Grenzwerte diejenigen SNRs offenzulegen, die potenziell der falschen Belieferungsform zugeordnet sind oder die nicht eindeutig einer Belieferungsform zugeordnet werden können. Der Beschaffungsaufwand der benötigten Daten für eine detaillierte Betrachtung von Transport- und Belieferungskonzepten sämtlicher SNRs wird in der Praxis als hoch eingeschätzt. Entsprechend wird zunächst eine Grob- und anschließend eine Detailbetrachtung durchgeführt. In diesem Planungsbaustein geht es somit um eine erste Eingrenzung der SNRs. Dazu wird nur zwischen lagerhaltiger und lagerloser Belieferung unterschieden. Im zweiten Planungsbaustein – der kostenoptimalen Auswahl der Logistikkonzepte – findet eine detailliertere Betrachtung der Inbound-Logistik statt (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Identifikationsmethode soll Antworten auf folgende Fragen liefern:

- Ab welchen Grenzwerten der verschiedenen Einflussfaktoren ist eine lagerlose bzw. eine lagerhaltige Belieferung anzustreben?
- Welche Bauteile können nicht eindeutig der lagerlosen oder lagerhaltigen Belieferung zugeordnet werden?
- Welche Bauteile sind laut Grenzwerten der falschen Belieferungsform zugeordnet?
- Welche Bauteile sind laut Grenzwerten aktuell der richtigen Belieferungsform zugeordnet, was sich jedoch bei einer Veränderung der Einflussfaktoren wandeln kann?

---

<sup>4</sup> Eine SNR ist eine eindeutige numerische Codierung zur Kennzeichnung von Bauteilen. Die einzelnen Bestandteile der verwendeten Zahlenfolgen von SNRs sind häufig so definiert, dass Rückschlüsse auf bestimmte Eigenschaften der Bauteile möglich sind. Beispielsweise können die ersten Ziffern einer SNR angeben, ob es sich um Prototypen- oder Serienbauteile handelt und die letzten Ziffern können die Varianten von Bauteilen (z. B. Bauteilfarbe, schmales oder breites Bauteil, etc.) kennzeichnen [Bop-2013b, S. 261]. Die Anzahl an SNRs eines Produktionsstandortes ist somit weitaus größer als die Anzahl an Bauteilen, aus denen ein Fahrzeug besteht, da alle Bauteilausprägungen in einer SNR-Liste enthalten sind.

Aus diesen Fragen ergibt sich folgende Definition für ein Grenzbauteil:

#### **Definition Grenzbauteil**

*Ein Grenzbauteil ist ein Bauteil, das aufgrund bestimmter Einflussfaktorausprägungen nicht eindeutig der lagerlosen oder lagerhaltigen Belieferung zugeordnet werden kann, das basierend auf den ermittelten Grenzwerten aktuell in der falschen Belieferungsform angeliefert wird und/oder dessen Belieferungskonzeptwahl eine hohe Sensitivität gegenüber Änderungen der Einflussfaktoren aufweist. Daher wird bei einem Grenzbauteil Umstellpotenzial bzgl. des verwendeten Logistikkonzeptes vermutet.*

Das Ergebnis dieses Planungsbausteins ist zweigeteilt: Zum einen liefert die Methode eine Liste von Grenzbauteilen, die in den folgenden Planungsbausteinen detailliert hinsichtlich der flexiblen Umstellung der Logistikkonzepte untersucht werden. Zum anderen gibt die Methode konkrete Grenzwerte je Einflussfaktor aus, die eine Entscheidungsgrundlage für die Wahl zwischen einer lagerhaltigen und einer lagerlosen Belieferung bilden. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf die Veröffentlichung von *Maas et al.* sowie auf durch die Autorin angeleitete Studienarbeiten [Maa-2016; fml-2016a; fml-2017a].

### **4.1 Anforderungen an die Identifikationsmethode**

Durch die Anforderungsdefinition wird sichergestellt, dass die Methodenentwicklung nicht nur ziel- und ergebnisgerichtet ist, sondern auch dass alle relevanten Aspekte berücksichtigt werden. Die im Folgenden erläuterten Anforderungen sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

*Tabelle 4-1: Anforderungen an die Methode zur Identifikation von Bauteilen mit Umstellpotenzial*

- 
- A1.1.** Multidimensionale Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren
  - A1.2.** Datenbasierte Bestimmung der Grenzwerte
  - A1.3.** Analytische Identifikation der Grenzbauteile
  - A1.4.** Aufwandsarme Wiederholbarkeit der Methode
  - A1.5.** Erweiterbarkeit um weitere Einflussfaktoren
- 

**A1.1. Multidimensionale Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren:** Wie bereits in Kapitel 2.4.1 beschrieben, betrachten klassische Materialklassifikationsansätze zwei bis drei Einflussfaktoren. *Bankhofer* kritisiert, dass für die Festlegung von Belieferungsstrategien neben dem Bedarfswert und den Bedarfsschwankungen auch andere Einflussfaktoren relevant sind. Entsprechend sollten mehrere Kriterien gleichzeitig berücksichtigt werden

[Ban-1999, S. 923]. Dabei ist darauf zu achten, dass die betrachteten Einflussfaktoren für die Zielsetzung relevant sind, um die Analyse nicht unnötig komplex zu gestalten.

**A1.2. Datenbasierte Bestimmung der Grenzwerte:** In der Literatur werden vornehmlich Tendenzaussagen dazu getroffen, unter welchen Umständen welche Belieferungsstrategie zu verwenden ist (vgl. Tabelle 2-6 in Kapitel 2.4.2). Beispielsweise wird eine JIS-Belieferung empfohlen, wenn besonders viele Varianten eines Bauteils vorliegen [Wag-2011, S. 5716 f.]. Eine konkrete Mindestanzahl an Varianten wird jedoch nicht genannt. Ebenso wenig existieren Ansätze, mit deren Hilfe Grenzwerte bestimmt werden können, um die Materialklassifikation durchzuführen. Zusätzlich sind Grenzwerte für die Erfassung von Veränderungen der Einflussfaktoren hilfreich. Daher ist es erforderlich Grenzwerte aus unternehmensspezifischen Daten je Einflussfaktor zu ermitteln.

**A1.3. Analytische Identifikation der Grenzbauteile:** Mit Hilfe der datenbasierten Grenzwerte soll ein analytisches Verfahren für die Bestimmung der Grenzbauteile entwickelt werden. Das bedeutet, dass dem Verfahren ein definiertes Vorgehen mit transparenter Berechnungslogik zugrunde zu legen ist. Durch diese Anforderung wird sichergestellt, dass der aktuelle Forschungsstand, der vornehmlich Tendenzaussagen umfasst, erweitert wird.

**A1.4. Aufwandsarme Wiederholbarkeit der Methode:** Zusätzlich soll die Identifikationsmethode ohne großen Aufwand wiederholbar sein. Die kürzer werdenden Produktlebenszyklen und die steigende Variantenvielfalt (vgl. Kapitel 1) führen dazu, dass sich die Grundgesamtheit der SNR eines Produktionsstandortes ebenfalls permanent verändert, was sich auf die identifizierten Grenzbauteile auswirken kann. Daher sollte die Identifikationsmethode in regelmäßigen Abständen angewendet werden können, was nur realisierbar ist, wenn die Anwendung der Methode aufwandsarm gestaltet ist.

**A1.5. Erweiterbarkeit um weitere Einflussfaktoren:** Die letzte Anforderung knüpft an die allgemeine Adaptierbarkeitsanforderung A4 des gesamten Steuerungskonzeptes an. Der Anspruch der Identifikationsmethode liegt darin, die wichtigsten Einflussfaktoren aus Literatur und Praxis zu berücksichtigen. Um jedoch unternehmensspezifische Eigenheiten und Besonderheiten abbilden zu können, soll die Identifikationsmethode um zusätzliche Einflussfaktoren erweiterbar sein.

## 4.2 Systematische Bestimmung der relevanten Einflussfaktoren

Um Anforderung A1.1 gerecht zu werden, sind in einem ersten Schritt die relevanten Einflussfaktoren zu bestimmen. Das in Abbildung 4-1 veranschaulichte Vorgehen zur systematischen Ermittlung dieser Einflussfaktoren gliedert sich in drei Schritte. Im ersten Schritt werden die verschiedenen Einflüsse auf die Effizienz der Inbound-Logistik identifiziert und in einer Gesamtliste gesammelt. Um die verschiedenen Einflüsse in konkrete Einflussfaktoren zu überführen, werden im zweiten Schritt Eigenschaften ermittelt, mit deren Hilfe sich die Einflüsse klassifizieren und strukturieren lassen. Im dritten Schritt werden die Ausprägungen der Eigenschaften festgelegt, welche für die Identifikation von Grenzbauteilen erforderlich sind. Dadurch kann die große Anzahl an Einflüssen auf eine überschaubare Menge an Einflussfaktoren reduziert werden. Die ermittelten Einflussfaktoren bilden im weiteren Verlauf der Datenanalyse die Grundlage zur Identifikation der Grenzbauteile.

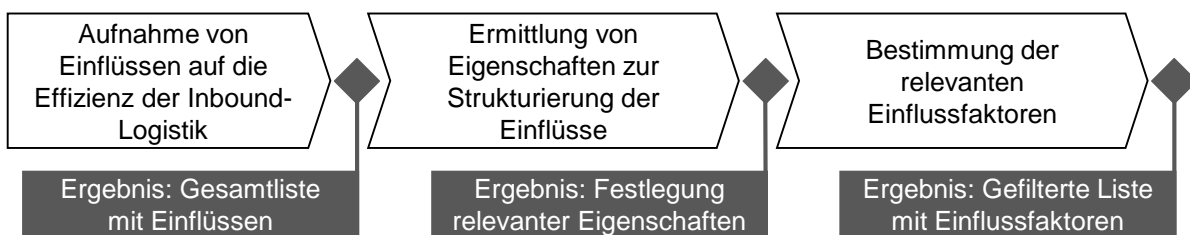


Abbildung 4-1: Vorgehen zur Ermittlung der relevanten Einflussfaktoren

### 4.2.1 Aufnahme von Einflüssen auf die Effizienz der Inbound-Logistik

Um relevante Einflussfaktoren zu bestimmen, werden zunächst Einflüsse auf die Effizienz der Inbound-Logistik gesammelt. Dadurch werden nicht nur die Einflussfaktoren identifiziert, die bereits von anderen Autoren für die Auswahl von Belieferungskonzepten genannt werden (z. B. Bedarfswert oder Bedarfsschwankungen), sondern es können zusätzliche Einflussfaktoren offengelegt werden. Ziel ist es, ein möglichst breites Spektrum an Einflüssen abzubilden, um daraus die wesentlichen Einflussfaktoren ableiten zu können.

Für die Identifikation von Einflüssen bieten sich Literaturrecherchen sowie Befragungen von Logistikexperten aus der Industrie an [Özs-2012, S. 610]. Eine große Anzahl an Einflüssen sind verschiedenen Grundlagenwerken der Logistik zu entnehmen, wie z. B. den Werken von *Gudehus*, *Schulte* oder *Klug* [Gud-2005; Klu-2010; Sch-2017b]. Zusätzliche Einflüsse entsprechen den Kriterien zur qualitativen Auswahl von Belieferungskonzepten (vgl. Tabelle 2-6 in Kapitel 2.4.2), wie z. B. in den Werken von *Thun et al.* oder *Wildemann* oder in der

*VDA-Empfehlung 5010* beschrieben [Thu-2007; Wil-2001; VDA 5010]. Die Befragung von Logistikexperten bezieht sich auf die Studie von *Maas und Fottner*, welche von Februar bis Mai 2016 durchgeführt wurde [Maa-2017a, S. 19]. Zudem wurden persönliche Expertengespräche bei einem OEM geführt [fml-2016a, S. A-4, A-5; fml-2016d, S. 65 ff.].

Nachdem Doppelungen aufgrund unterschiedlicher Bezeichnungen bei den identifizierten Einflüssen eliminiert wurden, ergibt sich aus der Recherche eine Liste mit 86 Einflüssen. Diese Einflüsse sind zur Strukturierung verschiedenen Kategorien zugeordnet – bestehend aus den Abschnitten der Lieferkette (d. h. Lieferanten, Inbound-Prozess, Inhouse-Prozess, Produktionsprozess, Kunden) sowie aus bauteilspezifischen und produktionsstandortspezifischen Eigenschaften. Die gesamte Liste der Einflüsse mit den Zuordnungen zu den Kategorien ist in Tabelle A-1 im Anhang A aufgeführt.

Im Folgenden werden exemplarische Einflüsse der verschiedenen Kategorien kurz erläutert. Durch Lieferanten verursachte Einflüsse sind z. B. die Sourcing-Strategie oder die Mindestbestellmenge. Mindestbestellmenge bedeutet, dass eine vertraglich festgelegte Mindestmenge an Bauteilen bei einem Bestellvorgang vom Kunden abzunehmen ist. Eine Mindestbestellmenge wirkt sich somit auf die Auslastung der Transporte sowie die Lagerbestände aus, sodass die Effizienz der Inbound-Logistik betroffen ist. Die Sourcing-Strategie besitzt insofern einen Einfluss, als dass es für die Belieferung einen Unterschied macht, ob ein Bauteil aus Übersee oder aus der umliegenden Region und von einem oder mehreren Lieferanten bezogen wird. Einflüsse, die im Inbound-Prozess entstehen, sind z. B. Transportkosten und -zeiten. Wenn sich Tarifstrukturen und -modelle der Spediteure ändern oder wenn sich die Transportzeiten aufgrund eines hohen Verkehrsaufkommens verlängern, wirkt sich das auf die Effizienz der Inbound-Logistik aus. Die Einflüsse des Inhouse-Prozesses umfassen vor allem Bestandskennzahlen (z. B. Bestandsmenge, Bestandsreichweite, Bestandswert). Hier stellt der Trade-Off zwischen Transport- und Bestandskosten den wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der Inbound-Logistik dar. Aus dem Produktionsprozess resultieren Einflüsse wie die Taktzeit der Montage oder die Stabilität der Auftragsreihenfolge (in der Automobilindustrie auch unter dem Begriff *Perlenkette*<sup>5</sup> bekannt). Eine Verkürzung der Taktzeit kann beispielsweise in einer Steigerung der Bestellfrequenz resultieren. Bei einer hohen Stabilität der Auftragsreihenfolge ist es möglich JIS-Belieferungen auf längeren Transportdistanzen durchzuführen, sodass die Effizienz des Inbound-Prozesses wiederum betroffen ist. Durch den Endkunden erzeugte Ein-

---

<sup>5</sup> Für detailliertere Ausführungen zum Perlenkettenkonzept sei an dieser Stelle z. B. auf die Werke von *Weyer, Meißner, Klug* und *Copaci* verwiesen [Wey-2002; Klu-2010, S. 388 ff.; Cop-2013, S. 41 ff.; Mei-2009, S. 28 ff.].

flüsse sind beispielsweise die Nachfrageschwankungen und Nachfragemengen. Bauteilspezifische Eigenschaften, wie das Bauteilvolumen oder -gewicht, haben ebenfalls einen Einfluss auf die Inbound-Effizienz, da dadurch die Auslastungsgrade der Transporte beeinflusst werden. Produktionsstandortspezifische Eigenschaften beziehen sich vor allem auf die Infrastruktur des Produktionswerkes des OEM. Restriktionen wie z. B. Flächenknappheit resultieren darin, dass Materialien vermehrt in vorgelagerten Stufen der SC zwischengepuffert werden, wodurch ein Effekt auf die Effizienz der Inbound-Logistik entsteht.

#### 4.2.2 Charakterisierung der Einflüsse

Es wird deutlich, dass viele Einflüsse auf die Effizienz der Inbound-Logistik wirken. Um die für eine Logistikkonzeptumstellung relevanten Einflussfaktoren zu ermitteln, werden in diesem Abschnitt Eigenschaften zur Charakterisierung der Einflüsse definiert. Dadurch können anschließend die relevanten Einflussfaktoren gefiltert werden. Für die Charakterisierung der Einflüsse wird auf vier Eigenschaften zurückgegriffen, die in ähnlicher Form in der Literatur bereits verwendet werden (vgl. [Wer-2004, S. 118 f.; Sch-2008a, S. 13]). In Tabelle 4-2 sind diese Eigenschaften mit einer Beschreibung und ihren Ausprägungen zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Eigenschaften zur Strukturierung der Einflüsse

Eigenschaft	Beschreibung	Ausprägungen
<b>Einflussart</b>	Einflüsse können eine direkte oder eine indirekte Auswirkung auf den Betrachtungsgegenstand haben. Indirekte Einflüsse sind z. B. auf das Marktumfeld oder die Unternehmensstrategie zurückzuführen [Sch-2008a, S. 13] und wirken nur über andere direkte Einflüsse.	direkt, indirekt
<b>Bedeutsamkeit</b>	Einflüsse können für den Betrachtungsgegenstand von unterschiedlich großer Bedeutung sein. Einflussfaktoren mit einem signifikanten Zusammenhang zum Zielkriterium können für die untersuchte Fragestellung eine hohe Bedeutung aufweisen [Wer-2004, S. 118].	hoch, mittel, gering
<b>Messbarkeit</b>	Einflüsse können quantitativ messbar (gut) oder qualitativ beschreibbar (gering) sein. Der Aufwand der Datenerfassung messbarer Einflussfaktoren sollte verhältnismäßig sein [Wer-2004, S. 118] – ansonsten ist die Messbarkeit mittelmäßig.	hoch, mittel, gering
<b>Veränderungshäufigkeit</b>	Die Automobillogistik ist stetigen Veränderungen ausgesetzt (vgl. Kapitel 1.1), weshalb die Veränderbarkeit als Eigenschaft von Einflüssen fungiert. Einflüsse verändern sich i. d. R. über den Zeitverlauf und lassen sich somit anhand Veränderungsfrequenz charakterisieren.	häufig, mittel, selten



Für alle identifizierten Einflüsse wurden die Ausprägungen dieser vier Eigenschaften bestimmt (vgl. Tabelle A-1 im Anhang A). Beispielsweise besitzt das Bauteilgewicht einen direkten Einfluss, da es das Frachtgewicht definiert. Die Bedeutsamkeit vom Bauteilgewicht ist hoch, da ein starker Zusammenhang zwischen dem Gewicht und dem Inbound-Transport besteht. Die Transportmenge wird häufig durch das frachtpflichtige Gewicht einer Lieferung reglementiert, sodass das Gewicht eines einzelnen Bauteils eine Auswirkung auf die Transportmenge besitzen kann. Die Messbarkeit des Bauteilgewichts ist gut, da für jedes Bauteil i. d. R. das entsprechende Gewicht systemisch erfasst ist. Die Veränderungshäufigkeit ist mittel, da sich das Bauteilgewicht nicht wöchentlich ändert, sondern eher in einem Jahreshorizont, z. B. wenn ein neues Fahrzeugmodell eingeführt wird. Das Bauteilgewicht kann sich dann beispielsweise durch den Einsatz leichterer Werkstoffe reduzieren.

### 4.2.3 Bestimmung der relevanten Einflussfaktoren

Nachdem für alle Einflüsse die Ausprägungen der vier Eigenschaften festgelegt wurden, sind nun diejenigen Ausprägungen festzulegen, welche für die Identifikation der Grenzbauerteile erforderlich sind (z. B. häufige, mittlere oder seltene Veränderungshäufigkeit). Einflüsse, die sich durch die Eigenschaften direkte Einflussart, hohe Bedeutsamkeit, gute Messbarkeit, häufige und mittlere Veränderungshäufigkeit charakterisieren lassen, sind für die Wahl und das Umstellpotenzial von Belieferungskonzepten relevant [Maa-2016, S. 4]. Die ersten drei Ausprägungen beziehen sich vornehmlich auf die Wahl des Belieferungskonzeptes. Die häufige bis mittlere Veränderungshäufigkeit wirkt insbesondere auf das Umstellpotenzial, da bei einer Veränderung der Einflüsse das aktuell verwendete Logistikkonzept möglicherweise nicht mehr das effizienteste ist (vgl. Kapitel 1.1). Im Folgenden wird diese Wahl der Ausprägungen der vier Eigenschaften erläutert.

Direkte Einflüsse sind beispielsweise das Bauteilgewicht oder das Bauteilvolumen. Transportkosten hingegen haben nur einen indirekten Einfluss auf die Effizienz des Inbound-Prozesses, da sie aus der Kombination anderer Einflüsse, z. B. der Entfernung zum Lieferanten und der transportierten Menge, resultieren. Die Entfernung zum Lieferanten ist dabei ebenfalls ein indirekter Einfluss. Die Entfernung ergibt sich vom Auslieferstandort des Lieferanten und der Lieferant wird wiederum durch die Beschaffung festgelegt.

Einflüsse mit hoher Bedeutsamkeit wirken maßgeblich auf die Entscheidung des Logistikplaners hinsichtlich der Belieferungskonzeptauswahl. Entsprechend wurden alle in Tabelle 2-6 (vgl. Kapitel 2.4.2) und in der Studie von *Maas und Fottner* [Maa-2017a, S. 35 f.] aufgeführten Einflussfaktoren mit einer hohen Bedeutung charakterisiert. Dabei können

Einflüsse zwar eine hohe Bedeutung besitzen, gleichzeitig aber nur indirekt wirken. Ein Beispiel hierfür sind werksspezifische Restriktionen, wie z. B. Flächenkapazitäten.

Die gute Messbarkeit der Einflüsse ist wichtig, damit die Grenzwerte datenbasiert bestimmt und die Bauteilidentifikation analytisch erfolgen kann (vgl. Anforderung A1.2 und A1.3). Eine gute Messbarkeit ist dann gegeben, wenn Daten nicht nur für einzelne SNRs, sondern für alle SNRs verfügbar sind. Beispielsweise kann der Einfluss Trailerreichweite<sup>6</sup> nur für lagerlos angelieferte Bauteile systemisch ermittelt werden. Für lagerhaltige Bauteile müsste die Trailerreichweite kalkulatorisch und manuell berechnet werden. Der Rechenaufwand ist bei der großen Menge an SNR an einem Produktionsstandort zu hoch, sodass die Trailerreichweite nur eine mittlere Messbarkeit aufweist. Ein Beispiel für eine gute Messbarkeit ist der Bedarf an einer SNR, da für jede SNR der Tagesbedarf systemisch vorliegt.

Die häufige und mittlere Veränderungshäufigkeit ist wichtig, um Bauteile identifizieren zu können, deren Belieferungskonzeptauswahl von auftretenden Veränderungen betroffen ist. Eine häufige und mittlere Veränderungshäufigkeit spiegelt zudem den kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont von Flexibilität wider. Einflüsse, die sich selten bis gar nicht ändern, sind z. B. die Verkehrsinfrastruktur oder spezielle Bauteilcharakteristika (z. B. Gefahrgüter). Einflüsse wie Bedarfe oder Transportvolumina können sich hingegen häufig und Einflüsse wie Lieferantentfernung und Bauteilwert können sich mittelfristig verändern.

Die gesamte Liste mit den 86 Einflüssen (vgl. Tabelle A-1) wird nach beschriebenen Ausprägungen der Eigenschaften gefiltert. Das Ergebnis sind sechs Einflüsse, die im Folgenden als *relevante Einflussfaktoren* bezeichnet werden. Diese Einflussfaktoren sind in Tabelle 4-3 aufgeführt. Eine zusätzliche Eigenschaft, die alle sechs Einflussfaktoren aufweisen, ist das metrische Skalenniveau (vgl. Kapitel 2.4.1.2.).

Tabelle 4-3: *Relevante Einflussfaktoren für die Grenzbauteilidentifikation*

Kategorie	<i>i</i>	Einflussfaktor	Einheit
Bauteil	1	Bauteilgewicht	in kg
Bauteil	2	Bauteilvolumen	in m <sup>3</sup>
Bauteil	3	Bauteilpreis	in Euro
Bauteil	4	Variantenanzahl	in Stück
Kunden	5	Bedarf	in Stück
Kunden	6	Bedarfsschwankungen	in Prozent

<sup>6</sup> Trailerreichweite entspricht der Anzahl an Tagen, die ein JIS/JIT-Trailer auf dem Werksgelände des OEM verbringt, bis alle Bauteile, die auf diesem Trailer geliefert wurden, verbaut sind.

### 4.3 Entwicklung der Identifikationsmethode für Grenzbauteile

Zunächst werden bestehende Ansätze bewertet (Kapitel 4.3.1) und danach erfolgt die Methodenentwicklung (Kapitel 4.3.2 bis 4.3.4).

#### 4.3.1 Bewertung bestehender Materialklassifikationsansätze

In Kapitel 2.4.1 wurden verschiedene Ansätze zur Materialklassifikation beschrieben. Diese Ansätze werden nun hinsichtlich der Anforderungen aus Kapitel 4.1 bewertet. Die Bewertungsübersicht ist in Tabelle 4-4 dargestellt und wird im Folgenden diskutiert.

Tabelle 4-4: Bewertung bestehender Materialklassifikationsansätze hinsichtlich der Anforderungen

Anforderungen		Klassisch				Multivariat	
		ABC-Analyse	XYZ-Analyse	Kombinierte ABC-XYZ-Analyse	Erweiterte ABC-XYZ-Analyse	Clusteranalyse	SVM
A1.1	Multidimensionalität	○	○	◐	◐	●	●
A1.2	Grenzwerte	○	○	○	○	○	◐
A1.3	Grenzbauteile	◐	◐	◐	◐	◐	◐
A1.4	Wiederholbarkeit	●	●	●	●	●	◐
A1.5	Erweiterbarkeit	○	○	◐	◐	●	●

● voll erfüllt      ◐ halb erfüllt      ◑ teilweise erfüllt      ○ nicht erfüllt

Die ABC- und XYZ-Analyse, die Kombination der beiden Methoden sowie die Erweiterung um eine zusätzliche Dimension bilden die klassischen Materialklassifikationsansätze. Je nach Methode können bis zu drei Einflussfaktoren gleichzeitig betrachtet werden (vgl. Kapitel 2.4.1.1). Darüber hinaus ist eine Erweiterung um zusätzliche Einflussfaktoren nicht möglich. Weiterhin geben diese Methoden keine konkreten Grenzwerte je Einflussfaktor aus, sodass Grenzbauteile nicht direkt ausgewiesen werden können. Mit Hilfe der klassischen Materialklassifikationsansätze erfolgt lediglich eine Zuordnung der Bauteile zu den verschiedenen Belieferungskonzepten. Die Methoden sind – eine gute Datenverfügbarkeit vorausgesetzt – leicht anwendbar und entsprechend aufwandsarm wiederholbar.

Insgesamt erfüllen die multivariaten Klassifizierungsansätze die meisten Anforderungen, wenn auch keine Methode alle Anforderungen vollständig erfüllt. Die Beurteilung zeigt, dass SVM-Verfahren die meisten Anforderungen abdecken. Nicht ganz erfüllt sind die Anforderungen der datenbasierten Bestimmung der Grenzwerte (A1.2), der analytischen Er-

mittlung der Grenzbauteile (A1.3) sowie der aufwandsarmen Wiederholbarkeit (A1.4). Das ist insbesondere auf die für die Anwendung von SVM-Verfahren benötigten Trainingsdaten zurückzuführen: Um SVM-Verfahren anwenden zu können, müsste eine Bauteilliste mit eindeutig und richtig zugeordneten Belieferungskonzepten existieren. Clusteranalyseverfahren besitzen den Vorteil der Multidimensionalität und somit der Erweiterbarkeit um weitere Einflussfaktoren. Datenbasierte Grenzwerte je Einflussfaktor liefert diese Methode allerdings nicht. Das liegt an der explorativen Grundidee der Methode, Datenpunkte mit ähnlichen Eigenschaften zu gruppieren. Für die reine multidimensionale Zuordnung von Bauteilen zu homogenen Bauteilgruppen wären Clusteranalyseverfahren durchaus geeignet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keine der aufgeführten Methoden für die anforderungsgerechte Identifikation der Grenzbauteile vollständig geeignet ist. Dadurch wird der Bedarf zur Entwicklung einer neuen Identifikationsmethode deutlich und die Relevanz der ersten Forschungsfrage verstärkt. Für die Entwicklung der Identifikationsmethode soll auf einzelne Aspekte der bestehenden Ansätze zurückgegriffen werden, um die jeweiligen Vorteile zu nutzen. Der Aufbau der Identifikationsmethode ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

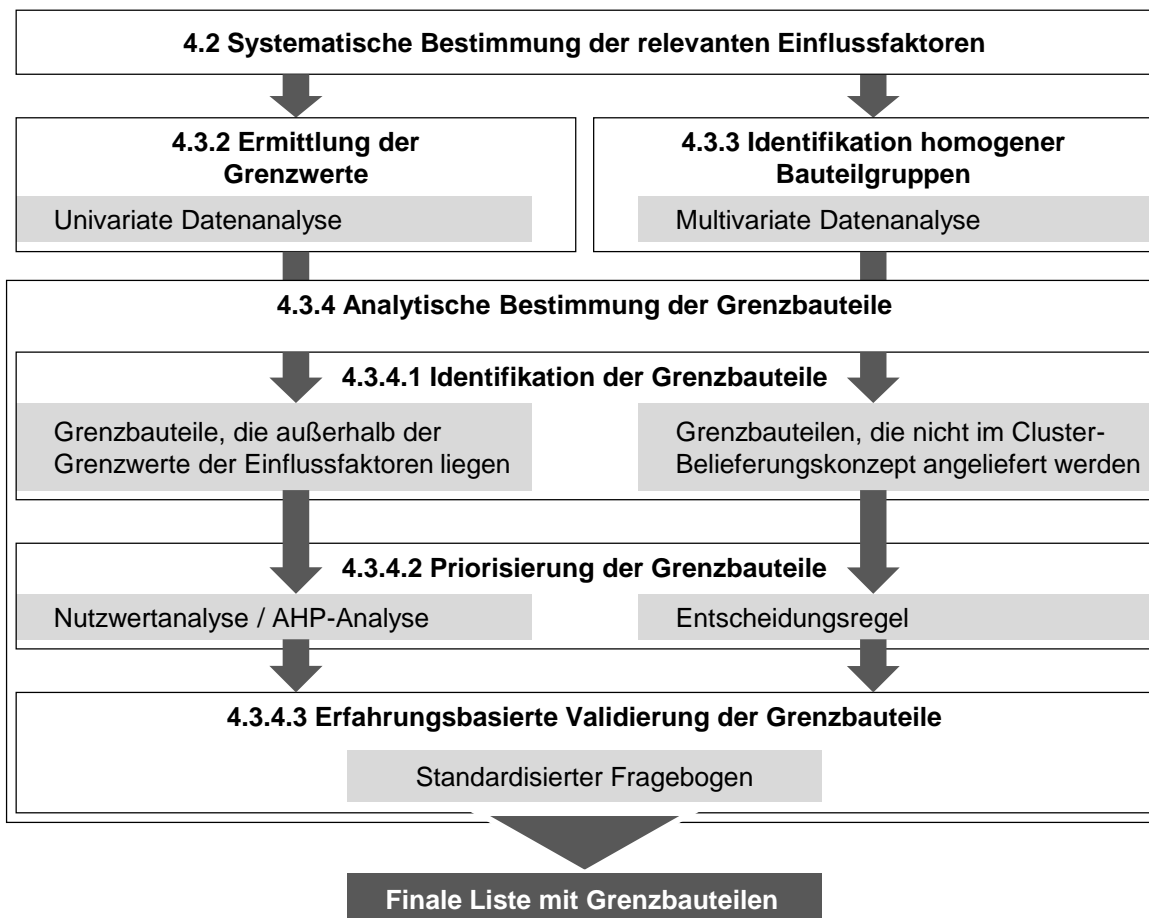


Abbildung 4-2: Zusammenhang der verwendeten Methoden zur Identifikation der Grenzbauteile

Zunächst wurden die relevanten Einflussfaktoren (Bedarf, Bauteilvolumen, Bauteilgewicht, etc.) identifiziert (vgl. Tabelle 4-3 in Kapitel 4.2). Die Einflussfaktoren stellen die Grundlage für die Bestimmung der Grenzwerte (vgl. Kapitel 4.3.2) sowie für die Bildung homogener Bauteilgruppen (vgl. Kapitel 4.3.3) dar. Die Grenzwerte werden je Einflussfaktor mit Hilfe einer univariaten Datenanalyse bestimmt. Univariat bedeutet die Betrachtung der Daten hinsichtlich eines einzelnen Merkmals (vgl. [Han-2010, S. 3]) – jeder Einflussfaktor wird demnach isoliert betrachtet. Die Logik bei der Grenzwertbestimmung basiert auf den Tendenzaussagen aus der Literatur (z. B. bei vielen Varianten sollte lagerlos angeliefert werden). Die Bildung homogener Bauteilgruppen erfolgt mit Hilfe einer multivariaten Datenanalyse – d. h. mehrere Einflussfaktoren werden simultan berücksichtigt. Dazu wird ein Clusteranalyseverfahren angewendet. Ziel der Clusteranalyse ist es, Bauteile mit gleichen Eigenschaften zu Bauteilgruppen zusammenzufassen, sodass möglichst homogene Bauteilgruppen (Cluster) entstehen. Die Verwendung sowohl der univariaten als auch der multivariaten Datenanalyse ist aufgrund der gestellten Anforderungen notwendig: Die univariate Analyse trägt zur Bestimmung konkreter Grenzwerte bei (Anforderung A1.2) und die multivariate Analyse ermöglicht die multidimensionale Betrachtung der Einflussfaktoren (Anforderung A1.1).

In Kapitel 4.3.4 erfolgt die Identifikation der Grenzbauteile. Dazu wird erläutert, wie mit Hilfe der Grenzwerte die univariaten sowie mit Hilfe der homogenen Bauteilgruppen die multivariaten Grenzbauteile ermittelt werden können (vgl. Kapitel 4.3.4.1). Anschließend erfolgt eine Priorisierung der univariaten und multivariaten Grenzbauteile mittels einer Nutzwert- und Analytical Hierarchy Process (AHP)-Analyse bzw. einer Entscheidungsregel (vgl. Kapitel 4.3.4.2). Der letzte Schritt umfasst die Validierung der Grenzbauteile durch einen Logistikexperten basierend auf einem standardisierten Fragebogen (vgl. Kapitel 4.3.4.3). Das Endergebnis der Identifikationsmethode ist eine finale Liste mit Grenzbauteilen.

### **4.3.2 Univariante Ermittlung der Grenzwerte**

Grenzwerte sind Werte je Einflussfaktor, ab denen ein Belieferungskonzept gegenüber einem anderen zu bevorzugen ist. Um die Grenzwerte der einzelnen Einflussfaktoren zu bestimmen, werden zunächst relevante statistische Grundlagen erläutert. Anschließend wird die Grundidee und das Vorgehen zur Berechnung der Grenzwerte beschrieben.

### 4.3.2.1 Statistische Grundlagen für die Grenzwertbestimmung

Ein Datensatz lässt sich mit Hilfe statistischer Kennzahlen beschreiben. Die grundlegenden statistischen Kennzahlen beschreiben die Lage der Daten (z. B. arithmetisches Mittel oder Median) oder die Streuung der Daten (z. B. Standardabweichung) [Mit-2017, S. 61].

**Arithmetisches Mittel.** Das arithmetische Mittel (oder Mittelwert)  $\bar{x}$  ist der durchschnittliche Wert eines Merkmals. Die Berechnung erfolgt, indem die Summe aller Werte  $x_i$  eines bestimmten Merkmals eines Datensatzes durch die Anzahl der Werte  $n$  dividiert wird. Alle Datensätze werden beim arithmetischen Mittel gleich gewichtet [Mit-2017, S. 63]. Die Formel lautet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4-1)$$

**Varianz und Standardabweichung.** Bei der Varianz  $\sigma^2$  und der Standardabweichung  $\sigma$  handelt es sich um Streuungsmaßzahlen. Diese Maßzahlen geben an, wie stark die Werte eines Datensatzes um den Mittelwert streuen. Die Varianz berechnet sich aus der mittleren quadrierten Abweichung vom Mittelwert und die Standardabweichung entspricht der positiven Quadratwurzel aus der Varianz [Hed-2016, S. 89]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (4-2)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4-3)$$

**Median und Quantile.** Der Median  $\tilde{x}$  (oder Zentralwert) stellt den mittleren Wert eines Datensatzes dar. Bei einem der Größe nach geordneten Datensatz entspricht der Median dem Wert, der bei einer ungeraden Anzahl an Werten an der Stelle  $\frac{n+1}{2}$  steht, d. h. der Median entspricht dem Wert  $x_{(\frac{n+1}{2})}$ . Bei einer geraden Anzahl an Werten liegt der Median genau zwischen zwei Werten. Dadurch ergibt sich folgende Fallunterscheidung bei der Berechnung des Medians [Mit-2017, S. 62 f.]:

$$\tilde{x} = q_{0,5} = \begin{cases} x_{(\frac{n+1}{2})}, & \text{wenn } n \text{ ungerade,} \\ \frac{1}{2} \cdot (x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}), & \text{wenn } n \text{ gerade.} \end{cases} \quad (4-4)$$

Der Median stellt gleichzeitig das 0,5-Quantil  $q_{0,5}$  dar. D. h., der Median ist der kleinste Wert, der von 50 % der Daten nicht überschritten wird. Neben dem Median kann für jedes  $\alpha \in$

$[0; 1]$  das entsprechende  $\alpha$ -Quantil berechnet werden. Das 0,25-Quantil  $q_{0,25}$  und das 0,75-Quantil  $q_{0,75}$  werden auch als unteres bzw. oberes Quartil bezeichnet [Hed-2016, S. 78 ff.; Röß-2016, S. 33 f.].

**Boxplot.** Ein Boxplot ist eine grafische Darstellung statistischer Kennzahlen und wird verwendet um empirische Verteilungen zu beurteilen. Ein exemplarischer Boxplot ist in Abbildung 4-3 zu sehen. Die äußeren Begrenzungen des Boxplots sind der minimale Wert  $x_{min}$  und der maximale Wert  $x_{max}$  eines Datensatzes. Die Differenz aus beiden Werten ergibt die Spannweite  $R = x_{max} - x_{min}$ . Die äußeren Grenzen der eigentlichen Box bilden das untere sowie das obere Quartil. An der Stelle des Medians, wird die Box noch einmal unterteilt, wobei nicht unbedingt zwei gleich große Hälften entstehen. Die Breite der Box entspricht dem Interquartilabstand (IQR) und berechnet sich aus der Differenz der beiden Quartile, d. h.  $IQR = q_{0,75} - q_{0,25}$  [Mit-2017, S. 75; Hed-2016, S. 81 f.; Bur-2012, S. 106].

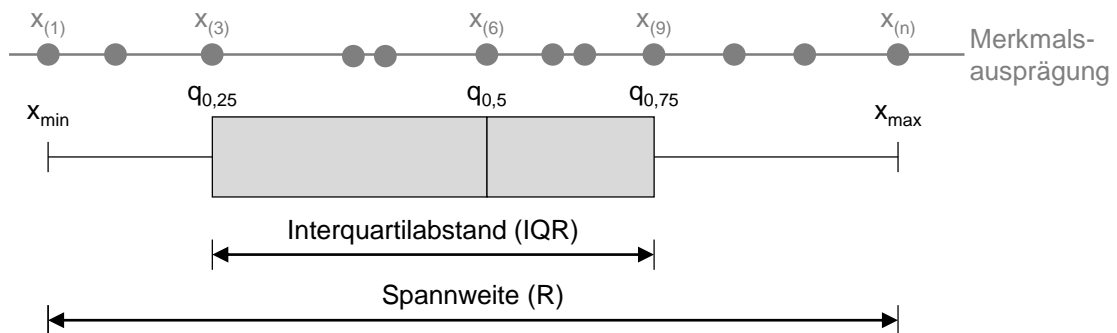


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung eines Boxplots (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Mit-2017, S. 75; Hed-2016, S. 81 f.]

**Bestimmung von Ausreißern und Exoten.** Unter *Ausreißern* werden in der Statistik fehlerhafte Daten verstanden. Konkret sind damit Daten gemeint, die ungewöhnlich stark von den übrigen Daten aus dem gleichen Datensatz abweichen und inkonsistent gegenüber den restlichen Daten wirken [Bar-1996, S. 7]. Um Ausreißer zu identifizieren, gibt es verschiedene Methoden, wobei grundsätzlich zwischen univariaten und multivariaten Methoden unterschieden wird [Ben-2005, S. 2 f.]. Allerdings ist die Ausreißerbestimmung mit Vorsicht zu genießen, da diese Methoden auch *Exoten* (d. h. Daten mit ungewöhnlichen, jedoch korrekten Merkmalsausprägungen) aus dem gesamten Datensatz eliminieren können [Run-2015, S. 24 f.]. Die Existenz von Ausreißern und Exoten führt dazu, dass Mittelwert und Standardabweichung stark beeinflusst werden [Cle-2015, S. 62]. Die Bestimmung von Ausreißern und Exoten mit Hilfe von diesen beiden Kennzahlen gilt daher als nicht robust. Laut *Tukey* besteht eine robuste Möglichkeit darin, Ausreißer und Exoten mit Hilfe von Boxplots aufzuzeigen [Tuk-1977, S. 43 ff.]. Zur Bestimmung robuster Grenzen für die Ausreißer- und

Exotenerkennung werden dabei Quartile sowie der IQR verwendet [Hed-2016, S. 468], die als robust gegenüber Ausreißern und Exoten gelten [Cle-2015, S. 62]. Diese Methode wird daher auch als **IQR-Methode** bezeichnet. Formal gilt ein Datenpunkt als Ausreißer oder Exot  $x_k$ , wenn:

$$x_k > q_{0,75} + f \cdot (q_{0,75} - q_{0,25}) \quad \text{oder} \quad x_k < q_{0,25} - f \cdot (q_{0,75} - q_{0,25}). \quad (4-5)$$

Dabei wird für den Faktor  $f$  in konfirmativen Studien  $f = 3$  und in explorativen Studien  $f = 1,5$  gewählt [Hed-2016, S. 468].

#### 4.3.2.2 Grundidee der Grenzwertbestimmung

Die Grundidee der univariaten Grenzwertbestimmung ist in Abbildung 4-4 visualisiert. Die Menge aller Bauteile lässt sich in die beiden Belieferungsformen lagerlos und lagerhaltig einteilen, sodass sich zwei Bauteilgruppen ergeben. Für jeden relevanten Einflussfaktor (Variantenanzahl, Bauteilvolumen, etc.) kann ein Boxplot je Bauteilgruppe erstellt werden, um die Verteilung innerhalb einer Bauteilgruppe zu visualisieren. Die oberen und unteren Grenzwerte werden mit Hilfe der IQR-Methode bestimmt, da diese Methode robust gegenüber Ausreißern und Exoten ist [fml-2017a, S. 51]. Bauteile, die ober- oder unterhalb dieser Grenzwerte liegen, werden als Exotenbauteile bezeichnet (d. h. es wird unterstellt, dass die Daten nicht fehlerhaft sind und daher keine Ausreißer vorliegen). Ziel ist es, mittels der IQR-Methode zunächst eine möglichst große Menge an Exoten zu identifizieren, sodass keine Bauteile mit Umstellpotenzial übersehen werden. Dies kann erreicht werden, indem ein möglichst geringer Faktor  $f$  gewählt wird, z. B.  $f = 1,5$ . In einem späteren Validierungsschritt (vgl. Kapitel 4.3.4.3) wird die Menge aller Exotenbauteile auf die Bauteile mit dem größten erwarteten Umstellpotenzial reduziert.

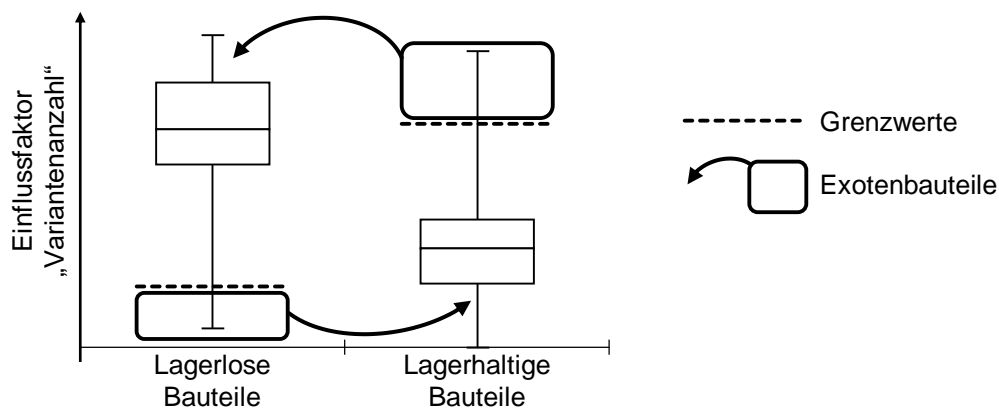


Abbildung 4-4: Grundidee der Grenzwertbestimmung von Einflussfaktoren (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Maa-2016, S. 4; fml-2016a, S. 50])



### 4.3.2.3 Vorgehen zur Grenzwertbestimmung

Die beschriebene Grundidee zur Grenzwertbestimmung ist auf alle Einflussfaktoren je Bauteilgruppe (lagerhaltig, lagerlos) anzuwenden. Für die Entscheidung, ob der obere oder der untere Grenzwert der IQR-Methode für die Bauteilgruppe und den Einflussfaktor relevant ist, bilden die Tendenzaussagen aus der Literatur die Grundlage (vgl. Tabelle 2-6 in Kapitel 2.4.2). Beispielsweise ist beim Einflussfaktor Variantenanzahl für die Gruppe der lagerlosen Bauteile die untere Grenze (d. h.  $G_{j=2,i=4}^u = q_{0,25} - 1,5(q_{0,75} - q_{0,25})$ ) und für die Gruppe der lagerhaltigen Bauteile die obere Grenze (d. h.  $G_{j=1,i=4}^o = q_{0,75} + 1,5(q_{0,75} - q_{0,25})$ ) entscheidend. Denn Bauteile, die heute lagerhaltig angeliefert werden, aber viele Varianten aufweisen, werden tendenziell für eine lagerlose Belieferung in Betracht gezogen. Und umgekehrt gilt für lagerlos angelieferte Bauteile mit wenig Varianten, dass sie möglicherweise besser für eine lagerhaltige Belieferung geeignet sind. Tabelle 4-5 zeigt, für welchen Einflussfaktor  $i$  und welche Bauteilgruppe  $j$  jeweils die untere Grenze  $G_{i,j}^u$  bzw. obere Grenze  $G_{i,j}^o$  der IQR-Methode zu berechnen ist. Je nach Verteilung der Daten können bei der Berechnung der unteren Grenze negative Werte resultieren. Negative Werte sind als Grenzwerte jedoch nicht sinnvoll, da die Ausprägungen der Einflussfaktoren immer mindestens Null betragen. Entsprechend beträgt die untere Grenze auch mindestens Null (d. h.  $\max[G_{i,j}^u; 0]$ ). Die Grenzwerte bilden die Grundlage für die univariate Grenzbauteilermittlung (vgl. Kapitel 4.3.4.1).

Tabelle 4-5: Berechnungsgrundlage der Grenzwerte je Einflussfaktor und Belieferungsgruppe

<b>Einflussfaktor</b>	$i$	<b>Lagerhaltig (<math>j = 1</math>)</b>	<b>Lagerlos (<math>j = 2</math>)</b>
Bauteilgewicht	1	$G_{1,1}^o$	$\max[G_{1,2}^u; 0]$
Bauteilvolumen	2	$G_{2,1}^o$	$\max[G_{2,2}^u; 0]$
Bauteilpreis	3	$G_{3,1}^o$	$\max[G_{3,2}^u; 0]$
Variantenanzahl	4	$G_{4,1}^o$	$\max[G_{4,2}^u; 0]$
Bedarf	5	$G_{5,1}^o$	$\max[G_{5,2}^u; 0]$
Bedarfsschwankungen	6	$\max[G_{6,1}^u; 0]$	$G_{6,2}^o$

### 4.3.3 Multivariate Identifikation homogener Bauteilgruppen

Da bei der univariaten Analyse die Einflussfaktoren lediglich isoliert voneinander betrachtet werden und dadurch möglicherweise nicht alle Grenzbauteile identifiziert werden, wird zusätzlich eine multivariate Datenanalyse angewendet. Das Ziel der multivariaten Datenanalyse ist die Klassifikation von Bauteilen in homogene Bauteilgruppen anhand der relevanten Einflussfaktoren, um aus dieser Klassifikation später die Grenzbauteile ableiten zu können. Für die multivariate Datenanalyse soll das Clusteranalyseverfahren angewendet werden,

da SVM-Verfahren aufgrund der benötigten Trainingsdaten im vorliegenden Anwendungsfall nicht direkt anwendbar sind (vgl. Kapitel 4.3.1). Aufgrund der Vielzahl an Clusteranalyseverfahren (vgl. Kapitel 2.4.1.2), ist zunächst festzulegen, welches dieser Verfahren verwendet werden soll (Kapitel 4.3.3.1). Im Anschluss daran werden die Funktionsweise und das Vorgehen zur Anwendung des ausgewählten Clusteranalyseverfahrens beschrieben (Kapitel 4.3.3.2).

#### **4.3.3.1 Auswahl des Clusteranalyseverfahrens**

Für die Auswahl eines Clusteranalyseverfahrens sind zwei Entscheidungen zu treffen: Was soll klassifiziert werden? Welche Eigenschaften sollen die Clusterlösungen aufweisen? Die erste Entscheidung bezieht sich auf die Klassifikationsobjekte, wobei diese entweder den Zeilen einer Datenmatrix (Objekte) oder den Spalten einer Datenmatrix (Variablen) entsprechen [Bac-2010, S. 147 ff.; Sch-2010a, S. 11]. Im vorliegenden Fall sollen die SNR eines OEM klassifiziert werden. Diese stellen die Zeilen eines Datensatzes (d. h. die Objekte) dar und werden durch die Einflussfaktoren (d. h. die Variablen) charakterisiert. Die zweite Entscheidung bezieht sich darauf, ob sich die Clusterlösungen überlappen dürfen oder nicht. Bei überlappungsfreien Clustern sind die Cluster disjunkt, sodass die Klassifikationsobjekte maximal einem Cluster zugeordnet sind. Bei überlappenden Clusteranalyseverfahren können die Klassifikationsobjekte mehreren Clustern zugeordnet sein [Bac-2010, S. 147 f.]. Da die Bauteile nur in einem Belieferungskonzept angeliefert werden, wird eine eindeutige Zuordnung und somit ein überlappungsfreies Clusteranalyseverfahren angestrebt.

Für die Auswahl eines geeigneten Clusteranalyseverfahrens bei der Klassifikation von Objekten schlagen *Bacher et al.* einen Entscheidungsbaum vor [Bac-2010, S. 465 ff.]. Wenn kein bestimmtes Proximitätsmaß zu verwenden ist und wenn Überlappungen der Cluster vermutet werden, wird ein probabilistisches Verfahren empfohlen [Bac-2010, S. 348, 466]. Sind probabilistische Verfahren nicht geeignet, wird das partitionierende k-Means-Verfahren empfohlen. Bei diesem Verfahren ist vom Anwender eine Clusteranzahl und eine Anfangspartition vorzugeben, die dann durch den Algorithmus solange verändert wird, bis eine optimale Lösung vorliegt [Bac-2010, S. 465 f.; Cle-2015, S. 206]. Sowohl probabilistische Verfahren als auch das k-Means-Verfahren erfordern eine gewisse Mindeststichprobengröße [Bac-2010, S. 466]. Die Eignung der jeweiligen Verfahren lässt sich mit Hilfe von Stabilitätstests überprüfen. Ein Verfahren kann auch nicht geeignet sein, wenn die Clusterlösung inhaltlich nicht interpretierbar oder nicht valide ist [Bac-2010, S. 466]. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind probabilistische Verfahren ausgeschlossen, da eine überlap-

pungsfreie Clusterlösung angestrebt wird. Entsprechend wird das k-Means-Verfahren für die Bauteilklassifikation empfohlen.

#### 4.3.3.2 Funktionsweise und Anwendung des k-Means-Verfahrens

Das k-Means-Verfahren gehört zu den partitionierenden Klassifikationsverfahren und eignet sich ausschließlich für metrisch skalierte Variablen [Eck-2016, S. 441; Jan-2007, S. 490]. Da die identifizierten relevanten Einflussfaktoren metrisch skaliert sind (vgl. Tabelle 4-3), ist die Voraussetzung der Skalierung erfüllt, sodass die Anwendung des k-Means-Verfahrens zulässig ist. Für die Zuordnung der Objekte zu den Clustern werden konstruierte Clusterzentren<sup>7</sup> verwendet. Dafür ist vom Anwender die Anzahl  $K$  an zu bildenden Clustern vorzugeben. Die Clusterbildung erfolgt durch die Minimierung der Streuungsquadratsumme (SQS) innerhalb der Cluster. Das Verfahren wird auch Minimal-Distanz-Verfahren genannt, da die Streuung der Variablenwerte von den Clusterzentren der quadrierten euklidischen Distanz entspricht [Bac-2010, S. 299 f.; Jan-2007, S. 490; Eck-2016, S. 441]. Für die Interpretation bedeutet das folgendes: Die Cluster sind umso homogener, je kleiner die SQS innerhalb der Cluster ist. Im Umkehrschluss heißt das: Je größer die SQS innerhalb der Cluster ist, desto heterogener sind die Objekte in diesem Cluster. Die SQS in den Clustern drückt somit den Heterogenitätsgrad in den Clustern aus. Formal berechnet sich die SQS wie folgt [Bac-2010, S. 299]:

$$SQS_{in}(K) = \sum_k \sum_{g \in k} \sum_j (x_{gj} - \bar{x}_{kj})^2, \quad (4-6)$$

mit

$x_{gj}$  = Ausprägung der Variablen  $j$  von Objekt  $g$ , das in Cluster  $k$  liegt,

$\bar{x}_{kj} = \frac{1}{n_k} \sum_{g \in k} x_{gj}$  = Clusterzentrum der Variablen  $j$  und Cluster  $k$ ,

$n_k$  = Anzahl der Objekte in Cluster  $k$ .

Der k-Means-Algorithmus funktioniert wie folgt [Bac-2010, S. 300; Cle-2015, S. 206 f.]:

1. **Zufallszuordnung:** Zu Beginn erfolgt eine zufällige Zuordnung der Objekte zu  $K$  Clustern mit initialen Clusterzentren.
2. **Neuberechnung der Clusterzentren:** Nach der ersten Zuordnung aller Objekte zu den initialen Clustern werden die Clusterzentren neu berechnet.
3. **Neuzuordnung:** Jedes Objekt wird jenem Cluster zugeordnet, zu dem die quadrierte

<sup>7</sup> Mit Clusterzentren sind die Mittelwerte aller Variablen, die in die Clusterbildung einbezogen werden, gemeint. Die Clusterzentren werden auch als Zentroide bezeichnet [Bac-2010, S. 150; Cle-2015, S. 206].

euklidische Distanz minimal ist, was somit die SQS in den Clustern minimiert.

4. **Iteration:** Die Schritte 2 und 3 werden solange wiederholt, bis keine Änderung in der Zuordnung der Objekte zu den Clustern mehr stattfindet.

Die Anwendung des k-Means-Verfahrens unterteilt sich in die drei Vorgehensschritte Vorbereitung der Clusteranalyse, Bestimmung der Clusteranzahl und Auswertung der Clusterlösung. Diese sind in Abbildung 4-5 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.

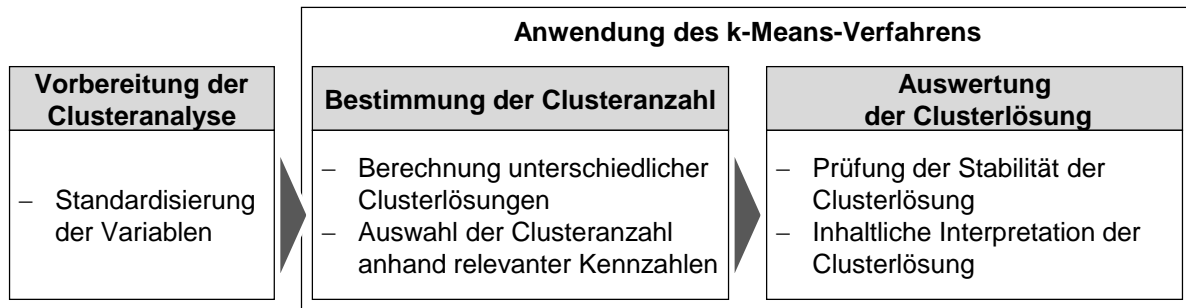


Abbildung 4-5: Anwendungsvorgehen des k-Means-Verfahrens

**Vorbereitung der Clusteranalyse:** Die ausgewählten Einflussfaktoren besitzen zwar das gleiche Skalenniveau, jedoch kann die Maßeinheit je Einflussfaktor variieren. Beispielsweise werden der Bauteilbedarf in Stück und der Bauteilpreis in Euro angegeben. Damit die berechnete quadrierte euklidische Distanz jedoch nicht verzerrt ist, sind die Werte der Variablen vor der Durchführung der Clusteranalyse zu standardisieren. Dies kann durch die z-Transformation erreicht werden. Dazu wird die Differenz vom Wert  $x_{gj}$  eines Objektes  $g$  (entspricht einer SNR) und einer Variablen  $j$  (entspricht einem Einflussfaktor) und dem Mittelwert derselben Variablen  $\bar{x}_j$  durch die Standardabweichung der Variablen  $\sigma_j$  dividiert [Cle-2015, S. 193; Bac-2016, S. 512; Bac-2010, S. 175]. Eine empirische Standardisierung<sup>8</sup> kann formal folgendermaßen erreicht werden:

$$z_{gj} = \frac{x_{gj} - \bar{x}_j}{\sigma_j}. \quad (4-7)$$

**Bestimmung der Clusteranzahl:** Um eine geeignete Clusteranzahl festlegen zu können, ist das k-Means-Verfahren für eine unterschiedliche Anzahl an Cluster (z. B. für  $K = 1, 2, \dots, 15$ ) anzuwenden. Die 1-Clusterlösung sollte dabei auch immer berechnet werden, da diese Lösung für die folgenden Kennzahlen von besonderer Bedeutung ist. Um bei der

<sup>8</sup> Es ist zu beachten, dass in der Literatur zwischen empirischer und theoretischer Standardisierung unterschieden wird. Eine empirische Standardisierung wird immer dann verwendet, wenn eine theoretische nicht möglich ist [Bac-2010, S. 175 ff.]. Für weitere Ausführungen sei auf das Werk von *Bacher et al.* verwiesen (vgl. [Bac-2010]).

Anwendung des k-Means-Verfahrens zu vermeiden, dass der Algorithmus bei einem lokalen Minimum stoppt, ist das k-Means-Verfahren für jede Clusteranzahl  $K$  mit mindestens 1000 unterschiedlichen initialen Clusterzentren zu berechnen. Gewählt wird dann die Clusterlösung mit der geringsten SQS – obgleich nicht sichergestellt ist, dass es sich, trotz der 1000 Versuche, bei der Clusterlösung um ein globales Minimum handelt [Bac-2010, S. 305]. Zur Bestimmung der Clusteranzahl wird zwischen der grafischen Identifikationsmöglichkeit und verschiedenen statistischen Modellprüfgrößen unterschieden.

Die grafische Identifikationsmöglichkeit bietet der Screeplot, der die SQS innerhalb der Cluster für verschiedene Clusterzahlen in einem Diagramm darstellt. Am Screeplot kann somit abgelesen werden, ab welcher Clusteranzahl die Heterogenität innerhalb der Cluster besonders stark zunimmt. Da die Cluster per Definition möglichst homogen sein sollen, wird die Clusteranzahl gewählt, die kurz vor einem großen Heterogenitätssprung liegt [Cle-2015, S. 201 ff.]. Grafisch kann der gesuchte „Knick“ als „Ellbogen“ interpretiert werden, sodass vom sogenannten *Ellbogen-Kriterium* gesprochen wird [Bac-2016, S. 495]. Ein beispielhafter Screeplot ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Der Heterogenitätssprung liegt bei der Clusteranzahl 5 und ist entsprechend in der Grafik gekennzeichnet.

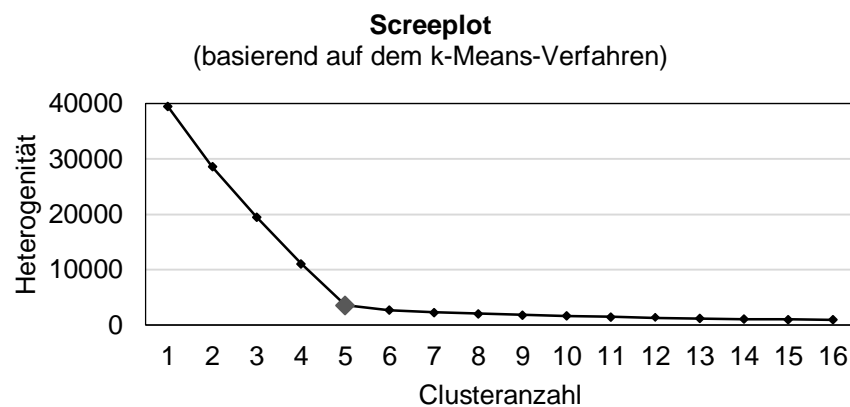


Abbildung 4-6: Exemplarische Darstellung eines Screeplots

Neben der grafischen Vorgehensweise zur Bestimmung der Clusteranzahl können drei verschiedene Modellprüfgrößen berechnet werden: Die erklärte Streuung  $\eta_K^2$ , der PRE-Koeffizient und der F-Wert. Diese drei Modellprüfgrößen werden im Folgenden in Anlehnung an *Bacher et al.* kurz erläutert [Bac-2010, S. 306 ff.]. Die durch die Clusterlösung  $K$  erklärte Streuung  $\eta_K^2$  berechnet sich wie folgt:

$$\eta_K^2 = 1 - \frac{SQS_{in}(K)}{SQS_{ges}} = 1 - \frac{SQS_{in}(K)}{SQS_{in}(1)}, \quad (4-8)$$

wobei  $SQS_{in}(K)$  die Streuungsumme innerhalb der Cluster für die Clusteranzahl

$K$  und  $SQS_{ges} = SQS_{in}(1)$  die gesamte Streuungsquadratsumme des Datensatzes und die Streuungsquadratsumme innerhalb der Cluster für die Clusteranzahl 1 ist. Die erklärte Streuung nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Die Entscheidungsregel zur Auswahl der Clusteranzahl bei Verwendung der erklärten Streuung lautet: Es wird die Clusteranzahl ausgewählt, bei welcher die erklärte Streuung  $\eta_K^2$  das erste Mal einen bestimmten Schwellenwert (z. B. 70 %) überschreitet. Allerdings wird von dieser Vorgehensweise zur Bestimmung der Clusteranzahl abgeraten, da die Festlegung eines Schwellenwertes subjektiv ist.

Der PRE-Koeffizient gibt die prozentuale Verbesserung einer Clusterlösung  $K$  gegenüber der vorherigen Clusterlösung  $K - 1$  an und berechnet sich wie folgt:

$$PRE_K = 1 - \frac{SQS_{in}(K)}{SQS_{in}(K-1)}. \quad (4-9)$$

Zur Auswahl der Clusteranzahl wird folgende Entscheidungsregel zugrunde gelegt: Die Clusterlösung, nach welcher der PRE-Koeffizient deutlich absinkt, ist auszuwählen. Der Anwender kann auch mehrere Clusterlösungen auswählen.

Der F-Wert ist die dritte Modellprüfgröße. Da beim k-Means-Verfahren die SQS innerhalb der Cluster minimiert wird, kann von einer Maximierung der Streuungsquadratsumme zwischen den Clustern gesprochen werden. Somit wird auch der F-Wert maximiert. Der F-Wert berechnet sich folgendermaßen:

$$F_{max_K} = \frac{SQS_{zw}(K)/(K-1)}{SQS_{in}(K)/(n-K)} = \frac{(SQS_{ges} - SQS_{in}(K))/(K-1)}{SQS_{in}(K)/(n-K)}, \quad (4-10)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Klassifizierungsobjekte und  $SQS_{zw}(K)$  die Streuungsquadratsumme zwischen den Clustern bei einer Clusteranzahl von  $K$  ist. Die Entscheidungsregel zur Auswahl der Clusteranzahl lautet: Es wird die Clusteranzahl ausgewählt, bei welcher der F-Wert am größten ist.

**Auswertung der Clusterlösung:** Bei der Auswertung der Ergebnisse geht es um die inhaltliche Interpretation der Clusterlösungen [Bac-2010, S. 159 ff.]. Aus inhaltlicher Sicht sind zwei Clusterlösungen wünschenswert: ein Cluster für lagerlose und ein Cluster für lagerhaltige Bauteile. Bei dem verwendeten Clusteranalyseverfahren kann es jedoch vorkommen, dass die ideale Clusteranzahl größer als zwei ist. Entsprechend ist festzulegen, wie die resultierenden Cluster zu interpretieren sind. Dazu wird angenommen, dass alle Bauteile eines jeden Clusters entweder lagerhaltig oder lagerlos angeliefert werden sollten

– d. h. es ist das theoretische Belieferungskonzept (BelK) eines jeden Clusters (Cluster-BelK) festzulegen. Dazu wird geprüft, wie die Mehrheit der SNRs im jeweiligen Cluster angeliefert wird. Das entsprechende Konzept ist dann das Cluster-BelK.

#### 4.3.4 Analytische Bestimmung der Grenzbauteile

In diesem Kapitel wird erläutert, wie aus der Anwendung der beschriebenen univariaten und multivariaten Datenanalyse eine finale Liste mit Grenzbauteilen hergeleitet wird. Die Vorgehensweise zur Grenzbauteilidentifikation ist in Abbildung 4-7 dargestellt und erfolgt in Anlehnung an die Vorgehensweise einer Datenanalyse nach *Runkler*, die sich vereinfacht in vier Phasen unterteilen lässt: Vorbereitung, Vorverarbeitung, Analyse und Nachbereitung [Run-2015, S. 3].

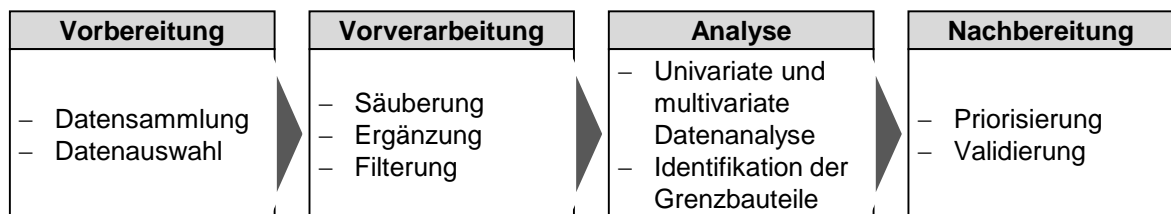


Abbildung 4-7: Vorgehensweise bei der Grenzbauteilidentifikation (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Run-2015, S. 3])

In der *Vorbereitung* werden zunächst Daten gesammelt und die für die Analyse vorgesehenen Daten ausgewählt (z. B. nur die Daten eines bestimmten Produktionsstandortes). Im Schritt *Vorverarbeitung* erfolgt die Säuberung, Ergänzung und Filterung von den Daten. Das bedeutet, der Datensatz wird um die Daten bereinigt, die nicht im Betrachtungsfokus der Analyse stehen (z. B. Schüttgüter und Prototypenteile, bei denen die Belieferungsform vorgegeben ist und eine Umstellung nicht denkbar ist). Weiterhin können bei manchen Daten fehlende Werte aufgrund eines nicht gepflegten Stammdatensatzes auftreten (z. B. keine Angabe beim Teilegewicht oder Volumen). Diese Werte sind – sofern verfügbar – manuell nachzutragen. Falls die fehlenden Werte nicht zu beziffern sind, sind die entsprechenden Datensätze aus dem gesamten Datensatz zu entfernen. Durch diese Schritte wird sichergestellt, dass nur relevante und vollständige Datensätze betrachtet werden, sodass die Datenanalyse sinnvolle Ergebnisse liefert.

Nach der Vorbereitung und Vorverarbeitung erfolgt die eigentliche *Analyse*, die sich in die univariate und multivariate Datenanalyse unterteilt. Aufbauend auf den beiden bereits beschriebenen Methoden wird in diesem Kapitel erörtert, wie die jeweiligen Grenzbauteile

identifiziert werden (vgl. Kapitel 4.3.4.1). Der Schritt *Nachbereitung* beinhaltet zwei Aspekte: die Priorisierung und Validierung der Grenzbauteile. Priorisierung bedeutet, dass die Grenzbauteile nach dem größten Umstellpotenzial sortiert werden. Dabei unterscheidet sich das Vorgehen zur Priorisierung von univariaten und multivariaten Grenzbauteilen (vgl. Kapitel 4.3.4.2). Die Validierung wird von einem Logistikexperten mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.4.3).

### 4.3.4.1 Identifikation der Grenzbauteile

In Abbildung 4-8 ist der schematische Zusammenhang der Grenzbauteile aus der univariaten und multivariaten Analyse illustriert. Für die univariate Datenanalyse werden die Grenzwerte je Einflussfaktor und Belieferungsgruppe berechnet. Mittels der Grenzwerte lassen sich diejenigen Bauteile identifizieren, die außerhalb dieser Grenzen liegen (vgl. Kapitel 4.3.2). Die Überprüfung, ob ein Bauteil außerhalb der Grenzwerte liegt, erfolgt dabei separat je Einflussfaktor (linke Seite von Abbildung 4-8).

Bei der multivariaten Datenanalyse findet ein Abgleich zwischen dem Cluster-BelK und dem aktuell verwendeten BelK der jeweiligen SNR statt (vgl. Kapitel 4.3.3). Alle SNR, bei denen eine unterschiedliche Belieferung vorliegt, werden als multivariate Grenzbauteile bezeichnet (rechte Seite von Abbildung 4-8). Das Vorliegen und die Größe einer Schnittmenge der beiden Grenzbauteilanalysen hängt von den zugrunde liegenden Daten ab.

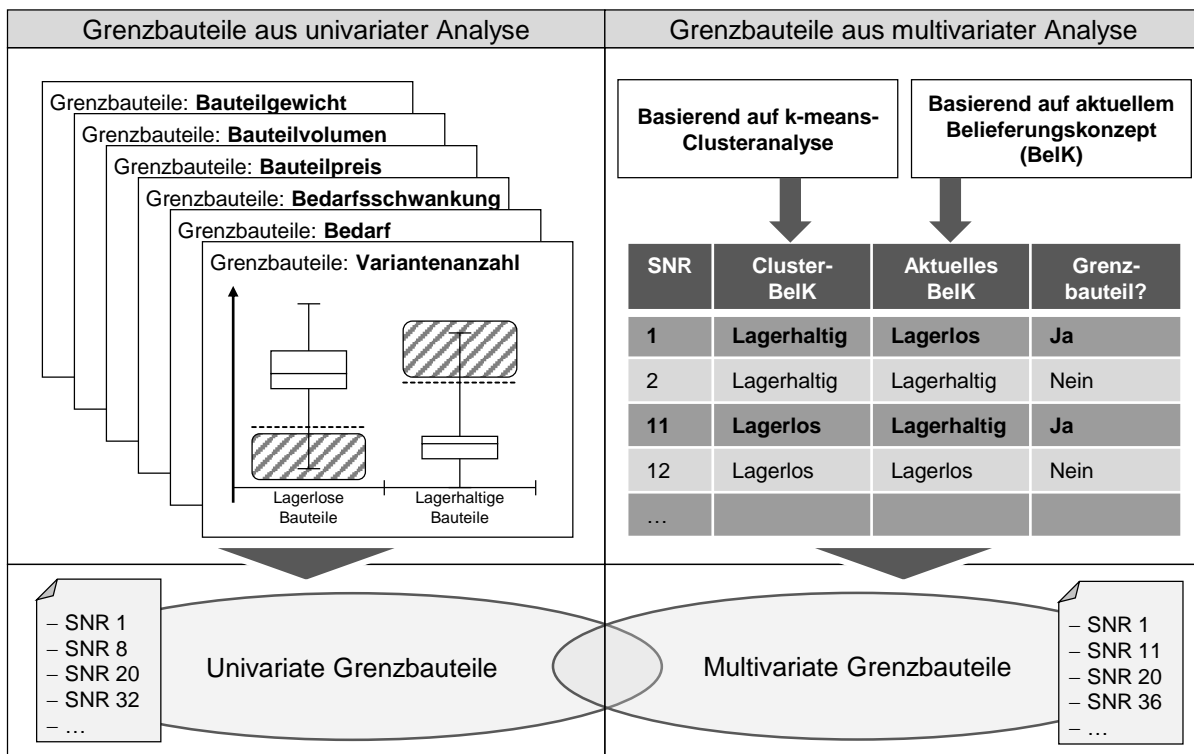


Abbildung 4-8: Schematischer Zusammenhang der univariaten und multivariaten Grenzbauteile



#### 4.3.4.2 Priorisierung der Grenzbauteile

Eine Priorisierung der Grenzbauteile ist dann erforderlich, wenn die Menge an identifizierten Bauteilen sehr groß ist. Grund hierfür ist, dass in den nachgelagerten Planungsbausteinen detaillierte Kostenbetrachtungen der Grenzbauteile erfolgen (vgl. Kapitel 3.2.2). Existieren zu viele Grenzbauteile, dann ist der Aufwand dieser Detailbetrachtung zu groß, sodass die Anforderung der Praxistauglichkeit des Steuerungskonzeptes (A6) nicht erfüllt wäre (vgl. Kapitel 3.1). Entsprechend wird jeweils ein Priorisierungsvorgehen für die univariaten und multivariaten Grenzbauteile vorgestellt.

Die Priorisierung der univariaten Grenzbauteile orientiert sich an dem Vorgehen einer Nutzwertanalyse (vgl. z. B. [Gün-2017, S. 4–11 f.]). Dabei wird die Tatsache genutzt, dass ein Grenzbauteil ein bis sechs Mal als Exot bewertet werden kann, da die Grenzwertprüfung für jeden der sechs Einflussfaktoren separat erfolgt. Es wird somit je Einflussfaktor bewertet, ob eine SNR ein Exot (= 1) oder kein Exot (= 0) ist [Maa-2016, S. 5]. Das Aufsummieren dieser Bewertung gibt an, bei wie vielen Einflussfaktoren eine SNR als Exot identifiziert wurde und entspricht dem *absoluten Umstellpotenzial*. Je höher diese Summe ist, desto stärker sollte die entsprechende SNR als Grenzbauteil priorisiert werden. Die Exotenbewertung ist in Tabelle 4-6 für zwei Einflussfaktoren veranschaulicht.

Tabelle 4-6: Exemplarische Priorisierung der univariaten Grenzbauteile für zwei Einflussfaktoren

Sachnummer	Einflussfaktor 1		Einflussfaktor 2		absolutes Umstellpotenzial	relatives Umstellpotenzial
	Exotenbewertung ja = 1 nein = 0	AHP-Gewicht	Exotenbewertung ja = 1 nein = 0	AHP-Gewicht		
SNR 1	1	61 %	0	39 %	1	61 %
SNR 2	1	61 %	1	39 %	2	100 %
SNR 3	0	61 %	1	39 %	1	39 %

Die Studie von *Maas und Fottner* hat gezeigt, dass die verschiedenen Einflussfaktoren unterschiedlich stark in die Auswahl der Belieferungskonzepte einbezogen werden sollten [Maa-2017a, S. 35 f.]. Um diesem Anspruch zu genügen, kann die Exotenbewertung um eine AHP-Analyse<sup>9</sup> erweitert werden. Dazu führt ein Logistikexperte einen paarweisen Ver-

<sup>9</sup> Die AHP Analyse ist eine Methode um multikriterielle Entscheidungen zu treffen, welche von *Saaty* entwickelt wurde [Saa-1980]. Bei der AHP-Analyse werden die betrachteten Elemente mittels einer Verhältnisskala in eine hierarchische Ordnung gebracht. Die Verhältnisskala wird über einen paarweisen Punktevergleich der einzelnen Elemente berechnet [Sha-2007, S. 62]. Für diesen paarweisen Vergleich wird eine fundamentale Skala benutzt, welche die relative Stärke von subjektiven Prioritäten und Gefühlen ausdrückt [Saa-1987, S. 161]. Für detailliertere Informationen sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen [Saa-1987; Saa-1990].

gleich der sechs Einflussfaktoren durch. Das Ergebnis der AHP-Analyse ist eine Gewichtung der Einflussfaktoren hinsichtlich deren Relevanz für die Belieferungskonzeptauswahl (vgl. AHP-Gewicht je Einflussfaktor in Tabelle 4-6) [Maa-2016, S. 4]. Die Kombination der beiden Methoden erfolgt, indem die Exotenbewertungen mit den AHP-Gewichtungen der entsprechenden Einflussfaktoren multipliziert werden. Die Summe dieser Produkte drückt das *relative Umstellpotenzial* des jeweiligen Grenzbauteils aus. Der Vorteil gegenüber dem absoluten Umstellpotenzial besteht darin, dass durch die unterschiedlichen Gewichtungen mehr Abstufungen bei der Priorisierung geschaffen werden. Die AHP-Gewichtung ist ebenfalls exemplarisch für zwei Einflussfaktoren in Tabelle 4-6 veranschaulicht. SNR 2 hat ein relatives Umstellpotenzial von 100 %, da diese SNR bei beiden Einflussfaktoren ein Exot ist. SNR 1 und SNR 3 besitzen ein relatives Umstellpotenzial von lediglich 61 % bzw. 39 %, da sie nur bei Einflussfaktor 1 bzw. 2 jeweils Exoten sind.

Bei der multivariaten Analyse werden die Grenzbauteile durch die Abweichung des aktuellen Belieferungskonzeptes vom Cluster-BelK identifiziert. Das Cluster-BelK wird durch das Belieferungskonzept bestimmt, welches die Mehrheit der SNR im entsprechenden Cluster aufweist. Es kann jedoch sein, dass keine eindeutige Mehrheit für eine lagerhaltige oder eine lagerlose Belieferung vorliegt (z. B. wenn 51 % der SNR in einem Cluster lagerhaltig und die restlichen 49 % lagerlos angeliefert werden). In diesem Fall ist das Cluster-BelK nicht eindeutig bestimmbar, sodass in diesem Cluster keine Grenzbauteile identifiziert werden können. Um die Eindeutigkeit eines Cluster-BelK zu bestimmen, legt der Anwender einen Mindestanteil an SNR mit dem gleichen Belieferungskonzept fest. Beispielsweise kann der Mindestanteil 85 % betragen, sodass folgende Entscheidungsregel resultiert: Wenn mehr als 85 % der SNR das gleiche Belieferungskonzept verwenden, dann entspricht dieses Konzept dem Cluster-BelK. Eine explizite Vorgabe bzgl. der Höhe des Mindestanteils ist an dieser Stelle nicht sinnvoll. Der Mindestanteil sollte von der Anzahl an multivariaten Grenzbauteilen abhängig gemacht werden. Es gilt, je höher der Mindestanteil gewählt wird, desto mehr multivariate Grenzbauteile können aus der weiteren Betrachtung herausfallen. Der Anwender kann somit über den Mindestanteil steuern, wie viele der multivariaten Grenzbauteile im nächsten Schritt durch einen Logistikexperten zu validieren sind.

Das Gesamtergebnis der Priorisierung sind zwei verkürzte Versionen der univariaten und multivariaten Grenzbauteillisten, in denen die Grenzbauteile mit dem größten erwarteten Umstellpotenzial enthalten sind. Für den Fall, dass ein Grenzbauteil sowohl aus der univariaten als auch der multivariaten Analyse resultiert (siehe Schnittmenge in Abbildung 4-8), ist dieses Grenzbauteil ebenfalls für die weitere Betrachtung zu priorisieren. Im nächsten

Schritt ist das erwartete Umstellpotenzial der Grenzbauteile durch einen Logistikexperten zu validieren.

#### 4.3.4.3 Erfahrungsbasierte Validierung der Grenzbauteile

Bei der Validierung der Grenzbauteile ist zu prüfen, ob die identifizierten Grenzbauteile für die Belieferung in einem anderen Belieferungskonzept in der Praxis in Frage kommen. Für die Validierung der Grenzbauteile ist ein standardisierter Fragenkatalog mit Kontrollfragen (vgl. Tabelle 4-7) von einem Logistikexperten zu beantworten. Ein solcher Fragebogen bietet sich als Methode an, da die Gründe für die Belieferung von Bauteilen häufig sehr individuell sind und von spezifischen Rahmenbedingungen abhängen, über die meist nur die Logistikexperten den Überblick besitzen. Die Kontrollfragen variieren, je nachdem ob das Grenzbauteil aktuell lagerhaltig oder lagerlos angeliefert wird. Inhaltlich beziehen sich die Kontrollfragen auf Einflüsse der Lieferanten (d. h. Entfernung oder Sourcing-Strategie) sowie auf die werkspezifische Infrastruktur (d. h. Restriktionen bzgl. verfügbarer Flächen). Werden alle Kontrollfragen mit „ja“ beantwortet, so besitzt das Grenzbauteil Umstellpotenzial und ist in den folgenden Planungsbausteinen detaillierter zu untersuchen.

Tabelle 4-7: Kontrollfragen zur Validierung der Grenzbauteile

<b>Kriterium</b>	<b>Kontrollfrage</b> (für lagerhaltige Grenzbauteile)	<b>Kontrollfrage</b> (für lagerlose Grenzbauteile)
Bauteilvarianten	Eignet sich die Bauteilgruppe dieser SNR grundsätzlich für eine lagerlose Belieferung?	Eignet sich die Bauteilgruppe dieser SNR grundsätzlich für eine lagerhaltige Belieferung?
Werkspezifische Flächenrestriktionen	Sind ausreichend Flächen auf Trailer-Yard und Dockplätzen verfügbar, um eine lagerlose Belieferung mit dieser Bauteilgruppe abzuwickeln?	Sind ausreichend Lagerflächen vorhanden, um eine lagerhaltige Belieferung dieser Bauteilgruppe zu ermöglichen?
Bereitstellung am Montageband	<i>(keine Frage erforderlich)</i>	Sind ausreichend Kapazitäten (z. B. Sequenzierflächen) verfügbar, um die gleiche Bereitstellungsform beibehalten zu können?
Entfernung zum Lieferanten	Ist die Entfernung des Lieferantenstandorts maximal so groß, dass eine lagerlose Belieferung möglich ist?	<i>(keine Frage erforderlich)</i>
Anzahl an Lieferanten	Werden alle Bauteile der Bauteilgruppe von nur einem Lieferanten bezogen?	<i>(keine Frage erforderlich)</i>
Fähigkeiten des Lieferanten	Ist der Lieferant heute bereits in der Lage Bauteile in JIT oder JIS anzuliefern?	<i>(keine Frage erforderlich)</i>

Stellt der Logistikplaner nach der Validierung fest, dass sich keines oder nur wenige der

identifizierten Grenzbauteile für eine detaillierte Betrachtung eignen, sind die grundlegenden Rahmenbedingungen (d. h. Einkauf, Lieferanten, Werksspezifika und Montageprozesse) zu prüfen, um die Inbound-Logistik überhaupt flexibler gestalten zu können. Eine Investition in Wandlungsfähigkeit kann damit einhergehen. Das bedeutet, dass beispielsweise neue Trailer-Yard-Flächen zu schaffen oder neue Läger zu bauen sind, sodass eine lagerlose bzw. lagerhaltige Belieferung möglich wird. Dennoch kann der Logistikplaner die folgenden Planungsbausteine anwenden, um den anderen Bereichen (z. B. Einkauf oder Produktion) den monetären Mehrwert einer flexiblen Inbound-Logistik aufzuzeigen. In diesem Fall sind entsprechende Annahmen zu treffen (z. B. erwartete Veränderung der Sourcing-Strategie, sodass nur noch von einem Lieferanten angeliefert wird).

Das Ergebnis der Grenzbauteilvalidierung ist eine finale Liste mit priorisierten und validierten Grenzbauteilen. Alle Grenzbauteile dieser finalen Listen stellen den Untersuchungsgegenstand des nächsten Planungsbausteins – der kostenoptimalen Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten – dar.

## **4.4 Zusammenfassung und kritische Reflexion der Identifikationsmethode**

Im vorliegenden Kapitel wurde eine Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen entwickelt. Die Methode liefert eine Liste mit Bauteilen, die in Bezug auf eine Umstellung der Belieferung detaillierter zu untersuchen sind. Die Grundlage der Methode bildet die systematische Ermittlung der relevanten Einflussfaktoren (vgl. Tabelle 4-3). Die Bauteilidentifikation setzt sich aus drei Teilen zusammen: Ermittlung von Grenzwerten (univariate Datenanalyse), Identifikation von homogenen Belieferungsgruppen (multivariate Clusteranalyse) sowie Bestimmung der Grenzbauteile (Identifikation, Priorisierung, Validierung).

Durch die Kombination der univariaten und multivariaten Datenanalyse sowie einer anschließenden Nachbereitung konnten alle an die Methode gestellten Anforderungen erfüllt werden. Sowohl die univariate als auch die multivariate Methode kann um zusätzliche Einflussfaktoren erweitert werden (A1.5). Die Multidimensionalität wird durch die Anwendung der multivariaten Clusteranalyse sichergestellt (A1.1). Das Ergebnis der Identifikationsmethode stellt eine Liste mit analytisch hergeleiteten Grenzbauteilen dar (A1.3). Da sich mit dem Clusteranalyseverfahren keine konkreten Grenzwerte je Einflussfaktor ausweisen lassen, ist die Anwendung der univariaten Datenanalyse erforderlich. Hierbei werden Grenzwerte je Einflussfaktor und je Bauteilgruppe mit Hilfe der IQR-Methode bestimmt (A1.2). Die

Grenzwerte dienen ebenfalls der Ermittlung der univariaten Grenzbauteile (A1.3). Durch den Schritt der Nachbereitung (Priorisierung und Validierung) wird zusätzlich Expertenwissen bei der Grenzbauteilidentifikation berücksichtigt. Bei guter Datenverfügbarkeit ist die gesamte Identifikationsmethode jederzeit mit geringem Aufwand wiederholbar (A1.4).

Die entwickelte Methode liefert die Antwort auf die erste Forschungsfrage. Durch die Identifikationsmethode wird der Betrachtungsfokus für die weiteren Planungsbausteine von der Gesamtheit aller SNRs eines Produktionsstandortes auf eine überschaubare Menge an Grenzbauteilen präzisiert. Für die Identifikation der Grenzbauteile wird zwischen einer lagerhaltigen und einer lagerlosen Belieferung unterschieden. Für eine erste Fokussierung des Betrachtungsumfangs wird diese Vereinfachung der Inbound-Logistik als sinnvoll erachtet. Für die Kostenbetrachtungen in den nächsten Planungsbausteinen ist die Inbound-Logistik jedoch in vollem Umfang zu modellieren – Transportkonzepte sind z. B. ebenfalls zu berücksichtigen. Ein Risiko der univariaten und multivariaten Analysen besteht darin, dass möglicherweise zu viele Grenzbauteile identifiziert werden. Bei der multivariaten Analyse ist vom Anwender ein Mindestanteil an SNR mit dem gleichen Belieferungskonzept zur Bestimmung des Cluster-BelK festzulegen, woraus wiederum die multivariaten Grenzbauteile abgeleitet werden. Das Aufstellen einer solchen Entscheidungsregel kann als subjektiv kritisiert werden. Allerdings wirkt sich diese Regel im Wesentlichen auf die Menge und nicht die Qualität der identifizierten Grenzbauteile aus, sodass diese Entscheidungsregel als unkritisch erachtet wird. Weiterhin soll dem Risiko von zu vielen Grenzbauteilen durch die Nachbereitungsschritte der Priorisierung und Validierung vorgebeugt werden. Für die Priorisierung wurden Entscheidungsregeln entwickelt. Bei den univariaten Grenzbauteilen wird z. B. die Anzahl der Exoten je SNR bestimmt, die dann mit den AHP-Gewichten der Einflussfaktoren bewertet werden. Die Stärke der Abweichung einer SNR von einem Grenzwert wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Die Abweichungsstärke vom Grenzwert stellt eine zusätzliche Möglichkeit der Priorisierung dar. In dieser Arbeit wird auf diese Priorisierungsmöglichkeit verzichtet, da die beschriebenen Priorisierungsansätze als ausreichend erachtet werden. Insgesamt können die Entscheidungsregeln der Priorisierung dazu führen, dass Grenzbauteile mit großem Umstellpotenzial aus der Betrachtung fallen (z. B. wenn nur zwei Einflussfaktoren als Exoten identifiziert wurden). Vor dem Hintergrund einer praxistauglichen Methode wird dieses Risiko jedoch in Kauf genommen. Zudem ist es dem Anwender freigestellt, sämtliche univariaten und multivariaten Grenzbauteile näher zu untersuchen (d. h. von der Priorisierung und Validierung abzusehen). Die Priorisierung und Validierung sollen bei der Entscheidung unterstützen, welche Grenzbauteile in jedem Fall weiter zu betrachten sind. Zusätzlich zu der Identifikationsmethode der Grenzbauteile stel-

len die systematisch ermittelten Einflussfaktoren die potenziellen Störgrößen im System dar (vgl. Kapitel 3.2.1). Dadurch kann der Logistikplaner bewusst auf Veränderungen dieser Störgrößen achten, sodass frühzeitig auf ein Über- oder Unterschreiten der Grenzwerte der Einflussfaktoren reagiert werden kann. Für die identifizierten Grenzbauteile gilt es im Folgenden herauszufinden, welche die kostengünstigsten Logistikkonzepte sind.

## 5 Integrierte Optimierung der Belieferungs- und Transportkonzepte

---

Das vorliegende Kapitel umfasst den zweiten Planungsbaustein des Steuerungskonzeptes. Das Ziel ist die kostenoptimale Auswahl des Belieferungs- und Transportkonzeptes für eines der zuvor identifizierten Grenzbauteile. In diesem Kapitel wird somit dem Effizienzgedanken in der Inbound-Logistik Rechnung getragen. Der erste Planungsbaustein der Grenzbauteilidentifikation nimmt eine grobe und nicht monetäre Einordnung der Bauteile vor, sodass noch offen ist, ob und in welchem Umfang Kosteneinsparungen durch die Nutzung eines anderen Logistikkonzeptes generiert werden können. Das Ergebnis des zweiten Planungsbausteins weist die Logistikkosten je Bauteil für verschiedene Logistikkonzepte aus. Daraus lassen sich potenzielle Kosteneinsparungen von einem Logistikkonzept gegenüber einem anderen bestimmen. Diese Kosteneinsparungen stellen die Basis für den dritten Planungsbaustein – die Entscheidung bzgl. einer flexiblen Logistikkonzeptumstellung – dar.

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf der Veröffentlichung von *Maas et al.* sowie auf Studienarbeiten, die durch die Autorin inhaltlich angeleitet wurden [Maa-2017c; fml-2016b; fml-2016e; fml-2016f].

### 5.1 Betrachtungsumfang und Rahmen des Optimierungsmodells

Bevor das Optimierungsmodell entwickelt wird, widmet sich dieses Kapitel den zu untersuchenden Optimierungsszenarien (vgl. Kapitel 5.1.1), den Anforderungen an das Modell (vgl. Kapitel 5.1.2) sowie zuletzt den Annahmen und Abgrenzungen (vgl. Kapitel 5.1.3).

#### 5.1.1 Optimierungsszenarien

Dieser Planungsbaustein dient dazu, die kostenoptimale Kombination aus Belieferungs- und Transportkonzept (d. h. Logistikkonzept) für die identifizierten Grenzbauteile zu bestimmen. Durch die Optimierung soll das aus Prozesssicht günstigste Logistikkonzept identifiziert werden, um anschließend die Umstellung auf dieses Logistikkonzept zu bewerten. Es handelt sich somit um taktische Optimierungen aktueller und möglicher Logistikkonzepte und nicht um Optimierungen in der operativen Steuerung der aktuellen Logistikkonzepte.

Im Optimierungsmodell sollen folgende Belieferungs- und Transportkonzepte sowie Kombinationen abgebildet werden: Die lagerlose Belieferung (d. h. JIS oder JIT) wird immer über

einen Direkttransport abgewickelt. Dies entspricht dem Standardtransportkonzept bei einer lagerlosen Belieferung [Klu-2010, S. 299 ff.]. Die Kombination einer lagerlosen Belieferung mit einem Milkrun oder über die Gebietsspedition ist weniger verbreitet und wird von der Betrachtung ausgeschlossen. Die lagerhaltige Belieferung ist mit allen Transportkonzepten (Direkttransport, Milkrun oder Hub-and-Spoke/GS) kombinierbar. Das entspricht sechs möglichen Kombinationen aus Belieferungs- und Transportkonzepten, wenn JIS und JIT sowie Hub-and-Spoke und Gebietsspedition jeweils als separate Konzepte betrachtet werden. Aufgrund der betrachteten Konzepte lassen sich drei denkbare Optimierungsszenarien ableiten, die in Abbildung 5-1 visualisiert sind.

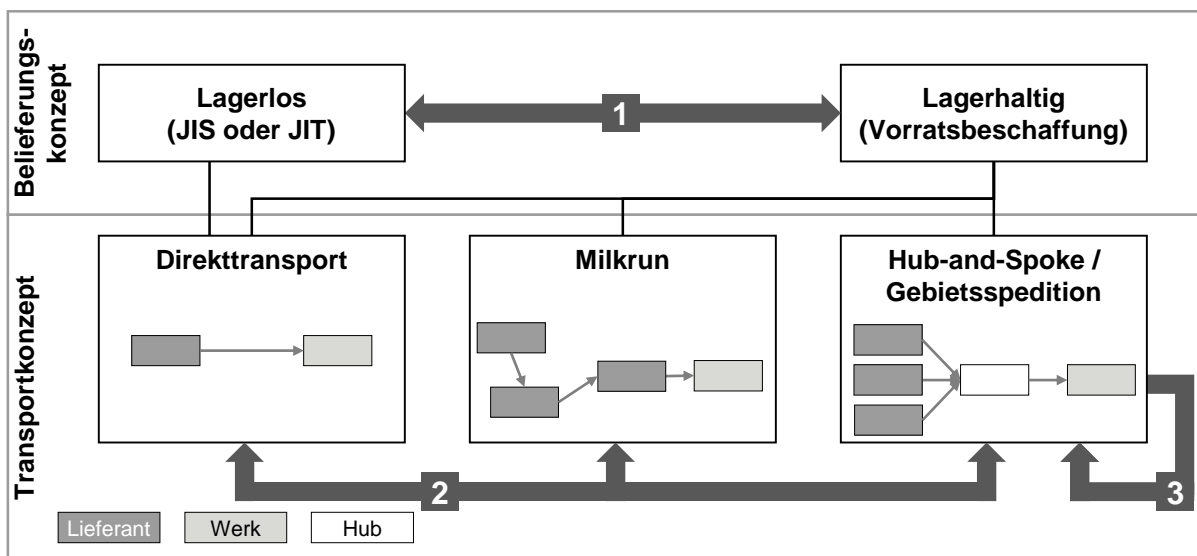


Abbildung 5-1: Betrachtete Optimierungsszenarien im Rahmen des Steuerungskonzeptes (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Maa-2017c, S. 496; fml-2016e, S. 29 f.]

Das erste Optimierungsszenario ist die Umstellung von einer lagerhaltigen auf eine der beiden lagerlosen Belieferungen und umgekehrt. Um einen sinnvollen Vergleich zwischen den Logistikkosten beider Belieferungskonzepten zu gewährleisten, wird bei der lagerhaltigen Belieferung immer das kostengünstigste Transportkonzept gewählt. Die Bestimmung des kostenoptimalen Transportkonzeptes innerhalb der lagerhaltigen Belieferung stellt das zweite Optimierungsszenario dar. Das dritte Optimierungsszenario umfasst die Optimierung der Anlieferfrequenzen, da sie sich auf Transport-, Bestands- und Lagerhaltungskosten auswirken können [fml-2016e, S. 29 f.]. Anlieferfrequenzen werden dabei lediglich für die Transportkonzepte Hub-and-Spoke und Gebietsspedition optimiert. Bei lagerlosen Belieferungskonzepten ergibt sich der Anlieferrhythmus aus der Trailerreichweite und dem Bedarf, sodass es keiner Optimierung der Anlieferfrequenzen bedarf. Die Steuerung von Milkruns stellt ein eigenes Planungsgebiet dar (vgl. z. B. [Gru-2015]), sodass die Optimierung von Milkrun-Anlieferfrequenzen in dieser Arbeit vernachlässigt wird.



## 5.1.2 Anforderungen an das Optimierungsmodell

Um das Optimierungsmodell zielorientiert zu entwickeln, werden die Anforderungen an das Optimierungsmodell definiert. Alle Anforderungen sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

*Tabelle 5-1: Anforderungen an das Optimierungsmodell*

- 
- A2.1.** Integrierte Betrachtung von Belieferungs- und Transportkonzepten
  - A2.2.** Prozesskostenbasierte Betrachtung der Logistikprozesse
  - A2.3.** Berücksichtigung der jeweiligen Tarifstrukturen
  - A2.4.** Berücksichtigung aller Bauteile eines Lieferantenstandortes
  - A2.5.** Mehrperiodische Betrachtung
  - A2.6.** Lösbarkeit in angemessener Rechenzeit
  - A2.7.** Aufwandsarme Anwendbarkeit
  - A2.8.** Erweiterbarkeit
- 

**A2.1. Integrierte Betrachtung von Belieferung und Transport:** Diese Anforderung adressiert die vollumfängliche Betrachtung der Inbound-Logistik. Dazu gehört sowohl die Berücksichtigung der Belieferungskonzepte als auch der Transportkonzepte. Diese Anforderung ist insbesondere aufgrund des in Kapitel 2.4.2 identifizierten Forschungsbedarfes relevant. Bisherige Ansätze zur Auswahl von Logistikkonzepten fokussieren sich entweder auf die Belieferung oder auf den Transport.

**A2.2. Prozesskostenbasierte Betrachtung:** Wie bereits in Kapitel 2.4.2.2 beschrieben, wird die Prozesskostenrechnung als probates Werkzeug zur Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten gesehen (vgl. z. B. [VDA 5010, S. 8; Wag-2011, S. 5717]). Aus diesem Grund soll die integrierte Auswahl von Belieferungs- und Transportkonzepten prozesskostenbasiert erfolgen. Die genaue Prozessabgrenzung wird in Kapitel 5.2 beschrieben.

**A2.3. Berücksichtigung der jeweiligen Tarifstrukturen:** Um bestehende Ansätze (vgl. Kapitel 2.4.2.2) zu ergänzen, sollen die Transportkonzepte möglichst detailliert modelliert werden. Bislang existieren wenige, jedoch vielversprechende Ansätze, die die Tarifstrukturen der Gebietsspedition modellieren (vgl. [Kem-2009; Sch-2010b]). Entsprechend sollen die Transportkosten ebenfalls mit Hilfe der Tarifstrukturen, statt z. B. über durchschnittliche Transportkostensätze, modelliert werden.

**A2.4. Berücksichtigung aller Bauteile eines Lieferantenstandortes:** Eine weitere Anforderung besteht darin, dass alle Bauteile einer Transportrelation betrachtet werden sollen,

da Lieferungen i. d. R. mehrere Bauteile eines Lieferantenstandortes bündeln. Die Betrachtung einzelner Bauteile eines Lieferanten würde eine realitätsnahe Berechnung der Transportkosten nicht zulassen, da bei einer solchen Betrachtung die Transportauslastungen zu gering und die resultierenden Kosten entsprechend zu hoch wären.

**A2.5. Mehrperiodische Betrachtung:** Insbesondere bei einer mehrperiodischen Betrachtung kommen die Trade-Offs zwischen Transportkosten sowie Bestands- und Lagerkosten zum Tragen. Wird z. B. bei einer einperiodischen Betrachtung einmalig geliefert, erfolgt dies zu Lasten der Bestands- und Lagerkosten und zu Gunsten der Transportkosten. Je nachdem wie groß der Bedarf in jeder Periode ist, kann es unter Umständen jedoch günstiger sein mehrere Transporte durchzuführen, um so Bestands- und Lagerkosten über den Zeitverlauf einzusparen. Somit besteht die Anforderung einer mehrperiodischen Betrachtung.

**A2.6. Lösbarkeit in angemessener Rechenzeit:** Eine Anforderung an die Praxistauglichkeit ist, dass das Optimierungsproblem in einer angemessenen Rechenzeit lösbar ist. Die Rechenzeit eines Optimierungsmodells wird durch die Modellstruktur (z. B. linear oder nicht-linear) sowie die Anzahl der betrachteten Szenarien und Entscheidungsvariablen beeinflusst (vgl. z. B. [Her-2015, S. 36 ff.]). Entsprechend können diese Stellhebel genutzt werden, um eine angemessene Rechenzeit zu ermöglichen.

**A2.7. Aufwandsarme Anwendbarkeit:** Eine weitere Anforderung an die Praxistauglichkeit des Optimierungsmodells stellt die aufwandsarme Anwendbarkeit dar. Das bedeutet zum einen, dass die für das Modell benötigten Daten verfügbar sein müssen und zum anderen, dass eine tool-gestützte Berechnung erfolgt.

**A2.8. Erweiterbarkeit:** Die letzte Anforderung adressiert die Erweiterbarkeit des Optimierungsmodells. Das bedeutet, dass das Modell beispielsweise um weitere Logistikkonzepte oder um zusätzliche Zielkriterien erweiterbar sein soll, um dadurch ggf. unternehmensspezifische Zielsetzungen in Zukunft noch besser abbilden zu können.

### 5.1.3 Annahmen und Abgrenzungen

Zusätzlich zu den Anforderungen an das Optimierungsmodell sind bestimmte Annahmen und Abgrenzungen an dieser Stelle zu treffen. Bei dem Transportkonzept Milkrun wird angenommen, dass die Transportroute gegeben ist, da die Transporttoursplanung ein ei-

genständiges Optimierungsfeld darstellt (vgl. z. B. [Gru-2015]). Die Berücksichtigung der Tourenplanung würde den Rahmen dieser Arbeit somit sprengen. Das bedeutet, dass das Optimierungsmodell nicht die optimale Transportroute für einen Milkrun bestimmt, sondern die Kosten für eine vorgegebene Milkrun-Transportroute ermittelt [Maa-2017c, S. 498].

Ebenso wie die Milkrun-Route als vorgegeben angenommen wird, ist das Logistiknetzwerk mit der vorliegenden Lieferantenstruktur und den bestehenden Produktionsstandorten fix. Es erfolgen somit keine Netzwerkoptimierung und Bewertung alternativer Standorte [Maa-2017c, S. 498]. Eine solche Bewertung geht über den Betrachtungsrahmen der Flexibilität hinaus und wird dem Handlungsspielraum der Wandlungsfähigkeit zugeordnet. Beispielsweise führt ein neues Crossdock zu zusätzlichen Logistikkonzepten, unterstützt allerdings nicht direkt die flexible Umstellung zu einem alternativen Logistikkonzept.

Weiterhin werden für alle Logistikkonzepte idealtypische Prozesse angenommen, um eine vergleichbare Bewertung der Logistikkosten zu ermöglichen. Das bedeutet, dass die Prozesse fehler- und störungsfrei funktionieren. Entsprechend werden Notfallprozesse (z. B. Sonderfahrten) nicht modelliert und Herausforderungen aus der Praxis (z. B. Qualitätsprobleme oder mangelnde Liefertreue) vernachlässigt. Ebenso werden Strafzahlungen (z. B. Standgeldkosten aufgrund einer zu frühen Ankunft im WE) im Modell nicht abgebildet. Zudem können Sicherheitsbestände vernachlässigt werden.

Für den Transport der Materialien wird ein Mega-Trailer – mit einer Nutzlast von 25 t, einem Fassungsvermögen von 100 m<sup>3</sup> und einem daraus resultierenden Volumengewicht von 250 kg/m<sup>3</sup> – als Transportmittel verwendet. Aufgrund des gewählten Transportmittels können Seewege nicht abgebildet werden und deshalb werden Überseetransporte vernachlässigt. Der verwendete Incoterm ist FCA, d. h. die Lieferung wird vom durch den OEM beauftragten Spediteur abgeholt und die Transportkosten werden vom OEM getragen (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Weiterhin werden Zollkosten vernachlässigt, da Deutschland als Produktionsstandort fokussiert wird. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass viele Automobilzulieferer ihren Entwicklungs- und Produktionsschwerpunkt in Deutschland haben [VDA-2016, S. 31]. Zum anderen erzielten die deutschen Automobilhersteller 2015 mit 15,1 Mio. Fahrzeugen einen Rekord in der globalen Pkw-Fertigung – davon wurden 5,7 Mio. Fahrzeuge und somit mehr als ein Drittel in Deutschland produziert [VDA-2016, S. 23]. Gemäß Anforderung A2.8 soll das Optimierungsmodell jedoch um Zollkosten erweiterbar sein.

Eine weitere Annahme bezieht sich auf die betrachteten Kosten. Im Optimierungsmodell

sollen gemäß Anforderung A2.2 die Kosten der verschiedenen Logistikkonzepte verglichen werden. Entsprechend werden Kosten und Investitionen zur Umstellung auf das alternative Logistikkonzept an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt. Die Umstellkosten sind Bestandteil des dritten Planungsbausteins und werden daher erst in Kapitel 6 aufgegriffen.

Die wesentlichen, zuvor erläuterten Annahmen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es liegen idealtypische Prozesse vor,
- das Lieferantennetzwerk ist festgelegt,
- das verwendete Transportmittel ist ein Mega-Trailer,
- es werden ausschließlich Logistikprozesskosten verglichen.

## **5.2 Prozesskosten der Inbound-Logistik**

Eine Anforderung an das Optimierungsmodell ist die Auswahl der Logistikkonzepte prozesskostenbasiert zu treffen (vgl. Anforderung A2.2). Dazu werden zunächst die betrachteten Prozesse beschrieben (vgl. Kapitel 5.2.1) und anschließend die relevanten Kostenkomponenten der Prozesse hergeleitet (vgl. Kapitel 5.2.2).

### **5.2.1 Allgemeine Prozessbeschreibung**

Zunächst werden die Prozesse definiert, auf die die Prozesskostenrechnung anzuwenden ist. Dazu werden die Inbound-Logistik und Inhouse-Logistik in Teilprozesse zerlegt. Aus den Teilprozessen können dann die erforderlichen Kostenkomponenten abgeleitet werden. Es wird zunächst zwischen der lagerhaltigen und lagerlosen Belieferung unterschieden, um die Verschiedenheit der beiden Belieferungskonzepte herauszuarbeiten. Dadurch sollen die wesentlichen Kostenkomponenten identifiziert werden. Eine weitere Detaillierung erfolgt im nächsten Abschnitt – bei der Zuordnung der Kostenkomponenten zu den jeweiligen Konzeptkombinationen. Die Abbildungen 5-2 und 5-3 veranschaulichen den Materialfluss im Inbound- und Inhouse-Prozess für eine lagerhaltige bzw. lagerlose Belieferung.

Beim lagerhaltigen Prozess (vgl. Abbildungen 5-2) werden beim Lieferanten die Materialien für eine Lieferung zusammengestellt. Dazu werden die Bauteile in den vorgesehenen Ladungsträgern verpackt. Ein mit Bauteilen befüllter Ladungsträger wird als Transporteinheit (TE) bezeichnet. Die Anzahl der Bauteile je Ladungsträger wird durch das Packlos beschrie-

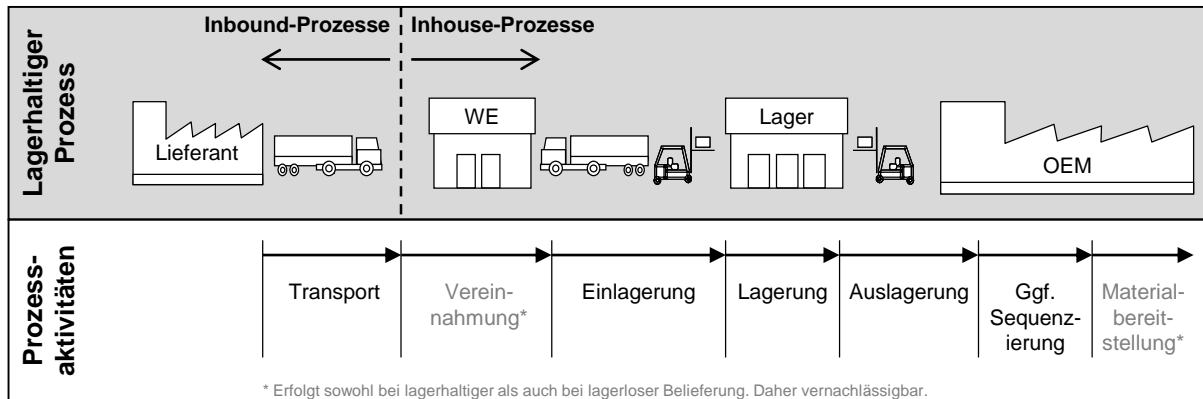


Abbildung 5-2: Prozessaktivitäten der lagerhaltigen Belieferung (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2016b, S. 20])

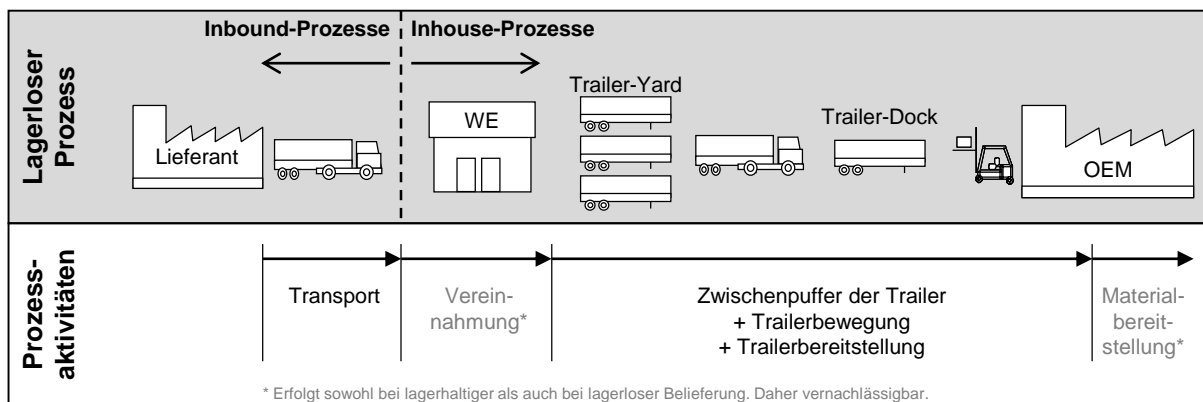


Abbildung 5-3: Prozessaktivitäten der lagerlosen Belieferung (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2016b, S. 21])

ben. Eine Lieferung umfasst i. d. R. mehrere TE und wird zum WE des OEM transportiert. Die Kombination eines bestimmten Lieferanten mit einem bestimmten Produktionswerk des OEM wird als Transportrelation bezeichnet. Der Transport kann dabei über verschiedene Transportkonzepte erfolgen (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Die Transportkosten können je nach Transportkonzept und frachtpflichtigem Gewicht<sup>10</sup> variieren. Im WE des OEM erfolgt die Vereinnahmung der Ware. Anschließend werden die Materialien zum vorgegebenen Lager transportiert und eingelagert. Die Lagerdauer variiert u. a. je nach Verbrauchsrate der Materialien und je nach Lagerbestand. Wird das Material benötigt, erfolgt die Auslagerung und der Transport des Materials in die Montagehalle. Gegebenenfalls ist eine Sequenzierung vor der Bereitstellung der Ware an der Montagelinie erforderlich. Der lagerlose Prozess (vgl. Abbildungen 5-3) unterscheidet sich vom lagerhaltigen Prozess in folgenden Punkten: Nach der Vereinnahmung im WE wird der gesamte Trailer auf dem Trailer-Yard zwischengeparkt. Sobald der Abruf erfolgt, wird der Trailer zum Trailer-Dock gefahren. Dort

<sup>10</sup> Es gilt: Ein Mega-Trailer mit 100 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen und 25 t Nutzlast kann maximal 250 kg/m<sup>3</sup> frachtpflichtiges Gewicht transportieren [fml-2016e, S. 24].

erfolgt die Trailerentladung und direkte Bereitstellung der Materialien an der Montagelinie. Das vorzeitige Entladen der Trailer auf Pufferflächen (sogenannten Footprints) sowie die Re-Sequenzierung von sequenzierten Bauteilen werden nicht explizit modelliert. Modellerweiterungen um diese Prozessdetails sind aufgrund von Anforderung A2.8 möglich.

Die Darstellungen verdeutlichen, dass für die Auswahl der Belieferungs- und Transportkonzepte die Prozesse der Inhouse-Logistik nicht zu vernachlässigen sind. Die Prozesse der Inhouse-Logistik variieren je nach Belieferungskonzept, sodass sich auch die Prozesskosten unterscheiden. Bei der lagerhaltigen Belieferung sind z. B. die aus der Lagerung beim OEM entstehenden Kosten zu berücksichtigen, während bei einer lagerlosen Belieferung Kosten für die Abwicklung über den Trailer-Yard verursacht werden. Welche Kosten bei welchem Logistikkonzept auftreten, wird im Folgenden erläutert.

### **5.2.2 Kostenkomponenten je Logistikkonzept**

Auf Basis der zuvor definierten Prozesse werden die für die Optimierung relevanten Kostenkomponenten identifiziert und den verschiedenen Logistikkonzepten zugeordnet. Das Ergebnis dieser Zuordnung ist in Tabelle 5-2 abgebildet. Es werden drei Kostenkategorien unterschieden: Transportkosten, Bestands- und Lagerhaltungskosten sowie sonstige Kosten. Die Summe dieser Kosten wird im Folgenden als Logistikkosten bezeichnet.

*Transportkosten* sind Kosten, die aufgrund des verwendeten Transportkonzeptes entstehen. Für die Direktbelieferung setzen sich die Transportkosten aus den Kosten für eine Komplettladung (englisch: *Full Truck Load*) (FTL) sowie den Kosten für den Leergutrücktransport zusammen. Beim Milkrun werden zusätzlich Stoppkosten durch die Zwischenhalte bei Lieferanten verursacht. Bei der Gebietsspedition ergeben sich die Transportkosten aus den Kosten für FTL oder Teilladung (englisch: *Less than Truck Load*) (LTL) und dem Leergutrücktransport. Ob der FTL- oder LTL-Tarif bei der Kostenkalkulation angesetzt wird, hängt vom transportierten frachtpflichtigen Gewicht ab. Beim Transportkonzept Hub-and-Spoke ergeben sich die Transportkosten aus den Kosten für den Vorlauf (VL), den Hauptlauf (HL) und den Leergutrücktransport. Für die VL-Kosten werden die gleichen Kostensätze wie bei der Gebietsspedition angesetzt – ebenfalls mit Unterscheidung in FTL und LTL. Beim Hub-Hauptlauf (HL) wird auch zwischen Komplett- und Teilladungen differenziert, wobei Hub-Spediteure andere Kostensätze veranschlagen können als Gebietsspediteure. Die Komplettladung beim Hub-Hauptlauf (HL) wird auch als Hub-Direktabholung (DA) bezeichnet.

Tabelle 5-2: Zuordnung der Kostenkomponenten zu den verschiedenen Logistikkonzepten (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Maa-2017c, S. 497; fml-2016e, S. 33])

	JIS	JIT	lagerhaltig			
	Direktransport	Direktransport	Direktransport	Gebietsspedition	Hub-and-Spoke	Milkrun
<b>Transportkosten</b>						
Komplettladung (FTL) (bzw. Hub-Vorlauf)	X	X	X	T	T	X
Teilladung (LTL) (bzw. Hub-Vorlauf)				T	T	
Hub-Hauptlauf (HL)					T	
Hub-Direktabholung (DA)					T	
Stoppkosten						X
Leergutrücktransport	X	X	X	X	X	X
<b>Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten</b>						
Kapitalbindung (KB) (konstant)	X	X	X	X	X	X
Kapitalbindung (KB) (dynamisch)	X	X	X	X	X	X
Lagerhaltungskosten (konstant)			X	X	X	X
Lagerhaltungskosten (dynamisch)			X	X	X	X
<b>Sonstige Kosten</b>						
Trailermiete (TM)	X	X				
Ladungsträgermiete	X	X	X	X	X	X
Sequenzierkosten	(X)		(X)	(X)	(X)	(X)
Trailerbewegungskosten	X	X				

X: Kosten enthalten

(X): Kosten evtl. enthalten

T: Tarifentscheidung erforderlich

Aufgrund der Annahme idealtypischer Prozesse umfassen die *Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten* einen konstanten und einen dynamischen Bestandteil. Die Kapitalbindungskosten fallen für alle Logistikkonzepte an. Konstante Kapitalbindungskosten hängen von der Dauer, die das Material im Logistikprozess gebunden ist, ab. Die Kapitalbindungsdauer variiert je Logistikkonzept und wird aufgrund idealer Prozesse als konstant angenommen, sodass der Kapitalbindungskostensatz je TE konstant ist. Die dynamischen Kapitalbindungskosten hängen von den Tagesbeständen – d. h. den angelieferten Mengen abzüglich des täglichen Bedarfs – ab. Da mehrere Perioden modelliert werden, können die dynamischen Kapitalbindungskosten je Periode variieren.<sup>11</sup> Die Lagerhaltungskosten fallen nur für die lagerhaltigen Logistikkonzepte an. Die konstanten Lagerhaltungskosten ergeben sich aus einem festen Kostensatz für die beanspruchte Fläche sowie den Ein- und Auslagerungen

<sup>11</sup> Beispiel: An Tag 1 werden 20 TE geliefert, die Bedarfe an den Tagen 1 und 2 betragen 5 TE bzw. 7 TE. Die Tagesbestände an Tag 1 und 2 betragen somit 15 TE bzw. 8 TE.

und der Anzahl an TEs. Die dynamischen Lagerhaltungskosten umfassen die Kosten aus der Lagerflächenbeanspruchung der variierenden Tagesbestände.

In der Kategorie *Sonstige Kosten* sind die Trailermiete, Ladungsträgermiete, Sequenzierkosten und Trailerbewegungskosten enthalten. Die Trailermiete und die Trailerbewegungskosten fallen nur bei der lagerlosen Belieferung an. Die Trailermiete bezieht sich auf den Zeitraum, in dem sich der Trailer auf dem Werksgelände des OEM befindet. Die Trailerbewegungskosten beziehen sich auf die Bewegung der lagerlosen Trailer vom WE zum Trailer-Yard sowie vom Trailer-Yard zum Trailer-Dock. Die Ladungsträgermiete entsteht bei allen Logistikkonzepten und hängt von der Zeit, die sich ein Ladungsträger im Versorgungskreislauf befindet, ab. Sequenzierkosten entstehen grundsätzlich immer bei einer JIS-Belieferung. Es wird unterschieden, ob das betrachtete Bauteil bereits in JIS angeliefert wird oder nicht. In ersterem Fall wird angenommen, dass die Sequenzierkosten im Bauteilpreis eingepreist sind. Wird noch nicht in JIS angeliefert, sind die Sequenzierkosten explizit zu berechnen. Eine JIT-Belieferung resultiert in einer sortenreinen Bereitstellung, sodass keine Sequenzierkosten verursacht werden. Bei der lagerhaltigen Belieferung sind nur dann Sequenzierkosten zu berücksichtigen, wenn die Bereitstellung nicht sortenrein, sondern sequenziert erfolgt. In diesem Fall wird die Sequenzierung beim OEM durchgeführt. Insgesamt ergeben sich somit zehn verschiedene Logistikkonzepte, die mit dem Optimierungsmodell abgebildet werden.

Neben den in Tabelle 5-2 aufgeführten Kosten existieren auch Kosten, die von den Belieferungskonzepten unabhängig sind und somit im Optimierungsmodell vernachlässigt werden. Dazu gehören die Vereinnahmung im WE, die Bereitstellung der Materialien an der Montagelinie (d. h. der interne Transport vom Lager oder Trailer-Dock zur Montagelinie), sonstige administrative Kosten und Verpackungskosten. Unabhängig bedeutet, dass diese Prozessaktivitäten sowohl bei der lagerhaltigen als auch bei der lagerlosen Belieferung auftreten und sich nicht wesentlich unterscheiden. Es wird somit angenommen, dass der administrative Aufwand zur Warenvereinnahmung für beide Belieferungsformen gleich ist und keine Kostenunterschiede auftreten. Entsprechend können die aus der Warenvereinnahmung resultierenden Kosten vernachlässigt werden. Lediglich die benötigte Zeit zur Warenvereinnahmung im WE wird bei der Berechnung der konstanten Kapitalbindungskosten berücksichtigt. Zur Bereitstellung gehören der interne Transport (z. B. mittels Routenzug) sowie die Anstellung der Materialien an der Montagelinie (z. B. im Fahrzeug-Set). Aufgrund der Abhängigkeit der Bereitstellung von den werksspezifischen Infrastrukturen ist eine realitätsnahe Modellierung je nach Belieferungskonzept sehr umfangreich. Die Ma-



terialbereitstellung bildet in der Literatur daher ein eigenständiges Optimierungsfeld (vgl. z. B. [Cap-2015a; Lim-2012]). Aufgrund der Komplexität in der Bereitstellung wird vereinfachend angenommen, dass die Bereitstellkosten für lagerhaltige und lagerlose Bauteile durchschnittlich gleich sind, sodass diese Kosten vernachlässigt werden können. Weitere administrative Kosten, die z. B. aus der Auftragsabwicklung oder Disposition resultieren, werden ebenfalls nicht in der Modellierung berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Belieferungskonzepte keine unterschiedlich hohen administrativen Kosten verursachen. Verpackungskosten entstehen aus der individuellen Verpackung von Bauteilen zur bestmöglichen Ausnutzung des Stauraums im Ladungsträger (LT). Da sowohl bei lagerhaltigen als auch bei lagerlosen Belieferungen Verpackungen anfallen, werden diese Kosten vernachlässigt.

In den nächsten Abschnitten erfolgt in Anlehnung an *Tisch* die Modellierung der in Tabelle 5-2 aufgeführten Kostenkomponenten [fml-2016e, S. 34 ff.]. Die Kostenformeln beziehen sich auf den Ein-Perioden-Fall, wobei eine Periode einem Tag entspricht. Die Einheit jeder Kostenformel ist in Euro angegeben. Eine TE ist die kleinste unteilbare Einheit zur Modellierung des betrachteten Bauteils.

### 5.2.2.1 Transportkosten

#### Komplettladung (FTL)

Die Transportkosten für Komplettladungen  $c_{T,FTL}$  ergeben sich aus dem Produkt des Transportkostensatzes je Kilometer  $p_{FTL}$ , der direkten Entfernung vom Lieferanten zum Empfängerwerk  $e_{DR}$  und der Anzahl der durchgeführten Transporte  $q_T$ . Diese Berechnung gilt für alle Transportkonzepte außer für den Milkrun und den Vorlauf (VL) des Hub-and-Spoke-Konzeptes. Die Transportkosten des Milkruns  $c_{T,FTL,MR}$  unterscheiden sich in Bezug auf die verwendete Distanz, da diese i. d. R. größer ist als beim Direkttransport. Die Milkrun-Entfernung  $e_{MR}$  ergibt sich aus der gewählten Milkrun-Route. Beim Vorlauf des Hub-and-Spoke-Konzeptes wird als Entfernung  $e_{VL}$  die Distanz zwischen Lieferanten und Hub angesetzt. Formal lassen sich die FTL-Kosten wie folgt ausdrücken:

$$c_{T,FTL} = p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot q_T, \quad (5-1)$$

$$c_{T,FTL,MR} = p_{FTL} \cdot e_{MR} \cdot q_T, \quad (5-2)$$

$$c_{T,FTL,VL} = p_{FTL} \cdot e_{VL} \cdot q_T. \quad (5-3)$$

**Teilladung (LTL)**

Bei den Kosten für eine Teilladung (englisch: *Less than Truck Load*)  $c_{T,LTL}$  wird das frachtpflichtige Gewicht einer TE  $g_{FP}$  mit der Anzahl der versendeten TEs  $q_{TE}$  und mit dem dazugehörigen Transportkostensatz je frachtpflichtigem Gewicht  $p_{LTL}$  multipliziert:

$$c_{T,LTL} = p_{LTL} \cdot g_{FP} \cdot q_{TE} \cdot \quad (5-4)$$

**Hub-Hauptlauf (HL)**

Beim Hub-Hauptlauf können die Tarifmodalitäten je nach Spediteur variieren. Für die Transportkosten des Hub-Hauptlaufs  $c_{T,HL}$  wird angenommen, dass die Berechnung analog zu der Kostenberechnung einer Teilladung erfolgt. Der einzige Unterschied ist, dass das tatsächliche Gewicht einer TE  $g_{KG}$  zugrunde gelegt wird. Der Transportkostensatz je 100 kg  $p_{HL}$  ist fix für die betrachtete Hub-Werk-Relation. Formal bedeutet dies:

$$c_{T,LTL,HL} = p_{HL} \cdot g_{KG} \cdot q_{TE} \cdot \quad (5-5)$$

**Hub-Direktabholung (DA)**

Bei der Hub-Direktabholung wird analog zu FTL ein Transportkostensatz je Kilometer  $p_{DA}$  zugrunde gelegt. Zusätzlich kann der Transportkostensatz in mehrere Gewichtsklassen, abhängig vom tatsächlichen Gewicht der Lieferung, gestaffelt sein. Daraus ergibt sich:

$$c_{T,FTL,DA} = p_{DA} \cdot e_{HL} \cdot q_T \cdot \quad (5-6)$$

**Stoppkosten**

Die beim Milkrun anfallenden Stoppkosten  $c_{T,Stopp}$  ergeben sich aus der Multiplikation des Kostensatzes für die Zwischenhalte bei den unterschiedlichen Lieferanten  $p_{Stopp}$  mit der Anzahl der durchgeführten Transporte  $q_T$ :

$$c_{T,Stopp} = p_{Stopp} \cdot q_T \cdot \quad (5-7)$$

**Leergutrücktransportkosten**

Die Rückführung von Leergut gilt als eigenständiges Forschungsfeld (vgl. z. B. [Cra-1993; Kel-1989; Kro-1995; Fle-1997]). Eine umfängliche Modellierung des Leergutrücktransportes würde die Komplexität zur Auswahl des kostenoptimalen Logistikkonzeptes stark ver-

größern. Aus Gründen der Vollständigkeit wird der Leergutrücktransport daher unter der vereinfachenden Annahme, dass immer ein 1:1-Tausch der Ladungsträger erfolgt, aufgenommen. Um die Leergutrücktransportkosten zu berechnen, werden die jeweils anfallenden Transportkosten  $c_{T,*}$  mit dem Faktor  $kv$  multipliziert. Der Faktor  $kv$  stellt das Verhältnis des Lademeterbedarfs eines Ladungsträgers von Leergut zu Vollgut dar und wird als Klappverhältnis bezeichnet. Für die Kosten des Leergutrücktransportes ergibt sich formal:

$$c_{T,LG} = c_{T,*} \cdot kv . \quad (5-8)$$

### 5.2.2.2 Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten

#### Kapitalbindungskosten (konstant)

Unter konstanten Kapitalbindungskosten  $c_{KB,konst}$  fallen die Kapitalbindungskosten, die aufgrund der anfallenden Prozessschritte für eine Transporteinheit immer auftreten. Sie berechnen sich aus dem Produkt des Preises einer Transporteinheit  $p_{TE}$ , dem Tageszinssatz für Kapitalbindung  $r_{KB}$ , der Kapitalbindungsdauer  $t_{KB}$  (in Tagen) und der Anzahl der gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE}$ . Der Preis einer Transporteinheit  $p_{TE}$  berechnet sich aus dem Preis eines Bauteils multipliziert mit dem Packlos einer Transporteinheit. Die Kapitalbindungsdauer  $t_{KB}$  setzt sich aus vier verschiedenen Zeitelementen zusammen: Die Transitzeit  $t_{TR}$  umfasst die Dauer eines Transportes. Die Wareneingangszeit  $t_{WE}$  ist die Dauer zur Vereinnahmung der Ware. Die Bedarfsvorlaufzeit  $t_{BV}$  ist ein zeitlicher Puffer in Form von Sicherheitsbeständen. Die Pufferzeit  $t_{PF}$  ist die Dauer, die ein Trailer durchschnittlich auf dem Trailer-Yard verbringt. Diese Zeiten können je nach Logistikkonzept variieren. Es ergibt sich folgende formale Beschreibung der konstanten Kapitalbindungskosten:

$$\begin{aligned} c_{KB,konst} &= p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot (t_{TR} + t_{WE} + t_{BV} + t_{PF}) \cdot q_{TE} \\ &= p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} \cdot q_{TE} . \end{aligned} \quad (5-9)$$

#### Kapitalbindungskosten (dynamisch)

Die dynamischen Kapitalbindungskosten  $c_{KB,dyn}$  hängen von der Summe der Tagesbestände  $q_B$  ab, die wiederum von den Tagesbedarfen und den gelieferten Mengen abhängen (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Berechnung erfolgt durch die Multiplikation des Preises einer Transporteinheit  $p_{TE}$ , mit dem Tageszinssatz der Kapitalbindung  $r_{KB}$  und dem Tagesbestand:

$$c_{KB,dyn} = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot q_B . \quad (5-10)$$

**Lagerhaltungskosten (konstant)**

Die konstanten Lagerhaltungskosten  $c_{L,konst}$  setzen sich aus zwei Komponenten zusammen: den Kosten für die Lagerflächenbeanspruchung und den Kosten für die Ein- und Auslagerung von TE. Um die Kosten der Lagerflächenbeanspruchung zu erhalten, wird der Tageskostensatz für die Lagerfläche  $p_{FL}$  mit der durch die Transporteinheit beanspruchten Fläche, der Dauer der Beanspruchung und der Anzahl der gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE}$  multipliziert. Die beanspruchte Fläche ist der Quotient aus der Grundfläche des verwendeten Ladungsträgers  $a_{LT}$  und dem Stapelfaktor  $sf$ . Der Stapelfaktor gibt die Anzahl der Ladungsträger, die sich stapeln lassen, an. Es wird angenommen, dass die erforderlichen Abstände zwischen den Ladungsträgern im Flächenkostensatz enthalten sind. Die Dauer der Lagerflächenbeanspruchung (d. h. die Lagerdauer) entspricht der Bedarfsvorlaufzeit  $t_{BV}$  (in Tagen). Zur Berechnung der Kosten der Ein- und Auslagerung wird der Kostensatz der Ein- und Auslagerung  $p_{EA}$  mit der Anzahl der gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE}$  multipliziert. Es ergibt sich folgende Formel:

$$c_{L,konst} = \left[ p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} \right] \cdot q_{TE} \quad (5-11)$$

**Lagerhaltungskosten (dynamisch)**

Wie bei den dynamischen Kapitalbindungskosten werden bei den dynamischen Lagerhaltungskosten  $c_{L,dyn}$  die variierenden Tagesbestände berücksichtigt. Es wird das Produkt aus dem Tageskostensatz für die Lagerfläche  $p_{FL}$ , der beanspruchten Fläche eines Ladungsträgerstapels  $\frac{a_{LT}}{sf}$  und dem Tagesbestand  $q_B$  berechnet. Formal bedeutet das:

$$c_{L,dyn} = p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot q_B \quad (5-12)$$

**5.2.2.3 Sonstige Kosten****Trailermiete**

Die Kosten für die Trailermiete  $c_{TM}$  fallen für die Zeitspanne an, während der sich ein Trailer auf dem Werksgelände des OEM befindet. Diese Zeitspanne ergibt sich aus der Pufferzeit  $t_{PF}$  und der durchschnittlichen Trailerreichweite  $t_{TM}$  (jeweils in Tagen). Die Pufferzeit entspricht der durchschnittlichen Verweildauer des Trailers auf dem Trailer-Yard und fällt pro Transport an. Für die Trailermiete basierend auf der Pufferzeit wird der Tageskostensatz der Trailermiete  $p_{TM}$  mit der Pufferzeit  $t_{PF}$  und der Anzahl an Transporten  $q_T$  multipliziert. Die Trailerreichweite gibt die Anzahl an Tagen an, bis der Inhalt auf dem Trailer bei vorliegendem Tagesbedarf vollständig verbraucht ist. Die Trailerreichweite ist somit

eine Funktion der täglichen Nachfrage und der gelieferten Transporteinheiten. Da lagerlose Belieferungen i. d. R. zu voll ausgelasteten Transporten führen und für Bauteile mit hoher Vorhersagegenauigkeit und geringen Bedarfsschwankungen angewendet werden, gilt die Trailerreichweite durchschnittlich als konstant. Die Trailermiete basierend auf der Trailerreichweite ergibt sich aus dem Produkt des Tageskostensatzes der Trailermiete  $p_{TM}$  und der durchschnittlichen Trailerreichweite  $t_{TM}$ . Die gesamte Trailermiete ist die Summe aus der Trailermiete der Pufferzeit und der Trailermiete der Trailerreichweite. Formal ergibt sich:

$$c_{TM} = p_{TM} \cdot t_{PF} \cdot q_T + p_{TM} \cdot t_{TM} \cdot q_T \quad (5-13)$$

### Ladungsträgermiete

Ladungsträgermieten gelten als wichtiger Hebel um Bestände zu reduzieren [Bac-2006, S. 90]. Sie werden i. d. R. mit Tageskostensätzen von 0,01 Euro bis 3,00 Euro pro Ladungsträger berechnet [Sch-2005, S. 1 f.]. Die Kosten der Ladungsträgermiete  $c_{LT}$  ergeben sich aus dem Produkt des Tageskostensatzes der Ladungsträgermiete  $p_{LT}$ , der Beanspruchungsdauer eines Ladungsträgers  $t_{LT}$  und der Anzahl der gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE}$ . Die Beanspruchungsdauer entspricht der Anzahl an Tagen, für die sich der Ladungsträger im Ladungsträgerkreislauf befindet. Dazu gehören die zweifache Transitzeit  $t_{TR}$ , die Leergutpufferzeit beim Lieferanten  $t_{LG}$  und die Vollgutpufferzeit beim Lieferanten  $t_{VG}$ . Dieser Berechnung liegt ebenfalls die Annahme des 1:1-Tauschverhältnisses von Vollgut zu Leergut zugrunde. Formal bedeutet das:

$$\begin{aligned} c_{LT} &= p_{LT} \cdot t_{LT} \cdot q_{TE} \\ &= p_{LT} \cdot (2 \cdot t_{TR} + t_{LG} + t_{VG}) \cdot q_{TE} \end{aligned} \quad (5-14)$$

### Sequenzierkosten

Die Sequenzierkosten  $c_{SQ}$  können bei einer JIS-Belieferung (wenn aktuell noch nicht in JIS geliefert wird) oder bei einer lagerhaltigen Belieferung mit sequenzierter Bereitstellung anfallen (vgl. Erläuterungen zu Tabelle 5-2). Die Kosten ergeben sich aus dem Produkt des Kostensatzes der Sequenzierung pro Bauteil  $p_{SQ}$ , des Packloses der Transporteinheit  $u_{TE}$  und der Menge an gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE}$ . Formal lassen sich die Sequenzierkosten schreiben als:

$$c_{SQ} = p_{SQ} \cdot u_{TE} \cdot q_{TE} \quad (5-15)$$

### Trailerbewegungskosten

Die Trailerbewegungskosten  $c_{TB}$  für lagerlose Belieferungen können als Pendant zu den Ein- und Auslagerkosten bei der lagerhaltigen Belieferung verstanden werden. Die Kosten ergeben sich aus dem zweifachen Produkt (für Hin- und Rückweg) des Kostensatzes einer Trailerbewegung  $p_{TB}$  und der Anzahl an Transporten  $q_T$ . Formal bedeutet das:

$$c_{TB} = 2 \cdot p_{TB} \cdot q_T. \quad (5-16)$$

## 5.3 Entwicklung des Optimierungsmodells

Nachdem die einzelnen Kostenkomponenten der Inbound-Logistik beschrieben wurden, wird im Folgenden das eigentliche Optimierungsmodell vorgestellt. Zuvor wird der zugrundeliegende Modellierungsansatz erläutert.

### 5.3.1 Auswahl des Modellierungsansatzes

Das Ziel des Optimierungsmodells ist die Minimierung der Kosten des Inbound-Logistikprozesses je Logistikkonzept. Die Logistikkosten ergeben sich aus der Summe der je Logistikkonzept anfallenden Kostenkomponenten (vgl. Tabelle 5-2). Im Folgenden sind die Entscheidungsvariablen festzulegen. Es fällt auf, dass in jeder Kostenkomponente mindestens einer der folgenden drei Kostentreiber auftritt: Anzahl der durchgeführten Transporte  $q_T$ , Anzahl der gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE}$ , Summe der Tagesbestände  $q_B$ .

Die Besonderheit bei den Beständen besteht darin, dass diese davon abhängen, zu welchem Zeitpunkt welche Anzahl an Transporteinheiten angeliefert wird und wie hoch der Bedarf ist. Die Bestände werden somit durch die zeit- und mengenmäßige Belieferung determiniert. Das führt dazu, dass die Betrachtung einer einzelnen Periode nicht ausreicht und somit mehrere Perioden bei der Modellierung zu berücksichtigen sind. Die formale Berechnung der Summe an Tagesbeständen bei einer mehr-periodischen Betrachtung lautet:

$$q_B = \sum_{i \in \mathbb{N}^I} \left[ \sum_{j=1}^i (q_{TE,j} - d_{TE,j}) + \frac{1}{2} \cdot d_{TE,i} \right], \quad (5-17)$$

wobei  $d_{TE,j}$  der Bedarf gemessen in Transporteinheiten und  $\sum_{j=1}^i (q_{TE,j} - d_{TE,j})$  der Bestand am Ende von Periode  $i$  ist. Dabei ist  $i$  eine natürliche Zahl aus der Menge aller Perioden  $I$ . Unter der Annahme eines konstanten Bedarfs und Verbrauchs ergibt sich der

durchschnittliche Bestand während einer Periode aus der Summe des Bestands am Ende der Periode und der Hälfte des Bedarfs in dieser Periode. Für ausführlichere Erläuterungen zur Bestandsberechnung sei auf Abbildung B-1 im Anhang B.1 verwiesen.

Als Entscheidungsvariablen ergeben sich somit die Anzahl der Transporte  $q_{T,i}$  und die Anzahl der gelieferten Transporteinheiten  $q_{TE,i}$  in jeder Periode  $i \in \mathbb{N}^I$ , da sich die Bestände  $q_B$  über die gelieferten Transporteinheiten berechnen lassen. Folglich ist die Basis des Optimierungsmodells ein mehr-periodisches Losgrößenmodell. Da sowohl die Anzahl der gelieferten Transporteinheiten als auch die Anzahl der Transporte nur ganzzahlige Werte annehmen können, handelt es sich um ein ganzzahliges Optimierungsmodell. Die Entscheidungsvariablen werden mit Hilfe des Optimierungsmodells so bestimmt, dass die Zielfunktion bestehend aus den Logistikkosten minimal wird. Wie in Kapitel 2.4.2.2 beschrieben, optimieren *Kempkes et al.* und *Schöneberg et al.* die Inbound-Logistik durch die Bestimmung der optimalen Bestellmenge unter Verwendung eines mehr-periodischen Capacitated-Lot-Sizing-Problem (CLSP)-Modells. Dabei finden sowohl die gestaffelten Transporttarife der Gebietsspedition in der Automobilindustrie als auch die beschränkten Transportkapazitäten Berücksichtigung. Aufgrund der ähnlichen Problemstellung erscheint eine Modellierung in Anlehnung an das CLSP ebenso für das vorliegende Optimierungsproblem zur Auswahl der Belieferungs- und Transportkonzepte geeignet.

### 5.3.2 Modellformulierung

Das Ziel des Planungsbausteins ist die Bestimmung des günstigsten Logistikkonzeptes. Für die Zielerreichung wird in zwei Schritten vorgegangen:

1. Die Minimierung der Logistikkosten erfolgt zunächst separat für jedes Logistikkonzept. Dies geschieht durch die Bestimmung der optimalen Anzahl der Transporte sowie der optimalen Anzahl an Transporteinheiten je Periode für einen bestimmten Betrachtungshorizont.
2. Anschließend wird das Konzept mit den minimalen Logistikkosten ausgewählt. Für den Vergleich der Logistikkonzepte werden die Logistikkosten je Bauteil ausgewiesen.

Das Entscheidungsproblem unterliegt vielen Wenn-Dann-Beziehungen. Diese ergeben sich aus den gewichts- und kilometergestaffelten Transporttarifen. Wenn z. B. die Entfernung zum Lieferanten kleiner als 100 km ist, dann beträgt der Transportkostensatz 2 Euro/km, wenn die Entfernung kleiner als 200 km ist, dann liegt der Transportkostensatz bei 1,80 Eu-

ro/km, etc. Die Transportkosten lassen sich mit Stufenfunktionen beschreiben. Eine beispielhafte Stufenfunktion für Transportkosten ist in Abbildung B-2 im Anhang B.2 dargestellt. Die gestaffelten Transporttarife führen somit zu einer nicht-linearen Zielfunktion, die i. d. R. schwerer zu lösen ist als eine lineare Zielfunktion (vgl. den Exkurs zur mathematischen Optimierung in Kapitel 2.4.2.2). Um eine lineare Zielfunktion zu erhalten, wird je Transporttarifstufe eine Entscheidungsvariable eingeführt. Somit ist für jede Periode  $i$  und jede Tarifstufe  $k$  die optimale Anliefermenge  $q_{TE,i,k}^*$  zu bestimmen.

### Modellierung des Ein-Produkt-Falls

Die Formeln 5-18 bis 5-25 stellen das entwickelte ganzzahlig-lineare Optimierungsmodell für den Ein-Produkt-Fall eines Logistikkonzeptes dar [Maa-2017c, S. 498 f.].

$$\begin{aligned}
 \min_{q_{TE,i,k}, q_{T,i,k}} \quad & \sum_{i \in \mathbb{N}^I} \sum_{k \in \mathbb{N}^K} \lambda_{T,i,k} \cdot q_{T,i,k} \\
 & + \lambda_B \cdot \sum_{i \in \mathbb{N}^I} \left[ \sum_{j=1}^i \left[ \sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,j,k} - d_{TE,j} \right] + \frac{1}{2} \cdot d_{TE,i} \right] \\
 & + \sum_{i \in \mathbb{N}^I} \sum_{k \in \mathbb{N}^K} \lambda_{TE,i,k} \cdot q_{TE,i,k} \tag{5-18}
 \end{aligned}$$

unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen (NB):

$$\sum_{j=1}^i \left[ \sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,j,k} - d_{TE,j} \right] \geq 0 \quad \forall i \in \mathbb{N}^I \tag{5-19}$$

$$q_{TE,i,k} \leq \left\lfloor \frac{ub_k}{w_{TE,k}} \right\rfloor \cdot q_{T,i,k} \quad \forall i \in \mathbb{N}^I, k \in \mathbb{N}^K \tag{5-20}$$

$$q_{TE,i,k} \geq \left\lceil \frac{lb_k}{w_{TE,k}} \right\rceil \cdot q_{T,i,k} \quad \forall i \in \mathbb{N}^I, k \in \mathbb{N}^K \tag{5-21}$$

$$\sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,i,k} > \left\lfloor \frac{l_{FT}}{g_{FP}} \right\rfloor \cdot \left[ \sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{T,i,k} - 1 \right] \quad \forall i \in \mathbb{N}^I \tag{5-22}$$

$$\sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,i,k} \geq q_{TE,min} \quad \forall i \in \mathbb{N}^I \tag{5-23}$$

$$q_{TE,i,k}, q_{T,i,k} \geq 0 \quad \forall i \in \mathbb{N}^I, k \in \mathbb{N}^K \tag{5-24}$$

$$q_{TE,i,k}, q_{T,i,k} \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in \mathbb{N}^I, k \in \mathbb{N}^K \tag{5-25}$$

Die Zielfunktion 5-18 gilt für alle in Tabelle 5-2 aufgeführten Logistikkonzepte. Die Abgrenzung der Logistikkonzepte erfolgt durch die Einführung der Zielfunktionskoeffizienten  $\lambda_B$ ,  $\lambda_T$  und  $\lambda_{TE}$ . Je nach Logistikkonzept variieren diese drei Koeffizienten. Die Ausprägungen der Zielfunktionskoeffizienten  $\lambda_T$  und  $\lambda_{TE}$  hängen zudem von der Periode  $i$  und dem



in dieser Periode verwendeten Tarif  $k$  (wobei  $k$  eine natürliche Zahl aus der Menge aller betrachteten Tarife  $K$  ist) ab. Für eine detaillierte Herleitung der Zielfunktionskoeffizienten sei auf Anhang B.3 verwiesen. Die Zielfunktionskoeffizienten aller Logistikkonzepte sind in Anhang B.4 aufgeführt. Im Folgenden werden die Nebenbedingungen erläutert. Die Bedeutungen der einzelnen Nebenbedingungen sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Bedeutung der Nebenbedingungen des Optimierungsmodells

NB	Bedeutung
(5-19)	Stellt sicher, dass die Nachfrage vollständig bedient wird.
(5-20)	Stellt sicher, dass Tarif $k$ nur verwendet wird, wenn dessen Obergrenze nicht überschritten wird.
(5-21)	Stellt sicher, dass Tarif $k$ nur verwendet wird, wenn dessen Untergrenze nicht unterschritten wird.
(5-22)	Stellt sicher, dass die durchgeführten Transporte voll ausgelastet sind, bevor ein zusätzlicher Transport initiiert wird.
(5-23)	Stellt sicher, dass die Mindestbestellmenge $q_{TE,min}$ eingehalten wird.
(5-24)	Nicht-Negativitätsbedingung von $q_{T,i,k}$ und $q_{TE,i,k}$ .
(5-25)	Ganzzahligkeitsbedingung von $q_{T,i,k}$ und $q_{TE,i,k}$ .

NB 5-19 besagt, dass der Bedarf bedient werden muss. Die bis zu einem Zeitpunkt angelieferte Menge  $\sum_k q_{TE,j,k}$  muss daher größer oder gleich der nachgefragten Menge  $d_{TE,j}$  sein.

Die Nebenbedingungen NB 5-20 und NB 5-21 beziehen sich auf die gestaffelten Transporttarife und stellen sicher, dass der jeweilige Tarif  $k$  nur dann verwendet wird, wenn die Ober- und Untergrenze  $ub_k$  bzw.  $lb_k$  des Tarifes nicht über- bzw. unterschritten wird. Die rechte Seite von NB 5-20 drückt aus, wie viele Transporteinheiten bei der Anzahl der durchgeführten Transporte maximal im Tarif  $k$  angeliefert werden dürfen. Die maximal zulässige Anzahl an TE in einem Tarif  $k$  wird wie folgt berechnet: Es wird der Quotient aus der Tarifobergrenze  $ub_k$  (z. B. 100 kg) und der Berechnungsgrundlage einer TE  $w_{TE,k}$ , um diese in die Tarifstufen einzuordnen (z. B. das frachtpflichtige Gewicht einer Transporteinheit), bestimmt. Die größte ganze Zahl aus diesem Quotienten wird mit der Anzahl an Transporten  $q_{T,i,k}$  multipliziert. NB 5-21 ist analog aufgebaut, nur dass hier die Untergrenze  $lb_k$  der Tarifstufe bestimmt wird – d. h. die Anzahl der Transporteinheiten, die bei der Anzahl der durchgeführten Transporte mindestens angeliefert werden muss, damit Tarif  $k$  gültig ist. Dazu wird die kleinste ganze Zahl aus dem Quotienten aus der Tarifuntergrenze  $lb_k$  und der Berechnungsgrundlage einer TE  $w_{TE,k}$  mit der Anzahl an Transporten  $q_{T,i,k}$  multipliziert.

NB 5-22 gewährleistet, dass die Anzahl der Transporte in einer Periode für die Menge der gelieferten TE in dieser Periode sinnvoll ist – d. h. unnötig viele Transporte sind nicht zulässig. Die rechte Seite von NB 5-22 gibt die maximale Anzahl an TE an, die mit einem

Transport weniger als der optimalen Anzahl an Transporten angeliefert werden kann. Dazu wird die maximale Anzahl an TE, die auf einem Trailer transportiert werden darf, mit der um eins verringerten Anzahl an Transporten  $q_{T,i,k} - 1$  multipliziert. Die maximale Anzahl an TE, die auf einem Trailer transportiert werden darf, ergibt sich aus der größten ganzen Zahl aus dem Quotienten der maximalen Nutzlast eines Frachträgers  $l_{FT}$  und dem frachtpflichtigen Gewicht einer TE  $g_{FP}$ .

NB 5-23 garantiert, dass die abgerufene Menge in einer Periode immer einer Mindestanzahl an Transporteinheiten  $q_{TE,min}$  (d. h. einer Mindestbestellmenge) entspricht. NB 5-24 ist die Nicht-Negativitätsbedingung und NB 5-25 ist die Bedingung der Ganzzahligkeit  $\mathbb{Z}$  der Entscheidungsvariablen für Transporte und Transporteinheiten.

### Modellierung des Mehr-Produkt-Falls

Beim Ein-Produkt-Fall wird die Optimierung für die Belieferung eines einzelnen Bauteils durchgeführt. Dies kann jedoch zu nicht realistischen Logistikkosten führen, da auf einer Transportrelation häufig über 100 verschiedene SNR transportiert werden. Die Bauteilvielfalt auf einer Transportrelation kann einen gravierenden Einfluss auf die Transportkosten haben, da ggf. bessere Transportauslastungen aufgrund höherer Bedarfe oder geringere Transporttarife aufgrund einer Veränderung des frachtpflichtigen Gewichts erzielt werden können. Eine Anpassung des Optimierungsmodells auf den Mehr-Produkt-Fall bringt allerdings zwei Probleme mit sich: Zum einen würde sich die Anzahl der Entscheidungsvariablen vervielfachen<sup>12</sup> und zum anderen wäre die mit der Bauteilvielfalt verbundene Datenbeschaffung mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden.

Folglich ist es erforderlich, eine alternative Vorgehensweise zur Modellierung des gesamten Güterstroms von einem Lieferantenstandort zu einem Empfängerwerk zu entwickeln. Dazu soll eine theoretische Transporteinheit geschaffen werden, in der alle Bauteile einer Relation anteilig zusammengefasst werden. Diese theoretische Transporteinheit wird als Referenz-Transporteinheit (Ref-TE) bezeichnet. Um die Ref-TE zu bestimmen, wird für die relevanten Eigenschaften der gewichtete Durchschnitt basierend auf den Bauteilbedarfen gebildet. Formal lässt sich das wie folgt ausdrücken [fml-2016e, S. 57 ff.]:

$$z_{REF} = \frac{\sum_{s \in S} z_s \cdot d_s}{\sum_{s \in S} d_s} \quad (5-26)$$

$$d_{REF} = \sum_{s \in S} d_s \quad \text{mit } S := \{s \mid s \text{ ist eine SNR der Transportrelation}\} \quad (5-27)$$

<sup>12</sup> Bei 30 Perioden, 27 Tarifstufen und 100 SNR wären es 81.810 Entscheidungsvariablen statt 1.625 Entscheidungsvariablen im Ein-Produkt-Fall.

wobei  $z_s$  eine der relevanten Eigenschaften und  $d_s$  der Bedarf von SNR  $s$  ist. Der Bedarf der Ref-TE  $d_{REF}$  ist die Summe aus den Bedarfen aller betroffenen SNR. Als relevante Eigenschaften werden alle Eigenschaften einer Transporteinheit bezeichnet, die sich auf das Optimierungsergebnis auswirken. Folgende Parameter zählen dazu, sodass für diese der gewichtete Durchschnitt für die Ref-TE zu bestimmen ist:

- Fläche des Ladungsträgers  $a_{LT}$ ,
- tatsächliches Gewicht der Transporteinheit  $g_{KG}$ ,
- frachtpflichtiges Gewicht der Transporteinheit  $g_{FP}$ ,
- Preis der Transporteinheit  $p_{TE}$ ,
- Mindestbestellmenge der Transporteinheit  $q_{TE,min}$ .

Mit den gebildeten Ref-TE ist es möglich, das Optimierungsmodell im Ein-Produkt-Fall anzuwenden. Anschließend ist die Ref-TE wieder aufzulösen, um die Kosten je SNR zu erhalten. Dazu wird die Gewichtung jeder SNR (analog zu Formel 5-26), auf die Kostenblöcke angewendet, die von den zuvor aufgeführten Eigenschaften betroffenen sind. Die anderen Kostenblöcke können unabhängig von den SNR berechnet werden.

### 5.3.3 Erweiterungen des Grundmodells

Zur Steigerung der Praxisrelevanz wird das Optimierungsmodell im Folgenden um zusätzliche Nebenbedingungen erweitert. Diese Nebenbedingungen gelten nicht für alle Logistikkonzepte, sondern bilden zusätzliche Aspekte der Belieferung ab. Daher werden sie erst jetzt als Erweiterungen zum Grundmodell vorgestellt. Es werden Anlieferfrequenzen und die Auslastung von Direkttransporten modelliert.

#### Modellierung von Anlieferfrequenzen

Eine Herausforderung besteht in der Modellierung von Lagerrestriktionen, d. h. der Beschränkung der Liefermenge aufgrund von verfügbaren Lagerkapazitäten. Für eine erfolgreiche Modellierung von Lagerrestriktionen müssen die Füllgrade der Lager bekannt sein, um eine maximal zulässige Bestandsmenge festlegen zu können. Die Ermittlung dieser maximal zulässigen Bestandsmenge gestaltet sich in der Praxis allerdings schwierig, da in einem Lager meist nicht nur die Bauteile eines einzelnen Lieferanten, sondern verschiedener Lieferanten gelagert werden. Da das Modell für die Optimierung bestimmter Transportrelationen und der entsprechenden Bauteile vorgesehen ist, wäre eine Berücksichtigung sämtlicher Bauteile eines Lagers nicht zielführend, sodass von der Modellierung der Lager-

restriktion in Form von maximal zulässigen Bestandsmengen abgesehen wird.

Eine Möglichkeit, um eine Beschränkung der Lagermenge indirekt abzubilden, besteht in der Modellierung von Anlieferfrequenzen (AF). Durch eine Senkung der Anlieferfrequenz (z. B. auf Montag, Mittwoch und Freitag statt einer täglichen Anlieferung) lassen sich verschiedene Glättungseffekte erzielen: Die Anlieferungsmengen je Transport steigen und gleichzeitig können die Schwankungen der Anlieferungsmengen gesenkt werden. Weiterhin lässt sich der Lagerbestand indirekt über Anlieferfrequenzen steuern. Je häufiger oder seltener die Anlieferung stattfindet, desto weniger bzw. mehr Bauteile müssen gelagert werden (vgl. Abbildung B-3 in Anhang B.5). Anlieferfrequenzen gelten daher als Kontrollmechanismus für eine höhere Fahrzeugauslastung und eine verbesserte Koordination der Lagerbestände innerhalb der Supply Chain [Sch-2010b, S. 217 f.; Vis-2001, S. 278].

Für die Modellierung von Anlieferfrequenzen wird im Modell eine zusätzliche binäre Entscheidungsvariable  $f_i$  eingeführt, die aussagt, ob in Periode  $i$  eine Anlieferung erlaubt ist ( $f_i = 1$ ) oder nicht ( $f_i = 0$ ). Anlieferfrequenzen sind für alle lagerhaltig angelieferten Bauteile relevant. In den Formeln 5-28 bis 5-34 sind die zusätzlichen Nebenbedingungen zur Modellierung der Anlieferfrequenzen aufgeführt [fml-2016e, S. 54 f.]. Interpretationen von jeder Nebenbedingung sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst.

$$\sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,m+h \cdot (n-1),k} \geq \sum_{\substack{i=m+ \\ h \cdot (n-1)}}^{h \cdot n} d_{TE,i} \cdot f_{m+h \cdot (n-1)} - \sum_{\substack{i=m+1+ \\ h \cdot (n-1)}}^{h \cdot n} \sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,i,k} \quad \forall n \in [1, \frac{I}{h}], m \in [1, h-1] \quad (5-28)$$

$$\sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,n \cdot h,k} \geq d_{TE,n \cdot h} \cdot f_{n \cdot h} \quad \forall n \in [1, \frac{I}{h}] \quad (5-29)$$

$$\sum_{\substack{i=1+ \\ h \cdot (n-1)}}^{h \cdot n} \sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{TE,i,k} \leq \sum_{\substack{i=1+ \\ h \cdot (n-1)}}^{h \cdot n} d_{TE,i} \quad \forall n \in [1, \frac{I}{h}] \quad (5-30)$$

$$\sum_{k \in \mathbb{N}^K} q_{T,i,k} \leq f_i \cdot q_{T,max} \quad \forall i \in \mathbb{N}^I \quad (5-31)$$

$$f_i = f_{i-h} \quad \forall i := \{i \in \mathbb{N}^I \mid i > h\} \quad (5-32)$$

$$f_i \in \{0; 1\} \quad \forall i \in \mathbb{N}^I \quad (5-33)$$

$$n, m \in \mathbb{N} \quad (5-34)$$

NB 5-28 und NB 5-29 stellen sicher, dass die Nachfrage in jeder Anlieferperiode  $n$  unter Berücksichtigung der Anlieferfrequenzen durch die Summe der gelieferten Transporte in-

heiten gedeckt ist. Das bedeutet, dass wenn in einer Periode keine Anlieferung stattfindet, die Nachfrage in dieser Periode dennoch durch die Anlieferung aus einer vorherigen Periode bedient wird. NB 5-28 bezieht sich auf Periode  $i = m + h(n - 1)$  bis Periode  $hn - 1$ . NB 5-29 bezieht sich auf die letzte Periode  $i = hn$  einer Anlieferperiode  $n$ .

NB 5-30 gibt an, dass die Liefermenge einer Anlieferperiode  $n$  die Bedarfsmenge der gleichen Anlieferperiode nicht überschreitet, damit eine regelmäßige Anlieferung sichergestellt ist und keine unnötigen Lagerbestände generiert werden. Dabei ist  $I$  die maximale Anzahl der betrachteten Perioden  $i$ ,  $h$  die Anzahl an Perioden in einer Anlieferperiode  $n$  und  $\frac{I}{h}$  ist die maximale Anzahl an Anlieferperioden  $n$ . NB 5-31 garantiert, dass eine definierte maximale Anzahl an Transporten  $q_{T,max}$  je Anliefertag  $f_i = 1$  nicht überschritten wird. Zusätzlich wird sichergestellt, dass an den Tagen, an denen keine Anlieferung vorgesehen ist (d. h. wenn  $f_i = 0$ ), keine Transporte stattfinden.

NB 5-32 stellt sicher, dass die ermittelten Anliefertage über den Betrachtungszeitraum gleich bleiben. Der Hilfsindex  $h$  gibt die Anzahl der Tage an, die für die Festlegung der Anlieferfrequenzen betrachtet werden (z. B. 5 Arbeitstage (AT)). Zur Verdeutlichung sei diese NB an einem Beispiel erläutert: Die Anliefertage sind immer dienstags ( $i = 2$ ) und freitags ( $i = 5$ ). Der Betrachtungshorizont beträgt zwei Wochen und umfasst somit  $n = 2$  Anlieferperioden, was insgesamt  $I = n \cdot h = 10$  AT entspricht. Diese Nebenbedingung garantiert, dass auch in der zweiten Woche die Anliefertage Dienstag und Freitag sind, da  $f_2 = f_{7-5}$  und  $f_5 = f_{10-5}$ . NB 5-33 ist die Binärbedingung der Anlieferfrequenz. NB 5-34 stellt sicher, dass die Indizes  $n$  und  $m$  in der Menge der natürlichen Zahlen enthalten sind.

Die gegebene Anlieferfrequenz eines Bauteils lässt sich durch die zusätzliche Nebenbedingung NB 5-35 modellieren [fml-2016e, S. 55]. Diese Nebenbedingung besagt, dass die Summe aller Anlieferfrequenzen  $f_i$  über alle Perioden  $I$  gleich dem Produkt der vorgegebenen Anlieferfrequenz  $af$  und der Anzahl der Anlieferperioden  $n$  sein muss.

$$\sum_{i \in \mathbb{N}^I} f_i = n \cdot af \quad \forall i \in \mathbb{N}^I \quad (5-35)$$

### Modellierung der Auslastung von Direkttransporten

Im lagerhaltigen Fall wird eine hohe Auslastung der Lkws über die zuvor eingeführten Anlieferfrequenzen gesteuert. Im Unterschied dazu folgen lagerlose Anlieferungen meist keinen festen Anlieferfrequenzen. Eine hohe Auslastung der Trailer wird in diesen Fällen durch bestimmte Packalgorithmen sichergestellt (vgl. z. B. [Con-2014; Coc-2006]). Eine Integration von Packalgorithmen im vorliegenden Optimierungsmodell würde jedoch den Rahmen die-

Tabelle 5-4: Ergänzende Nebenbedingungen zur Modellierung von Anlieferfrequenzen

NB	Bedeutung
(5-28)	Stellt sicher, dass die Nachfrage in den Perioden $i = m+h(n-1)$ bis $i = h(n-1)$ durch die Summe an gelieferten Transporteinheiten der Vorperioden (unter Berücksichtigung der Anlieferfrequenzen) vollständig bedient wird.
(5-29)	Stellt sicher, dass die Nachfrage in der letzten Periode $i = hn$ einer Anlieferperiode $n$ durch die Summe an gelieferten Transporteinheiten der Vorperioden (unter Berücksichtigung der Anlieferfrequenzen) vollständig bedient wird.
(5-30)	Legt die maximale Liefermenge in einer Anlieferperiode $n$ in Abhängigkeit von den Bedarfen in dieser Anlieferperiode fest.
(5-31)	Stellt sicher, dass die maximale Anzahl der Transporte $q_{T,max}$ nicht überschritten und die definierte Anlieferfrequenz nicht verletzt wird.
(5-32)	Stellt sicher, dass die Anliefertage in jeder Woche über den gesamten Betrachtungszeitraum $I$ gleich sind.
(5-33)	Binärbedingung der Anlieferfrequenz $f_i$ .
(5-34)	Indizes $n$ und $m$ sind in der Menge der natürlichen Zahlen enthalten.
(5-35)	Stellt sicher, dass die Summe der Anlieferfrequenzen $f_i$ der vorgegebenen Anlieferfrequenz $a.f$ aller Anlieferperioden $n$ entspricht.

ser Arbeit überschreiten, zumal sie eher auf operativer Steuerungsebene und weniger auf taktischer Ebene angewendet werden. Entsprechend ist die Lkw-Auslastung für lagerlose Direkttransporte (oder für lagerhaltige Direkttransporte, die ohne Anlieferfrequenzen geliefert werden) über eine zusätzliche Nebenbedingung zu modellieren.

Die Auslastung der Transporte wird im Grundmodell bislang nur in NB 5-22 adressiert. Diese NB reguliert die Anzahl der Transporte in einer Periode, indem sichergestellt wird, dass erst ein neuer Transport initiiert wird, wenn alle anderen Transporte voll ausgelastet sind. Wird die Kapazität der Lkws um nur eine Transporteinheit überstiegen, dann wird diese einzelne Transporteinheit in einer eigenen Komplettlading angeliefert. Dies würde sich negativ auf die Transportkosten je Transporteinheit auswirken. Zudem würde ein solches Vorgehen in der Praxis nicht umgesetzt. Daher wird zusätzlich folgende Nebenbedingung für die Mindestauslastung eines FTL-Transportes formuliert [fml-2016e, S. 56]:

$$q_{TE,i,k} \geq \left\lfloor \frac{l_{FT}}{g_{FP,TE}} \right\rfloor \cdot (q_{T,i,k} - 1) + \left\lceil \frac{l_{FTL,min}}{g_{FP,TE}} \right\rceil \quad \forall i \in \mathbb{N}^I, k \in \mathbb{N}^K \quad (5-36)$$

wobei  $l_{FTL,min}$  die minimale Auslastung eines Transportes (z. B. 20 t frachtpflichtiges Gewicht) ist. Die Anzahl der Transporteinheiten in Periode  $i$  in Tarif  $k$  muss mindestens gleich der Anzahl der Transporteinheiten sein, die sich aus der Vollaustung aller Transporte in dieser Periode und Tarifstufe weniger einem Transport (linke Seite der Summe) und der Minimalauslastung eines FTL-Transportes (rechte Seite der Summe) ergibt.

## 5.4 Zusammenfassung und kritische Reflexion des Optimierungsmodells

In diesem Kapitel wurde ein Optimierungsmodell zur Auswahl des kostengünstigsten Logistikkonzeptes entwickelt. Es wurden zehn verschiedene Logistikkonzepte – bestehend aus verschiedenen Belieferungs- und Transportkonzepten – mittels eines Prozesskostenansatzes modelliert. Dazu wurden die Kostenkomponenten je Logistikkonzept identifiziert und zunächst separat modelliert. Anschließend wurde ein Grundmodell entwickelt, das für alle Logistikkonzepte gültig ist. Die Bildung von Referenz-Transporteinheiten ermöglicht die aufwandsarme Anwendung des Optimierungsmodells auf den Mehr-Produkt-Fall. Anschließend wurde das Grundmodell durch die Modellierung von Anlieferfrequenzen sowie der Minimalauslastung von FTL-Transporten erweitert.

Insgesamt ist festzuhalten, dass alle gestellten Anforderungen an das Optimierungsmodell erfüllt wurden. Durch die prozesskostenbasierte Betrachtung der verschiedenen Logistikkonzepte kann die integrierte Optimierung von Belieferungs- und Transportkonzepten erfolgen (A2.1 und A2.2), wodurch die zweite Forschungsfrage beantwortet wurde. Es ist anzumerken, dass eine Erweiterung des Optimierungsmodells um zusätzliche Logistikkonzepte (z. B. einen lagerlosen Milkrun) denkbar ist (A2.8). Für ein neues Konzept müssen lediglich die drei Zielfunktionskoeffizienten identifiziert und gegebenenfalls zusätzliche Nebenbedingungen aufgestellt werden. Vorarbeiten haben zudem gezeigt, dass sich das Modell auch um nicht monetäre Zielkriterien, wie CO<sub>2</sub>-Emissionen, erweitern lässt (vgl. [Maa-2017c; fml-2016e]). Die Einführung zusätzlicher Entscheidungsvariablen ermöglicht die Abbildung der verschiedenen Tarifstrukturen sowie die Erzeugung eines linearen Modells (A2.3). Das Ergebnis des Optimierungsmodells weist die optimale Bestellmenge sowie die optimale Anzahl an Transporten je Periode je Logistikkonzept aus. Damit lassen sich die Prozesskosten der Inbound-Logistik berechnen und anschließend auf Kosten je Bauteil verteilen. Dadurch wird ein kostenbasierter Vergleich der Logistikkonzepte möglich, um das günstigere Logistikkonzept auszuwählen. Ein zusätzlicher Vorteil des Optimierungsmodells ist die vom Steuerungskonzept unabhängige Einsatzmöglichkeit. So ist es denkbar, das Optimierungsmodell auch in anderen Situationen anzuwenden, wie z. B. der Planung des Inbound-Prozesses für ein neues Bauteil. Für die Anwendung des Optimierungsmodells wird eine Vielzahl an Daten benötigt, da der gesamte Güterstrom einer Transportrelation betrachtet wird (A2.4). Für die Berechnung des Mehr-Produkt-Falls müssen die Daten in einem vorgeschalteten Schritt so aufbereitet werden, dass die Ref-TE gebildet werden können. Dadurch

wird die Komplexität des Modells reduziert, sodass eine angemessene Rechenzeit erwartet wird (A2.6). Der Aufwand in der Datenbeschaffung ist nicht zu unterschätzen, wird für eine überschaubare Anzahl an Transportrelationen jedoch als vertretbar eingestuft (A2.7). Das Optimierungsmodell ist zudem auf die Betrachtung mehrerer Perioden ausgelegt (A2.5).

Trotz der Erfüllung aller Anforderungen sind an dieser Stelle kritische Aspekte anzumerken. Aufgrund der Vernachlässigung bestimmter Kosten (z. B. Bereitstellkosten, administrative Kosten) ist von einer unreflektierten Verwendung der vom Modell kalkulierten absoluten Logistikkosten abzusehen. Dennoch ist der Vergleich der Logistikkosten zweier Logistikkonzepte aufgrund der relativen Betrachtung aussagekräftig. Desweiteren werden innerhalb des Optimierungsmodells keine vertraglichen Rahmenbedingungen mit den Lieferanten geprüft. Daher ist im Nachgang sicherzustellen, dass die berechneten Logistikkonzepte auch realisierbar sind. Es wird jedoch empfohlen, auch die nicht vertraglich zulässigen Konzepte zu optimieren, um die größtmöglichen Optimierungspotenziale in der Inbound-Logistik zu identifizieren. Im Kontext des Steuerungskonzeptes ist das Optimierungsmodell auf die identifizierten Grenzbauteile sowie auf die Bauteile derselben Transportrelation anzuwenden. Die Häufigkeit der Anwendung des Optimierungsmodells hängt dabei von dem betrachteten OEM und dessen Rahmenbedingungen sowie der Häufigkeit der Anwendung der Methode zur Grenzbauteilidentifikation ab. Im Optimierungsmodell wurden zudem sämtliche Investitionen und Kosten, die für die Umstellung auf das kostengünstigere Logistikkonzept anfallen würden, vernachlässigt. Dieser Aspekt der Umstellung wird daher im nachfolgenden Kapitel adressiert.



## 6 Flexible Umstellung des Inbound-Prozesses

---

In diesem Kapitel wird der dritte und letzte Planungsbaustein des Steuerungskonzeptes erarbeitet. Nachdem in Kapitel 4 die für die Flexibilitätsbetrachtung relevanten Grenzbau- teile identifiziert und in Kapitel 5 die Prozesskosten verschiedener Logistikkonzepte mit Hilfe eines Optimierungsmodells berechnet wurden, widmet sich das vorliegende Kapitel der monetären Entscheidung, ob und zu welchem Zeitpunkt eine flexible Umstellung statt- finden sollte. Um zu dieser Entscheidung zu gelangen, werden in diesem Kapitel zwei Ziele verfolgt: Zum einen soll ein Bewertungsvorgehen zur Bestimmung der Umstellkosten und Umstell dauern erarbeitet werden. Mit Hilfe dieses Vorgehens soll zudem der Effekt aus Flexibilisierungsmaßnahmen bewertbar gemacht werden. Zum anderen soll ein Entschei- dungsmodell entwickelt werden, um festzulegen, ob sich Logistikkonzeptumstellungen aus monetärer Sicht lohnen und ob eine Investition in Flexibilisierungsmaßnahmen erfolgen sollte, um dadurch künftige Umstellungen zu begünstigen. Das Gesamtergebnis wird als Flexibilitätsansatz bezeichnet.

Dieses Kapitel baut auf einer Arbeit von *Maas und Fottner* und durch die Autorin inhaltlich angeleitete Studienarbeiten auf (vgl. [Maa-2017b; fml-2015c; fml-2017b; fml-2017c]).

### 6.1 Betrachtungsumfang des Flexibilitätsansatzes

Für eine Entwicklung des Flexibilitätsansatzes werden zunächst die an diesen gestellten Anforderungen erörtert. Anschließend wird ein Überblick über das Vorgehen zur Entwick- lung des Ansatzes gegeben.

#### 6.1.1 Anforderungen an den Flexibilitätsansatz

Die definierten Anforderungen sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst und werden im Fol- genden erläutert.

*Tabelle 6-1: Anforderungen an den Flexibilitätsansatz*

- 
- A3.1.** Berücksichtigung der Flexibilitätsdimensionen Kosten und Zeit
  - A3.2.** Absolute, monetäre Bewertung von Umstellentscheidungen
  - A3.3.** Integration von Flexibilität in Umstellentscheidungen
  - A3.4.** Mehrperiodische Betrachtung von Umstellentscheidungen
  - A3.5.** Berücksichtigung von zukünftigen, unsicheren Entwicklungen
  - A3.6.** Sicherstellung einer hohen Praxistauglichkeit
-

**A3.1. Flexibilitätsdimensionen Kosten und Zeit:** Zwei Dimensionen von Flexibilität sind Zeit und Kosten [Sla-1983, S. 7]. Zum einen werden durch Umstellungen von Logistikkonzepten Kosten verursacht (Umstellkosten) und zum anderen nimmt eine Umstellung eine gewisse Zeit in Anspruch (Umstelldauer). Zusätzlich können weitere Kosten für Flexibilisierungsmaßnahmen entstehen, um die Zeit für zukünftige Umstellungen zu verkürzen oder die Kosten dieser Umstellungen zu senken. Entsprechend sind beide Dimensionen bei der Bewertung von Umstellungen und von Flexibilisierungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

**A3.2. Absolute, monetäre Bewertung:** Sowohl die Umstellung eines Logistikkonzeptes als auch die Steigerung von Flexibilität verursachen Kosten. Die Verwendung eines alternativen Logistikkonzeptes muss einen ausreichend großen Nutzen aufweisen, sodass die Kosten für eine Umstellung gerechtfertigt sind. Für eine Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen, sollte der Nutzen monetär ausgedrückt werden. Ebenso tritt der positive Effekt von zusätzlicher Flexibilität nur dann ein, wenn Aufwand und Nutzen der Flexibilisierungsmaßnahmen in einem sinnvollen Verhältnis zueinander stehen [Pfe-2016, S. 26; Hoc-2004, S. 26; Dam-2002, S. 39]. Der Nutzen aus Flexibilisierungsmaßnahmen lässt sich in geringeren Umstellkosten messen. Der Aufwand für Flexibilisierungsmaßnahmen sind Aktivitäten, die die Umstellung beschleunigen und die sich in Kosten ausdrücken lassen. Insgesamt soll die Zielgröße der Umstellbewertung absolut und monetär sein.

**A3.3. Flexibilität:** Die Integration von Flexibilität im Entscheidungsmodell für Umstellungen lässt sich in zweierlei Hinsicht auslegen: Zum einen sollen Flexibilisierungsmaßnahmen Berücksichtigung finden. D. h. es soll darüber entschieden werden, ob in Flexibilisierungsmaßnahmen investiert werden sollte, um zukünftige Umstellungen zu begünstigen. Zum anderen soll mit Hilfe des Modells der monetäre Wert der flexiblen Inbound-Logistik bestimmt werden können. Das bedeutet, dass das Ergebnis der Bewertung angibt, wie groß der Wert ist, die Logistikkonzepte bei gegebenen Umstellkosten umstellen zu können.

**A3.4. Mehrperiodische Betrachtung:** Die Kosten für Flexibilisierungsmaßnahmen treten vor dem eigentlichen Nutzen aus der zusätzlich generierten Flexibilität auf [Nag-2003, S. 18]. Das bedeutet, dass Flexibilisierungsmaßnahmen einen Einfluss auf die Umstellungen zukünftiger Perioden besitzen. Entsprechend ist es erforderlich, mehrere Perioden im Entscheidungsmodell abzubilden.

**A3.5. Dynamische, unsichere Entwicklungen:** Die zukünftigen Entwicklungen der Einflussfaktoren (z. B. Bedarf) zur Auswahl der Logistikkonzepte unterliegen ungewissen

Schwankungen. Entsprechend sollen bei dem Entscheidungsmodell nicht nur zukünftige Perioden, sondern auch die ungewissen Schwankungen von Bedarfen berücksichtigt werden. Der Fokus auf den Einflussfaktor Bauteilbedarf rührt daher, dass sich dieser Einflussfaktor kurzfristiger und häufiger verändert als beispielsweise die Variantenanzahl oder das Bauteilgewicht (vgl. Kapitel 4.2.3).

**A3.6. Praxistauglichkeit:** Die letzte Anforderung besteht in einer hohen Praxistauglichkeit. Der Flexibilitätsansatz wird dann als praxistauglich eingestuft, wenn die Anwendung aufwandsarm erfolgen kann und wenn die zugrundeliegende Berechnungslogik transparent und nachvollziehbar ist. Dies kann beispielsweise durch ein software-gestütztes Tool ermöglicht werden.

### 6.1.2 Vorgehen zur Entwicklung des Flexibilitätsansatzes

Das Vorgehen zur Entwicklung des Flexibilitätsansatzes ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Zunächst wird der Umstellprozess betrachtet (vgl. Kapitel 6.2.1). Dazu werden die Arbeitspakete einer Umstellung definiert. Basierend auf Experteneinschätzungen und statistischen Auswertungen von bereits erfolgten Umstellungen kann dann bewertet werden, wie teuer eine Umstellung ist und wie lange sie dauert. Danach wird die Flexibilisierung von Logistikkonzeptumstellungen betrachtet (vgl. Kapitel 6.2.2). Dazu werden Maßnahmen identifiziert, die die Umstellkosten reduzieren, die Umstell dauern verkürzen oder auf beide Aspekte wirken. Die Identifikation der Maßnahmen und deren Effektbewertung erfolgen mittels Expertenbefragungen bzw. -schätzungen.

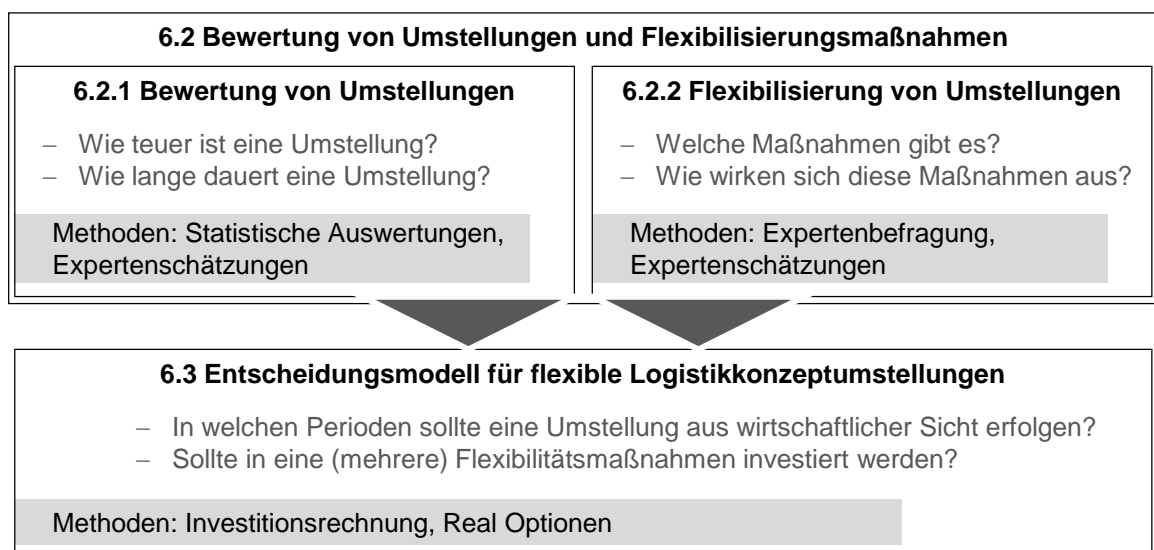


Abbildung 6-1: Vorgehen zur Entwicklung des Flexibilitätsansatzes

Die Ergebnisse aus der Umstellbewertung und der Flexibilisierung von Umstellungen fließen in das Entscheidungsmodell für flexible Logistikkonzeptumstellungen ein (vgl. Kapitel 6.3). Für die Entscheidung, in welchen Perioden eine Umstellung erfolgen sollte und ob sich eine Investition in Flexibilität lohnt, wird ein Realloptionsansatz verwendet.

Es sei angemerkt, dass in diesem Kapitel weder eine umfassende Sammlung von Flexibilisierungsmaßnahmen noch eine Detaildarstellung eines Umstellprozesses stattfindet, da beide Aspekte unternehmensspezifisch sind. Vielmehr soll ein OEM darin unterstützt werden, Umstellungen von Logistikkonzepten einheitlich bewerten und Flexibilisierungsmaßnahmen identifizieren zu können, um Umstellentscheidungen treffen zu können.

## **6.2 Bewertung von Umstellungen und Flexibilisierungsmaßnahmen**

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Bewertung von Umstellungen eingegangen (Kapitel 6.2.1). Anschließend wird ein Vorgehen zur Identifikation von Flexibilisierungsmaßnahmen vorgestellt (Kapitel 6.2.2).

### **6.2.1 Bewertung von Logistikkonzeptumstellungen**

Die Bewertung von Umstellungen erfolgt in drei Schritten: Im ersten Schritt ist festzulegen, welche Arbeitspakete und Aktivitäten anfallen, um den Umstellprozess eines Logistikkonzeptes durchführen zu können (vgl. Kapitel 6.2.1.1). Der zweite Schritt umfasst die Schätzung der Umstellkosten und Umstell dauern je Arbeitspaket (vgl. Kapitel 6.2.1.2). Im dritten Schritt wird eine systematische Vorgehensweise für die Bewertung von Logistikkonzeptumstellungen abgeleitet (vgl. Kapitel 6.2.1.3).

#### **6.2.1.1 Inhalte des Umstellprozesses**

Im Folgenden werden die Inhalte des Umstellprozesses ermittelt. In Abbildung 6-2 sind die drei Schritte, in denen dabei vorgegangen wird, aufgezeigt. Zunächst werden die für eine Umstellung relevanten Arbeitspakete gesammelt und inhaltlich beschrieben. Anschließend werden die Arbeitspakete strukturiert, indem gegenseitige Abhängigkeiten ermittelt werden. Da nicht jedes Arbeitspaket bei jeder Logistikkonzeptumstellung durchzuführen ist, erfolgt am Ende eine Zuordnung der Arbeitspakete zu den Logistikkonzeptumstellungen je Umstellenszenario.

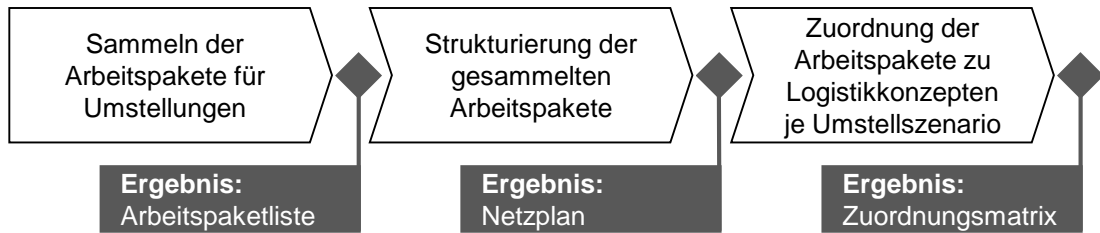


Abbildung 6-2: Vorgehen zur Bestimmung der Inhalte des Umstellprozesses

### Sammeln der Arbeitspakete

Bei der Betrachtung von Logistikkonzeptumstellungen wird davon ausgegangen, dass die einzige Veränderung in der Konzeptumstellung besteht und der ursprüngliche Lieferant beibehalten wird. Sowohl die Umstellkosten als auch die Umstelldauer resultieren aus den im Voraus erforderlichen Aktivitäten für die Befähigung des Prozesses, das neue Logistikkonzept umzusetzen. Die Höhe dieser Kosten und Dauer kann je nach notwendigen Aktivitäten und betrachteten Logistikkonzepten variieren. Beispielsweise ist für eine JIS-Belieferung relevant, ob der betrachtete Lieferant bereits andere Bauteile in JIS anliefert oder ob ein Logistikdienstleister (LDL) für die Sequenzierung der Bauteile einzubinden ist. Die Arbeit von *Wagner und Silveira-Camargos* liefert einen Überblick über die im Voraus erforderlichen Investitionen für die Umstellung von einer JIT- auf eine JIS-Belieferung. Die Investitionen werden in Prozessbefähiger (d. h. notwendige Hardware, wie z. B. Anpassungen des IT-Systems für geeignete Abrufe) und in Beziehungsvoraussetzungen (d. h. die erforderlichen weichen Faktoren, wie z. B. die Schulung der involvierten Mitarbeiter) unterschieden [Wag-2011, S. 5719 f.]. Da sich die Arbeit von *Wagner und Silveira-Camargos* auf die Umstellung von JIT und JIS beschränkt, wurden die Arbeitspakete für weitere Logistikkonzepte detailliert und erweitert. Die resultierenden 14 Arbeitspakete sind Werkslayout und Infrastruktur, Logistikaudit, Ladungsträgeranalyse, Ladungsträgerbeschaffung, Beschaffung von Logistikequipment, Mitarbeiterschulung, Integration von LDL, Notfallprozessdefinition, IT-Anbindung, Lastenhefterstellung, Parameterbestimmung, Prozessbegleitung des Roll-Outs, Transportkonzept und Prozessqualität. Erläuterungen zu den Arbeitspaketen sind in Tabelle 6-2 aufgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Arbeitspakete nicht allgemeingültig sind. Dennoch geben sie ein umfassendes Bild der zu berücksichtigenden Aktivitäten bei einer Umstellung [Wag-2011, S. 5719].

Tabelle 6-2: *Arbeitspakete von Umstellungen* (Teil 1/2) (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 24 ff.]

Kategorie	Arbeitspaket	Erläuterung
Infrastruktur	Anpassung von Werkslayout und Infrastruktur	Anpassung der werksinternen Infrastruktur, z. B. Bereitstellungsfläche am Montageband, Stellplätze im Lager, Sequenzierfläche im Supermarkt, Dock- und Trailer-Yard-Plätze, werksinterne Fördermittel [Wag-2011, S. 5720].
Lieferant	Durchführung von Logistikaudits	Die vom Lieferanten erbrachte Produktqualität und Liefertreue müssen für die Anlieferung mit dem neuen Logistikkonzept ausreichend hoch sein [Bec-2008, S. 105]. Um dies sicherzustellen, werden Logistikaudits beim Lieferanten durchgeführt [Pfo-1994, S. 297].
Logistik-equipment	Ladungsträger-analyse	Je nach Bauteilabmessungen und Logistikkonzept, ändert sich u. U. der Ladungsträger des Bauteils (z. B. für JIS sind Sequenzladungsträger erforderlich) [Wag-2011, S. 5720]. Für die Auswahl eines geeigneten Ladungsträgers sind verschiedene Kriterien, wie Ergonomie, Sicherheit oder Transport- und Bereitstellungsaspekte, zu berücksichtigen [Klu-2010, S. 153 ff.].
	Ladungsträger-beschaffung	Wird für das neue Logistikkonzept ein anderer Ladungsträger benötigt oder sind nicht ausreichend Ladungsträger für das neue Logistikkonzept vorhanden, so sind neue oder zusätzliche Ladungsträger durch den Einkauf zu beschaffen [Wag-2011, S. 5720; Klu-2010, S. 165].
	Beschaffung von Logistikequipment	Abhängig von der Ladungsträgeranalyse ist ggf. zusätzliches Logistikequipment zu beschaffen. Dies umfasst: Lastanhänger für Routenzüge (falls zu wenige oder die falsche Bauform vorhanden ist); Manipulatoren bzw. Industrieroboter (falls sich die Zugriffsrichtung für die Bauteilentnahme ändert) [Gün-2013, S. 106 f.; Pfo-2010, S. 195 f.].
Prozess-beteiligte	Information und Training der Mitarbeiter	Die Veränderung von Prozessen kann direkten Einfluss auf die Produktivität sowie Qualität haben, insbesondere wenn involvierte Mitarbeiter sich mit dem neuen Prozess nicht auskennen. Entsprechend sind die Mitarbeiter bzgl. neuer Prozesse zu schulen und zu trainieren [Nem-2014, S. 1418; Wag-2011, S. 5720].
Sonder-prozesse	Integration von LDLs	Wenn das neue Logistikkonzept die Verwendung eines LDL vorsieht, so ist dieser ebenfalls in den Umstellprozess zu integrieren, indem Schnittstellen und Verantwortlichkeiten definiert werden [Wag-2011, S. 5720].
	Definition von Notfallprozessen	Für den Fall, dass Lieferungen verspätet sind, Bauteile in einer Lieferung fehlen oder Bauteile Qualitätsmängel aufweisen, ist ein Notfallkonzept zu definieren. Dadurch soll Produktionsausfällen vorgebeugt werden [Wag-2011, S. 5720; Klu-2010, S. 302].

Tabelle 6-2: *Arbeitspakete von Umstellungen* (Teil 2/2) (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 24 ff.]

Kategorie	Arbeitspaket	Erläuterung
Prozess	IT-Anbindung	Sowohl beim Lieferanten als auch beim OEM ist u. U. die IT-Anbindung anzupassen. Die IT-Anbindung dient der Kommunikation, Planung und Steuerung von Materialflüssen. Bei der Logistikkonzeptumstellung ist sicherzustellen, dass die Lieferabrufe weiterhin funktionieren. Die Daten-Fernübertragung (DFÜ) von Lieferabrufen ist z. B. in der VDA 4905 geregelt. Zusätzlich zu diesem Abruf werden Feinabrufe und produktionssynchrone Abrufe in der VDA 4915 und VDA 4916 für die lagerlose Belieferung definiert [VDA 4915; VDA 4916; VDA 4905; Ihm-2006, S. 206].
	Erstellung eines Lastenhefts	Im Lastenheft werden die Anforderungen des Auftraggebers (d. h. des OEM) hinsichtlich des Leistungsumfangs der Belieferung (z. B. Prozessbeschreibung, Anlieferfrequenz, Abrufsteuerung, Ladungsträger, etc.) zusammengefasst [VDI 3694, S. 3; Bec-2008, S. 105].
	Parameterbestimmung	Für die Umstellung der Logistikkonzepte sind verschiedene Parameter zu bestimmen. Dazu gehören z. B. das Packlos, die Trailerreichweite, das maximale Gesamtgewicht pro Ladungsträger oder das Beladeschema [Klu-2010, S. 289; Con-2014, S. 70 ff.].
	Prozessbegleitung vor und nach Roll-Out	Damit die Umstellung problemlos verlaufen kann, ist es erforderlich den Übergang von einem Logistikkonzept auf das andere zu begleiten. Dadurch wird sichergestellt, dass z. B. die entsprechenden Lagerplätze verfügbar sind oder Materialien bei fehlerhaften ersten JIS-Lieferungen vorrätig sind.
	Festlegung des Transportkonzeptes	Die Umstellung des Belieferungskonzeptes geht häufig einher mit der Anpassung des Transportkonzeptes, da z. B. JIS meist mit Direkttransporten abgewickelt wird [Klu-2010, S. 299 ff.]. Es ist eine Leistungsbeschreibung des Transportkonzeptes mit den Rahmendaten, wie z. B. Lieferhäufigkeit, Liefergewicht oder Transitzeit, zu erstellen [VDA 5010, S. 41].
	Sicherstellung der Prozessqualität	Für die Transparenz und Qualität des Prozesses sind z. B. Bar-Codes oder Pick-By-Light-Geräte zu installieren und Key Performance Indicators (KPIs) zu definieren [Wag-2011, S. 5720].

### Strukturierung der gesammelten Arbeitspakete

Im Sinne eines strukturierten Projektmanagements sind die Arbeitspakete in einzelne Aktivitäten zu zerlegen, sodass sich eine Aktivitätenliste je Arbeitspaket ergibt. Eine Aktivität beschreibt einen durch eine Person ausgeführten Vorgang mit definiertem Anfang und Ende. Die Aktivitäten werden durch die für das Arbeitspaket verantwortliche Person definiert.

Zusätzlich werden Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten bestimmt, indem die jeweils vorgeschaltete Aktivität festgelegt wird [Kra-2010, S. 104 ff.]. Die Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten stellen die Grundlage für einen Balkenplan und einen Netzplan dar. Der *Balkenplan* (auch Gantt-Diagramm genannt) gibt einen Überblick über die Aktivitäten und ihren zeitlichen Ablauf. Ein exemplarischer Balkenplan ist in Abbildung C-1 im Anhang C.1 dargestellt. Ein Nachteil des Balkenplans besteht darin, dass sich die identifizierten Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten nicht abbilden lassen [Kra-2010, S. 114 f.]. Für die Darstellung der Abhängigkeiten wird ein *Netzplan* verwendet. Die Netzplantechnik unterstützt dabei, komplizierte Prozesse zu planen, zu analysieren und zu steuern [Ste-1971, S. 20]. Ein Netzplan stellt graphisch dar, in welcher Reihenfolge die Aktivitäten aufeinander folgen müssen. Durch das Hinterlegen von benötigten Zeiten für die einzelnen Aktivitäten kann der sogenannte *kritische Pfad* berechnet werden. Dieser drückt aus, welche Reihenfolge von Aktivitäten keinen zeitlichen Puffer aufweist. Eine Verzögerung dieser Aktivitäten hat somit eine Verlängerung der gesamten Projektlaufzeit zur Folge [Kra-2010, S. 111 ff.].

Da die Aktivitäten unternehmensspezifisch sind, ist in Abbildung 6-3 ein exemplarischer Netzplan für die Arbeitspakete dargestellt. Abgebildet ist die Umstellung von einer lagerhaltigen Belieferung mit Gebietsspedition auf eine JIS-Belieferung mit Direkttransport. Aus Gründen der Vereinfachung wurden die Arbeitspakete Integration eines LDL, Notfallprozesse und Prozessqualität vernachlässigt. Im Lastenheft werden zunächst die Anforderungen an den neuen Logistikprozess definiert. Anschließend wird der Lieferant hinsichtlich seiner JIS-Fähigkeit auditiert und die involvierten Mitarbeiter werden informiert. Danach werden mehrere Arbeitspakete parallel durchgeführt: die IT-Anbindungen beim OEM und beim Lieferanten, die Prozessbegleitung vor dem Roll-Out, die Anpassung von Werkslayout und Infrastruktur und die Ladungsträgeranalyse. Auf Letzteres folgen die Arbeitspakete Beschaffung von Logistikequipment und Ladungsträgern sowie die Parameterbestimmung. Im Anschluss daran findet die Transportkonzeptfestlegung statt. Nach durchgeführter Umstellung erfolgt die Prozessbegleitung nach dem Roll-Out.

Der Umstellprozess kann je nach betrachteten Logistikkonzepten und je nach OEM variieren. Beispielsweise ist ein Lastenheft für die Umstellung auf eine lagerlose Belieferung notwendig, jedoch vermutlich nicht für eine lagerhaltige Standardbelieferung, da hierfür i. d. R. Standardlastenhefte vorliegen. Die Mitarbeiterinformation hingegen ist bei allen Umstellungen erforderlich. Grundsätzlich umfasst eine Umstellung auf ein lagerloses Belieferungskonzept mehr Arbeitspakete und Aktivitäten als die Umstellung auf die lagerhaltige Standardbelieferung. Die Umstellung des Transportkonzeptes ist als Arbeitspaket im Um-



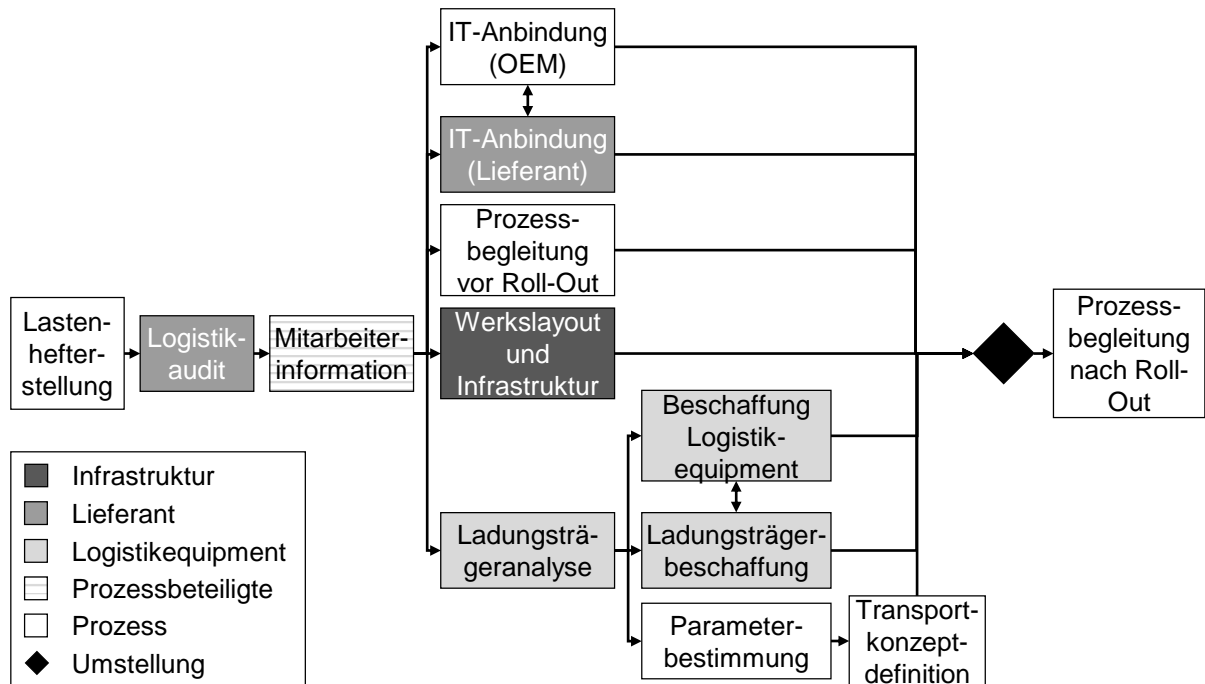


Abbildung 6-3: Exemplarischer Netzplan der Arbeitspakete für die Umstellung von einer lagerhaltigen Belieferung auf eine JIS-Belieferung (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 31])

stellprozess von Belieferungskonzepten subsumiert. Dabei erfolgt entweder eine kosten- und zeitintensive Neuausschreibung oder eine Lieferantenklärung. Bei der Neuausschreibung ist der Leistungsumfang zu definieren und eine geeignete Spedition auszuwählen. Sie erfolgt bei der Umstellung auf einen FTL-Transport. Bei der Lieferantenklärung geht es darum, den Lieferanten in das bestehende Gebietsspeditionsnetz, unter Berücksichtigung möglicher Kündigungsfristen von bestehenden Relationen, zu integrieren.

### Zuordnung der Arbeitspakete je Umstellszenario und Logistikkonzept

Wie zuvor bereits erwähnt, unterscheiden sich die Umstellprozess je nachdem von welchem Logistikkonzept auf welches umgestellt wird. Zusätzlich hängt der Umstellprozess vom vorliegenden Umstellszenario ab. Es werden drei Umstellszenarien unterschieden (vgl. Abbildung 6-4): Erst-, Rück- und Erneut-Umstellungen. Es handelt sich um eine Erst-Umstellung, wenn das neue Logistikkonzept zuvor noch nie für diese Bauteilgruppe verwendet wurde. Eine Rück-Umstellung liegt vor, wenn in das ursprüngliche Logistikkonzept (in Abbildung Konzept 1) zurück gewechselt wird. Eine Erneut-Umstellung liegt vor, wenn bereits einmal in das entsprechende Logistikkonzept (in Abbildung Konzept 2) gewechselt wurde. Die Zuordnungen der relevanten Arbeitspakete je nach betrachteten Logistikkonzepten und Umstellszenarien sind – aus Gründen der Übersichtlichkeit – im Anhang C.1 in den Tabellen C-1 bis C-3 zu finden.

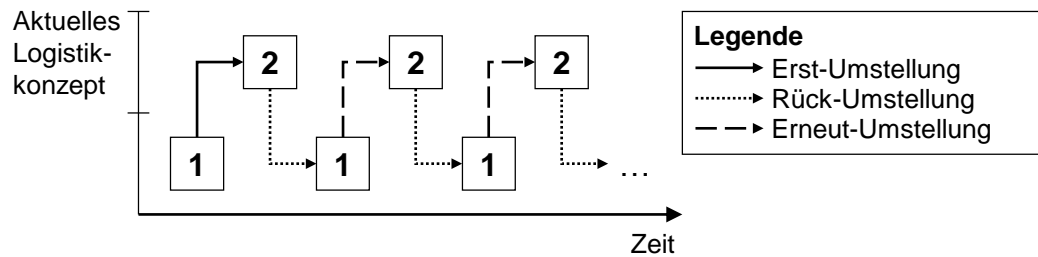


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der möglichen Umstellszenarien (in Anlehnung [fml-2017c, S. 34])

### 6.2.1.2 Umstellkosten und Umstell dauern

Damit die vollständige Bewertung einer Umstellung stattfinden kann, sind die Kosten und Dauern der durchzuführenden Aktivitäten zu ermitteln. Wie zuvor beschrieben, sind die Aktivitäten jedoch unternehmensspezifisch, sodass sich keine allgemeingültigen Kosten und Dauern für Umstellungen ermitteln lassen. Laut *Richtlinie 2870* vom *Verein Deutscher Ingenieure (VDI)* beträgt die übliche Dauer einer Umstellung auf JIS oder JIT zwischen 6 und 12 Monaten [VDI 2870-2, S. 83]. Die Studie zu Flexibilität in der Automobilindustrie zeigt, dass bei einem Großteil der OEMs die Umstellung zwischen 3 und 12 Monaten dauert. Hingegen gaben 27 % an, dass die Umstellung des Belieferungskonzeptes nur 1 bis 3 Monate dauert [Maa-2017a, S. 47]. Diese Aussagen untermauern, dass Logistikkonzeptumstellungen je nach Unternehmen variieren. Um mehr Planungssicherheit und Transparenz zu erlangen, werden im Folgenden die auftretenden Kostenarten je Arbeitspaket und die Treiber der Umstelldauer diskutiert. Eine zusammenfassende Übersicht dazu liefert Tabelle 6-3. Zudem werden Methoden vorgeschlagen, um die Kosten und Dauern zu ermitteln.

#### Umstelldauer

Die Dauern für die einzelnen Aktivitäten ergeben sich aus dem unternehmensinternen Personaleinsatz sowie aus extern beeinflussten Durchlaufzeiten (DLZ). Ein interner Personaleinsatz liegt bei jedem Arbeitspaket vor, bei dem ein interner Mitarbeiter des OEM eine aktive Funktion innehat. Beispielsweise werden die Parameterbestimmung und Lastenhefterstellung von einem Logistikexperten des OEM durchgeführt. Extern beeinflusste DLZ ergeben sich, sobald in den Arbeitspaketen unternehmensexterne Parteien involviert sind. Das betrifft beispielsweise die Beschaffungsvorgänge von Ladungsträgern und Logistikequipment sowie die Festlegung des Transportkonzeptes, die von den Dauern der Angebotserstellung der Lieferanten und Spediteure abhängen. Aber auch das Logistikaudit und die IT-Anbindung unterliegen extern beeinflussten DLZ, da die Dauer dieser Arbeitspakete von der Kooperation des betroffenen Lieferanten abhängt.

Für die erfolgreiche zeitliche Planung einer Logistikkonzeptumstellung ist es erforderlich,

Tabelle 6-3: Arten der Umstellkosten und Treiber der Umstelldauer je Arbeitspaket (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 33])

		Umstelldauer		Umstellkosten		
		Personal- einsatz	extern be- einflusste DLZ	Personal- kosten	Investi- tionen	Ge- mein- kosten
1	Lastenheft	X		X		
2	Logistikaudit	X	X	X		X
3	Mitarbeiterinformation	X	X	X		
4	IT-Anbindung (OEM)	X	X	X		X
5	IT-Anbindung (Lieferant)	X	X	X		X
6	Prozessbegleitung vor Roll-Out	X	X	X		
7	Werkslayout und Infrastruktur	X		X	X	
8	Ladungsträgeranalyse	X		X		
9	Beschaffung Logistikequipment	X	X	X	X	
10	Ladungsträgerbeschaffung	X	X	X	X	
11	Parameterbestimmung	X		X		
12	Transportkonzept	X	X	X		
13	Prozessbegleitung nach Roll-Out	X		X		

die Dauern der Aktivitäten innerhalb der Arbeitspakete zu ermitteln. In der Netzplantechnik existieren dafür verschiedene Methoden. Eine davon ist die Program-Evaluation-and-Review-Technique (PERT)-Methode (deutsch: *Verfahren zur Berechnung und Überwachung eines Planes*), die insbesondere Anwendung findet, wenn die Zeiten von Abläufen einen Schätzcharakter aufweisen. Durch die Verwendung mehrerer Zeitschätzungen (pessimistische, optimistische und wahrscheinliche Zeitdauer) und die Anwendung statistischer Methoden werden Unsicherheitsfaktoren bzgl. der tatsächlichen Dauer einer Aktivität berücksichtigt [Ste-1971, S. 55 ff.]. Aus diesem Grund empfiehlt sich die PERT-Methode für die Schätzung der Dauern der Aktivitäten von Logistikkonzeptumstellungen. Für detaillierte Ausführungen zur PERT-Methode sei auf Anhang C.1 verwiesen.

### Umstellkosten

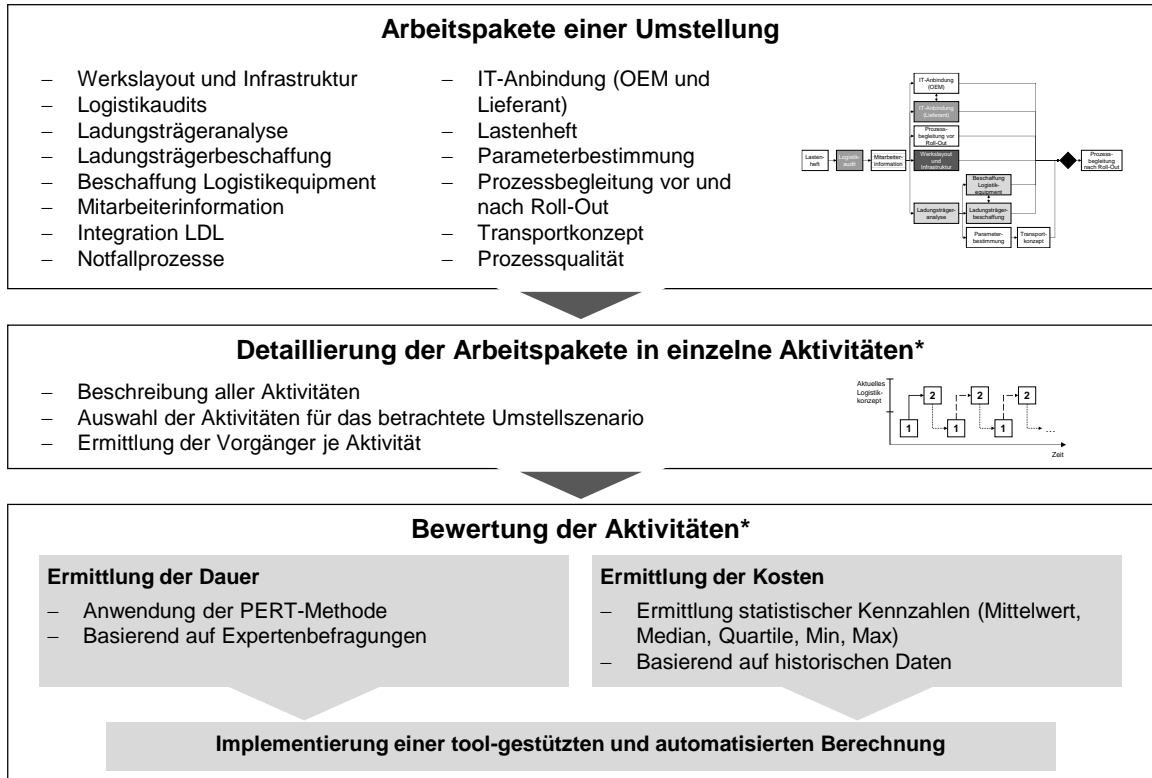
Die Kosten einer Aktivität ergeben sich aus dem erforderlichen Personalaufwand sowie zusätzlichen Investitionen für Equipment und IT [Kra-2010, S. 107]. Bei der Betrachtung von Umstellungen werden drei Kostenarten unterschieden: Investitionen, Gemeinkosten und Personalkosten. Der vermögensorientierte Investitionsbegriff ist definiert als die langfristige Bindung von finanziellen Mitteln in materiellen und immateriellen Vermögensgegenständen, die für eine individuelle Zielsetzung genutzt werden sollen [Ker-1974, S. 8; Göt-2014, S. 6]. Investitionen können demnach bei den Arbeitspaketen Werkslayout und Infrastruktur sowie

der Beschaffung von Ladungsträgern und Logistikequipment auftreten. Bei Gemeinkosten handelt es sich um Kosten, die sich nicht verursachungsgerecht einer Leistungseinheit zuordnen lassen [Göt-2010, S. 19]. Grundsätzlich sind Personalkosten ebenfalls Gemeinkosten. Da der personelle Aufwand bei Logistikkonzeptumstellungen jedoch einen großen Anteil des Gesamtaufwands ausmacht, werden Personalkosten explizit ausgewiesen. Personalkosten ergeben sich aus dem Produkt aus Personaleinsatz in Personenstunden sowie dem Kostensatz des OEM je Personenstunde eines Mitarbeiters. Personalkosten fallen daher – entsprechend des Personaleinsatzes – bei jedem Arbeitspaket an. Sonstige Gemeinkosten treten nur noch bei den Arbeitspaketen Logistikaudit und IT-Anbindung auf.

Für die Schätzung von Umstellkosten wird empfohlen, historische Daten als Grundlage zu verwenden. Historische Daten können sowohl vergangene Logistikkonzeptumstellungen als auch allgemein durchgeführte Aktivitäten (z. B. Ladungsträgerbeschaffungen und Transportkonzeptdefinitionen nicht im Kontext einer Umstellung) sein. Je nach Datenstruktur können verschiedene statistische Kennzahlen für die Kostenschätzung angemessen sein. Bei Daten mit einer hohen Spannweite aufgrund von starken Extremwerten eignen sich Quartile, da diese robust gegenüber Extremwerten sind (vgl. Kapitel 4.3.2.1). Bei Daten mit geringer Spannweite und keinen oder wenigen Extremwerten können Mittelwert und minimaler sowie maximaler Wert für die Kostenschätzung herangezogen werden.

### **6.2.1.3 Methode zur systematischen Umstellbewertung**

An dieser Stelle werden die zuvor beschriebenen Tätigkeiten für die systematische Bewertung von Umstellungen in einer Methode zusammengefasst. Diese Methode umfasst drei Schritte und ist in Abbildung 6-5 illustriert. Im ersten Schritt sind die Arbeitspakete einer Umstellung festzulegen, wobei die 14 beschriebenen Arbeitspakete eine umfangreiche Grundlage für jedes Unternehmen darstellen. Im zweiten Schritt sind die unternehmensspezifischen Aktivitäten je Arbeitspaket zu definieren. Zudem sind die Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten zu identifizieren, um einen Netzplan der Aktivitäten erstellen zu können. Dabei sind sowohl das Umstellszenario (Erst-, Rück-, Erneut-Umstellung) als auch die betrachteten Logistikkonzepte zu berücksichtigen. Im dritten Schritt erfolgt die Bewertung der Aktivitäten. Zur Schätzung der Dauer der Aktivitäten wird die Anwendung der PERT-Methode mittels Expertenbefragungen empfohlen. Für die Kostenschätzung sollten (wenn möglich) historische Daten mittels statistischer Kennzahlen ausgewertet werden. Aufgrund der Komplexität des Umstellprozesses wird empfohlen, die Schätzwerte der Kosten und Dauern in einem Software-Tool (z. B. MS Excel und MS Project) für zukünftige Umstellbewertungen einzupflegen.



\* Unternehmensspezifisch durchzuführen

Abbildung 6-5: Methode zur systematischen Bewertung der Kosten und Dauern von Umstellungen

## 6.2.2 Flexibilisierung von Umstellungen

Im Sinne der Definition von Belieferungsflexibilität (vgl. Kapitel 2.2.1) ist die Umstellung von Logistikkonzepten flexibel, wenn sie in kurzer Zeit und mit geringem monetären Aufwand umgesetzt werden kann. Die Flexibilität von Umstellungen lässt sich somit steigern, wenn Umstellkosten und -dauer gesenkt werden. Maßnahmen, die die Reduktion der Kosten und Dauer herbeiführen, werden als Flexibilisierungsmaßnahmen bezeichnet. Sowohl Logistikkonzeptumstellungen als auch Flexibilisierungsmaßnahmen sind unternehmensspezifisch. Daher liegt der Fokus auf dem Vorgehen zur Identifikation und Bewertung von Flexibilisierungsmaßnahmen.

Bei der Identifikation von Flexibilisierungsmaßnahmen können zwei Ansätze verfolgt werden: Erstens, die Identifikation von Maßnahmen, die auf die spezifischen Gegebenheiten einer betrachteten Umstellung wirken. Zweitens, die Identifikation von Maßnahmen, die sich allgemein auf die Flexibilität zukünftiger Umstellungen auswirken. Die Identifikation von Flexibilisierungsmaßnahmen kann durch Expertenbefragungen erfolgen. Dabei sollte der Fokus auf Maßnahmen mit Auswirkung auf diejenigen Aktivitäten gelegt werden, die entweder einen hohen Anteil an den Umstellkosten verursachen oder Teil des kritischen Pfades sind.

Zudem sind die Einschätzungen der Experten zu berücksichtigen, die aufgrund ihrer Erfahrungen die kritischen Aktivitäten kennen und dadurch weitere Flexibilisierungsmaßnahmen benennen können. Zunächst sollten möglichst viele verschiedene Flexibilisierungsmaßnahmen aufgezeigt werden, unabhängig von der Umsetzbarkeit oder eventuell notwendigen Investitionen. Hierfür empfiehlt sich der Einsatz von Kreativitätstechniken (z. B. Brainstorming, Mind-Mapping, Morphologischer Kasten), um neuartige Ideen zu entwickeln und verfestigte Denkstrukturen zu überwinden [Rab-2009, S. 77 ff.; Ges-2015, S. 287 ff.].

Nachdem die Flexibilisierungsmaßnahmen identifiziert wurden, besteht der nächste Schritt darin, den Effekt aus diesen Maßnahmen zu bestimmen. Es gilt herauszufinden, wie stark eine Maßnahme die Umstelldauer verkürzt und die Umstellkosten senkt. Dieser Effekt wird als Einspareffekt (oder Nutzen) aus der Flexibilisierungsmaßnahme bezeichnet. Die Bewertung des Effektes kann analog zur Umstellbewertung erfolgen, indem die von der Flexibilisierungsmaßnahme betroffenen Aktivitäten entsprechend angepasst werden. Zusätzlich ist die Höhe der Investition für die Umsetzung der Flexibilisierungsmaßnahme zu schätzen, da dieser Wert in das im Folgenden beschriebene Entscheidungsmodell einfließt.

### **6.3 Entscheidungsmodell für flexible Umstellungen**

Nachdem der Umstellprozess hinsichtlich der anfallenden Kosten und Dauern bewertet sowie Flexibilisierungsmaßnahmen und ihre Effekte bestimmt wurden, wird im Folgenden das Entscheidungsmodell erarbeitet. Das Ziel einer Entscheidungsfindung ist die Bestimmung der am besten geeigneten Alternative für ein vorliegendes Problem [Hof-2008, S. 297].

#### **6.3.1 Methodischer Ansatz für Umstellentscheidungen**

In Kapitel 2.4.3 wurde erläutert, dass sich die Entscheidung zur Umstellung eines Logistikkonzeptes als Investitionsentscheidung interpretieren lässt. Die Umstellkosten (Investitionen, Gemeinkosten und Personalkosten) stellen die einmalige Zahlung zu Beginn eines Betrachtungszeitraumes dar. Die resultierenden Zahlungen in den folgenden Perioden entsprechen den Einsparungen des neu verwendeten Logistikkonzeptes gegenüber des vorherigen Logistikkonzeptes. Eine Anforderung an das Entscheidungsmodell ist somit die Berücksichtigung der unterschiedlichen Zahlungsströme mehrerer Perioden (vgl. Anforderung A3.4). Die Bewertung soll zudem transparent, nachvollziehbar und anwenderfreundlich sein, sodass eine hohe Praxistauglichkeit gewährleistet werden kann (vgl. Anforderung A3.4).

zung A3.6). Vor dem Hintergrund des dynamischen Marktumfeldes eines OEM, welches durch sich verändernde und schwankende Einflüsse geprägt ist, soll die Bewertung der Umstellentscheidung unter Unsicherheit erfolgen (vgl. Anforderung A3.5). Weiterhin soll der Effekt aus Flexibilisierungsmaßnahmen in die Bewertung einfließen und der Wert der flexiblen Inbound-Logistik ausgewiesen werden können (vgl. Anforderung A3.3). Auf Basis der beschriebenen Aufgabenstellung und Anforderungen werden im Folgenden die in Kapitel 2.4.3 dargestellten Methoden hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert und es wird eine Methode für das Entscheidungsmodell ausgewählt.

### Methodenauswahl

Die in Abbildung 2-15 in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Investitionsrechenverfahren sind in Tabelle 6-4 hinsichtlich der an die Umstellentscheidung gestellten Anforderungen bewertet.

Tabelle 6-4: Bewertung der Investitionsverfahren hinsichtlich der gestellten Anforderungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Hom-1999, S. 128])

Anforderungen	Statische Modelle	Dynamische Modelle	Ergänzende Verfahren	Entscheidungsbaumverfahren	Realoptionsansatz
<b>A3.4</b> mehrperiodisch / Zahlungsstruktur über Zeitverlauf	○	●	●	●	●
<b>A3.6</b> Praxistauglichkeit	●	●	◐	◐	◐
<b>A3.5</b> Unsicherheit	○	○	◐	◐	●
<b>A3.3</b> Flexibilität	○	○	◐	◐	●

● voll erfüllt    ◐ fast erfüllt    ◑ halb erfüllt    ◒ wenig erfüllt    ○ nicht erfüllt

Statische Modelle, wie die Kosten- oder Gewinnvergleichsrechnung, weisen aufgrund ihrer Transparenz und wenig komplexen Struktur eine sehr hohe Praxistauglichkeit auf. Allerdings vernachlässigen diese Modelle die Zahlungsstruktur über den Zeitverlauf, da sie sich auf einen expliziten Zeitabschnitt oder eine hypothetische Durchschnittsperiode beziehen. Dies hat zur Folge, dass weder die Anforderung zur Berücksichtigung unterschiedlicher Zahlungsströme in mehreren Perioden noch die Anforderung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten durch diese Modelle erfüllt werden. Die statischen Investitionsmodelle eignen sich somit nicht für die Bewertung von flexiblen Umstellentscheidungen.

Die dynamischen Modelle sind, ebenso wie die statischen Modelle, in der Praxis weit verbreitet und gut einsetzbar. Zusätzlich berücksichtigen diese Verfahren die sich verändernde Zahlungsstruktur über den Zeitverlauf, indem die Zahlungen in den einzelnen Perioden auf einen bestimmten Zeitpunkt diskontiert werden. Durch diese Diskontierung wird ein Vergleich der Zahlungen aus unterschiedlichen Perioden ermöglicht. Die Kapitalwertmethode gilt dabei als das am stärksten akzeptierte Verfahren [Göt-2014, S. 87]. Eine entscheidende Annahme dieser Modelle ist, dass zukünftige Zahlungen mit Sicherheit eintreten, sodass die Anforderung Unsicherheiten zu berücksichtigen nicht erfüllt ist. Flexibilität kann durch die dynamischen Modelle ebenfalls nicht abgebildet werden, da diese Verfahren „jetzt-oder-nie“-Entscheidungen modellieren. Damit sind Entscheidungen gemeint, die nur zum aktuellen, nicht aber zu einem späteren Zeitpunkt getroffen werden können, sodass der Entscheidungsträger keine Handlungsflexibilität besitzt [Hun-2015, S. 69]. Insgesamt eignen sich dynamische Modelle für das vorliegende Entscheidungsproblem von Logistikkonzeptumstellungen somit nicht.

Die ergänzenden Verfahren basieren meist auf den dynamischen Modellen unter Sicherheit. Entsprechend wird bei diesen Verfahren die Zahlungsstruktur über den Zeitverlauf berücksichtigt. Unsicherheiten können teilweise abgebildet werden. Bei Sensitivitätsanalysen kann beispielsweise die Auswirkung von der Veränderung einzelner Inputparameter auf die Zielgröße bestimmt werden. Die Inputparameter lassen sich jedoch nicht mittels stochastischer Verteilungen darstellen und gleichzeitige Veränderungen mehrerer Inputgrößen sind ebenfalls nicht möglich. Der Nachteil fehlender Entscheidungsregeln von den ergänzenden Verfahren wirkt insbesondere auf die Anforderung der Flexibilität, da dadurch dem Entscheidungsträger keine Empfehlung gegeben wird, welche Handlungsalternative gewählt werden sollte. Entsprechend können diese Verfahren nicht als Entscheidungsmodelle fungieren, sondern dienen vielmehr zur Analyse der Wirkzusammenhänge.

Die letzten beiden Verfahren, das Entscheidungsbaumverfahren und der Realloptionsansatz, erfüllen alle Anforderungen fast vollständig. Das Entscheidungsbaumverfahren ist im Vergleich zum Realloptionsansatz transparenter aufgrund der Darstellung der Handlungsalternativen in Form eines ungerichteten Graphens. Bei einer zu großen Anzahl an Handlungsalternativen und Entscheidungszeitpunkten werden Entscheidungsbäume jedoch sehr groß und damit unübersichtlich. Ein weiterer Kritikpunkt dieser Methode ist, dass die Veränderung des systematischen Risikos sehr aufwendig zu berücksichtigen ist. Eine Veränderung des systematischen Risikos wirkt sich auf den Kapitalkostensatz aus, sodass jeder Entscheidungsknoten individuell angepasst werden müsste. Bei Verwendung eines ein-



heitlichen Kapitalkostensatz über alle Zeitpunkte weist der resultierende Kapitalwert keine Marktwertorientierung auf. Mit Hilfe von Optionspreismodellen hingegen lässt sich der theoretische Marktwert bei expliziter Berücksichtigung von Unsicherheiten und Flexibilität bestimmen. Die Problematik der Wahl eines geeigneten Kapitalkostensatzes entfällt aufgrund des Prinzips der risikoneutralen Bewertung<sup>13</sup> [Hom-1999, S. 128 f.; Hom-2001, S. 120 ff.]. Dennoch sind das Entscheidungsbaumverfahren und der Realoptionsansatz eng miteinander verwandt. *Smith und Nau* zeigen, dass bei korrekter Anwendung die beiden Verfahren zu konsistenten Ergebnissen führen [Smi-1995, S. 795 ff.]. Der entscheidende Vorteil des Realoptionsansatzes liegt darin, dass sich der Wert der vorliegenden Handlungsoptionen explizit ausweisen lässt, sodass die Anforderung der Flexibilität einzig von dieser Methode voll erfüllt wird. Zwei Hürden in der Anwendung des Realoptionsansatzes sind das oftmals unzureichende Methodenverständnis von Entscheidungsträgern und die problematische Spezifikation der erforderlichen Optionsparameter. Aufgrund dieser Hürden wird die Anwendung des Realoptionsansatzes nur bei Investition mit großer Unsicherheit und einem hohen Maß an Flexibilität empfohlen. Der Aufwand in der Anwendung sollte dann durch einen hohen Optionswert gerechtfertigt werden [Hom-1999, S. 129]. In Bezug auf die Anforderungen ist der Realoptionsansatz von allen Investitionsverfahren am geeignetsten. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Realoptionsansatz auf die Umstellentscheidung von Logistikkonzepten übertragen.

### **Realoptionsansatz bei Umstellentscheidungen**

Wie in Kapitel 2.4.3 dargestellt, gibt es eine Vielzahl an Realoptionstypen (vgl. z. B. [Göt-2014, S. 421; Tri-1996, S. 2 ff.]). Einer dieser Realoptionstypen ist die Option den Fertigungsmodus umzustellen (englisch: *option to switch*). Bei der Umstelloption geht es darum, für mehrere Entscheidungspunkte (z. B. in jeder Periode) festzulegen, ob zwischen den zur Verfügung stehenden Fertigungsmodi gewechselt werden sollte. Gleichzeitig sind bei dieser Entscheidung Umstellkosten zu berücksichtigen [Tri-1996, S. 171]. Dieser Realoptionstyp weist offensichtliche Parallelen zu der Umstellentscheidung von Logistikkonzepten auf. Daher werden die Charakteristika der Umstellentscheidung von Logistikkonzepten auf diesen Realoptionstyp übertragen.

<sup>13</sup> Die risikoneutrale Bewertung ist ein Grundprinzip fast aller Optionspreismodelle. Dabei wird angenommen, dass sich das betrachtete Projekt durch ein Hedge-Portfolio beschreiben lässt. Ein Hedge-Portfolio ist die Kombination aus dem zu bewertenden Projekt sowie risikofreien Anleihen. Dieses Portfolio weist in jedem Umweltzustand die gleichen Zahlungsströme auf wie die zu bewertende Option. Da das Hedge-Portfolio unabhängig von unsicheren Preisentwicklungen ist, lässt sich der Barwert des Hedge-Portfolios mit Sicherheit bestimmen. Aufgrund der gleichen Zahlungsströme muss der Barwert des Hedge-Portfolios gleich dem Barwert der Realoption sein [Hom-1999, S. 129; Hom-2001, S. 121 f.].

Um eine Umstelloption zu bewerten, stehen verschiedene Bewertungsansätze zur Auswahl. Die Wahl der Bewertungsmethode von Realloptionen hängt dabei stark von den Anwenderpräferenzen ab. Der Vorteil des Binomialmodells und der analytischen Modelle liegt darin, dass sie leicht in einem Tabellenkalkulationsprogramm implementiert werden können [Amr-2003, S. 126]. Aufgrund der Anforderung der Praxistauglichkeit, welche durch eine hohe Transparenz, Nachvollziehbarkeit sowie einfache Anwendbarkeit zu erfüllen ist, scheint das Binomialmodell (vgl. die Vorteile von Lattice-Ansätzen in Kapitel 2.4.3.2) ein geeignetes Optionsbewertungsverfahren für Umstellentscheidungen von Logistikkonzepten zu sein.

### 6.3.2 Strukturierung der Umstellentscheidung

Für die erfolgreiche Modellierung von Umstellentscheidungen für Logistikkonzepte wird stufenweise vorgegangen. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Das Fundament der Modellierung besteht zum einen aus dem Binomialmodell und zum anderen aus der Einführung einer Bedarfsgrenze. Durch diese Bedarfsgrenze wird sichergestellt, dass das eine Logistikkonzept nicht per se vorteilhaft gegenüber dem anderen Logistikkonzept ist, sodass sich die Zahlungsströme der Logistikkonzepte über den Zeitverlauf verändern (vgl. Kapitel 6.3.3.1).

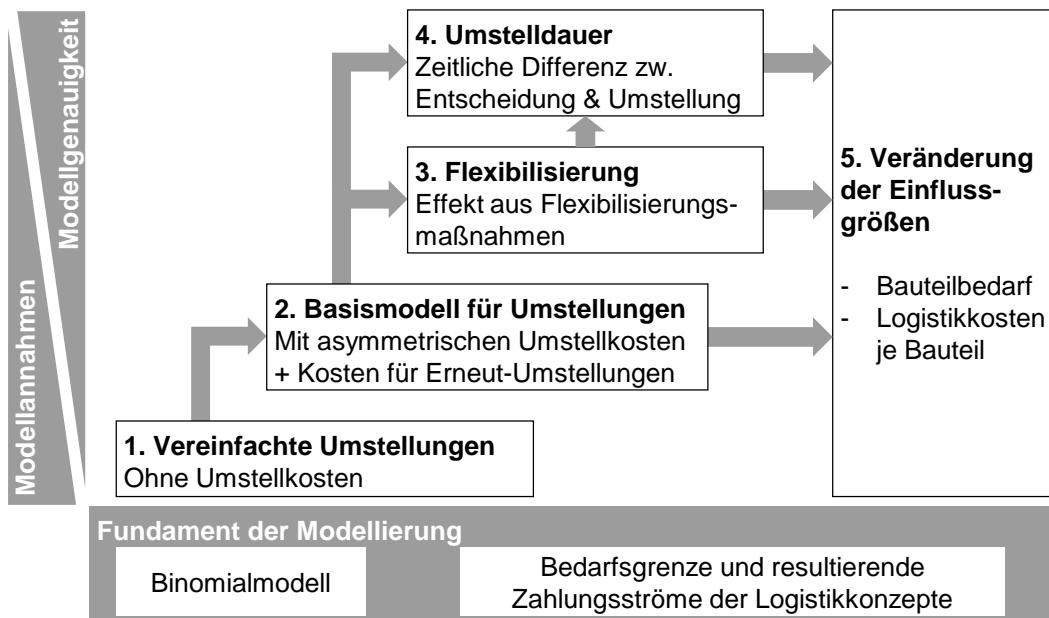


Abbildung 6-6: Vorgehensweise bei der Modellierung der Realloptionen von Logistikkonzeptumstellungen

Bei der Modellierung werden fünf Detaillierungsstufen unterschieden, wobei Stufe 5 alle vorherigen Stufen um zusätzliche Veränderungen erweitert. Die Modellgenauigkeit soll je Stufe zunehmen, indem bestimmte Modellannahmen aufgelöst werden. In Stufe 1 werden

vereinfachte Umstellentscheidungen modelliert. Es wird angenommen, dass die Umstellung von einem zum anderen Logistikkonzept ohne weiteres erfolgen kann – d. h. es liegen keine Umstellkosten vor und Umstellung findet ohne Verzögerung statt (vgl. Kapitel 6.3.3.2). Stufe 2 bildet das Basismodell für Umstellungen ab. In dieser Stufe werden asymmetrische Umstellkosten eingeführt (vgl. Kapitel 6.3.3.3). Asymmetrisch bedeutet, dass sich die Umstellkosten von Logistikkonzept 1 gegenüber denen von Logistikkonzept 2 unterscheiden können. Zudem werden Erneut-Umstellungen modelliert, indem die geringeren Umstellkosten einer Erneut-Umstellung gegenüber einer Erst-Umstellung integriert werden (vgl. die Umstellungszenarien in Abbildung 6-4). In Stufe 3 wird das Basismodell um Flexibilisierungsmaßnahmen ergänzt. Das bedeutet, dass Investitionen in der aktuellen Periode anfallen, sodass die Kosten für zukünftige Umstellungen geringer werden (vgl. Kapitel 6.3.3.4). In Stufe 4 wird die Umstelldauer berücksichtigt. Wenn in einer Periode die Entscheidung für eine Umstellung getroffen wird, so erfolgt die Umsetzung der Umstellung nicht in derselben, sondern in einer späteren Periode. Die Berücksichtigung der Umstelldauer kann sowohl auf Stufe 2 als auch auf Stufe 3 angewendet werden (vgl. Kapitel 6.3.3.5). Die Erweiterungen in Stufe 5 umfassen sprunghafte Veränderungen der Einflussgrößen Bauteilbedarf und Logistikkosten je Bauteil. Die Veränderungen lassen sich auf die Stufen 2 bis 4 anwenden (vgl. Kapitel 6.3.3.6).

### 6.3.3 Modellierung der Umstellentscheidung

Vor der eigentlichen Modellierung werden die für alle Modellierungsstufen geltenden, allgemeinen Annahmen beschrieben:

- Die Entwicklung der Bedarfe gilt als unsicher und erfordert daher eine entsprechende Modellierung. Die Bedarfe der Bauteile sind immer ganzzahlig und nicht-negativ. Bei nicht-ganzzahliger Entwicklung werden die Bedarfe auf die nächste ganze Zahl aufgerundet. Bei negativer Entwicklung werden die Bedarf gleich Null gesetzt.
- Eine Anforderung ist die Berücksichtigung mehrerer zukünftiger Perioden. Eine Periode  $t$  entspricht einem Monat. Diese Periodenlänge wird aufgrund des taktischen Planungshorizontes von Umstellentscheidungen gewählt.
- Eine Umstellentscheidung wird immer zu Beginn einer Periode getroffen. Mit der Entscheidung werden die Umstellkosten direkt fällig. Die Umstelldauer wird erst in Stufe 4 explizit berücksichtigt. In den vorherigen Stufen wird angenommen, dass die Umstellung ohne Zeitverzögerung und unendlich schnell umgesetzt wird. Entsprechend können in der Periode der Umstellentscheidung bereits Einsparungen aufgrund der

Verwendung eines neuen Logistikkonzeptes generiert werden.

- Die Entscheidung wird immer zwischen zwei verschiedenen Logistikkonzepten getroffen. Das erste Logistikkonzept ist das aktuell verwendete Konzept  $LK_1$ , das zweite Logistikkonzept das günstigere Logistikkonzept  $LK_2$ .
- Die Umstellung von einem auf das andere Logistikkonzept erfolgt problemlos. Beide Logistikkonzepte bieten den gleichen Grad an Versorgungssicherheit.
- Die aus dem Modell resultierenden Entscheidungsempfehlungen basieren auf dem Zeitpunkt  $t = 0$ . Das bedeutet, dass die Zahlungsströme auf diesen Zeitpunkt diskontiert werden und ausschließlich die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen in die Entscheidung einfließen können.

### 6.3.3.1 Fundament der Modellierung

Die Modellierung basiert auf dem Binomialmodell und der Bedarfsgrenze mit den resultierenden Zahlungsstromentwicklungen. Beide Aspekte werden im Folgenden kurz erklärt.

#### Binomialmodell

Das Binomialmodell gilt als das bekannteste Verfahren unter den Lattice-Ansätzen, die der Bewertung von Optionen dienen, und geht auf die Arbeit von *Cox et al.* (vgl. [Cox-1979]) zurück [Hom-2001, S. 126; Göt-2014, S. 423]. Das Ziel des Binomialmodells ist die Entwicklung der betrachteten unsicheren Größe zu modellieren. Die Grundidee besteht darin, dass die unsichere Größe in der folgenden Periode nur zwei verschiedene Werte annehmen kann. Der Wert der unsicheren Größe entwickelt sich somit:

- entweder mit einer Wahrscheinlichkeit  $\pi_u$  nach oben, durch die Multiplikation mit dem Faktor  $u$  (*up-Bewegung*)
- oder mit einer Wahrscheinlichkeit  $\pi_d$  nach unten, durch die Multiplikation mit dem Faktor  $d$  (*down-Bewegung*).

Der Ausgangswert  $B_0$  der unsicheren Größe in Periode  $t = 0$  verändert sich in  $t = 1$  somit nach oben zum Wert  $u \cdot B_0$  oder nach unten zum Wert  $d \cdot B_0$ . In Periode  $t = 2$  sind die Werte  $u^2 \cdot B_0$ ,  $u \cdot d \cdot B_0$  und  $d^2 \cdot B_0$  möglich. Entwickelt sich der Ausgangswert einmal nach oben und dann nach unten, entspricht der resultierende Wert dem Ausgangswert, d. h.  $u \cdot d \cdot B_0 = B_0$ . Für die Anwendung des Binomialmodells sind folglich die vier Parameter  $u$ ,  $d$ ,  $\pi_u$  und  $\pi_d$  zu bestimmen [Fra-2004, S. 98 ff.; Amr-2003, S. 113 ff.; Göt-2014, S. 424]. Die Parameter des Binomialmodells werden so gewählt, dass die resultierende Verteilung

der unsicheren Größe die empirische Realität widerspiegelt. Bei der Annahme symmetrischer Up- und Down-Bewegungen lassen sich die Faktoren zur Modellierung der jeweiligen Bewegung  $u$  und  $d$  mit Hilfe der Exponentialfunktion  $e$  und der Volatilität  $\sigma$  der unsicheren Größe bestimmen [Amr-2003, S. 115]:

$$u = e^\sigma \quad \text{und} \quad d = e^{-\sigma} = \frac{1}{u}. \quad (6-1)$$

Die Wahrscheinlichkeiten  $\pi_u$  und  $\pi_d$  können mit Hilfe der Faktoren  $u$  und  $d$  für die Up- und Down-Bewegungen und dem risikolosen Zinssatz  $r$  bestimmt werden [Amr-2003, S. 115]:

$$\pi_u = \frac{e^r - d}{u - d} \quad \text{und} \quad \pi_d = 1 - \pi_u. \quad (6-2)$$

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 6-7 die Entwicklung des unsicheren Bedarfs eines Bauteils dargestellt. Der initiale Bedarf beträgt im Beispiel  $B_0 = 2.000$  und die Volatilität liegt bei  $\sigma = 0,15$ , sodass sich  $u = 1,16$  und  $d = 0,86$  ergeben. Der Bedarf von 2.324 in Periode 3 berechnet sich wie folgt:  $u \cdot u \cdot d \cdot B_0 = d \cdot u \cdot u \cdot B_0 = u \cdot d \cdot u \cdot B_0 = 1,16^2 \cdot 0,86 \cdot 2.000 = 2.324$ . Es gibt somit drei mögliche Pfade, über die dieser Wert erreicht wird. Die grauen Balken geben die Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Bedarfe an.

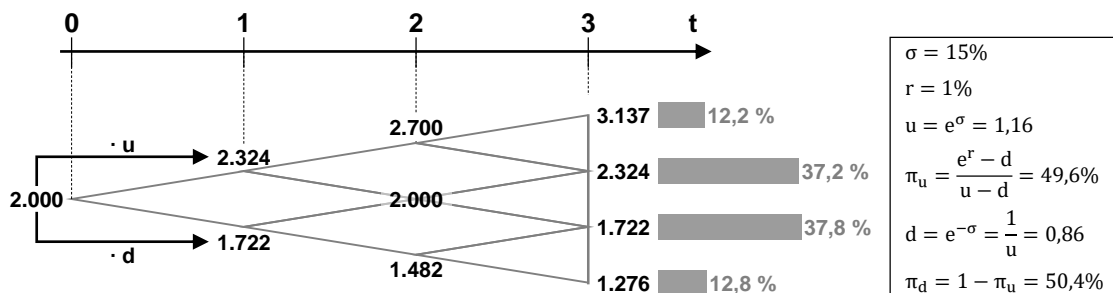


Abbildung 6-7: Veranschaulichung der Idee des Binomialmodells für einen exemplarischen Bauteilbedarf (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Amr-2003, S. 113])

Die Formel der Eintrittswahrscheinlichkeit von Wert  $B_t^s$  in Periode  $t$  im Zustand  $s$  lautet:

$$\pi(B_t^s) = \binom{t}{n_{u(s)}} \cdot \left[ \pi_u^{n_{u(s)}} \cdot \pi_d^{t-n_{u(s)}} \right], \quad (6-3)$$

wobei  $n_{u(s)}$  die Anzahl an Up-Bewegungen in Abhängigkeit vom Zustand  $s$  des betrachteten Wertes  $B_t^s$  und  $\binom{t}{n_{u(s)}}$  die Anzahl an Möglichkeiten, um den Wert  $B_t^s$  zu erreichen, ist. Für den Wert  $B_3^2 = 2.324$  berechnet sich die Eintrittswahrscheinlichkeit somit wie folgt:  $\pi(B_3^2 = 2.324) = \binom{3}{2} \cdot [0,496^2 \cdot 0,504^{3-2}] = 0,372$ .

## Bedarfsgrenze

Eine wichtige Grundlage für die Modellierung der Umstellentscheidung ist die Einführung einer Bedarfsgrenze (BG). Die Bedarfsgrenze gibt den Bedarf an, ab welchem das eine Logistikkonzept gegenüber dem anderen Logistikkonzept vorteilhafter ist. Durch die Bedarfsgrenze wird somit modelliert, dass sich bei schwankendem Bedarf gemäß des Binomialmodells die Vorteilhaftigkeit der Logistikkonzepte erneut ändern kann (z. B. kann in  $t = 0$   $LK_2$  günstiger sein und in  $t = 3$  aufgrund der Bedarfsentwicklung  $LK_1$  wieder günstiger sein). Die Idee der Bedarfsgrenze ist in Abbildung 6-8 exemplarisch veranschaulicht.

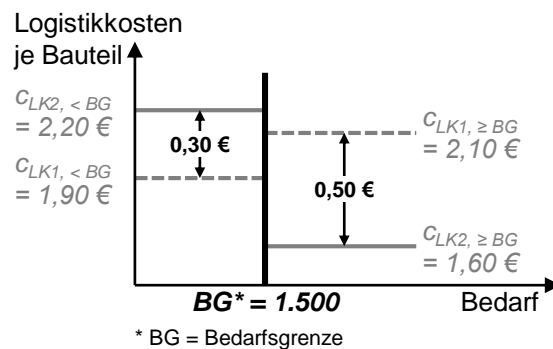


Abbildung 6-8: Exemplarische Darstellung der Logistikkosten je Logistikkonzept in Abhängigkeit von der Bedarfsgrenze (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017b, S. 40])

Die Abbildung zeigt die Logistikkosten je Bauteil für die beiden Logistikkonzepte  $LK_1$  und  $LK_2$  in Abhängigkeit von der Höhe des Bedarfs. Die Bedarfsgrenze beträgt  $BG = 1.500$ . Ist der Bedarf in einer Periode kleiner als diese Grenze, dann ist  $LK_1$  mit einem Kostensatz von  $c_{LK1, < BG} = 1,90$  günstiger als  $LK_2$  mit  $c_{LK2, < BG} = 2,20$ . Steigt der Bedarf jedoch über die BG, dann wird  $LK_2$  mit dem Kostensatz  $c_{LK2, \geq BG} = 1,60$  günstiger als  $LK_1$  mit  $c_{LK1, \geq BG} = 2,10$ . Es wird somit angenommen, dass eine sprungfixe Veränderung der Logistikkosten je Bauteil vorliegt. Ohne eine Bedarfsgrenze wären im Modell die Kosten des einen Logistikkonzeptes immer höher als die des anderen Logistikkonzeptes. Das würde dazu führen, dass sich trotz Bedarfsschwankungen die Präferenz für ein Logistikkonzept niemals ändert. Das kann in der Realität der Fall sein, muss es aber nicht. Entsprechend unterstützt die BG eine realitätsnähere Modellierung.

Die wechselnde Präferenz für ein Logistikkonzept sei im Folgenden an einem Zahlenbeispiel verdeutlicht. In Abbildung 6-9 sind die resultierenden Zahlungsströme für  $LK_1$  und  $LK_2$  mit den beispielhaften Logistikkosten aus Abbildung 6-8 und der Bedarfsentwicklung aus Abbildung 6-7 dargestellt. Die Zahlungsströme der Logistikkonzepte ergeben sich aus den jeweiligen Kosten. Die Kosten  $C_t^s(LK_i)$  für das Logistikkonzept  $LK_i$  in Periode  $t$  und in Zustand  $s$  berechnen sich allgemein wie folgt:

$$C_t^s(LK_i) = \begin{cases} -c_{LK_i, < BG} \cdot B_t^s & \text{für } B_t^s < BG, \\ -c_{LK_i, \geq BG} \cdot B_t^s & \text{für } B_t^s \geq BG. \end{cases} \quad (6-4)$$

Die obere linke Tabelle der Abbildung zeigt die Bedarfsentwicklung. Die Bedarfsentwicklung von einer Periode zur nächsten in der gleichen Zeile (z. B. von 2.000 in  $t = 0$  zu 2.324 in  $t = 1$ ) steht für eine Up-Bewegung und in der nächsten Zeile (z. B. von 2.000 in  $t = 0$  zu 1.722 in  $t = 1$ ) für eine Down-Bewegung. Die Bedarfe, die kleiner als die Bedarfsgrenze sind, sind grau hinterlegt. Die beiden rechten Tabellen bilden die Zahlungsströme von  $LK_1$  bzw.  $LK_2$  ab, in Abhängigkeit von den Bedarfen und unter Berücksichtigung der Bedarfsgrenze. Da es sich um Prozesskosten handelt, sind die Zahlungsströme negativ. Die Tabelle unten links weist das Logistikkonzept aus, das die geringeren Kosten verursacht. Es wird deutlich, dass in den Fällen, in denen der Bedarf kleiner als die Bedarfsgrenze ist,  $LK_1$  gegenüber  $LK_2$  präferiert wird. In den anderen Fällen ist  $LK_2$  günstiger.

	s	t	0	1	2	3	4
<b>Bedarfsentwicklung</b> $B_t^s$	1		2.000	2.324	2.700	3.137	3.645
	2			1.722	2.000	2.324	2.700
	3				1.482	1.722	2.000
	4					1.276	1.482
	5						1.098
<b>Zahlungsstrom</b> $LK_1$ $C_t^s(LK_1)$	1		-4.200	-4.880	-5.670	-6.588	-7.655
	2			-3.616	-4.200	-4.880	-5.670
	3				-2.816	-3.616	-4.200
	4					-2.424	-2.816
	5						-2.086
<b>Günstigeres LK</b>				LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>
				LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>
					LK <sub>1</sub>	LK <sub>2</sub>	LK <sub>2</sub>
						LK <sub>1</sub>	LK <sub>1</sub>
							LK <sub>1</sub>
Da $C(LK_2) = -2.416 < C(LK_1) = -2.086$ → wähle LK <sub>1</sub>							
<b>Zahlungsstrom</b> $LK_2$ $C_t^s(LK_2)$	1		-3.200	-3.718	-4.320	-5.019	-5.832
	2			-2.755	-3.200	-3.718	-4.320
	3				-3.260	-2.755	-3.200
	4					-2.807	-3.260
	5						-2.416

Abbildung 6-9: Exemplarische Darstellung der Bedarfsentwicklung, der Zahlungsströme je Logistikkonzept und der Ausweisung des günstigeren Logistikkonzeptes

### 6.3.3.2 Stufe 1: Vereinfachte Umstellungen

Bei der ersten Modellstufe wird angenommen, dass für die Umstellung des Logistikkonzeptes keine Umstellkosten entstehen. Die Umstelldauer beträgt null Perioden, d. h. die Umsetzung der Umstellung erfolgt in der Periode, in der die Entscheidung getroffen wird. Es wird in jeder Periode entschieden, ob das Logistikkonzept umzustellen ist. Die Umstellungsentscheidung von Logistikkonzepten lässt sich auf eine Umstelloption mit verschiedenen Fertigungsmodi übertragen (vgl. Kapitel 6.3.1). Bei einer Umstelloption wird entschieden, wann zwischen zwei Fertigungsmodi gewechselt wird. Bei der Übertragung auf eine flexible Inbound-Logistik entsprechen die Fertigungsmodi den Logistikkonzepten. Der Unterschied zwischen der Umstellung von Fertigungsmodi und Logistikkonzepten liegt darin, dass je-

der Fertigungsmodus einen positiven Zahlungsstrom (d. h. einen Ertrag) generiert. Hin- gegen resultieren aus jedem Logistikkonzept Prozesskosten, wodurch ein negativer Zah- lungsstrom entsteht. Dieser Unterschied hat jedoch keine Auswirkung auf die Modellierung. Aufgrund der beschriebenen Übertragbarkeit erfolgt die Modellierung in Anlehnung an *Tri- georgis* (vgl. [Tri-1996, S. 171 ff.]).

Da die Zahlungsströme der Logistikkonzepte unsicher sind, ist es erforderlich den erwarteten Zahlungsstrom  $E[C_t(LK_i)]$  zu bestimmen. Dieser ergibt sich aus der Summe des Pro- duktes der Logistikkosten  $C_t^s(LK_i)$  der verschiedenen Zustände  $s$  mit ihren Eintrittswahr- scheinlichkeiten  $\pi(C_t^s)$ , die analog zu Formel 6-3 berechnet werden; es gilt:  $\pi(B_t^s) = \pi(C_t^s)$ . Formal bedeutet das:

$$E[C_t(LK_i)] = \sum_{s=1}^{t+1} C_t^s(LK_i) \cdot \pi(C_t^s). \quad (6-5)$$

Um den Barwert  $PV(LK_i)$  der Inbound-Logistik unter Verwendung von Logistikkonzept  $LK_i$  zu bestimmen, sind die erwarteten Zahlungen  $E[C_t(LK_i)]$  der einzelnen Perioden auf den Zeitpunkt  $t = 0$  zu diskontieren und anschließend zu summieren:

$$PV(LK_i) = \sum_{t=1}^T \frac{E[C_t(LK_i)]}{(1+r)^t}. \quad (6-6)$$

Der Barwert  $PV(LK_i)$  entspricht dabei dem Wert einer nicht flexiblen Inbound-Logistik – d. h. dem Wert der Inbound-Logistik bei ausschließlicher Verwendung von  $LK_i$ . Wenn eine flexible Umstellung der Logistikkonzepte möglich ist, können die Kostenvorteile der jeweiligen Logistikkonzepte berücksichtigt werden. Der resultierende erwartete Wert aus dem Zahlungsstrom einer flexiblen Inbound-Logistik  $E[F]$  muss dabei größer sein als der maximale Barwert der Inbound-Logistik bei Verwendung von  $LK_1$  bzw.  $LK_2$ :

$$E[F] \geq \max[PV(LK_1), PV(LK_2)]. \quad (6-7)$$

Anders ausgedrückt, entspricht der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik  $E[F]$  dem Barwert einer nicht flexiblen Inbound-Logistik  $PV(LK_i)$  plus dem Flexibilitätswert  $F(i \rightarrow j)$  einer Umstellung von Logistikkonzept  $i$  zu  $j$ :

$$E[F] = PV(LK_i) + F(i \rightarrow j) \quad \forall i = 1, 2, j = 1, 2 \text{ und } i \neq j. \quad (6-8)$$

Als nächstes wird der Flexibilitätswert der Logistikkonzeptumstellung  $F(i \rightarrow j)$  bestimmt. Die Entscheidung umzustellen findet immer zu Beginn einer Periode statt. Der Entschei-



Träger besitzt somit die Option  $S_t^s(i \rightarrow j)$ , das Logistikkonzept von  $i$  zu  $j$  in Periode  $t$  und Zustand  $s$  umzustellen. Da diese Option nur zu Beginn der Periode  $t$  ausgeübt werden kann, handelt es sich um eine *europäische Option* [Göt-2014, S. 422]. Der Entscheidungsträger wird die Option ausüben, wenn aus der Umstellung eine vorteilhafte Zahlung resultiert. Der Wert der Option  $S_t^s(i \rightarrow j)$  entspricht somit dem maximalen Wert aus der positiven Einsparung bei Verwendung von  $j$  statt  $i$  und dem Wert null:

$$S_t^s(i \rightarrow j) = \max [C_t^s(LK_j) - C_t^s(LK_i), 0] . \quad (6-9)$$

Die Optionswerte je Zustand  $s$  lassen sich für eine Periode  $t$  mit Hilfe des erwarteten Optionswertes  $E [S_t(i \rightarrow j)]$  zusammenfassen. Dazu werden die Produkte aus Optionswerten  $S_t^s(i \rightarrow j)$  und Eintrittswahrscheinlichkeiten  $\pi(S_t^s)$  summiert; wobei  $\pi(B_t^s) = \pi(S_t^s)$  ist:

$$E [S_t(i \rightarrow j)] = \sum_{s=1}^{t+1} S_t^s(i \rightarrow j) \cdot \pi(S_t^s) . \quad (6-10)$$

Liegen keine Umstellkosten vor, können die Optionen der unterschiedlichen Perioden unabhängig voneinander betrachtet werden. Der Wert der Flexibilität zur Logistikkonzeptumstellung  $F(i \rightarrow j)$  kann dann durch die Summe der diskontierten erwarteten Optionswerte aus jeder Periode ausgedrückt werden:

$$F(i \rightarrow j) = \sum_t^T PV [E [S_t(i \rightarrow j)]] = \sum_t^T \frac{E [S_t(i \rightarrow j)]}{(1+r)^t} . \quad (6-11)$$

### Entscheidungsregel: Stufe 1

Liegen keine Umstellkosten vor, dann ergibt sich das optimale Logistikkonzept je Periode  $t$  und je Zustand  $s$  aus folgender Entscheidungsregel:

- $LK_1$  wird verwendet, wenn  $C_t^s(LK_1) > C_t^s(LK_2)$ .
- $LK_2$  wird verwendet, wenn  $C_t^s(LK_2) > C_t^s(LK_1)$ .

Eine Investition  $I(F)$  in die flexible Inbound-Logistik sollte dann erfolgen, wenn der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik  $E[F]$  abzüglich der Investition in diese größer ist als der Wert der nicht flexiblen Inbound-Logistik  $PV(LK_i)$  abzüglich der erforderlichen Investition  $I(LK_i)$  zur Verwendung von  $LK_i$ :

- Investiere  $I(F)$ , wenn  $E[F] - I(F) > PV(LK_i) - I(LK_i)$ .

Modellstufe 1 wird in Anhang C.2 anhand eines Zahlenbeispiels verdeutlicht.

### 6.3.3.3 Stufe 2: Basismodell für Umstellungen

Die Bewertung der Optionen verändert sich, wenn Umstellkosten existieren. Dann sind die Umstelloptionen der verschiedenen Perioden nicht mehr unabhängig voneinander, sodass sich die einzelnen Optionswerte nicht mehr additiv kombinieren lassen. Das liegt daran, dass sich Umstellkosten nicht nur auf die Entscheidung und die Zahlung in der aktuellen Periode, sondern auch auf die der Folgeperioden auswirken. Dadurch ist es erforderlich, die Optionsbewertung mittels einer *Rückwärtsrechnung* durchzuführen. Als erstes wird der Optionswert der letzten Periode und anschließend werden sukzessive die Optionswerte der vorherigen Perioden ermittelt [Göt-2014, S. 426]. So wird sichergestellt, dass der Wert der flexiblen Inbound-Logistik immer mit dem optimalen Logistikkonzept berechnet wird. Die Umstellkosten für die Umstellung von  $LK_i$  zu  $LK_j$  werden mit  $I(i \rightarrow j)$  bezeichnet. Es wird von asymmetrischen Umstellkosten ausgegangen, d. h. es gilt  $I(1 \rightarrow 2) \neq I(2 \rightarrow 1)$ .

#### Entscheidungsregel: Stufe 2

**1. Auswahl Logistikkonzept je Periode und Zustand.** Wähle das Logistikkonzept aus, bei welchem die Zahlung der aktuellen Periode  $t$  zuzüglich der diskontierten erwarteten Zahlung der nächsten Periode  $t + 1$  und abzüglich eventueller Umstellkosten  $I(i \rightarrow j)$  maximal wird. Formal wird der Erwartungswert der flexiblen Inbound-Logistik  $E_t^s [LK_i]$  im Zeitpunkt  $t$  und Zustand  $s$  berechnet, wobei  $LK_i$  das aktuell verwendete Logistikkonzept ist:

$$E_t^s [LK_i] = \max \left[ C_t^s(LK_i) + \frac{\hat{E} [E_{t+1}^s [LK_i]]}{1+r}, \right. \\ \left. C_t^s(LK_j) + \frac{\hat{E} [E_{t+1}^s [LK_j]]}{1+r} - I(i \rightarrow j) \right] \quad \forall i, j = 1, 2 \text{ und } i \neq j. \quad (6-12)$$

Die erwartete Zahlung der Folgeperiode berechnet sich wie folgt:

$$\hat{E} [E_{t+1}^s [LK_m]] = \pi_u \cdot E_{t+1}^u [LK_m] + \pi_d \cdot E_{t+1}^d [LK_m] \quad \forall m = i, j. \quad (6-13)$$

**2. Auswahl optimales initiales Logistikkonzept.** Der aktuelle Erwartungswert der flexiblen Inbound-Logistik  $E_0[F]$  entspricht dem maximalen erwarteten Wert der flexiblen Inbound-Logistik ausgehend von  $LK_i$  bzw.  $LK_j$ . Das Logistikkonzept, bei dem der Wert der flexiblen Inbound-Logistik maximal ist, gilt als optimales initiales Konzept.

$$E_0[F] = \max [E_0[LK_i], E_0[LK_j]]. \quad (6-14)$$

Um die Entscheidungsregel anzuwenden, sind die Erwartungswerte der flexiblen Inbound-Logistik ausgehend von  $LK_1$  und  $LK_2$  zu bestimmen. Die Berechnung der Erwartungswerte startet in Periode  $T$ . Die erwartete Zahlung der Folgeperiode von  $T$  ist annahmegemäß gleich null:  $\hat{E} [E_{T+1}^s[LK_m]] = 0$ . Für die restlichen Perioden gelten die Formeln 6-12 und 6-13. Die Berücksichtigung von Umstellkosten führt dazu, dass der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik geringer ist als bei Vernachlässigung der Umstellkosten.

Eine Erweiterung ist die Differenzierung von Erst- und Erneut-Umstellungen, indem für die Erst-Umstellung andere Umstellkosten angesetzt werden als für die Erneut-Umstellung. Die Kosten für die Erst-Umstellung sind dabei i. d. R. größer, d. h.  $I(i \rightarrow j) \geq I^{re}(i \rightarrow j)$ . Diese Kosten beziehen sich auf die Umstellung von  $LK_i$  zu  $LK_j$ , wobei  $LK_i$  das ursprünglich verwendete Logistikkonzept ist. In Periode  $t = 0$  werden die Umstellkosten der Erst-Umstellung  $I(i \rightarrow j)$  und in den Perioden  $t \geq 1$  werden die Umstellkosten der Erneut-Umstellung  $I^{re}(i \rightarrow j)$  angesetzt. Diese Modellierung gilt jedoch nur dann, wenn in  $t = 0$  das optimale Logistikkonzept  $LK_j$  ist (da sonst die Erst-Umstellung erst in einer späteren Periode stattfindet und in diesem Fall zu niedrigeren Umstellkosten angesetzt würden). Insgesamt kann zur Berücksichtigung von Kosten für Erneut-Umstellungen festgehalten werden, dass diese zu einem höheren Erwartungswert der flexiblen Inbound-Logistik führen. Werden die Kosten der Erst- und Erneut-Umstellung nicht differenziert (d. h. wenn nur die höheren Kosten der Erst-Umstellungen für alle Umstellungen angesetzt werden), führt dies nicht zwangsläufig zu einem falschen, jedoch zu einem pessimistischeren Ergebnis, da in Summe mit höheren Umstellkosten gerechnet wird.

#### 6.3.3.4 Stufe 3: Flexibilisierung

Für die Flexibilisierung der Logistikkonzeptumstellungen ist eine initiale Investition in Flexibilisierungsmaßnahmen  $I(FM)$  erforderlich. Durch diese Investition verringern sich ab Periode  $t = 0$  die Umstellkosten. Dies kann zu häufigeren Umstellungen und damit zum Ausnutzen relativ geringerer Kostenvorteile von Logistikkonzept  $i$  gegenüber  $j$  führen. Die Höhe der Veränderung der Umstellkosten und welche Umstellrichtungen betroffen sind, hängt dabei von der jeweiligen Flexibilisierungsmaßnahme ab. Es gilt zu entscheiden, ob in eine Flexibilisierungsmaßnahme investiert werden sollte oder nicht. Die Berechnung der Erwartungswerte der flexiblen Inbound-Logistik erfolgt mit den angepassten Umstellkosten  $I^*(i \rightarrow j)$  analog zu Stufe 2 (vgl. 6-12). Eine Abweichung liegt jedoch bei der Kalkulation des Erwartungswertes der flexiblen Inbound-Logistik in  $t = 0$  vor. Dieser wird zusätzlich um den Betrag für die Investition in die Flexibilisierungsmaßnahme  $I(FM)$  reduziert:

$$E_0^* [LK_i] = \max \left[ C_0(LK_i) + \frac{\hat{E} [E_1^s[LK_i]]}{1+r}, \right. \\ \left. C_0(LK_j) + \frac{\hat{E} [E_1^s[LK_j]]}{1+r} - I^*(i \rightarrow j) \right] - I(FM) \\ \forall i, j = 1, 2 \text{ und } i \neq j. \quad (6-15)$$

### Entscheidungsregel: Stufe 3

Implementiere die Flexibilisierungsmaßnahme, wenn der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik mit Flexibilisierungsmaßnahme  $E_0[F_{FM}]$  größer ist, als der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik ohne diese Maßnahme  $E_0[F]$  (vgl. Formel 6-14):

- In  $I(FM)$  investieren, wenn  $E_0[F_{FM}] > E_0[F]$ .

#### 6.3.3.5 Stufe 4: Umstelldauer

Die Stufen 1 bis 3 unterliegen der realitätsfernen Annahme, dass eine Logistikkonzeptumstellung ohne zeitliche Verzögerung erfolgt. In Stufe 4 wird daher die Umstelldauer modelliert. Es wird zwischen einer einmonatigen  $T_{UZ} = 1$  und einer mehrmonatigen Umstelldauer  $T_{UZ} > 1$  unterschieden. Im ersten Fall verändert sich die Formel 6-12 zur Berechnung des Erwartungswertes der flexiblen Inbound-Logistik zu:

$$E_t^s [LK_i] = \max \left[ C_t^s(LK_i) + \frac{\hat{E} [E_{t+1}^s[LK_i]]}{1+r}, \right. \\ \left. C_t^s(LK_i) + \frac{\hat{E} [E_{t+1}^s[LK_j]]}{1+r} - I(i \rightarrow j) \right] \quad \forall i, j = 1, 2 \text{ und } i \neq j. \quad (6-16)$$

Die Zahlungen aus der Beibehaltung des aktuellen Logistikkonzeptes  $LK_i$  sind von der Umstelldauer unabhängig und bleiben daher unverändert. Die Zahlungen, die aus der Entscheidung für eine Umstellung entstehen, ändern sich hingegen bei Berücksichtigung der Umstelldauer: Obwohl bereits die Umstellkosten  $I(i \rightarrow j)$  in  $t$  anfallen, fallen in  $t$  weiterhin die Zahlungen aus dem noch nicht umgestellten, aktuellen Logistikkonzept  $LK_i$  an. Erst in  $t + 1$  werden die erwarteten Zahlungen aus dem dann umgestellten Logistikkonzept  $LK_j$  berücksichtigt. Dadurch sinkt der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik. Implizit steigen somit die Umstellkosten – und zwar in Höhe der entgangenen Einsparungen aufgrund der verzögerten Umstellung. Bei einmonatiger Umstelldauer werden Umstellungen seltener stattfinden als bei einer Umstelldauer von null Perioden.

Da bei der Optionsbewertung mittels Rückwärtsrechnung immer nur die Folgeperiode  $t + 1$  berücksichtigt wird, ist die Modellierung der Umstelldauer von  $T_{UZ} > 1$  aufwendig. Um der Anforderung der Praxistauglichkeit gerecht zu werden, wird daher angenommen, dass sich die Umstellkosten abhängig von der Umstelldauer um die Summe der Barwerte der erwarteten Einsparungen  $PV[E[\Delta C_t(i \rightarrow j)]]$  bei Verwendung von  $LK_j$  entwickeln:

$$E_t^s [LK_i] = \max \left[ C_t^s(LK_i) + \frac{\hat{E} [E_{t+1}^s[LK_i]]}{1+r}, \right. \\ \left. C_t^s(LK_i) + \frac{\hat{E} [E_{t+1}^s[LK_j]]}{1+r} - I(i \rightarrow j) - \sum_t^{t+T_{UZ}-1} PV[E[\Delta C_t(i \rightarrow j)]] \right] \\ \forall i, j = 1, 2 \text{ und } i \neq j. \quad (6-17)$$

Die Einsparungen entsprechen den Optionswerten der Stufe 1 aus Formel 6-9:

$$E[\Delta C_t(i \rightarrow j)] = E[S_t(i \rightarrow j)] \\ PV[E[\Delta C_t(i \rightarrow j)]] = \frac{E[S_t(i \rightarrow j)]}{(1+r)^t}. \quad (6-18)$$

Diese Stufe lässt sich zudem um Flexibilisierungsmaßnahmen, die die Umstelldauer reduzieren, erweitern. Die Modellierung dieser Flexibilisierungsmaßnahmen umfasst zwei Aspekte: die Berücksichtigung der Investition in die Flexibilisierungsmaßnahme sowie die Reduktion der Umstelldauer. Die Berücksichtigung der Investition erfolgt analog zur Flexibilisierung in Bezug auf die Umstellkosten (Stufe 3). Das bedeutet, dass die Investitionshöhe der Flexibilisierungsmaßnahme  $I(FM)$  in Periode  $t = 0$  bei der Berechnung von  $E_0[LK_i]$  subtrahiert wird (vgl. Formel 6-15). Der Nutzen aus der Flexibilisierungsmaßnahme in Form der Reduktion der Umstelldauer wird über eine Anpassung der Inputdaten modelliert (statt  $T_{UZ}$  wird  $T_{UZ}^*$  verwendet). Entsprechend ist Formel 6-17 mit der neuen Umstelldauer nach der Flexibilisierung  $T_{UZ}^*$  zu berechnen. Die Entscheidungsregeln bleiben von der Flexibilisierungsmaßnahme bzgl. der Umstelldauer unberührt.

### 6.3.3.6 Stufe 5: Veränderung der Einflussgrößen

Bisher wurde für den Bedarf eine unsichere binomiale Entwicklung angenommen. Möglicherweise verändern sich die Inputparameter aufgrund bestimmter Einflüsse jedoch nicht nur binomial sondern sprunghaft. Beispielsweise kann eine Wirtschaftskrise zu Absatzeinbußen führen, sodass sich der Bedarf sprunghaft reduziert. Ebenso kann die Einführung einer neuen Modellbaureihe zur Folge haben, dass für eine bestimmte Zeitspanne mehrere Modelle im Parallelbetrieb produziert werden. Dies kann zu einem Anstieg in der Varian-

tenanzahl führen, was wiederum einen Einfluss auf die Logistikkosten je Bauteil der untersuchten Logistikkonzepte haben kann. Entsprechend werden im Folgenden die sprunghafte Veränderung der Bedarfe und die Veränderung der Logistikkosten der Logistikkonzepte für einen bestimmten Zeitraum modelliert. Dabei gilt die Annahme, dass ausreichend sichere Informationen bzgl. der auftretenden Veränderungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  vorliegen.

### Sprunghafte Bedarfsveränderung

Um eine sprunghafte Veränderung im Bedarf zu modellieren, wird der Bedarf  $B_t^s$  in jeder Periode  $t$  und in jedem Zustand  $s$  mit einem Änderungsfaktor  $\beta_t$  multipliziert. Liegt keine sprunghafte Veränderung des Bedarfs vor, dann gilt  $\beta_t = 1$ . Andernfalls ist der erwartete Änderungsfaktor zu schätzen. Für  $\beta_t < 1$  liegt eine Bedarfssenkung und für  $\beta_t > 1$  eine Bedarfssteigerung vor. Ein Bedarfssprung kann für alle Stufen implementiert werden. Die jeweiligen Entscheidungsregeln bleiben davon unberührt. Allerdings wirkt sich die Veränderung des Bedarfs auf den Flexibilitätswert zur Logistikkonzeptumstellung  $F(i \rightarrow j)$  aus. Je nach Höhe der Logistikkosten und Bedarfsgrenze kann dann ein mehrfaches Umstellen der Logistikkonzepte vorteilhafter sein als ohne einen Bedarfssprung. Aufgrund der Abhängigkeit von den restlichen Inputparametern, ist es nicht möglich, definitive, verallgemeinerte Aussagen bzgl. der Auswirkungen von drastischen Bedarfsveränderungen zu treffen.

### Zeitraumbezogene Logistikkostenveränderung

In einer beliebigen zukünftigen Periode können sich die Logistikkosten je Bauteil eines Logistikkonzeptes verändern. Periode  $t^{nK}$  gibt den Zeitpunkt an, ab welchem die neuen Kosten ( $nK$ ) der Logistikkonzepte gelten und Periode  $t^{aK}$  den, ab welchem die ursprünglichen Kosten wieder gelten. Die Kostenänderung kann für einen festgelegten Zeitraum von Periode  $t^{nK}$  bis Periode  $t^{aK}$  oder für den gesamten restlichen Betrachtungszeitraum ab einer bestimmten Periode  $t^{nK}$  (d. h.  $t^{aK} = T$ ) gelten. Formel 6-4 zur Berechnung der Zahlungen aus einem Logistikkonzept  $LK_i$  ändert sich dann wie folgt:

$$C_t^s(LK_i) = \begin{cases} -c_{LK_i, < BG} \cdot B_t^s & \text{für } B_t^s < BG \text{ und } 0 \leq t < t^{nK} \text{ und } t > t^{aK}, \\ -c_{LK_i, \geq BG} \cdot B_t^s & \text{für } B_t^s \geq BG \text{ und } 0 \leq t < t^{nK} \text{ und } t > t^{aK}, \\ -c_{LK_i, < BG}^* \cdot B_t^s & \text{für } B_t^s < BG \text{ und } t^{nK} \leq t \leq t^{aK}, \\ -c_{LK_i, \geq BG}^* \cdot B_t^s & \text{für } B_t^s \geq BG \text{ und } t^{nK} \leq t \leq t^{aK}. \end{cases} \quad (6-19)$$

Ebenso wie die Bedarfsveränderung kann die Logistikkostenveränderung auf alle Stufen angewendet werden. Je nach Kostenveränderung und Dauer der Kostenveränderung kann dies zu einer Änderung des erwarteten Logistikkonzeptes führen.

## 6.4 Zusammenfassung und kritische Reflexion des Flexibilitätsansatzes

Im vorliegenden Kapitel wurde der dritte Planungsbaustein des Steuerungskonzeptes entwickelt, der den Flexibilitätsgedanken adressiert. Der Flexibilitätsansatz soll auf die Bauteile angewendet werden, die mit der Identifikationsmethode als Grenzbauteile ermittelt wurden und bei denen das Optimierungsmodell als kostenoptimales Logistikkonzept ein anderes als das derzeit verwendete Konzept ausgegeben hat.

Der Flexibilitätsansatz unterteilt sich in zwei wesentliche Bestandteile: die Bewertung von Umstellungen und Flexibilisierungsmaßnahmen sowie das Entscheidungsmodell für flexible Logistikkonzeptumstellungen. Bei der Bewertung von Umstellungen wurde der Umstellprozess in Arbeitspakete zerlegt und deren Abhängigkeiten in einem Netzplan veranschaulicht. Eine Detaillierung der Arbeitspakete in Aktivitäten gilt als unternehmensspezifisch. Für die Bewertung der Aktivitäten hinsichtlich Kosten und Dauern wurden die PERT-Methode sowie statistische Kennzahlen empfohlen. Allgemeingültige Kosten und Dauern lassen sich aufgrund der unternehmensspezifischen Eigenschaft von Aktivitäten nicht ausweisen. Zudem wurde ein Vorgehen vorgeschlagen, um unternehmensspezifische Flexibilisierungsmaßnahmen zu identifizieren und deren Effekt auf Umstellkosten und -dauern zu quantifizieren. Das Entscheidungsmodell für Umstellungen basiert auf einem Realoptionsansatz. Die Modellierung erfolgte stufenweise, wobei in jeder Stufe die Modellgenauigkeit zunimmt.

Die in Kapitel 6.1.1 gestellten Anforderungen konnten durch die entwickelten Methoden erfüllt werden. Die entwickelte Vorgehensmethode zur systematischen Bewertung von Umstellungen stellt sicher, dass Unternehmen den Prozess der Logistikkonzeptumstellung hinsichtlich der Flexibilitätsdimensionen Kosten und Zeit bewerten können (A3.1), auch wenn sich keine allgemeingültigen Kosten und Umstelldauern ausweisen lassen. Die Anforderung, dass die Umstellentscheidung auf absoluter und monetärer Basis erfolgen soll (A3.2), kann durch das Entscheidungsmodell erfüllt werden. Die Umstelldauer wurde im Modell durch die entgangenen Einsparungen je Periode, die die Umstellung dauert, eingepreist. Entsprechend wurde ebenfalls die Anforderung der mehrperiodischen Betrachtung erfüllt (A3.4). Die Praxistauglichkeit wurde durch die Wahl des Binomialmodells zur Bewertung der Realoptionen sichergestellt (A3.6). Dieses Modell lässt sich in einem Tabellenkalkulationsprogramm implementieren, sodass das Modell in der Praxis anwendbar und nachvollziehbar ist. Ebenso konnten mit Hilfe des Binomialmodells unsichere Entwicklungen von Bedarfen modelliert werden (A3.5). Der entscheidende Aspekt der Flexibilität (A3.3)

wurde ebenfalls vollumfänglich abgebildet: Zum einen wurde der Effekt geringerer Umstellkosten und -dauern aufgrund von Flexibilisierungsmaßnahmen erfolgreich modelliert. Zum anderen kann mit Hilfe des Realloptionsansatzes der Wert einer flexiblen Inbound-Logistik gegenüber einer nicht-flexiblen Inbound-Logistik explizit ausgewiesen werden.



## 7 Evaluation des Steuerungskonzeptes in der industriellen Praxis

In diesem Kapitel wird das entwickelte Steuerungskonzept für eine flexible Inbound-Logistik an Fallbeispielen angewendet. Dadurch soll sowohl die Funktionalität des Steuerungskonzeptes als auch dessen Praxistauglichkeit validiert werden. Die Fallbeispiele basieren auf den Daten eines deutschen Nutzfahrzeugherstellers. Die in diesem Kapitel präsentierten Zahlen und Ergebnisse wurden anonymisiert, um Rückschlüsse auf Detailinformationen des betrachteten Unternehmens zu verhindern. Zudem basieren die Ergebnisse zum Teil auf Veröffentlichungen und durch die Autorin angeleiteten Studienarbeiten (vgl. [Maa-2016; Maa-2017c; fml-2016a; fml-2017a; fml-2016e; fml-2017c; fml-2017b]). Eine Übersicht über den Aufbau dieses Kapitels liefert Abbildung 7-1.



Abbildung 7-1: Struktur des Anwendungskapitels

In Kapitel 7.1 werden zunächst die Grenzbauteile für einen Produktionsstandort des Nutzfahrzeugherstellers identifiziert. Als Input wird dafür die Liste aller SNR des Produktionsstandortes benötigt. Je SNR müssen zudem die Ausprägungen der sechs relevanten Einflussfaktoren (Bauteilgewicht, Bauteilgröße, etc.) und die aktuelle Belieferungsform (lagerhaltig oder lagerlos) vorliegen.

In Kapitel 7.2 wird der Inbound-Prozess für die Grenzbauteile optimiert. Dafür sind die erforderlichen Kostensätze (z. B. Transporttarif, Zinssatz, Kapitalbindungssatz, etc.) zu identifizieren und die anwendungsfallspezifischen Daten (z. B. Bedarfe, Entfernungen zum Lieferanten, etc.) zu ermitteln. Das Ergebnis des Optimierungsmodells sind die Kosten je Bauteil und je Logistikkonzept.

In Kapitel 7.3 wird der Flexibilitätsansatz in drei Schritten angewendet. Zunächst erfolgt die Bewertung der Umstellkosten und Umstelldauer für die Grenzbauteile. Danach werden Flexibilisierungsmaßnahmen identifiziert und deren Effekt bewertet. Die ersten zwei Schritte stellen den Input für das Entscheidungsmodell dar. Das Entscheidungsmodell liefert den Wert einer flexiblen und einer nicht flexiblen Inbound-Logistik und die Entscheidung hinsichtlich einer Logistikkonzeptumstellung mit und ohne Flexibilisierungsmaßnahme.

## 7.1 Validierung der Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen

Bei der Identifikation der Grenzbauteile wird gemäß Abbildung 4-7 in Kapitel 4.3.4 vorgegangen. Die ersten beiden Schritte sind die *Vorbereitung* und *Vorverarbeitung*. Da diese Schritte eine Grundvoraussetzung zur Anwendung der Methode sind, jedoch keinen direkten Beitrag zur Grenzbauteilidentifikation leisten, ist deren ausführliche Beschreibung im Anhang D.1.1 aufgeführt. Der dritte Schritt *Datenanalyse* unterteilt sich in die univariate und multivariate Analyse (Kapitel 7.1.1). Der vierte Schritt *Nachbereitung* umfasst die Validierung der ermittelten Grenzbauteile (Kapitel 7.1.2). Das Kapitel endet mit einer Evaluation der Identifikationsmethode (Kapitel 7.1.3). Die diesem Fallbeispiel zugrundeliegende Datenbasis wurde bei dem betrachteten OEM im Januar 2018 erhoben.

### 7.1.1 Datenanalyse

#### 7.1.1.1 Univariate Datenanalyse

Die univariate Datenanalyse unterteilt sich in drei Schritte: Zunächst werden die Grenzwerte der Einflussfaktoren bestimmt, danach werden die univariaten Grenzbauteile ermittelt, die anschließend priorisiert werden.

#### Schritt 1: Bestimmung der Grenzwerte je Einflussfaktor

Zur Bestimmung der Grenzwerte wurde die frei verfügbare *Statistik-Software R* verwendet. Dazu wurde ein Skript in der Programmiersprache R geschrieben, um die Reproduzierbarkeit der Methode sicherzustellen. Die aus der IQR-Methode resultierenden Grenzwerte je Einflussfaktor und je Belieferungsgruppe sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Die Berechnung der Grenzwerte für die Variantenanzahl erfolgte dabei auf Bauteilgruppen- und nicht auf SNR-Ebene. Eine Erklärung dazu ist im Anhang D.1.2 aufgeführt. Die Verteilungen für die beiden Belieferungsgruppen lassen sich je Einflussfaktor in einem Boxplot inklusive der ermittelten Grenzwerte visualisieren (vgl. Abbildungen D-4, D-5 und D-6 im Anhang D.1.2).

Tabelle 7-1: Grenzwerte je Einflussfaktor und Belieferungsgruppe auf Basis der IQR-Methode

<i>i</i>	<b>Einflussfaktor</b>	<b>Einheit</b>	<b>lagerhaltig (LH)</b>	<b>lagerlos (LL)</b>
1	Bauteilgewicht	in kg	6,68	0,00
2	Bauteilvolumen	in m <sup>3</sup>	0,04	0,00
3	Bauteilpreis	in Euro	60,82	0,00
4	Variantenanzahl	in Stück	13,50	0,00
5	Bedarf (pro Jahr)	in Stück	27.953,00	0,00
6	Bedarfsschwankungen	in 100%	0,00	5,71

Bei Betrachtung der Grenzwerthöhe wird deutlich, dass die Untergrenze (bei  $i = 1, \dots, 5$  für LL-Bauteile und bei  $i = 6$  für LH-Bauteile) immer null beträgt. Da die Grenzwerte mittels der IQR-Methode berechnet wurden, muss das 1,5-fache der Differenz vom 0,75- und 0,25-Quartil bei den Untergrenzen immer größer sein als das 0,25-Quartil. Dadurch werden keine Exoten bei den lagerlosen Bauteilen für die ersten fünf Einflussfaktoren sowie bei den lagerhaltigen Bauteilen für den sechsten Einflussfaktor vorliegen, da die Ausprägungen der Einflussfaktoren nicht negativ sein können. Es wird somit erwartet, dass die Mehrheit der Grenzbauteile der univariaten Analyse lagerhaltige Bauteile sind. Lagerhaltige Bauteile werden dann als Exoten identifiziert, wenn sie mehr als 6,68 kg wiegen, ein Volumen größer als  $0,4 \text{ m}^3$ , mehr als 60,82 Euro kosten, mehr als 13,50 Varianten besitzen oder einen Jahresbedarf von mehr als 27.953 Stück besitzen. Lagerlose Bauteile sind Exoten, wenn deren Bedarfsschwankungen größer als 571 % sind.

### Schritt 2: Ermittlung der univariaten Grenzbauteile

Bei der Ermittlung der univariaten Grenzbauteile geht es darum, die Bauteile zu identifizieren, die Exoten in Bezug auf die Unter- bzw. Überschreitung der Grenzwerte der Einflussfaktoren darstellen. Für die Exotenermittlung wurde ebenfalls ein R-Skript verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-2 dargestellt.

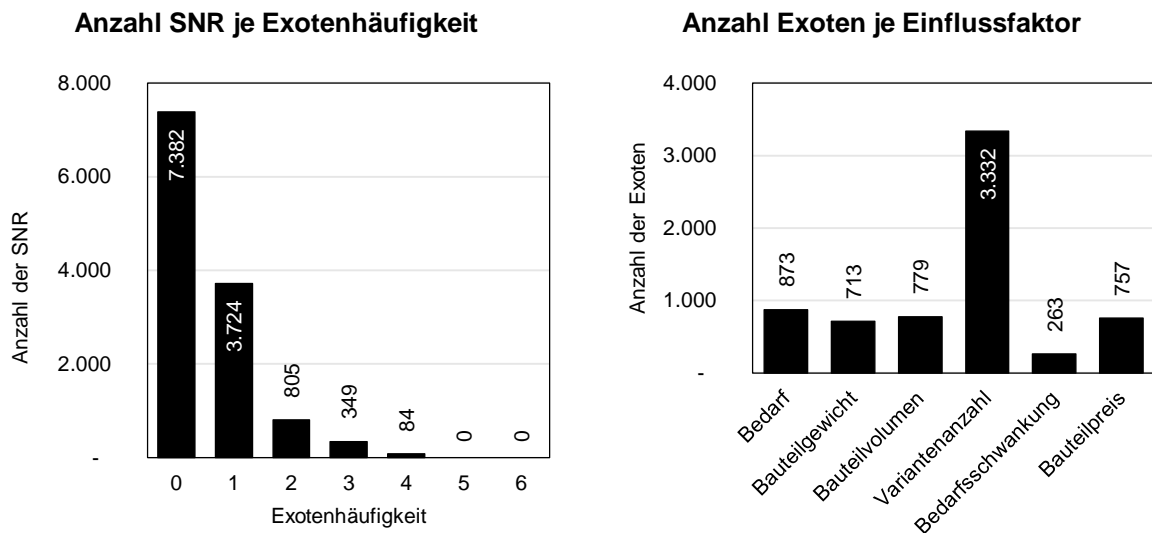


Abbildung 7-2: Ergebnisse aus univariater Analyse

Die Grafik links zeigt, wie viele SNR wie häufig als Exoten gewertet werden. Beispielsweise sind 3.724 SNR bei einem Einflussfaktor und 805 SNR bei zwei Einflussfaktoren Exoten. Die Grafik rechts zeigt, wie viele Exoten die einzelnen Einflussfaktoren aufweisen. Der Einflussfaktor Variantenanzahl besitzt mit 3.332 (nur lagerhaltige SNR; dies entspricht 49 % aller lagerhaltigen SNR) die meisten und der Einflussfaktor Bedarfsschwankung mit 263 die we-

nigsten Exoten. Die anderen Einflussfaktoren besitzen zwischen 700 und 900 Exoten. Die Daten zeigen zudem (wie die Grenzwerte erwarten ließen), dass lagerlose Bauteile ausschließlich beim Einflussfaktor *Bedarfsschwankungen* Exoten aufweisen. Alle lagerlosen SNR besitzen somit entweder keinen oder maximal einen Exoten. Die maximale Anzahl an Exoten, die ein Bauteil besitzt, beträgt vier – diese Anzahl an Exoten besitzen insgesamt 84 SNR.

### **Schritt 3: Priorisierung der univariaten Grenzbauteile**

Da insgesamt 4.962 SNR mindestens einen Exoten besitzen und nicht all diese SNR detailliert untersucht werden können, ist eine Priorisierung erforderlich. Ziel der Priorisierung ist es daher, die univariaten Grenzbauteile mit der größten Relevanz systematisch herauszufiltern. Dazu werden die Exoten zunächst mit den Gewichten aus einer AHP-Analyse über die Einflussfaktoren bewertet. Bei der AHP-Analyse haben Logistikexperten im paarweisen Vergleich die Relevanz der sechs Einflussfaktoren für die Auswahl des Belieferungskonzeptes beurteilt. Eine ausführliche Darstellung der AHP-Analyse ist im Anhang D.1.2 zu finden. In Abbildung 7-3 sind die Gewichte der AHP-Analyse (links) und die Ergebnisse der Gewichtung der Grenzbauteile (rechts) dargestellt. Der wichtigste Einflussfaktor ist die Variantenanzahl mit 50,25 %, gefolgt vom Bauteilpreis mit 17,75 % und dem Bedarf mit 13,17 %. Die anderen drei Einflussfaktoren besitzen laut Logistikexperten einen Einfluss von unter 10 % auf die Wahl des Belieferungskonzeptes. Abbildung 7-3 rechts zeigt die Anzahl an SNR für das jeweilige relative Umstellpotenzial. Das relative Umstellpotenzial drückt prozentual das Potenzial eines Grenzbauteils hinsichtlich einer Logistikkonzeptumstellung aus. Es ergibt sich für jede SNR aus der Summe der Produkte aus Exotenbewertung und AHP-Gewicht je Einflussfaktor (vgl. Tabelle 4-6 in Kapitel 4.3.4.2). Je mehr Exoten eine SNR besitzt, desto größer ist das relative Umstellpotenzial. Die Grafik zeigt, dass 4.406 SNR ein relatives Umstellpotenzial größer als 10 % und 3.675 SNR ein relatives Umstellpotenzial größer als 20 % besitzen. Dahingegen ist das Umstellpotenzial bei lediglich 202 SNR größer als 70 % und bei 542 SNR größer als 60 %. Der Grund, warum die Anzahl an SNR ab einem Umstellpotenzial von größer 60 % so stark abnimmt, ist die hohe AHP-Gewichtung der Variantenanzahl und die geringe Anzahl an SNR mit einer Exotenhäufigkeit größer als 3 (vgl. Abbildung 7-2). Aufgrund der Exotenhäufigkeiten muss eine SNR für ein Umstellpotenzial größer als 60 % ein Exot bei der Variantenanzahl und mindestens einem weiteren Einflussfaktor sein.

Anschließend werden mit Hilfe einer Entscheidungsregel die finalen univariaten Grenzbauteile festgelegt. Die Entscheidungsregel dient dazu, den Fokus auf die wichtigsten Grenz-

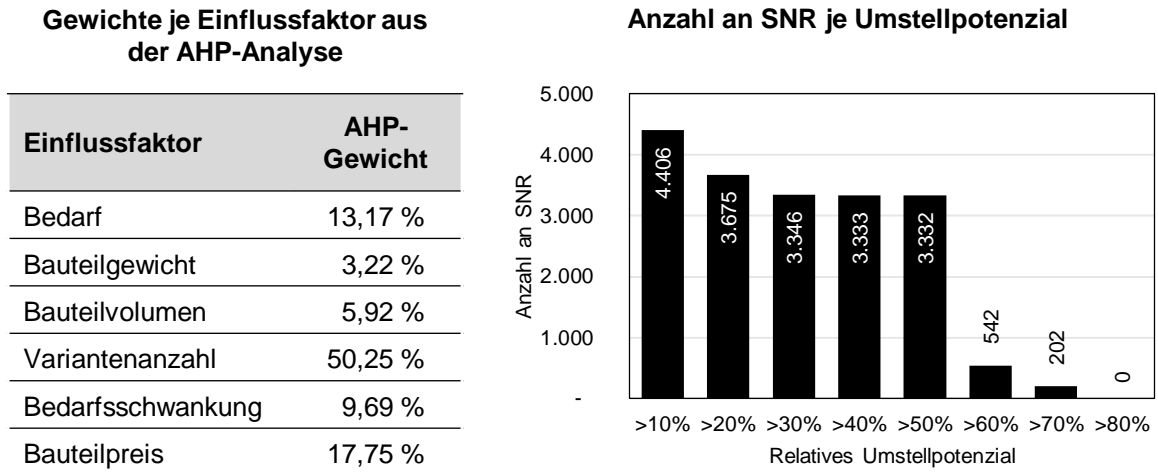


Abbildung 7-3: Ergebnisse aus der AHP-Analyse und Priorisierung der univariaten Grenzbauteile

bauteile zu legen, sodass eine spätere manuelle Validierung durch den Logistikexperten praktikabel ist. Wie diese Entscheidungsregel aussieht, ist subjektiv und kann je Anwendungsfall und Anwender variieren. In Abstimmung mit Logistikexperten wurde folgende Entscheidungsregel zur sinnvollen Eingrenzung der Menge an univariaten Grenzbauteilen festgelegt: Eine SNR ist dann ein Grenzbauteil, wenn die Exotenhäufigkeit der SNR mindestens vier beträgt und das Umstellpotenzial größer als 70 % ist. Aus der univariaten Analyse resultieren somit 83 Grenzbauteile. 84 Grenzbauteile besitzen eine Exotenhäufigkeit von 4, aber nur 83 Grenzbauteile davon besitzen ein relatives Umstellpotenzial von größer als 70 %. Dass sich die Anzahl von SNR mit dieser Exotenhäufigkeit und diesem Umstellpotenzial fast decken, ist Zufall und kann sich mit der Datenbasis verändern.

### 7.1.1.2 Multivariate Datenanalyse

Vorbereitend für die Anwendung der Clusteranalyse sind zunächst die Ausprägungen der Einflussfaktoren des multivariaten Datensatzes mit Hilfe der z-Transformation zu standardisieren (vgl. Formel 4-7). Die multivariate Analyse ist in drei Schritte unterteilt: Bestimmung der Clusteranzahl, Auswertung der Clusterlösung und Priorisierung der Grenzbauteile.

#### Schritt 1: Bestimmung der Clusteranzahl

Um die Clusteranzahl zu bestimmen, wurde das k-means-Verfahren auf verschiedene Clusterlösungen angewendet. Für die verschiedenen Clusterlösungen wurde ein Screeplot erstellt und die Modellprüfgrößen wurden berechnet (vgl. Kapitel 4.3.3.2). Gemäß der Modellprüfgrößen ist die Lösung mit 13 Clustern die geeignetste Clusterlösung. Entsprechend wird die 13-Clusterlösung zur Ermittlung der Grenzbauteile herangezogen. Für eine detaillierte Ausführung zur Bestimmung der Clusteranzahl sei auf Anhang D.1.3 verwiesen.

## Schritt 2: Ermittlung der multivariaten Grenzbauteile

Zunächst ist die 13-Clusterlösung hinsichtlich der Anzahl an SNR und der verwendeten Belieferungskonzepte auszuwerten. Tabelle 7-2 gibt eine Übersicht über die Zusammensetzung der Cluster. Beispielsweise sind in Cluster 1 insgesamt 754 SNR enthalten, von denen 95 LH und 659 LL Bauteile sind. Cluster 3 hingegen umfasst lediglich 49 SNR, von denen aktuell alle LL angeliefert werden. Danach wurden die Cluster-BelKs bestimmt. Das Cluster-BelK wird festgelegt, indem geprüft wird, in welchem Konzept die Mehrheit der SNR in diesem Cluster angeliefert wird. Das Belieferungskonzept von Cluster 1 ist beispielsweise LL. Entsprechend beträgt der SNR-Anteil im Cluster-BelK  $\frac{659}{754} = 87\%$ . Es fällt auf, dass das Cluster-BelK bei manchen Clustern eindeutiger ist (hoher SNR-Anteil im Cluster-BelK) als bei anderen (geringer SNR-Anteil im Cluster-BelK). Beispielsweise beträgt in Cluster 5 der SNR-Anteil lediglich 52 %, sodass mit 97 und 107 fast die gleiche Anzahl an lagerlosen bzw. lagerhaltigen SNR vorliegt. Daher ist das Cluster-BelK bei Cluster 5 nicht eindeutig lagerhaltig: Wären 6 SNR lagerlosen statt im lagerhaltigen Konzept gewesen, wäre das Cluster-BelK lagerlos. Allen SNR, die in einem anderen Konzept als dem Cluster-BelK angeliefert werden, wird ein Umstellpotenzial hinsichtlich des Belieferungskonzeptes unterstellt. Diese SNR gelten daher als Grenzbauteile, sodass sich in Summe 1.497 Grenzbauteile ergeben. Da diese Anzahl für eine Detailbetrachtung zu hoch ist und da einige Cluster-BelKs nicht eindeutig sind, erfolgt im nächsten Schritt die Priorisierung.

Tabelle 7-2: Auswertung der 13-Clusterlösung aus dem k-means-Verfahren

Cluster k	SQS innerhalb des Clusters	Anzahl SNR	Anzahl LH	Anzahl LL	Cluster-BelK	Anteil SNR in Cluster-BelK	Anzahl Grenzbauteile
1	703	754	95	659	LL	87 %	95
2	288	647	581	66	LH	90 %	66
3	380	49	0	49	LL	100 %	0
4	176	106	102	4	LH	96 %	4
5	288	204	107	97	LH	52 %	97
6	167	13	13	0	LH	100 %	0
7	428	691	443	248	LH	64 %	284
8	212	112	0	112	LL	100 %	0
9	492	2691	2177	514	LH	81 %	514
10	318	44	5	39	LL	89 %	5
11	384	243	12	231	LL	95 %	12
12	376	993	537	456	LH	54 %	456
13	279	48	0	48	LL	100 %	0
<b>Summe</b>		<b>6.595</b>	<b>4.072</b>	<b>2.523</b>			<b>1.497</b>

### Schritt 3: Priorisierung der multivariaten Grenzbauteile

Wie bei den univariaten Grenzbauteilen ist auch bei den multivariaten Grenzbauteilen darauf zu achten, dass die finale Grenzbauteilliste einen handhabbaren Umfang besitzt, so dass der Aufwand bei späterer Validierung angemessen ist. Bei 1.497 multivariaten Grenzbauteilen handelt es sich – laut Aussagen der Logistikexperten – um zu viele Bauteile. Es sei darauf hingewiesen, dass trotz der Priorisierung auch die Logistikkonzepte der nicht priorisierten Bauteile zu einem späteren Zeitpunkt überprüft und optimiert werden können. Die Priorisierung der multivariaten Grenzbauteile erfolgt nach der Eindeutigkeit der jeweiligen Cluster-BelK (vgl. Kapitel 4.3.4.2). In Abstimmung mit den Logistikexperten wurde folgende Entscheidungsregel festgelegt: Ist der SNR-Anteil im Cluster-BelK größer als 85 %, gelten diejenigen SNR, die nicht im Cluster-BelK angeliefert werden, als Grenzbauteile. Somit resultieren aus den Clustern 1, 2, 4, 10 und 11 priorisierte Grenzbauteile (in Tabelle 7-2 grau hinterlegt). Die Grenzbauteile aus den Clustern mit den nicht eindeutigen Cluster-BelK werden bei der weiteren Analyse vernachlässigt. Die meisten priorisierten Grenzbauteile liefern Cluster 1 und 2 mit 95 bzw. 66 SNR. In Summe ergeben sich aus der multivariaten Analyse 182 Grenzbauteile. Die Charakterisierung dieser Cluster durch die Mittelwerte der Einflussfaktoren ist in Tabelle 7-3 dargestellt. Beispielsweise besitzt Cluster 4 mit 133.427 Stück durchschnittlich einen hohen Bedarf, und die Cluster 10 und 11 besitzen mit 37 bzw. 91 Stück einen sehr geringen Bedarf. Hingegen ist der Bauteilpreis mit 3.738 Euro in Cluster 10 besonders groß. Die Variantenanzahl bei Cluster 1 und 11 liegt im Mittel bei 173 bzw. 164. Die schwersten Bauteile sind mit durchschnittlich 355 kg in Cluster 10 enthalten. Die Kennzahlen aller Cluster sind in Tabelle D-3 im Anhang D.1.3 zu finden.

Tabelle 7-3: Mittelwerte der Einflussfaktoren je Grenzbauteil-Cluster

Cluster	Bedarf [in Stück]	Bauteilgewicht [in kg]	Bauteilvolumen [in m <sup>3</sup> ]	Variantenanzahl [in Stück]	Bedarfschwankung [in 100 %]	Bauteilpreis [in Euro]
1	1.869	60	0,35	173	0,81	91
2	46.813	2	0,02	15	0,26	8
4	133.427	1	0,00	13	0,26	3
10	37	355	0,24	34	2,35	3.738
11	91	46	0,58	164	3,78	306

### 7.1.2 Nachbereitung der Ergebnisse

Aus beiden Analysen resultieren zwei Listen mit Grenzbauteilen – univariate Grenzbauteile (uvGB) und multivariate Grenzbauteile (mvGB). Tabelle 7-4 zeigt die Anzahl der Grenz-

bauteile der jeweiligen Analyse. Dabei wird in lagerhaltige und lagerlose Grenzbauteile unterschieden. Von den 83 uvGB, werden alle lagerhaltig angeliefert und von den 182 mvGB werden 112 lagerhaltig und 70 lagerlos angeliefert. Bei Betrachtung der Schnittmenge beider Grenzbauteillisten wird deutlich, dass 2 lagerhaltige Grenzbauteile durch beide Analysen identifiziert wurden. 15 uvGB wurden jedoch bei der multivariaten Analyse aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt (vgl. Anhang D.1.1). Die Resultate verdeutlichen, dass die multivariate Analyse zu anderen Ergebnissen als die univariate Analyse, die bislang in der Literatur verwendet wird, führen kann. Es kann jedoch an dieser Stelle keine Aussage darüber getroffen werden, welche Analyse bessere Ergebnisse liefert. Die Vereinigungsmenge fasst alle Grenzbauteile aus beiden Analysen zusammen. In Summe ergeben sich aus der Identifikationsmethode somit 263 Grenzbauteile.

Tabelle 7-4: Auswertung der Grenzbauteillisten aus univariater und multivariater Analyse

	uvGB	mvGB	uvGB $\cap$ mvGB	uvGB $\cup$ mvGB
<b>LH</b>	83	112	2	193
<b>LL</b>	–	70	–	70
<b>Summe</b>	<b>83</b>	<b>182</b>	<b>2</b>	<b>263</b>

Abschließend wurden diese 263 Grenzbauteile von Logistikexperten validiert. Durch die Validierung sollte geprüft werden, ob für die Grenzbauteile eine alternative Belieferung in Frage kommt. Falls nicht, ist zu begründen, warum keine Umstellung empfohlen wird. Bei der Validierung wurde gemäß des standardisierten Fragebogens aus Tabelle 4-7 vorgegangen. Dabei wurde das Umstellpotenzial der Grenzbauteile basierend auf deren Eigenschaften (Bauteilvolumen, Bedarf, etc.) und Rahmenbedingungen (Lieferantenstruktur, Wechselwirkung mit anderen Bauteilen, etc.) hinsichtlich der praktischen Umsetzung validiert. Das Ergebnis der Validierung ist in Abbildung 7-4 dargestellt.

Insgesamt wurde festgestellt, dass bei 22 % der Grenzbauteile (d. h. 58 SNR) eine alternative Belieferung geprüft werden sollte. Auffällig dabei ist, dass die Mehrheit davon (44 vs. 14) in der univariaten Analyse identifiziert wurde. Insgesamt werden aktuell 48 dieser Grenzbauteile lagerhaltig und 10 der multivariaten Grenzbauteile lagerlos angeliefert. Beispiele für Grenzbauteile, bei denen die Umstellung zu prüfen ist, sind aktuell lagerlos angelieferte *Ansaugschächte* und *Druckluftbehälter* sowie lagerhaltig angelieferte *Achsbrücken*, *Abgasrohre* und *Luftfedern*. Bei 78 % aller Grenzbauteile wird eine Umstellung aus verschiedenen Gründen nicht empfohlen. Beispielsweise ist bei 25 Grenzbauteilen (davon 1 multivariates und 24 univariate) eine Umstellung aufgrund der Bedarfshöhe nicht empfohlen. Bei diesen Bauteilen handelt es sich um aktuell lagerhaltig angelieferte Bauteile, die einen so gerin-



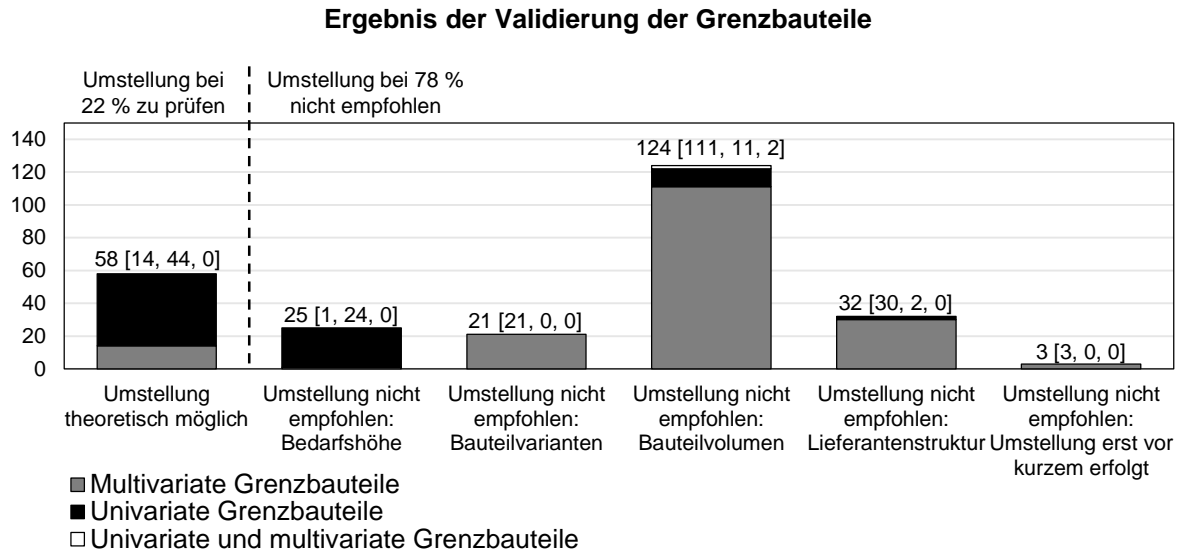


Abbildung 7-4: Ergebnis der Validierung unterteilt nach multivariaten und univariaten Grenzbauteilen

gen Bedarf aufweisen, dass eine lagerlose Belieferung zu einer zu hohen Durchlaufzeit der Trailer auf dem Werksgelände führen würde. Für 21 multivariate, lagerlose Grenzbauteile ist die Umstellung nicht empfohlen aufgrund der Variantenanzahl. Beispielsweise sollte der *Zusammenbau (ZSB)-Kotflügel* aufgrund der 48 Varianten und des relativ großen Bauteilvolumens weiterhin lagerlos angeliefert werden. Gleiches gilt für den *Zusatzscheinwerfer* mit 52 Varianten. Für die meisten Grenzbauteile (124, davon 111 multivariat und 11 univariat und 2 uni- und multivariat) wurde eine Umstellung aufgrund des Bauteilvolumens ausgeschlossen. Bei diesen Grenzbauteilen handelt es sich um diverse *Halter*, die i. d. R. sehr kleinvolumig sind, sodass sich eine lagerlose Belieferung aufgrund einer zu geringen Trailerauslastung oder einer zu langen Durchlaufzeit der Trailer nicht lohnt. Hier könnte jedoch geprüft werden, ob es sinnvoll ist bestimmte Halter eines Lieferanten mit anderen lagerlosen Bauteilen desselben Lieferanten gemeinsam anzuliefern. Bei 32 Grenzbauteilen wird aufgrund der Lieferantenstruktur von einer Umstellung abgeraten. Dabei handelt es sich um lagerlose Bauteile wie die *Seitenwand außen* und *Seitenwand innen*, bei denen der gleiche Lieferant andere Bauteile ebenfalls lagerlos anliefert. Diese Grenzbauteile in eine lagerhaltige Lieferung zu separieren, ist daher nicht sinnvoll. Der letzte Grund, aus dem eine Umstellung nicht empfohlen wird, bezieht sich auf Bauteile, bei denen die Belieferung erst kürzlich umgestellt wurde (insgesamt 3 Grenzbauteile). Laut Logistikexperten war die Entscheidung für die Umstellung begründet, sodass eine Überprüfung nicht priorisiert wird. Folgende Erkenntnisse lassen sich zusammenfassen: Bei 53 % der univariaten Grenzbauteile sollte die Umstellung geprüft werden. 83 % der zu prüfenden Umstellungen sind lagerhaltige und 17 % lagerlose Bauteile. Inhaltliche Gründe für die nicht empfohlene Umstellung bei 92 % der multivariaten Grenzbauteile sind vornehmlich die Bauteilvarianten, das

Bauteilvolumen und die Lieferantenstruktur. Die Ursache für diesen großen Anteil kann ein datenspezifischer Zufall oder der Methode (z. B. Cluster-BelK-Bildung oder Priorisierung fragwürdig, 13-Clusterlösung ungeeignet) geschuldet sein.

### **7.1.3 Evaluation der Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen**

Die in Kapitel 4 entwickelte Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen konnte im vorliegenden Kapitel erfolgreich auf das Fallbeispiel eines deutschen Nutzfahrzeugherstellers angewendet werden. Ziel war es Bauteile mit Umstellpotenzial bzgl. der Logistikkonzepte zu identifizieren. Das bedeutet nicht, dass durch die Methode alle Bauteile mit Umstellpotenzial aufgedeckt werden sollten. Die Güte der Bauteilidentifikation war somit zweitrangig, solange durch die Methode überhaupt Bauteile mit vielversprechendem Umstellpotenzial identifiziert werden. Die Methode lieferte insgesamt 263 Grenzbauteile, von denen 58 hinsichtlich einer Umstellung des Belieferungskonzeptes näher zu untersuchen sind.

Die Identifikationsmethode ist sehr umfänglich, da sowohl eine multivariate als auch eine univariate Datenanalyse durchgeführt wird. Durch die multivariate Clusteranalyse wurden fast vollständig andere Grenzbauteile identifiziert als durch die univariate Analyse (vgl. Abbildung 7-4). In der Literatur wurde bereits angeregt, multivariate Methoden für die Belieferungskonzeptauswahl zu verwenden. Dies wurde bislang jedoch nicht getan, sodass die vorgeschlagene Methode einen wesentlichen Beitrag zur Wissenschaft leistet. Kritisch zu betrachten ist allerdings, dass nach der Validierung der Grenzbauteile lediglich 14 von 182 der multivariaten Grenzbauteile für die weitere Prüfung der Logistikkonzeptumstellung empfohlen wurden. Ursache hierfür kann die Logik zur Bildung der Cluster-BelK sein. Multivariate Grenzbauteile sind Bauteile, die nicht im gleichen Belieferungskonzept wie dem Cluster-BelK angeliefert werden. Das Cluster-BelK wurde aus dem Belieferungskonzept, in dem die Mehrheit der SNR dieses Cluster angeliefert werden, abgeleitet. Cluster-Eigenschaften, wie durchschnittlicher Bedarf oder Bauteilpreis, wurden bei der Festlegung des Cluster-BelK nicht berücksichtigt. Bei Cluster 4 könnte das Cluster-BelK lagerlos möglicherweise sinnvoller sein als lagerhaltig, aufgrund des durchschnittlich hohen Bedarfs und der durchschnittlichen Variantenanzahl (vgl. Tabelle 7-3). Die Logik zur Bestimmung der Cluster-BelK ist daher fragwürdig. Bei der Clusteranalyse wurden zudem keine Zusammenhänge zwischen den Bauteilen berücksichtigt. Somit können verschiedene Bauteile des gleichen Lieferanten in unterschiedlichen Clustern sein. Dies ließe sich ändern, indem Lieferanten bei der Aufbereitung der Datensätze berücksichtigt würden. Eine andere Option wäre, die Clusteranalyse nicht auf SNR-Ebene sondern auf Bauteilgruppenebene durchzuführen, sodass

Bauteile derselben Bauteilart und desselben Lieferanten automatisch gruppiert sind.

Obwohl die Literatur multivariate Verfahren zur Belieferungskonzeptauswahl empfiehlt, ist die Vorteilhaftigkeit der univariaten Analyse nicht zu vernachlässigen. Diese Methode liefert Grenzwerte je Belieferungskonzept und Einflussfaktor. Die Grenzwerte unterstützen – neben der univariaten Grenzbauteilidentifikation – bei der Einschätzung, ob die Belieferung von Bauteilen aufgrund von zukünftigen Entwicklungen zu überplanen ist. Solche quantitativen Grenzwerte gab es in der Literatur bislang nicht. Ob die Höhe der Grenzwerte immer angemessen ist, kann auf Basis des einen hier durchgeführten Anwendungsfalles nicht bestätigt werden. Dennoch bieten die Grenzwerte einen ersten quantitativen Anhaltspunkt für den Logistikplaner, um eine vorausschauende Planung in der Inbound-Logistik zu etablieren. Die Berechnung der unteren Grenzwerte ist allerdings zu überdenken, da diese mit der IQR-Methode im Anwendungsfall immer null und entsprechend wenig aussagekräftig war. Aufgrund der Formel der IQR-Methode ist zu erwarten, dass die unteren Grenzwerte auch bei anderen Anwendungsfällen null sind. Daher sollte für die unteren Grenzwerte eine andere Berechnungsmethode definiert werden. Die Priorisierung der Grenzbauteile basiert aktuell auf der Exotenhäufigkeit und den AHP-Gewichten der Einflussfaktoren. Als Erweiterung ist zukünftig zu prüfen, ob bei Berücksichtigung der Stärke der Abweichung vom Grenzwert validere Grenzbauteile aufgrund der detaillierteren Priorisierung erzielt werden können. Weiterhin ist die univariate Methode weniger restriktiv als die multivariate Methode, da lediglich eine Zuordnung zu einer der beiden Belieferungsgruppen vorliegen muss. Vollständige Datensätze bei den Einflussfaktoren sind für eine bessere Ergebnisqualität wünschenswert, für die reine Durchführbarkeit der univariaten Analyse aber nicht zwingend erforderlich – im Gegensatz zur Clusteranalyse (vgl. Anhang D.1.1). Bei der Clusteranalyse sind einige Bauteile aus der Betrachtung herausgefallen, obwohl in Summe nicht viele Daten (SNR und sechs Einflussfaktoren) für die Anwendung der Identifikationsmethode benötigt werden. Die Datenqualität hat aufgrund der Anwendung statistischer Methoden insgesamt einen großen Einfluss auf die Ergebnisqualität. Entsprechend sollte der Anwender darauf achten, dass die benötigten Daten leicht verfügbar und vollständig gepflegt sind.

In Bezug auf den Validierungsschritt besitzt die Identifikationsmethode Ausbaupotenzial. Die Qualität der Validierung ist aufgrund der Abhängigkeit von Logistikexperten ungewiss. Es ist zu prüfen, ob die Methode so erweiterbar ist, dass eine (teilweise) automatisierte Validierung erfolgen kann. Dazu müssten die Restriktionen aus dem standardisierten Fragebogen (vgl. Tabelle 4-7) mit Hilfe von Daten abgebildet und eine entsprechende Entscheidungslogik entwickelt werden. Dann könnten die Subjektivität der Validierung gemin-

dert, der Aufwand für den Logistikplaner reduziert und die Ergebnisqualität möglicherweise erhöht werden. Je nach Umsetzung und Performanz einer automatisierten Validierungsmethode, kann eine erste Bestimmung von Grenzbauteilen weiterhin sinnvoll sein. Eine andere Weiterentwicklungsmöglichkeit besteht darin, zu prüfen, ob der Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens (wie z. B. SVM-Verfahren) trotz erforderlicher Trainingsdaten möglich ist. Das bedeutet, dass eine Methode zu entwickeln ist, mit deren Hilfe aussagekräftige Trainingsdaten für die Belieferungskonzeptauswahl eines Produktionsstandortes generiert werden können. Wenn solche Trainingsdaten gleichzeitig die werksspezifischen Gegebenheiten sowie die beschaffungsspezifischen Rahmenbedingungen berücksichtigen, kann die Zuordnung der SNR zu den Belieferungskonzepten vereinfacht werden. Die Komplexität, ein aussagekräftiges Trainingsdatenset zu erschaffen, ist dabei nicht zu unterschätzen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die entwickelte Methode zur Grenzbauteilidentifikation großes Potenzial für die Anwendung in der Unternehmenspraxis bietet und einen ersten Schritt in Richtung einer flexibleren Inbound-Logistik darstellt. Es sei angemerkt, dass die Methode keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Es kann somit nicht garantiert werden, dass sämtliche Grenzbauteile mit hohem Umstellpotenzial identifiziert werden. Im Anwendungsbeispiel wurde aber gezeigt, dass die Methode einige Grenzbauteile mit interessantem Umstellpotenzial liefert. Zudem kann die Methode unabhängig vom Steuerungskonzept eingesetzt und aufgrund der entwickelten R-Skripte bei korrekter Datenstruktur aufwandsarm regelmäßig angewendet werden. Wie groß die Kosteneffekte bei Verwendung unterschiedlicher Logistikkonzepte für die Grenzbauteile sein können, wird im folgenden Kapitel bei der Anwendung des Optimierungsmodells veranschaulicht.

## **7.2 Validierung des Optimierungsmodells auf ausgewählte Grenzbauteile**

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 5 entwickelte Optimierungsmodell auf ausgewählte Grenzbauteile des deutschen Nutzfahrzeugherstellers angewendet. Dazu wird zunächst das Vorgehen zur Anwendung des Optimierungsmodells beschrieben (Kapitel 7.2.1). Danach werden die Ergebnisse aus dem Optimierungsmodell präsentiert (Kapitel 7.2.2) und abschließend erfolgt die Evaluation des Modells (Kapitel 7.2.3).

### 7.2.1 Vorgehen zur Anwendung des Optimierungsmodells

Um das Optimierungsmodell anzuwenden, wird in drei Schritten vorgegangen: Datenerhebung und -vorbereitung, Ausführung des Optimierungsmodells und Nachbereitung der Ergebnisse.

**1. Datenerhebung und -vorbereitung:** Für die Berechnung verschiedener Fallbeispiele sind zunächst die erforderlichen Daten bei dem betrachteten OEM zu erheben. Bei den Input-Daten sind drei Kategorien zu unterscheiden: einmalig festzulegende Parameter (z. B. Kapitalbindungssatz, Kostensatz für Lagerfläche), fallbeispielspezifische Daten (z. B. Bedarf je SNR, Packlos) und vorab zu berechnende Input-Daten für die Relationsbetrachtung (z. B. Ladungsträgerfläche der Referenz-Transporteinheit (Ref-TE), Preis einer Ref-TE). Letztere sind gemäß Formel 5-26 zu bestimmen. Wenn für bestimmte Parameter keine Daten vorliegen (z. B. Ladungsträgerdaten bei einer noch nicht verwendeten JIS-Belieferung), so sind entsprechende Annahmen zu treffen. Die Daten für die im Folgenden dargestellten Fallbeispiele wurden im September 2016 erhoben [fml-2016e, S. 81], basierend auf Grenzbauteilen aus ersten Ausführungen der Identifikationsmethode im Oktober 2015 (vgl. [Maa-2016, S. 5 ff.; fml-2016a, S. 42]). Es sei erneut angemerkt, dass aus Gründen der Anonymisierung die Ergebnisse keine tatsächlichen Kosten widerspiegeln.

**2. Ausführung des Optimierungsmodells:** Das Optimierungsmodell wurde in MS Excel implementiert. Zur Lösung des Optimierungsmodells wurde der Solver *Gurobi Optimizer 6.5.1* verwendet [fml-2016e, S. 64]. Dieser Solver lässt sich über das Open-Source-Plug-In *OpenSolver* in MS Excel einbinden [Mas-2012, S. 401]. Je Logistikkonzept wurde ein Tabellenblatt mit einem eigenständigen Optimierungsmodell angelegt. Ein exemplarischer Screenshot eines Modells ist in Abbildung D-8 im Anhang D.2 aufgeführt. Mit Hilfe von *Visual Basic* wurden die Inputdaten automatisch eingelesen und das Optimierungsmodell wurde ausgeführt. Alle Ergebnisse (z. B. Gesamtkosten, Transportkosten, Anzahl an Transporteinheiten und Transporte je Periode, etc.) eines Optimierungsmodells wurden automatisch in ein separates Output-Tabellenblatt geschrieben [fml-2016e, S. 65]. Es wurde festgelegt, dass eine Periode einem Arbeitstag entspricht. Diese Periodenlänge lässt sich dadurch begründen, dass in der Gebietsspedition häufig vertraglich geregelt ist, dass der Spediteur Transporte eines Tages konsolidieren kann [Kem-2009, S. 20]. Als Betrachtungshorizont wurden zwei Arbeitswochen, d. h. 10 Arbeitstage berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass das in MS Excel implementierte Optimierungsmodell ab einem längeren Betrachtungshorizont hohe Berechnungszeiten aufweist [fml-2016e, S. 58 f.]. Dies führt zudem dazu, dass für

die Fallbeispiele jeweils gleichverteilte Bedarfe angenommen wurden. Die Integration von schwankenden Bedarfen bei einem Betrachtungshorizont von nur zwei Wochen hätte zur Folge, dass kurzfristige, starke Schwankungen einen zu großen Einfluss auf die Ergebnisse hätten, die bei einem längeren Betrachtungshorizont geglättet würden [fml-2016e, S. 58 f.].

**3. Nachbereitung der Ergebnisse:** Nach erfolgreicher Anwendung des Optimierungsmodells wurden die Ergebnisdaten aus den Output-Tabellenblättern ausgewertet. Dazu erfolgten eine Umrechnung der resultierenden Kosten auf Bauteilebene sowie eine grafische Darstellung der Ergebnisse.

## 7.2.2 Ergebnisse aus der Anwendung des Optimierungsmodells

Das Optimierungsmodell wurde auf die drei Grenzbauteile *Frontklappen*, *Federn* und *Luftfilter* mit jeweils unterschiedlichen zu prüfenden Logistikkonzepten angewendet. Die Rahmenbedingungen zu den Fallbeispielen sind in Tabelle 7-5 zusammengefasst. Da am Produktionsstandort des betrachteten Nutzfahrzeugherstellers eine angespannte Situation hinsichtlich der Lagerplatzverfügbarkeit herrscht, konnte kein geeignetes Fallbeispiel für die Umstellung von JIS oder JIT auf lagerhaltig identifiziert werden.

Tabelle 7-5: Übersicht zu den Rahmenbedingungen der drei Fallbeispiele

Rahmenbedingungen	Frontklappen	Federn	Luftfilter
aktuelles Logistikkonzept	lagerhaltig, Direkttransport	lagerhaltig, Direkttransport	lagerhaltig, Direkttransport
geprüftes Logistikkonzept	JIT, Direkttransport	JIS 2-stufig, Direkttransport	JIS, Direkttransport
Anzahl Varianten	2	26	19
Anzahl Lieferanten	1	5	1

**Frontklappen:** Im Fallbeispiel *Frontklappen* werden die Varianten der schmalen und breiten Frontklappe für Fahrzeuge der Abgasnorm Euro 6 untersucht. Ausgenommen von der Betrachtung sind Sondervarianten für Winterdienstfahrzeuge. Die Frontklappen werden aktuell unlackiert und somit sortenrein per Direkttransport lagerhaltig in ein Bodenblocklager des OEM angeliefert. Als alternative Belieferung wird eine JIT-Belieferung mit Direkttransport untersucht. Dieses Logistikkonzept kommt aufgrund der geringen Variantenzahl sowie des großen Bauteilvolumens und des hohen Bedarfs als Belieferungsalternative in Frage. Der bestehende Lieferant beherrscht bereits die lagerlose Belieferung, sodass eine praktische Umsetzung der JIT-Belieferung problemlos möglich ist. Es wird angenommen, dass

der aktuell verwendete Ladungsträger für die JIT-Belieferung verwendet werden kann.

**Federn:** Im Fallbeispiel *Federn* wurden 26 Federvarianten gemeinsam (z. B. Parabelfedern, Stützblattfedern, etc.) betrachtet. Die aktuelle Belieferung erfolgt lagerhaltig von fünf verschiedenen Lieferanten per Direkttransport. Für die bedarfsorientierte Bereitstellung am Verbauort werden die Federn intern sequenziert. Aufgrund der hohen Variantenzahl und des relativ hohen durchschnittlichen Bauteilpreises ist zu prüfen, ob sich eine JIS-Belieferung der Federn lohnt. Die Lieferantenzahl erfordert, dass die JIS-Belieferung in einem 2-stufigen Prozess erfolgt. Für die Sequenzierung wird daher angenommen, dass sie von einem externen LDL durchgeführt wird. Als Referenzladungsträger wird für den 2-stufigen JIS-Prozess der Sonderladungsträger (SLT) der Trapezfedern verwendet.

**Luftfilter:** Das Fallbeispiel *Luftfilter* umfasst 19 Varianten, die alle von einem Lieferanten lagerhaltig über einen Direkttransport angeliefert werden. Die Bereitstellung am Verbauort erfolgt in Produktionssequenz, sodass die verschiedenen Varianten zunächst intern sequenziert werden. Aufgrund des hohen Bedarfs und der großen Variantenzahl ist zu prüfen, ob eine JIS-Belieferung mit Direkttransport ein effizienteres Logistikkonzept darstellt.

Die Ergebnisse aus der Optimierung sind in Form der verschiedenen Kostenblöcke in Abbildung 7-5 dargestellt. Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei den Fallbeispielen *Frontklappen* und *Luftfilter* das vorgeschlagene alternative Logistikkonzept 28 % bzw. 44 % günstiger ist als das aktuell verwendete Konzept. Beim Fallbeispiel *Federn* hingegen ist die 2-stufige JIS-Belieferung 4 % teurer als die aktuelle lagerhaltige Belieferung. Die Höhe der ermittelten Logistikkosten konnte mittels bereits erfolgter Business-Case-Rechnungen des Nutzfahrzeugherstellers plausibilisiert werden [fml-2016a, S. 76]. Bei den Frontklappen sind die Lagerhaltungskosten der entscheidende Kostenblock, der aufgrund der JIT-Belieferung entfällt. Die hohen Lagerhaltungskosten sind auf das große Bauteilvolumen zurückzuführen. Bei den Federn werden die Einsparungen in den Lagerhaltungskosten durch die höhere Ladungsträgermiete der zu verwendenden SLTs, die Leergutrücktransportkosten und die Dienstleisterkosten kompensiert. Zudem fallen bei dem 2-stufigen JIS-Prozess geringfügig höhere Transportkosten an, was durch ein geringeres Packlos zu begründen ist. Bei den Luftfiltern liegt der gleiche Effekt wie bei den Frontklappen vor: Durch den Wegfall der hohen Lagerkosten und die geringen zusätzlichen Kosten für Trailermiete und Dienstleisterkosten ist die JIS-Belieferung fast halb so teuer wie die lagerhaltige Belieferung.

Die in Abbildung 7-5 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Einzelbetrachtung der

### Ergebnisse aus der Optimierung der Fallbeispiele

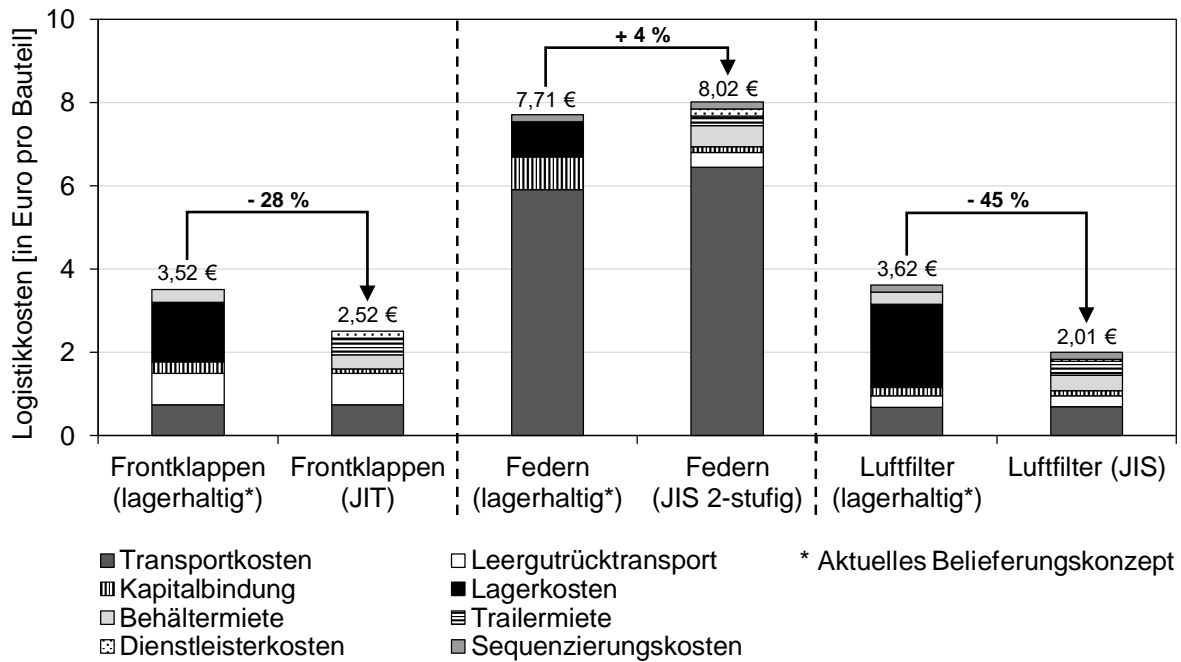


Abbildung 7-5: Ergebnisse des Optimierungsmodells zu den betrachteten Fallbeispielen (in Anlehnung an [fml-2016e, S. 82])

Bauteile und berücksichtigen nicht den gesamten Warenstrom eines Lieferanten (d. h. es sind keine Ref-TEs abgebildet). Dennoch könnte die Berücksichtigung des gesamten Warenstroms eines Lieferanten Auswirkungen auf die Transportkosten haben, sodass die Optimierung ebenfalls mit Ref-TEs durchgeführt wurde (vgl. Modellierung des Mehr-Produkt-Falles in Kapitel 5.3.2). Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Logistikkosten bei Anwendung der Logik von Ref-TEs lediglich um ca. 0,8 % verringern [fml-2016e, S. 82]. Dieser geringe Einfluss des gesamten Warenstroms eines Lieferanten ist in den Fallbeispielen auf die bereits hohen Transportauslastungen zurückzuführen. Es lässt sich schlussfolgern, dass die Berücksichtigung des gesamten Warenstroms eines Lieferanten nur dann einen signifikanten Einfluss auf die Logistikkosten hat, wenn die Transportauslastung eines einzelnen Bauteils nicht groß genug ist. Weist ein Bauteil aufgrund seiner Bauteileigenschaften und seines Bedarfs bereits eine hohe Transportauslastung auf, dann ist eine Betrachtung des gesamten Warenstroms des Lieferanten für die Kostenkalkulation nicht erforderlich.

Es sei anzumerken, dass in Abbildung 7-5 lediglich zwei Logistikkonzepte im Vergleich dargestellt sind. Mit Hilfe des Modells wurden jedoch weitere Logistikkonzepte (vgl. Tabelle 5-2) optimiert. Dazu gehört die lagerhaltige Belieferung mit dem Transport über einen Gebietspediteur. Zusätzlich wurden hierbei die Anlieferfrequenzen durch das Modell optimiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kosten für die Konzeptkombinationen lagerhaltiger Direkttransport, lagerhaltige GS, lagerhaltige GS ohne Anlieferfrequenzoptimierung nahe-



zu identisch sind. Dies ist auf die jeweils hohen Transportauslastungen zurückzuführen. Entsprechend wurde hier nur ein lagerhaltiger Fall grafisch abgebildet.

Darüber hinaus wurde das Optimierungsmodell vom betrachteten Nutzfahrzeughersteller bereits vielseitig eingesetzt. So wurde es nicht nur zum Vergleich der Logistikkosten verschiedener Logistikkonzepte von Grenzbauteilen verwendet, sondern auch zur Bewertung der Inbound-Logistikkosten bei einer Produktionsverlagerung. Im Zuge dieses Anwendungsfalls wurde zudem gezeigt, dass die Berücksichtigung von Referenztransporteinheiten unter Umständen einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Logistikkosten haben kann. Weiterhin konnte ein positiver Effekt aus der Optimierung der Anlieferfrequenzen für dieses Anwendungsbeispiel nachgewiesen werden. Eine zusätzliche Erweiterung stellte die Integration von CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Optimierung der Logistikkosten dar. Für weitere Details sei an dieser Stelle auf die Veröffentlichung von *Maas et al.* verwiesen [Maa-2017c].

### 7.2.3 Evaluation des Optimierungsmodells

Das in Kapitel 5 entwickelte Optimierungsmodell konnte in diesem Kapitel erfolgreich auf drei Fallbeispiele angewendet werden. Die ermittelten Logistikkosten konnten mit den Ergebnissen aus bestehenden unternehmensinternen Business-Case-Rechnungen plausibilisiert werden. Somit liefert das Optimierungsmodell nachweislich valide Ergebnisse. Zudem erfüllt das Modell die gestellte Zielsetzung, indem es einen Vergleich der Logistikkosten je Bauteil verschiedener Logistikkonzepte ermöglicht. Ebenso war die kombinierte Betrachtung von Belieferungs- und Transportkonzepten erfolgreich. Trotz allem weist das Optimierungsmodell weitere im Folgenden erläuterte Entwicklungsmöglichkeiten auf.

Für eine nachhaltige Implementierung in der Industrie sollte das Optimierungsmodell intuitiv bedien- und anwendbar sein. Daher wird eine Überführung des derzeit in MS Excel implementierten Modells in ein professionelles Software-Tool empfohlen. Dadurch ließe sich sowohl die Nutzerfreundlichkeit in der Anwendung als auch die Performance steigern. In den Fallbeispielen wurden lediglich 10 Perioden mit gleichverteilten Bedarfen abgebildet. Zwar waren diese Annahmen für die betrachteten Bauteile begründet, die Berücksichtigung schwankender Bedarfe und eines längeren Betrachtungshorizontes würde jedoch präzisere Ergebnisse liefern. Weiterhin ist die Anwendung des Modells mit MS Excel nicht besonders intuitiv. So muss beispielsweise zur Änderung des betrachteten Logistikkonzeptes der Visual Basic-Quellcode entsprechend angepasst werden. Dies wiederum erfordert vom

Anwender ein umfangreiches Know-How in der Visual Basic-Programmierung. Kritisch zu beurteilen ist zudem der Aufwand in der Vorbereitung der Fallbeispiele. Das Modell basiert auf vielen unterschiedlichen Kostensätzen je Logistikkonzept und anwendungsfallspezifischen Daten, die zeitintensiv in der Beschaffung sind. Für die Anwendung erfordert jedes Fallbeispiel zudem logistisches Hintergrundwissen (z. B. hinsichtlich der Anforderungen zur Bereitstellung am Verbauort). Aus diesem Grund konnte das Optimierungsmodell nicht auf alle 58 identifizierten Grenzbauteile mit zu prüfendem Umstellpotenzial angewendet werden.

Das Optimierungsmodell zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus. Es kann problemlos um zusätzliche Restriktionen und eine erweiterte Zielfunktion angepasst werden. Erweiterungsmöglichkeiten bestehen insbesondere in der Integration zusätzlicher Logistikkonzepte. Beispielsweise sind derzeit keine lagerlosen Milkruns im Modell abbildbar, stellen jedoch ein interessantes zukünftiges Logistikkonzept dar. Das Potenzial von lagerlosen Milkruns könnte durch das Optimierungsmodell ausgewiesen werden. Weiterhin sind Veränderungen bei zukünftigen Logistikkonzepten zu erwarten. So ist zu untersuchen, wie sich neue Technologien der Automobilindustrie (z. B. autonomes Fahren) auf die aktuellen Logistikkonzepte auswirken und wie diese im Optimierungsmodell zu bewerten sind. Ein wesentlicher Aspekt in diesem Kontext sind CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es konnte gezeigt werden, dass sich auch CO<sub>2</sub>-Emissionen als nicht monetäre Größe in der Zielfunktion integrieren lassen. Das Zusammenwirken von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Transportkonzepten wurde mit dem Optimierungsmodell allerdings nur am Rande untersucht und erfordert insbesondere aus gesellschaftlicher Sicht weitere Aufmerksamkeit. Ein weiterer Aspekt, der Entwicklungspotenzial birgt, ist das Transportmittel – der derzeitige Fokus liegt auf dem Mega-Trailer. Durch die Integration weiterer Transportmittel könnten z. B. Transporte von Übersee modelliert werden. Durch einen zusätzlichen intensiveren Austausch zwischen Einkauf und Logistik könnte dann eine gesamtunternehmerisch sinnvolle Entscheidung bezüglich der Vergabe von Bauteilen in Billiglohnländer getroffen werden. Eine andere Möglichkeit den Anwendungsbereich des Modells zu erweitern, ist die Optimierung bestimmter Kostensätze bei bekannten Anliefermengen und Transporten. So könnte beispielsweise der optimale Kilometerkostensatz für Direkttransporte bestimmt werden, welcher dann als Grundlage für die Verhandlung mit Speditionen einsetzbar wäre.

Im entwickelten Optimierungsmodell wurde über Ref-TEs eine Möglichkeit geschaffen, den gesamten Warenstrom eines Lieferanten abzubilden. Gleichzeitig wurde die Modellkomplexität nicht erhöht, da die Ref-TEs in einem vorgelagerten Schritt gebildet wurden. Kritisch

anzumerken ist, dass für die lagerlose Belieferung lediglich die Varianten eines Bauteils zu einer Ref-TE gebündelt wurden. Eine übergreifende Bündelung mit anderen lagerlosen Bauteilfamilien des Lieferanten, könnte zu einer Reduktion der Logistikkosten bei der lagerlosen Belieferung führen. Die Herausforderung besteht darin, festzulegen, welche lagerlosen Bauteilfamilien auf einem Trailer gemeinsam anzuliefern sind. Ergänzend dazu ist grundsätzlich zu prüfen, welche Konsequenzen eine Veränderung der Belieferungsform nach sich zieht. Wenn beispielsweise die Belieferung eines Bauteils von lagerhaltig auf lagerlos umgestellt wird, erfolgt dies gegebenenfalls zu Lasten der Logistikkosten anderer lagerhaltiger Bauteile desselben Lieferanten. Entsprechend wird eine übergreifende Betrachtung aller relevanten Bauteile inklusive der Berücksichtigung resultierender Konsequenzen empfohlen. Eine naheliegende Konsequenz einer Umstellung sind die resultierenden Umstellkosten und Umstell dauern. Diese wurden daher im Flexibilitätsansatz berücksichtigt, welcher im Folgenden an einem Anwendungsbeispiel validiert wird.

## **7.3 Validierung des Flexibilitätsansatzes**

Im Folgenden wird der in Kapitel 6 entwickelte Flexibilitätsansatz angewendet. Zunächst werden potenzielle Logistikkonzeptumstellungen hinsichtlich Kosten und Dauern bewertet (Kapitel 7.3.1). Für diese Umstellungen werden mögliche Flexibilisierungsmaßnahmen identifiziert sowie deren Effekte kalkuliert (Kapitel 7.3.2). Anschließend wird das Entscheidungsmodell auf angewendet (Kapitel 7.3.3). Das Kapitel endet mit einer Evaluation des Flexibilitätsansatzes (Kapitel 7.3.4).

### **7.3.1 Umstellbewertung ausgewählter Grenzbauteile**

Zur Bewertung von Logistikkonzeptumstellungen wurde gemäß Abbildung 6-5 vorgegangen. Zunächst wurden die in Tabelle 6-2 aufgeführten Arbeitspakete in Diskussionen mit Logistikexperten in Aktivitäten detailliert. Das Arbeitspaket Parameterbestimmung umfasst u. a. die Bestimmung vom Ladungsträgertyp, -gewicht und -größe. Insgesamt wurden den Arbeitspaketen 44 Aktivitäten zugeordnet (vgl. Tabelle D-4 im Anhang D.3.1). Dann wurden für die Aktivitäten die direkten Vorgängeraktivitäten je nach Umstell szenario bestimmt (vgl. Tabelle D-5 im Anhang D.3.1). Um die Kosten und Dauern für Logistikkonzeptumstellungen für verschiedene Fallbeispiele aufwandsarm berechnen zu können, wurde ein Schätztool in MS Excel entwickelt. Ein exemplarischer Ausschnitt des Excel-Tools ist in Abbildung D-9 im Anhang D.3.1 dargestellt. Der Aufbau des Tools orientiert sich an den Rahmenbedingungen

der Umstellung und an den verschiedenen Arbeitspaketen. Initial sind das umzustellende Logistikkonzept und das Umstellszenario festzulegen, um die erforderlichen Aktivitäten zu filtern (vgl. Anhang C.1). Anschließend sind Fragen zu den Arbeitspaketen zu beantworten, um daraus die Kosten und Dauer der Umstellung zu ermitteln. Durch das automatische Einblenden von Fragen aufgrund der Beantwortung vorheriger Fragen wird der Anwender durch das Tool geleitet. Je nach Antwort sind im Tool minimale, maximale und durchschnittliche Kosten und Dauern für das entsprechende Arbeitspaket hinterlegt. Diese Werte resultieren aus historischen Daten des Nutzfahrzeugherstellers. Zudem kann der Anwender für eine präzisere Umstellbewertung eigene Planwerte je Arbeitspaket eingeben.

Das entwickelte Tool wurde verwendet, um die Logistikkonzeptumstellungen der Grenzbauteile zu bewerten. Zu den betrachteten Grenzbauteilen gehören die aus Kapitel 7.1.2 und aus vorheriger Anwendung der Identifikationsmethode (Datenbasis: Oktober 2015) resultierenden *Abgasrohre*, *Achsbrücken*, *Druckluftbehälter* und *ZSB-Luftfedern*. Die Umstellbewertungen basieren auf im August 2017 erhobenen Daten. Zunächst wurden die Rahmenbedingungen der Umstellungen festgelegt und in Tabelle 7-6 zusammengefasst.

Tabelle 7-6: Rahmenbedingungen von vier ausgewählten Grenzbauteilumstellungen (in Anlehnung an [fml-2017c, S. 69])

Teilefamilie	BelK		LT		IT		Lieferant		TK	
	vorher	nachher	Änderung	Entwicklung	Neuanbindung	Anpassung	Audit	Standort	vorher	nachher
Abgasrohr	LH	JIS				intern				intern
Achsbrücke	LH	JIS	X	SLT	X		X	Europa	GS	FTL
Druckluftbehälter	LH	JIS	X	SLT		X	X	Europa	GS	FTL
ZSB Luftfeder	LH	JIS			X		X	Europa	GS	FTL

BelK = Belieferungskonzept, LT = Ladungsträger, IT = IT-Anbindung, TK = Transportkonzept

Das initiale Belieferungskonzept von allen Grenzbauteilen ist lagerhaltig und es soll auf JIS umgestellt werden. Für Achsbrücken und Druckluftbehälter würde sich jeweils der LT ändern, sodass die Entwicklung eines Stahl-SLT erforderlich ist. Weiterhin wird unterschieden, ob bei der IT-Anbindung eine Neuanbindung des Lieferanten oder eine Anpassung der bestehenden IT-Anbindung zu erfolgen hat. Die Abgasrohre werden von einem anderen Produktionsstandort des Nutzfahrzeugherstellers geliefert, daher ist die IT-Anpassung nur intern und es sind kein Logistikaudit und keine Transportkonzeptänderung erforderlich. Bei den anderen Grenzbauteilen müssen ein Logistikaudit durchgeführt und das Transportkonzept geändert werden.

Die Umstellkosten und Umstell Dauern wurden mit Hilfe des Tools für die drei Umstellszenarien Erst-, Rück- und Erneut-Umstellung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-7 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Erst-Umstellung bei den Achsbrücken und Druckluftbehältern mit 270.240 Euro bzw. 253.840 Euro am teuersten ist und mit 331 Arbeitstagen am längsten dauert. Die Erst-Umstellung vom Abgasrohr kostet mit 7.060 Euro am wenigsten und dauert lediglich 71 Arbeitstage. Grund für die großen Diskrepanzen in den Umstellkosten und Umstell dauern zwischen den Grenzbauteilen sind die unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Insbesondere die SLT-Entwicklung steigert die Umstellkosten bei den Achsbrücken und Druckluftbehältern. Die kurze Umstelldauer beim Abgasrohr ist darauf zurückzuführen, dass der Nutzfahrzeughersteller sein eigener Lieferant ist und deshalb die IT-Anpassung schneller abgewickelt werden kann. In allen Fällen sind die Kosten bei der Erneut-Umstellung niedriger als bei der Erst-Umstellung. Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass die aus der Erst-Umstellung beschafften Ladungsträger eingelagert werden und bei der Erneut-Umstellung somit nicht neu entwickelt werden müssen.

Tabelle 7-7: *Kosten und Dauern vier ausgewählter Grenzbauteilumstellungen (in Anlehnung an [fml-2017c, S. 70])*

Teilefamilie	Erst-Umstellung		Rück-Umstellung		Erneut-Umstellung	
	Kosten	Dauer	Kosten	Dauer	Kosten	Dauer
Abgasrohr	7.060	71	30.810	87	7.060	71
Achsbrücke	270.240	331	30.810	87	17.930	71
Druckluftbehälter	253.840	331	30.810	87	17.930	71
ZSB Luftfeder	39.330	189	30.810	87	17.930	71

[Kosten in Euro] [Dauer in AT]

Für die Validierung des Umstelltools wurden weitere Anwendungsbeispiele berechnet und mit den Erfahrungswerten von Logistikexperten plausibilisiert (vgl. [fml-2017c, S. 62 ff.] und Tabellen D-6 und D-7 im Anhang D.3.1). Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Umstellungen von einer lagerhaltigen Belieferung auf eine JIS-Belieferung durchschnittlich 63.000 Euro kosten und 191 AT (entspricht 9 Monaten) dauern. Umstellungen auf eine JIT-Belieferung liegen durchschnittlichen bei 29.000 Euro und 188 AT [Bri-2017, F. 17]. Logistikexperten konnten bestätigen, dass die aus dem Umstelltool resultierenden Umstellkosten und Umstell dauern valide sind. Zudem wurde bekräftigt, dass das Tool eine standardisierte und transparente Planung von Logistikkonzeptumstellungen ermöglicht. Entsprechend wird eine zukünftige Nutzung des Tools beim betrachteten Nutzfahrzeughersteller angestrebt.

### 7.3.2 Bewertung von Flexibilisierungsmaßnahmen für Umstellungen

Im nächsten Schritt wurden Flexibilisierungsmaßnahmen (FMs) identifiziert, mit denen Umstellungen günstiger und schneller durchgeführt werden können. Dazu wurden FMs gemäß der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Methoden gesammelt. Für eine ausführliche Beschreibung aller beim Nutzfahrzeughersteller identifizierten FMs sei auf die Arbeit von Müller verwiesen [fml-2017c, S. 39 ff.]. Im Folgenden werden vier FMs, die jeweils unterschiedliche Aspekte adressieren, detaillierter beschrieben:

- **FM1. Feinabrufe über Standard-Software:** Derzeit erfolgen die Lieferabrufe für die lagerlose Belieferung beim betrachteten Nutzfahrzeughersteller über eine unternehmensspezifische Software. Aufgrund dieser spezifischen Software ist die IT-Anbindung von Lieferanten kostspielig und langwierig. Eine Verbesserungsmöglichkeit bestünde in der Verwendung einer Standard-Software für die Feinabrufe, wie z. B. SAP. Da viele Lieferanten ebenfalls SAP benutzen, könnte dadurch eine höhere systemische Kompatibilität zwischen OEM und Lieferanten erzeugt werden. Zu beachten ist hierbei, dass die standardisierte Software unternehmensweit auszurollen ist.
- **FM2. Direkttransporte über Gebietsspedition:** Diese FM bezieht sich darauf, den Transport von Bauteilen ausschließlich über die Gebietsspedition abzuwickeln. Dadurch müssten keine Ausschreibungen bei einer Transportkonzeptumstellung (wie z. B. von GS auf Direkttransport) erfolgen, sodass Zeit und Kosten bei der Umstellung eingespart würden. Zusätzlich sorgt die konstante Beauftragung des gleichen Spediteurs für eine höhere Prozessstabilität.
- **FM3. ULT statt SLT:** Eine weitere Flexibilisierungsmöglichkeit besteht in der Verwendung von bereits entwickelten Universalladungsträgern (ULTs) statt SLTs. Um die Bauteile entsprechend der Produktionsreihenfolge im ULT anzuordnen, könnten entsprechende Einlagen, Einbauten oder Fächer im ULT eingesetzt werden. Dies hätte einen Einfluss auf das Arbeitspaket Ladungsträgerbeschaffung, da zukünftig keine Neuentwicklung von SLTs notwendig wäre.
- **FM4. Konzernübergreifende Logistikaudits:** Diese FM adressiert die verstärkte Zusammenarbeit innerhalb eines Konzerns. Dazu sind die Lieferantenaudits zu standardisieren, sodass die Ergebnisse des Audits einer Konzernmarke ebenso für eine andere Konzernmarke gelten. Logistikaudits beim Lieferanten könnten entfallen, wenn ein anderes Unternehmen im Konzern diesen Lieferanten bereits auditiert hat.

Anschließend wurden mit Hilfe des Umstelltools die Effekte aus den FMs auf Logistikkon-

zeptumstellungen abgeleitet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-8 dargestellt. Zu beachten ist, dass diese Maßnahmen gegebenenfalls initiale Investitionen im Sinne von Anschaffungskosten erfordern oder mehr Zeit für die Erstimplementierung beanspruchen. Diese Investitionen sind im nachfolgend angewendeten Entscheidungsmodell für flexible Umstellungen aufgegriffen (vgl. Kapitel 7.3.3). Den größten Hebel hinsichtlich Kosten und Dauer hat FM3. Dies ist auf die hohen Entwicklungskosten und -dauern von SLTs zurückzuführen, die bei der Verwendung von ULTs entfallen. Durch die Abwicklung von Direkttransporten der lagerlosen Belieferung über die GS kann die Umstelldauer durchschnittlich um 115 AT reduziert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Reduktion der Umstelldauer verschiedener FMs meist nicht kumulierbar ist. Dies ist nur möglich, wenn die von den FMs betroffenen Aktivitäten nacheinander und nicht parallel durchgeführt werden.

Tabelle 7-8: Durchschnittliche Effekte aus Flexibilisierungsmaßnahmen

Flexibilisierungsmaßnahme	Reduktion der Umstellkosten	Verkürzung der Umstelldauer
FM1. Feinabrufe über Standard-Software	-7.000 Euro	- 40 AT
FM2. FTL über GS	-150 Euro	- 115 AT
FM3. ULT statt SLT	-170.000 Euro	- 120 AT
FM4. Konzernübergreifende Logistikaudits	-5.000 Euro	- 2 AT

Werden alle vier FMs auf die vier Grenzbauteile aus Tabelle 7-7 angewendet, verändern sich die Umstellkosten und Umstelldauern, wie in Abbildung 7-6 veranschaulicht. Die größte Veränderung ist bei den Druckluftbehältern und Achsbrücken erkennbar. Das liegt daran, dass auf diese Bauteile alle vier FMs wirken. Bei den Abgasrohren hingegen kann die Umstellung nicht schneller und günstiger erfolgen, da aufgrund der Rahmenbedingungen (vgl. Tabelle 7-6) keine der FMs wirksam wird.

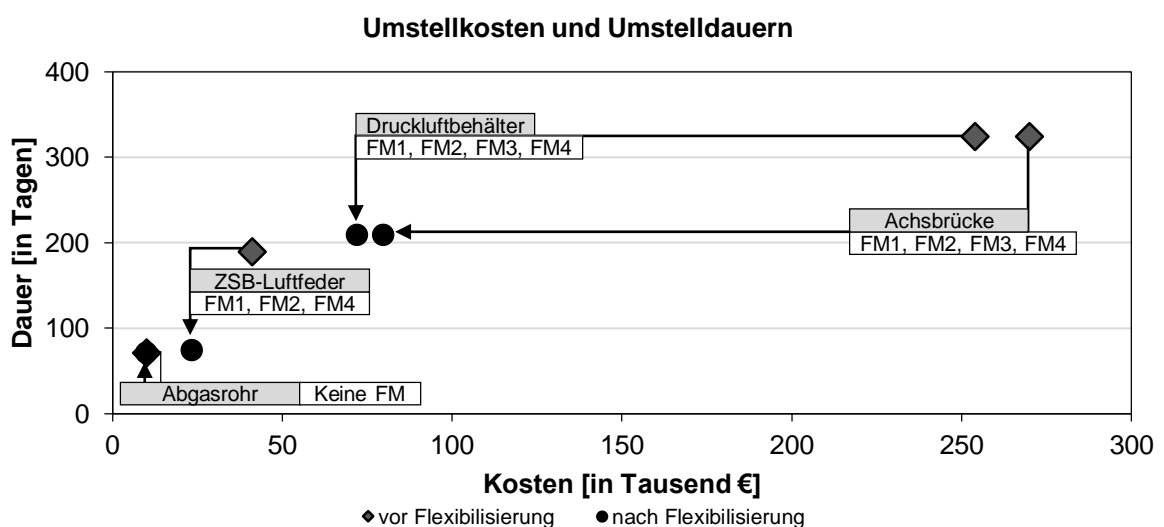


Abbildung 7-6: Umstellkosten und Umstelldauer je Grenzbauteil vor und nach Flexibilisierung

### 7.3.3 Anwendung des Entscheidungsmodells für flexible Umstellungen

In diesem Kapitel wird das auf dem Realoptionsansatz basierende Entscheidungsmodell für flexible Umstellungen angewendet. Das Verhalten und die Funktionsweise der verschiedenen Modellstufen werden zunächst anhand eines Zahlenbeispiels analysiert (Kapitel 7.3.3.1). Anschließend erfolgt die Anwendung des Entscheidungsmodells auf die Umstellung des Grenzbauteils *Frontklappen* des Nutzfahrzeugherstellers (Kapitel 7.3.3.2).

#### 7.3.3.1 Analyse des Modellverhaltens

Um das Modellverhalten zu analysieren, wurden die zu untersuchenden Modellstufen festgelegt, die auf den in Abbildung 6-6 dargestellten Stufen basieren. Die fünf Stufen können jeweils variieren, z. B. kann die Umstelldauer einen Monat oder drei Monate betragen. Die Varianten der Modellstufen sind in Tabelle 7-9 spezifiziert. Anschließend wurden die Input-Parameter festgelegt und in Tabelle D-8 im Anhang D.3.2 zusammengefasst. Der Planungszeitraum für Umstellentscheidungen beträgt 12 Perioden. Dieser Planungszeitraum basiert auf der Länge der Bedarfsvorschau für Lieferabrufe, die wiederum auf dem Planungshorizont für das Produktionsprogramm beruht (vgl. [Her-2005, S. 23 f., S. 72]).

Tabelle 7-9: Spezifizierung der Modellstufen

Modellstufe	Kapitalwertmethode	keine Umstellkosten	asymmetrische Umstellkosten	Differenzierung Erst- und Erneut-Umstellung	Flexibilisierungsmaßnahmen	Umstelldauer 1 Monat	eingepreiste Umstell-dauer 1 Monat	eingepreiste Umstell-dauer 3 Monate	sprunghafte Bedarfsveränderungen	sprunghafte Logistik-kostenveränderungen
Stufe 0	X									
Stufe 1		X								
Stufe 2a			X							
Stufe 2b			X	X						
Stufe 3			X		X					
Stufe 4a			X			X				
Stufe 4b.1			X				X			
Stufe 4b.2			X					X		
Stufe 5a.1			X						X	
Stufe 5a.2			X		X				X	
Stufe 5b.1			X							X
Stufe 5b.2			X		X					X



### **Binomialmodell und Bedarfsgrenze**

Um den Effekt aus der Verwendung des Binomialmodells und der Bedarfsgrenze zu analysieren, wurde der Barwert der Zahlungsströme von 12 Monaten bei Verwendung von  $LK_1$  und  $LK_2$  für drei verschiedene Fälle berechnet: auf Basis des durchschnittlichen Bedarfs, auf Basis des erwarteten Bedarfs aus dem Binomialmodell und auf Basis des erwarteten Bedarfs aus dem Binomialmodell sowie der Berücksichtigung der Bedarfsgrenze. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-7 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Barwert der Zahlungsströme sowohl bei Verwendung eines Durchschnittsbedarfs als auch bei Verwendung des Binomialmodells konstant für unterschiedliche Bedarfsschwankungen ist. Dabei ist der Barwert bei Berücksichtigung des Binomialmodells geringer als der mit Durchschnittsbedarf. Dies ist auf die Berücksichtigung der Bedarfsschwankungen zurückzuführen. Beim dritten Fall, der Berücksichtigung von Binomialmodell und Bedarfsgrenze, hängt der Barwert der Zahlungsströme von der Höhe der Bedarfsschwankung ab. Bei Verwendung von  $LK_1$  steigt der Barwert der Zahlungsströme bis zu einer Volatilität von 35 %, d. h. die Kosten sinken. Durch die höheren Schwankungen fällt der Bedarf häufiger unter die Bedarfsgrenze, sodass für die Verwendung von  $LK_1$  günstigere Kosten angesetzt werden können. Ab 50 % Bedarfsschwankungen sinkt der Barwert wieder. Grund hierfür ist, dass die extremen Schwankungen dazu führen, dass der Bedarf ab und zu extrem hohe Werte annimmt, die bei der Kostenberechnung stärker ins Gewicht fallen als die günstigeren Logistikkosten, wenn der Bedarf unter die Bedarfsgrenze fällt. Bei Verwendung von  $LK_2$  verhält sich die Kurve vom dritten Fall entgegengesetzt. Bis zu einer Volatilität von 35 % sinkt der Barwert; ab einer Volatilität von 50 % steigt der Barwert und die Kosten sinken. Grund hierfür ist, dass im Gegensatz zu  $LK_1$  bei  $LK_2$  die Logistikkosten bei einem Bedarf oberhalb der Bedarfsgrenze günstiger sind als beim Bedarf unterhalb der Bedarfsgrenze. Insgesamt führt die Verwendung des Binomialmodells zu höheren negativen und somit konservativeren Zahlungsströmen als die Verwendung des Durchschnittsbedarfs. Dennoch sind beim Binomialmodell die Zahlungsströme aufgrund des konstanten erwarteten Bedarfs ebenfalls konstant. Um die Auswirkung der Bedarfsschwankungen zu berücksichtigen und somit die sich verändernde Vorteilhaftigkeit eines Logistikkonzeptes gegenüber eines anderen abzubilden, stellt die Bedarfsgrenze ein geeignetes Werkzeug dar.

### **Vergleich: Stufe 2a (Umstellkosten) und Stufe 3 (Flexibilisierungsmaßnahme)**

Die Ergebnisse des Realoptionsmodells der Stufen 2a und 3 sind in Abbildung 7-8 visualisiert. Zudem ist der diskontierte Zahlungsstrom  $PV_t(LK_1)$  dargestellt, d. h. der Zahlungsstrom, wenn ausschließlich das Ausgangslogistikkonzept  $LK_1$  verwendet wird. In Periode  $t = 0$  fällt für Stufe 3 die Investition in die Flexibilisierungsmaßnahme an, weshalb die

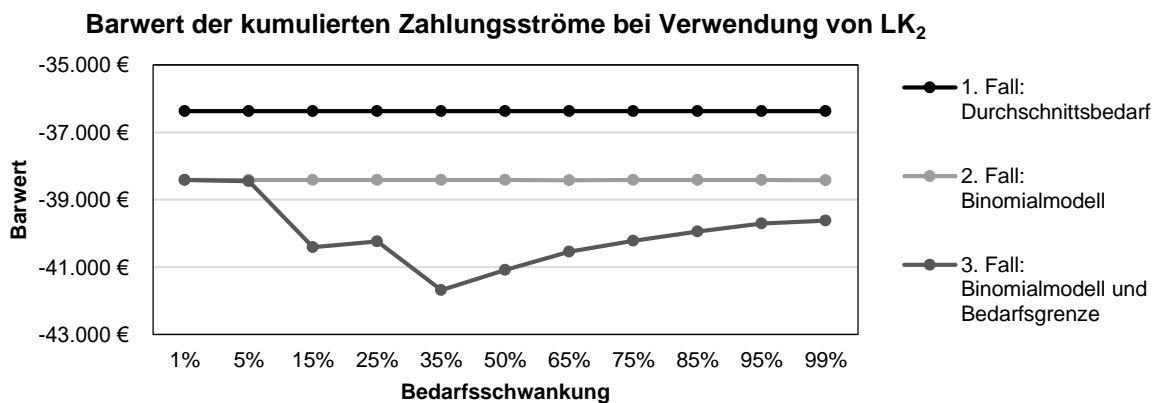
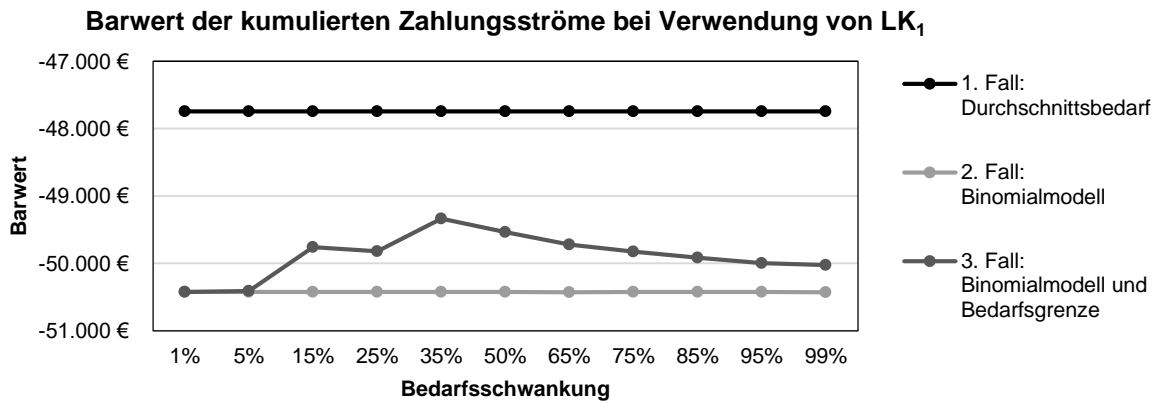


Abbildung 7-7: Barwert der Zahlungsströme bei Verwendung von  $LK_1$  (oben) und  $LK_2$  (unten) mit unterschiedlichen Bedarfsschwankungen

Zahlung in dieser Periode höher ist als in Stufe 2a. In der letzten Periode wird in Stufe 3 mit einer Wahrscheinlichkeit von 51 % auf  $LK_1$  zurückgestellt, wodurch sich der extreme Wert erklären lässt. Die Schwankungen der Zahlungsströme der beiden Stufen sind auf die Bedarfsentwicklung zurückzuführen. Bei Betrachtung der Logistikkonzeptpläne (vgl. Abbildung D-10 im Anhang D.3.2) wird deutlich, dass bei Stufe 2a die Rückumstellung auf  $LK_1$  weniger häufig auftritt als bei Stufe 3. Die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit zur Verwendung von  $LK_2$  beträgt bei Stufe 2a 89 %. Bei Stufe 3 wird mit einer durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit von 25 % in späteren Perioden wieder auf  $LK_1$  umgestellt. Diese Tatsache bestätigt, dass die Flexibilisierungsmaßnahme häufigere Umstellungen von Logistikkonzepten fördert. Der Wert der flexiblen Inbound-Logistik  $E(F)$  ist in Stufe 2a um 1.343 Euro größer als in Stufe 3. Dies ist auf die Investition in Flexibilisierungsmaßnahmen in Höhe von 3.000 Euro zurückzuführen. Es wird deutlich, dass diese Differenz kleiner als 3.000 Euro ist, sodass die Investition bereits durch Einsparungen aufgrund häufigerer Umstellungen zu 55 % kompensiert wurde. Die maximale Zahlungsbereitschaft für die Flexibilität, von  $LK_1$  zu  $LK_2$  umzustellen, beträgt in Stufe 2a 9.644 Euro und in Stufe 3 8.302 Euro. Diese Werte entsprechen der Differenz des Barwertes einer nicht-flexiblen Inbound-Logistik  $PV(LK_1)$  bei ausschließlicher Verwendung von  $LK_1$  und dem erwarteten Wert einer fle-

xiblen Inbound-Logistik  $E(F)$ . Da der erwartete Wert einer flexiblen Inbound-Logistik bei Stufe 2a größer ist als bei Stufe 3, ist auch die Zahlungsbereitschaft für Flexibilität größer. Dabei ist zu beachten, dass in Stufe 3 bereits in Flexibilität investiert wurde, sodass hier auch weniger Handlungsbedarf notwendig ist. Insgesamt kann festgehalten werden, dass je nach Bedarfsentwicklung eine Investition in Flexibilisierungsmaßnahmen zu häufigeren Logistikkonzeptumstellungen führen kann. Ob tatsächlich investiert werden sollte, liegt im Ermessen des Anwenders. Bei einem Planungshorizont von 12 Monaten ist der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik mit Flexibilisierungsmaßnahme geringer als ohne ( $E(F)_{\text{Stufe 2a}} > E(F)_{\text{Stufe 3}}$ ), sodass sich der Anwender vermutlich gegen die Implementierung der Flexibilisierungsmaßnahme entscheiden würde. Allerdings würde die Flexibilisierungsmaßnahme nicht nur innerhalb des zwölfmonatigen Planungshorizontes wirken; Umstellungen können auch nach den 12 Monaten günstiger durchgeführt werden. Bei Betrachtung eines längeren Planungshorizontes würde die Entscheidung für die Flexibilisierungsmaßnahme daher positiv ausfallen.

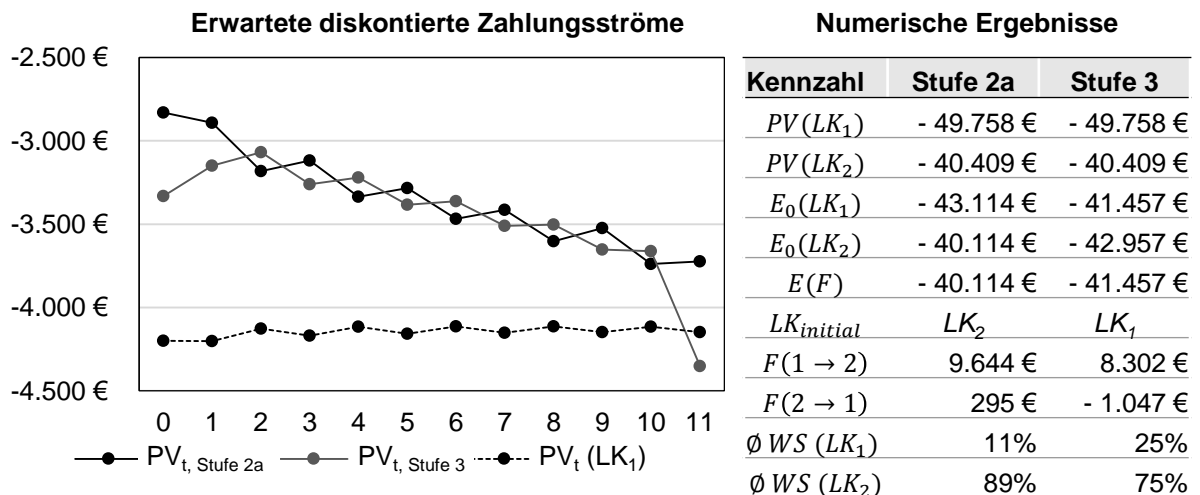


Abbildung 7-8: Ergebnisse der Modellstufen 2a und 3

### Vergleich: Stufe 2a (Umstellkosten) und Stufe 4 (Umstelldauer)

Im nächsten Schritt wurde die Stufe 2a den Stufen 4a (Umstelldauer 1 Monat), 4b.1 (eingepreiste Umstelldauer 1 Monat) und 4b.2 (eingepreiste Umstelldauer 3 Monate) gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung D-11 im Anhang D.3.2 dargestellt. Der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik  $E(F)$  ist bei Stufe 2a mit -40.114 Euro am höchsten und bei Stufe 4a mit -40.223 Euro am niedrigsten, wobei die Werte mit einer Differenz von 109 Euro nicht weit auseinanderliegen. Es liegt folgender Zusammenhang zu den erwarteten entgangenen Einsparungen vor: Je höher die erwarteten entgangenen Einsparungen sind, desto größer ist die Differenz der erwarteten Werte der flexiblen Inbound-Logistik dieser Stufen. Denn jeder Monat, in dem nicht das günstigere Logistikkonzept verwendet wird,

führt zu einer Senkung des erwarteten Wertes der flexiblen Inbound-Logistik. Bei Stufe 4a wurde die Umstelldauer in der Modellierung explizit berücksichtigt und bei Stufe 4b.1 wurde die Umstelldauer indirekt durch die Einpreisung der erwarteten entgangenen Einsparungen aufgrund der Umstelldauer modelliert (vgl. Kapitel 6.3.3.5). Die numerischen Ergebnisse (vgl. Abbildung D-11) zeigen, dass die Ergebnisse von Stufe 4a konservativer als die Ergebnisse der eingepreisten Umstelldauer sind. In allen Fällen wirkt sich die Umstelldauer negativ auf Logistikkonzeptumstellungen aus. Je länger die Umstelldauer ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer erneuten Umstellung. Im Beispiel sollte  $LK_2$  verwendet werden. Mit einer durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit von 11 % wird bei Stufe 2a erneut auf  $LK_1$  umgestellt. Bei Stufe 4a beträgt die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, erneut auf  $LK_1$  umzustellen, 9 %, bei den Stufen 4b.1 und 4b.2 10 %. Das Fazit zur Modellierung der Umstelldauer ist, dass diese den Wert der flexiblen Inbound-Logistik realistisch beeinflusst. Während der Effekt bei Stufe 4a größer ist als bei den Stufen 4b.1 und 4b.2, ist die Modellierung bei letzteren Stufen aufwandsärmer.

#### **Vergleich: Veränderung der Einflussgrößen mit/ohne Flexibilisierungsmaßnahme**

Die Ergebnisse bei Betrachtung der sprunghaften Veränderung des Bedarfs und der Logistikkosten sind in Abbildung D-12 im Anhang D.3.2 dargestellt. Der Bedarf wurde in Periode  $t = 5$  um 70 % reduziert. Aufgrund des geringeren Bedarfs muss weniger angeliefert werden, sodass insgesamt geringere Logistikkosten entstehen. Der erwartete Wert der flexiblen Inbound-Logistik liegt bei -24.584 Euro. Die Logistikkostenveränderungen sind in den Perioden  $t = 4$  bis  $t = 8$  entsprechend der neuen Logistikkostensätze (vgl. Tabelle D-8 im Anhang D.3.2). Diese Veränderung hat im Vergleich zur Bedarfsveränderung eine nicht so starke Auswirkung auf den gesamten erwarteten Wert der flexiblen Inbound-Logistik mit -41.258 Euro. Beim Bedarfssprung wird mit einer durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit über alle Perioden von 55 % wieder auf  $LK_1$  umgestellt. Durch die Investition in eine Flexibilisierungsmaßnahme beträgt diese Wahrscheinlichkeit 60 %. Bei der Logistikkostenveränderung erzeugt die Flexibilisierungsmaßnahme keinen nennenswerten Effekt – weder auf den erwarteten Wert der flexiblen Inbound-Logistik noch auf die Wahrscheinlichkeit der Verwendung von  $LK_1$ . Entsprechend sollte bei der Logistikkostenveränderung von einer Flexibilisierungsmaßnahme abgesehen werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Entscheidungsmodell logisch nachvollziehbare und interpretierbare Ergebnisse liefert. Das Entscheidungsmodell ist somit geeignet um Logistikkonzeptumstellungen zu bewerten.

### 7.3.3.2 Umstellentscheidung bei Frontklappen

Im Folgenden wird das Entscheidungsmodell zur Umstellung des Logistikkonzeptes auf das Grenzbauteil *Frontklappen* angewendet (Aufbauend auf den Ergebnissen des Optimierungsmodells in Kapitel 7.2.2). Die Inputdaten sind in Tabelle D-9 im Anhang D.3.2 aufgelistet. Die numerischen Ergebnisse aus der Modellanwendung sowie der Logistikkonzeptplan für Modellstufe 3 sind in Abbildung 7-9 dargestellt. Beim Fallbeispiel *Frontklappen* werden die Stufe 2a (Berücksichtigung der Umstellkosten) und die Stufe 3 (zusätzliche Berücksichtigung von Flexibilisierungsmaßnahmen) gegenübergestellt. Ein wesentlicher Unterschied in den Ergebnissen ist das optimale initiale Logistikkonzept. Bei Stufe 2a ist das optimale initiale Konzept  $LK_2$  und bei Stufe 3  $LK_1$ . Mit dem optimalen initialen Logistikkonzept schlägt das Entscheidungsmodell das Logistikkonzept vor, welches zum besseren Gesamtergebnis über den Betrachtungszeitraum führt. Das optimale initiale Logistikkonzept ist vor allem bei einer Neuauslegung des Inbound-Prozesses relevant. Im Fallbeispiel ist das initiale Logistikkonzept  $LK_1$  (d. h. lagerhaltige Belieferung) bereits vorgegeben.

Numerische Ergebnisse Frontklappen			Logistikkonzeptplan – Stufe 3 $LK_{initial} = LK_1$												
Kennzahl	Stufe 2a	Stufe 3	s \ t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$PV(LK_1)$	- 117.145 €	- 117.145 €	1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
$PV(LK_2)$	- 86.144 €	- 86.144 €	2		LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
$E_0(LK_1)$	- 113.396 €	- 96.872 €	3			LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
$E_0(LK_2)$	- 86.144 €	- 106.144 €	4				LK1	LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK1
$E(F)$	- 86.144 €	- 96.872 €	5					LK1	LK1	LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK1
$LK_{initial}$	$LK_2$	$LK_1$	6						LK1	LK1	LK1	LK1	LK1	LK1	LK1
$F(1 \rightarrow 2)$	31.001 €	20.272 €	7							LK1	LK1	LK1	LK1	LK1	LK1
$F(2 \rightarrow 1)$	- €	- 10.729 €	8								LK1	LK1	LK1	LK1	LK1
$\emptyset WS(LK_1)$	0%	36%	9									LK1	LK1	LK1	LK1
$\emptyset WS(LK_2)$	100%	64%	10										LK1	LK1	LK1
			11											LK1	LK1
			12												LK1

Abbildung 7-9: Ergebnisse des Entscheidungsmodells für Frontklappen

Wird  $LK_1$  über die nächste 12 Perioden weiterverwendet, so beträgt der Barwert dieser nicht-flexiblen Inbound-Logistik  $PV(LK_1) = -117.145$  Euro. Wird bei Stufe 2a in Periode 0 auf  $LK_2$  umgestellt, so wird zu 100 %-iger Wahrscheinlichkeit  $LK_2$  über alle Perioden beibehalten. Daher entspricht der Barwert der nicht-flexiblen Inbound-Logistik unter Verwendung von  $LK_2$  dem Erwartungswert der flexiblen Inbound-Logistik bei Verwendung von  $LK_2$ , d. h.  $PV(LK_2) = E_0(LK_2) = -86.144$  Euro. In Stufe 2a beträgt die Zahlungsbereitschaft für eine Umstellung 31.001 Euro. Die Umstellkosten von lagerhaltig auf JIT wurden mit Hilfe des Schätztools auf 29.000 Euro geschätzt, sodass eine Umstellung durchgeführt werden sollte. Eine Rückumstellung in den nächsten 12 Monaten

wird nicht erwartet. Der erwartete Wert der Inbound-Logistik ausgehend von  $LK_1$  beträgt  $E_0(LK_1)_{\text{Stufe 2a}} = -113.396$  Euro.

Bei Stufe 3 wird in eine Flexibilisierungsmaßnahme investiert. Ausgehend vom initialen Konzept  $LK_1$  wird in Periode 0 auf  $LK_2$  umgestellt und gleichzeitig die Flexibilisierungsmaßnahme implementiert. Im Logistikkonzeptplan auf der rechten Seite von Abbildung 7-9 wird deutlich, dass  $LK_2$  – im Gegensatz zu Stufe 2a – nicht mit 100 %-iger Wahrscheinlichkeit beibehalten wird. Die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit über alle Perioden, dass erneut auf  $LK_1$  umgestellt wird, beträgt 36 %. Dies verdeutlicht den Effekt aus der Flexibilisierungsmaßnahme der geringeren Umstellkosten. Der erwartete Wert der Inbound-Logistik ausgehend von  $LK_1$  beträgt  $E_0(LK_1)_{\text{Stufe 3}} = -96.872$  Euro. Dieser Wert ist größer als der bei Stufe 2a, sodass eine klare Empfehlung für die Implementierung der Flexibilisierungsmaßnahme ausgesprochen werden kann.

### **7.3.4 Evaluation des Flexibilitätsansatzes**

Der in Kapitel 6 entwickelte Flexibilitätsansatz wurde in diesem Kapitel erfolgreich angewendet. Die Anwendung des Flexibilitätsansatzes erfolgte in drei Schritten: der Bewertung von Umstellungen, der Identifikation und Bewertung von Flexibilisierungsmaßnahmen und der Anwendung des Entscheidungsmodells.

Für die Bewertung von Umstellungen sowie die Bewertung der Effekte aus Flexibilisierungsmaßnahmen wurde ein Schätztool in MS Excel entwickelt. In diesem Tool wurden historische Daten zu den einzelnen Aktivitäten bei Logistikkonzeptumstellungen des betrachteten Nutzfahrzeugherstellers hinterlegt. Dadurch war es möglich eine Vielzahl an Anwendungsbeispielen mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen aufwandsarm und standardisiert zu bewerten. Die durchschnittlichen Umstellkosten von lagerhaltig auf JIS betragen 63.000 Euro und von lagerhaltig auf JIT 29.000 Euro. Weiterentwicklungsbedarf ergibt sich insbesondere im Hinblick auf das eingeführte Schätztool. Zum einen wird empfohlen, die Datenbasis des Tools kontinuierlich zu erweitern. Dafür ist eine Verknüpfung mit entsprechenden Datenbanklösungen anzustreben, um eine aufwandsarme Erweiterung zu ermöglichen. Zudem wurden bei dem Tool Rück- und Erneut-Umstellungen bislang manuell bewertet. Aufgrund der wiederkehrenden Logik, ist hier eine automatisierte Lösung denkbar. Weiterhin sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, Flexibilisierungsmaßnahmen im Tool zu hinterlegen. Dadurch könnten dem Anwender direkte Hinweise zum Einsatz von Flexibilisierungsmaßnahmen proaktiv eingeblendet werden. Der Effekt aus den Flexibilisie-

rungsmaßnahmen ließ sich ebenfalls mit dem entwickelten Schätztool bewerten. Weitaus schwieriger gestaltete sich die Bewertung der Investitionshöhe je Flexibilisierungsmaßnahme. Hier wird dem Anwender empfohlen, detailliertere Kostenbetrachtungen durchzuführen. Es sollte zudem unterschieden werden, ob eine Flexibilisierungsmaßnahme lediglich auf die Umstellung einer Bauteilgruppe wirkt oder ob bauteilübergreifende Effekte möglich sind. In letzterem Fall könnte dann die Investition auf mehrere Grenzbauteile aufgeteilt werden, sodass eine Befürwortung der Flexibilisierungsmaßnahme eher zu erwarten ist.

Das auf dem Realloptionsansatz basierende Entscheidungsmodell wurde erfolgreich hinsichtlich seines Verhaltens untersucht und auf das Grenzbauteil *Frontklappen* angewendet. Dazu wurde das Entscheidungsmodell in MS Excel implementiert. Es zeigte sich, dass die Einführung der Bedarfsgrenze die Berücksichtigung unterschiedlicher Bedarfsentwicklungen in der Umstellentscheidung ermöglicht. An dieser Stelle sei anzumerken, dass sich die Bedarfsgrenze mit den in dieser Arbeit entwickelten Methoden nicht automatisch bestimmen lässt. Vielmehr ist eine Sensitivitätsanalyse des Optimierungsmodells erforderlich, um die Bedarfsgrenze mit den entsprechenden neuen Kostensätzen zu identifizieren. Entsprechend ist die Weiterentwicklung des Optimierungsmodells erforderlich, sodass für unterschiedliche Bedarfshöhen entsprechende Logistikkosten ausgegeben werden.

Beim Fallbeispiel *Frontklappen* des Nutzfahrzeugherstellers zeigte sich, dass die Implementierung der Flexibilisierungsmaßnahme zu befürworten ist. Ebenfalls sollte eine Umstellung auf JIT zu angesetzten Umstellkosten bei den Frontklappen durchgeführt werden. Es wird jedoch deutlich, dass der betrachtete OEM mit den aktuellen Umstellkosten kaum flexibel ist, da eine Rück-Umstellung ohne die Implementierung einer Flexibilisierungsmaßnahme nicht in Frage kommt. Inwiefern der OEM in mehr Flexibilität investieren sollte, ist eine Fragestellung des Flexibilitätsmanagements, bei welchem ein Abgleich zwischen Soll- und Ist-Flexibilität erfolgt. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten daher untersuchen, wie hoch die optimalen Umstellkosten maximal sein dürfen, um das Gesamtoptimum einer flexiblen und effizienten Inbound-Logistik gewährleisten zu können. Ein großer Hebel zur Steigerung der Flexibilität wird in der simultanen Betrachtung mehrerer Umstellungen sowie bauteilübergreifender Flexibilisierungsmaßnahmen vermutet. Dazu müssten die Umstellungen aller Grenzbauteile des OEM simultan bewertet werden. Eine solche Bewertung ist mit dem aktuellen Entscheidungsmodell denkbar, wobei die Ergebnisdarstellung übersichtlicher zu gestalten wäre. Weiterhin sollte das Tool entsprechend erweitert werden, sodass der Gesamteffekt an Einsparungen für mehrere Umstellungen direkt ersichtlich wird und die Entscheidung für oder gegen eine Flexibilisierungsmaßnahme offensichtlich erkennbar

ist. Ein aktuell kritischer Aspekt des Entscheidungsmodells ist die Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Diese erfordert ein grundlegendes Verständnis des Entscheidungsmodells, da die Ergebnisse nicht durchgängig intuitiv sind. Hilfreich wäre eine bessere Aufbereitung der Ergebnisse im verwendeten Tool, sodass der Anwender direkt sieht, welche Ergebnisse für den betrachteten Anwendungsfall essentiell sind. Insgesamt wird das entwickelte Modell für die Bewertung von Umstellentscheidungen als sinnvoll erachtet.

## 7.4 Beantwortung der Forschungsfrage

Die forschungsleitende Fragestellung dieser Arbeit war, wie eine Steuerung zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie zu gestalten ist, sodass auf relevante Veränderungen schnell und aufwandsarm reagiert werden kann, um dadurch kosteneffiziente Logistikprozesse zu gewährleisten.

Die Anwendung des Steuerungskonzeptes wird durch das Auftreten von Veränderungen der Einflussgrößen (d. h. Störgrößen) ausgelöst (vgl. Kapitel 3.2). Daher wurden die relevanten Einflussfaktoren identifiziert und deren Grenzwerte als Indikator für eine Logistikkonzeptumstellung ermittelt, die regelmäßig zu überprüfen sind. Die entwickelte Identifikationsmethode (vgl. Kapitel 4) ermöglicht die Analyse großer Datenmengen, um diejenigen Grenzbauteile zu priorisieren, bei denen eine Umstellung aufgrund der Datengrundlage naheliegend ist. Die Ergebnisse aus dem Anwendungsbeispiel haben gezeigt, dass insbesondere durch die univariate Methode einige Grenzbauteile mit Umstellpotenzial identifiziert wurden (vgl. Kapitel 7.1). Mit Hilfe des entwickelten Optimierungsmodells (vgl. Kapitel 5) ist es möglich, kosteneffizienten Inbound-Logistikprozesse zu bestimmen. Hervorzuheben ist die Modellierung verschiedener Konfigurationen von Transport- und Belieferungskonzepten. In den Fallbeispielen des Nutzfahrzeugherstellers, konnten die Ergebnisse des Optimierungsmodells validiert und plausibilisiert werden. Bei zwei der drei betrachteten Grenzbauteile war das alternative Logistikkonzept günstiger als das aktuell verwendete (vgl. Kapitel 7.2). Den letzten Planungsbaustein bildet das Entscheidungsmodell für Logistikkonzeptumstellungen (vgl. Kapitel 6). Dieses Modell bindet zukünftige Entwicklungen (z. B. Bedarfsveränderungen, Änderungen der Logistikkosten) in den Entscheidungsprozess ein. Zudem wurden die Aktivitäten des Umstellprozesses detailliert definiert, damit dieser mit Hilfe von Flexibilisierungsmaßnahmen schneller und aufwandsärmer gestaltet werden kann. In diesem Kontext wurde ein Vorgehen zur Identifikation von Flexibilisierungsmaßnahmen entwickelt. Das Ziel von Flexibilisierungsmaßnahmen ist die Reduktion der



Umstellkosten und Umstelldauer. Die Anwendung des Entscheidungsmodells beim Nutzfahrzeughersteller zeigte, dass Flexibilisierungsmaßnahmen durchzuführen und die vorgeschlagene Logistikkonzeptumstellung umzusetzen ist (vgl. Kapitel 7.3).

Das gesamte Steuerungskonzept folgt einer standardisierten und systematischen Vorgehensweise (A1). Für die Bewertung der Logistikkonzepte wurden Logistikprozesskosten zugrunde gelegt und für die Entscheidung zur Logistikkonzeptumstellung wurden monetäre Zielgrößen verwendet (A2). Der mögliche separate Einsatz der einzelnen Planungsbausteine ist ebenfalls gegeben (A3). So kann beispielsweise ausschließlich das Optimierungsmodell verwendet werden, um Logistikprozesse für ausgewählte Bauteile zu optimieren. Weiterhin sind alle Planungsbausteine so konzipiert, dass sie sich erweitern oder auf bestimmte Anwenderbedürfnisse anpassen lassen (A4). Die Praxistauglichkeit des Steuerungskonzeptes wurde in den Kapiteln 7.1 bis 7.3 bestätigt (A6). Insbesondere der entwickelte Flexibilitätsansatz bietet Logistikplanern methodische Unterstützung zur Flexibilisierung der Inbound-Logistik. Für die im Anwendungsbeispiel involvierten Logistikplaner waren die Methoden durchgehend transparent und nachvollziehbar (A5). Die Verfolgung der Logistikziele (A7) und die Berücksichtigung der Lean-Prinzipien (A8) wurden durch das Steuerungskonzept ebenfalls erfüllt. Die Gesamtbetrachtung des Logistikprozesse hat grundsätzlich stattgefunden (A9), allerdings wäre hier eine umfänglichere Berücksichtigung der an den Inbound-Prozess angrenzenden Inhouse-Prozesse denkbar. Insgesamt kann festgehalten werden, dass das Steuerungskonzept die Forschungsfrage beantwortet und die gestellten Anforderungen erfüllt.



### 8.1 Zusammenfassung

In der Automobilindustrie hat sich die Bedeutung der Inbound-Logistik in den letzten Jahren erhöht: Die geringere Wertschöpfungstiefe von Automobilherstellern, globaler werdende Zuliefernetzwerke, neuartige Logistikkonzepte und die variierende Vielfalt anzuliefernder Bauteile verstärken den wertschaffenden Beitrag der Inbound-Logistik bei gleichzeitig anhaltendem Kostendruck. Daraus resultiert die Notwendigkeit, Optimierungspotenziale in der Inbound-Logistik zu identifizieren und zu heben, was wiederum flexible Logistikprozesse erfordert. Flexibilität stellt die Fähigkeit dar, schnell und kostengünstig auf Veränderungen zu reagieren. Bisherige Forschungsansätze zum Thema Flexibilität adressieren vornehmlich die Strukturierung und Klassifizierung verschiedener Flexibilitätsarten oder die Messung von Flexibilität. Es fehlt an planerischen Ansätzen, wie sich Flexibilität in der Logistik operativ umsetzen lässt. Zudem fehlt es an Entscheidungsregeln, unter welchen Umständen in Flexibilität investiert werden sollte (vgl. Kapitel 2.2). Eine Praxisstudie zum Thema Flexibilität in der Automobilindustrie belegt, dass die Inbound-Logistik derzeit wenig flexibel ist und einmal definierte Belieferungsprozesse über mehrere Jahre weder überprüft noch angepasst werden (vgl. Kapitel 2.3).

An dieser Stelle knüpft die vorliegende Arbeit an: Ziel war es, ein Steuerungskonzept zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik in der Automobilindustrie zu entwickeln. Durch das Steuerungskonzept sollen kosteneffiziente Logistikprozesse trotz auftretender Veränderungen gewährleistet werden. Das zu entwickelnde Steuerungskonzept wurde dazu in den allgemeinen Wirkungsablauf der Steuerung eingeordnet (vgl. Kapitel 3.2). Steuerung wurde als die zielgerichtete Beeinflussung eines dynamischen Systems definiert, wobei der Inbound-Prozess das dynamische System darstellt. Die Zielgröße ist die Effizienz der Inbound-Logistik. Auf den Inbound-Prozess wirkende Störgrößen (z. B. Veränderung der Bauteilvarianten) sind durch das Steuerungskonzept zu erfassen (z. B. mittels regelmäßiger Überprüfung der Einflussfaktoren). Als Steuereinrichtung wurden drei aufeinander aufbauende Planungsbausteine entwickelt, die die Stellgrößen des Inbound-Prozesses (Belieferungs- und Transportkonzepte sowie Flexibilisierungsmaßnahmen) festlegen.

Im ersten Planungsbaustein wurde eine Methode zur Identifikation von Grenzbauteilen entwickelt (vgl. Kapitel 4). Als Grenzbauteile wurden die Bauteile definiert, die aufgrund bestimmter Einflussfaktorausprägungen nicht eindeutig einer bestimmten Belieferungsform zugeordnet werden können, dem falschen Belieferungskonzept zugeordnet sind oder des-

sen Belieferungskonzeptwahl eine hohe Sensitivität gegenüber Änderungen der Einflussfaktoren besitzt. Entsprechend wurde Grenzbauteilen ein hohes Umstellpotenzial in Bezug auf die verwendeten Logistikkonzepte zugeschrieben. Die Identifikation von Grenzbauteilen stellt eine Fokussierung der relevanten Bauteile dar und ist insbesondere vor dem Hintergrund der großen Anzahl an Sachnummern an einem Produktionsstandort eines OEM erforderlich. Für die Entwicklung der Identifikationsmethode wurden zunächst die relevanten Einflussfaktoren (Bauteilgewicht, Bauteilvolumen, Bauteilpreis, Variantenanzahl, Bedarf, Bedarfsschwankungen) systematisch ermittelt. Die Identifikationsmethode umfasst eine univariate und eine multivariate Analyse. Bei der univariaten Datenanalyse sind Grenzwerte je Einflussfaktor mit Hilfe der Interquartilabstand-Methode zu bestimmen. Die Bauteile, die außerhalb dieser Grenzwerte liegen, sind die univariaten Grenzbauteile. Die multivariate Analyse umfasst eine Clusteranalyse, bei der mit Hilfe des k-Means-Verfahrens homogene SNR-Gruppen gebildet werden. Durch den Abgleich zwischen dem Cluster-Belieferungskonzept und dem SNR-Belieferungskonzept werden die multivariaten Grenzbauteile identifiziert. Das Anwendungsbeispiel bei einem Nutzfahrzeughersteller hat gezeigt, dass die Methode zur Grenzbauteilidentifikation in der Praxis anwendbar ist und sinnvolle Ergebnisse liefert (vgl. Kapitel 7.1). Ausgehend von insgesamt ca. 15.000 SNR wurden 263 Grenzbauteile identifiziert. Bei 22 % der Grenzbauteile ist – laut Logistikexperten – eine Umstellung des Belieferungskonzeptes weiter zu prüfen, da ein Einsparpotenzial vermutet wird. Die entwickelte Identifikationsmethode ist aufgrund der multivariaten Analyse (d. h. der simultanen Betrachtung mehrerer Einflussfaktoren) innovativ gegenüber bisherigen Materialklassifikationsansätzen in der Inbound-Logistik.

Der zweite Planungsbaustein dient dazu, für die identifizierten Grenzbauteile die kostenoptimale Kombination aus Belieferungs- und Transportkonzept auszuwählen. Dazu wurde ein prozesskostenbasiertes Optimierungsmodell entwickelt (vgl. Kapitel 5). Eine Neuerung gegenüber anderen Optimierungsmodellen ist die integrierte Betrachtung von Belieferungs- und Transportkonzepten in einem Modell. Ziel des Optimierungsmodells war die Minimierung der Logistikkosten je Bauteil für verschiedene Logistikkonzepte. Denn nur durch eine detailliertere Kostenbetrachtung lassen sich die bei den Grenzbauteilen vermuteten Umstellpotenziale belegen und quantifizieren. Um das Modell zu entwickeln, wurden je Logistikkonzept die typischen Prozesse und die dazugehörigen Kostenkomponenten identifiziert, die jeweils in der Zielfunktion integriert wurden. Die gestaffelten Tarifstrukturen der Transportkonzepte konnten durch die Integration zusätzlicher Entscheidungsvariablen erfolgreich abgebildet werden. Der verwendete Modellierungsansatz basiert auf der Idee eines mehrperiodischen Capacitated-Lot-Sizing-Problems. Die zu optimierenden Variablen

sind die Anzahl der Transporte und Transporteinheiten je Periode. Die entwickelte Logik von Referenz-Transporteinheiten ermöglicht die Betrachtung des gesamten Warenstroms auf einer Transportrelation. Das Optimierungsmodell wurde auf identifizierte Grenzbauteile eines Nutzfahrzeugherstellers angewendet (vgl. Kapitel 7.2). Bei den Grenzbauteilen *Frontklappen* und *Luftfiltern* waren die Logistikkosten je Bauteil bei einer JIT- bzw. JIS-Belieferung um 28 % bzw. 45 % geringer als bei der aktuellen lagerhaltigen Belieferung.

Im dritten Planungsbaustein wurde der Flexibilitätsaspekt berücksichtigt und in zwei Teilschritten erarbeitet: der Umstellbewertung und der Umstellentscheidung (vgl. Kapitel 6). Im ersten Teil des Planungsbausteins wurde ein Vorgehen zur Bewertung von Logistikkonzeptumstellungen und Flexibilisierungsmaßnahmen entwickelt. Dazu wurden zunächst die Arbeitspakete von Umstellungen (z. B. Ladungsträgerbeschaffung, IT-Anbindung des Lieferanten) bestimmt und anschließend in einem Netzplan zur Darstellung der Abhängigkeiten angeordnet. Eine Detaillierung der Arbeitspakete fand erst im Anwendungsbeispiel statt, da die Aktivitäten unternehmensspezifisch sind (vgl. Kapitel 7.3.1). Die Bewertung erfolgte hinsichtlich der Dimensionen Zeit und Kosten. Zur Bewertung der Umstelldauer wird die PERT-Methode empfohlen und zur Umstellkostenbewertung die Verwendung von statistischen Kennzahlen vergangener Daten. Flexibilisierungsmaßnahmen sind unternehmensspezifisch und wurden daher ebenfalls erst im Anwendungsfall detailliert. Als exemplarische Flexibilisierungsmaßnahme ist die Verwendung von modularen Ladungsträgern zu nennen, da dadurch die Beschaffung von neuen Ladungsträgern entfällt. Der Effekt aus den Flexibilisierungsmaßnahmen lässt sich durch eine Reduktion der Umstelldauer und der Umstellkosten beschreiben. Der zweite Teil des Planungsbausteins umfasste die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für flexible Logistikkonzeptumstellungen. Der methodische Ansatz basiert auf der Idee von Realloptionen, mit deren Hilfe sich sowohl Unsicherheiten als auch Handlungsoptionen abbilden lassen. Die Entwicklung der Zahlungsströme (d. h. der Logistikkosten aus der Verwendung der Logistikkonzepte) basiert auf der Bedarfsentwicklung über die Zeit, die einem Binomialmodell folgt. Die Einführung einer Bedarfsgrenze ermöglichte die sich verändernde Vorteilhaftigkeit von einem Konzept gegenüber einem anderen zu modellieren. Bei der Entwicklung des Entscheidungsmodells wurde stufenweise vorgegangen, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit für den Anwender sicherzustellen. Die Anwendung des Flexibilitätsansatzes erfolgte ebenfalls am Beispiel des Nutzfahrzeugherstellers (vgl. Kapitel 7.3). Die Ergebnisse der Umstellbewertung zeigten, dass Umstellungen von lagerhaltigen zu JIT-Belieferungen durchschnittlich 29.000 Euro kosten und 188 AT dauern, während Umstellungen von lagerhaltigen zu JIS-Belieferungen durchschnittlich 63.000 Euro kosten und 191 AT dauern. Die höheren Kosten

bei JIS-Umstellungen sind im Wesentlichen auf die Entwicklung und Beschaffung von Sonderladungsträgern zurückzuführen. Bei der Anwendung des Entscheidungsmodells konnte nachgewiesen werden, dass die Implementierung von Flexibilisierungsmaßnahmen zukünftige Rück-Umstellungen des verwendeten Logistikkonzeptes begünstigt. Weiterhin kann mit Hilfe des Entscheidungsmodells explizit ausgewiesen werden, wie hoch die maximale Zahlungsbereitschaft für die Umstellung des Logistikkonzeptes ist. Beim Grenzbauteil *Frontklappen* wurde die Implementierung der Flexibilisierungsmaßnahmen und die sofortige Umstellung von lagerhaltig auf JIT empfohlen, da der Erwartungswert der Inbound-Logistik dann größer ist als bei einer Umstellung ohne Flexibilisierungsmaßnahmen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Ergebnis dieser Arbeit ein Steuerungskonzept zur flexiblen Konfiguration der Inbound-Logistik ist. Das Steuerungskonzept kann sowohl gesamtheitlich als auch in Teilen in der Praxis angewendet werden. Es dient zur Unterstützung des Logistikplaners, bei Veränderungen die relevanten Bauteile zu identifizieren, die kostenoptimale Kombination von Belieferungs- und Transportkonzept auszuwählen und anschließend eine fundierte Entscheidung bezüglich der Logistikkonzeptumstellung sowie der Implementierung von Flexibilisierungsmaßnahmen zu treffen. Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit ist vielfältig: Zum einen konnte ein Ansatz entwickelt werden, der die Steuerung und Planung zur operativen Implementierung von Flexibilität in der Inbound-Logistik ermöglicht. Dabei wurde Flexibilität nicht per se als erstrebenswerter Zustand betrachtet, sondern in einem monetären Entscheidungsmodell mit einer entsprechenden Aufwand-Nutzen-Betrachtung inkludiert. Zum anderen leisten die drei entwickelten Planungsbausteine jeweils einen separaten wissenschaftlichen Nutzen durch die Anwendung und Erweiterung verschiedener methodischer Ansätze.

## 8.2 Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung des Steuerungskonzeptes konnten diverse Ideen für zukünftige Forschungsarbeiten und praxisnahe Untersuchungsbedarfe generiert werden.

Die Methode der Grenzbauteilidentifikation stellt eine spezifische Art der Materialklassifikation für die anzuliefernden Bauteile dar. Die verwendete Clusteranalyse als multivariate Methode ist ein erster Schritt zur Anwendung von *Big Data* in der Steuerung und Planung der Inbound-Logistik. Hier gilt es zu untersuchen, inwiefern *intelligente Algorithmen* (d. h. Methoden des *maschinellen Lernens*) genutzt werden können, um bessere Ergebnisse bei der Grenzbauteilidentifikation zu erhalten. Bessere Ergebnisse liegen dann vor, wenn die

identifizierten Grenzbauteile eindeutig sind und durch eine spätere Validierung der Logistikexperten nicht wieder verworfen werden. In diesem Zusammenhang sollte zudem die Güte der Ergebnisse der Identifikationsmethode quantifiziert werden. Dann ließen sich verallgemeinerte Aussagen darüber treffen, wie vielversprechend die identifizierten Grenzbauteile hinsichtlich Logistikkonzeptumstellungen sind. Um dies zu realisieren, sollte das Steuerungskonzept vollumfänglich auf mehrere Anwendungsfälle angewendet werden. Weiterhin empfiehlt es sich zu untersuchen, ob weitere Einflussfaktoren bei der Grenzbauteilidentifikation zu berücksichtigen sind. Möglicherweise kann durch die Berücksichtigung von Werksspezifika (z. B. Lagerort des betrachteten Bauteils und Lagerfüllmengen) der durch den Logistikplaner manuell durchzuführende Validierungsschritt vernachlässigt werden. Zudem wäre denkbar, dass keine Vorgaben bezüglich der zu wählenden Einflussfaktoren gemacht werden, sondern sämtliche Bauteileigenschaften und Einflussfaktoren in die Betrachtung einfließen. Sobald der Logistikplaner eine Anpassung bei einem Bauteil vornimmt, würde das System prüfen, ob es ein anderes Bauteil mit ähnlichen Eigenschaften und Einflussfaktoren gibt, die entsprechend anzupassen sind. Dies würde eine dynamischere Identifikation von Grenzbauteilen ermöglichen.

Alle genannten Ideen in Bezug auf Big Data erfordern allerdings eine durchgängige und qualitativ hohe Datenverfügbarkeit bei den betrachteten Unternehmen. Daher besteht ein praxisorientierter Untersuchungsbedarf darin zu erarbeiten, wie die Datenverfügbarkeit und Datentransparenz in Unternehmen schnell sowie kosten- und aufwandsarm über mehrere Bereiche erhöht werden kann. Damit ist nicht gemeint, die bestehende IT-Struktur gänzlich anzupassen. Vielmehr besteht die Idee darin, ein modulares Schnittstellensystem zu entwerfen, mit dessen Hilfe alle relevanten Logistikkennzahlen aus verschiedenen Systemen ausgelesen werden können. Die Hauptanforderung besteht somit darin, möglichst viele verschiedene Systeme und Tools an dieses Schnittstellensystem anbinden zu können. Die Modularität unterstützt dabei, dass das Schnittstellensystem schrittweise um neue Systemanbindungen erweitert werden kann. Ein solches Schnittstellensystem würde die kurzfristige praktische Umsetzung vieler theoretischer Konzepte (wie z. B. ein ganzheitliches Kennzahlensystem in der Logistik [Dör-2017; Sch-2017a]) ermöglichen.

Ein weiterer Aspekt, der vor allem die praxisnahe Umsetzung des Steuerungskonzeptes adressiert, ist die Implementierung der einzelnen Planungsbausteine in einem durchgängigen Software-Tool. Damit ließen sich benutzerfreundlichere Oberflächen erzeugen, so dass das Steuerungskonzept vereinfacht und schneller an Akzeptanz gewinnen würde. Die hier erarbeiteten Planungsbausteine wurden exemplarisch bei einem deutschen Nutzfahr-

zeughersteller erprobt. Mit einem kontinuierlichen und langfristigen Einsatz der Planungsbausteine ist jedoch nur dann zu rechnen, wenn die Anwendung der Planungsbausteine in die Aufgabenbeschreibung des Logistikplaners aufgenommen wird. Weiterhin könnte mit Hilfe eines durchgängigen Software-Tools der Automatisierungsgrad erhöht werden. Wenn alle relevanten Daten im Tool hinterlegt sind, dann könnte das System die Planungsbausteine selbstständig ausführen oder eine Meldung an den Logistikplaner senden, falls noch zusätzliche Informationen einzugeben sind. Für das Optimierungsmodell wäre ein anderes Tool als MS Excel wünschenswert, um zum einen die Performance zu erhöhen und zum anderen durch einen modularen Aufbau andere Logistikkonzepte (z. B. Lieferantenpark) einfacher einbinden zu können. Für das Tool der Umstellbewertung gilt ebenfalls, dass eine Umsetzung nicht in MS Excel geeignet ist. Da die Bewertung von Umstelldauer und Umstellkosten auf Vergangenheitsdaten basiert, bietet sich eine Datenbanklösung an. Die Datenbank sollte erweiterbar sein, um Erkenntnisse aus jüngsten Umstellungen einbinden zu können.

Weiterhin ist eine zunehmende Bedeutung von *Green Logistics* zu erwarten. Darunter wird der Prozess verstanden, Emissionen aus Transport- und Logistikprozessen zwischen Unternehmen nachhaltig zu ermitteln und zu senken [Wit-2015, S. 1]. Das entwickelte Optimierungsmodell wurde in der Zielfunktion bereits um CO<sub>2</sub>-Emissionen ergänzt (vgl. [Maa-2017c]). An diese ersten Untersuchungen sollte angeknüpft werden, sodass eine adäquate Bewertung zukünftiger neuer Logistikkonzepte (z. B. Transporte mit autonomfahrenden Lkws) ermöglicht wird.



## Literaturverzeichnis

---

- [Abe-2006] Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: "Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems". In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* Jg. 55, Nr. 1 (2006), S. 433–436.
- [Ada-1993] Adam, D.: Planung und Entscheidung: Modelle – Ziele – Methoden: mit Fallstudien und Lösungen. Gabler, Wiesbaden: 1993.
- [Alm-2015] Almeder, C.; Traxler, R.: "Das mehrstufige kapazitierte Losgrößenproblem". In: *Produktionsplanung und -steuerung*. Hrsg. von Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. Springer Gabler, Wiesbaden: 2015, S. 89–107.
- [Alt-2002] Alt, W.: Nichtlineare Optimierung. vieweg studium Aufbaukurs Mathematik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden: 2002.
- [Amr-2003] Amram, M.; Kulatilaka, N.: Real options: Managing strategic investment in an uncertain world. Financial Management Association survey and synthesis series. Harvard Business School Press, Boston, Mass.: 2003.
- [Arn-2007] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg: 2007.
- [Arn-2008] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K., Hrsg.: Handbuch Logistik. Springer, Berlin: 2008.
- [Bac-2006] Bachmann, H.: "Mehrweg-Ladungsträger effizient verwalten und steuern". In: *Logistik für Unternehmen* Jg. 10 (2006), S. 88–91.
- [Bac-2010] Bacher, J.; Pöge, A.; Wenzig, K.: Clusteranalyse: Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. Oldenbourg, München: 2010.
- [Bac-2012] Bach, N.; Brehm, C.; Buchholz, W.; Petry, T.: Wertschöpfungsorientierte Organisation: Architekturen - Prozesse - Strukturen. Gabler, Wiesbaden: 2012.
- [Bac-2016] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. Springer, Berlin, Heidelberg: 2016.
- [Bag-1988] Bagchi, P. K.: "Management of Materials under Just-in-Time Inventory System: A new look". In: *Journal of Business Logistics* Jg. 9, Nr. 2 (1988), S. 89–102.
- [Ban-1999] Bankhofer, U.: "Zur Klassifikation von Verbrauchsfaktoren im Rahmen der Materialbedarfsplanung". In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft (ZfB)* Jg. 69, Nr. 8 (1999), S. 913–925.
- [Bar-1996] Barnett, V.; Lewis, T.: Outliers in statistical data. Wiley series in probability and mathematical statistics. Wiley, Chichester [u.a.]: 1996.

- [Bar-2011] Bardmann, M.: Grundlagen der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre. Lehrbuch. Gabler, Wiesbaden: 2011.
- [Bat-2013] Battini, D.; Boysen, N.; Emde, S.: "Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry". In: *Journal of Management Control* Jg. 24, Nr. 2 (2013), S. 209–217.
- [Bea-2000] Beach, R.; Muhlemann, A. P.; Price, D.; Paterson, A.; Sharp, J. A.: "A review of manufacturing flexibility". In: *European Journal of Operational Research* Jg. 122, Nr. 1 (2000), S. 41–57.
- [Bec-2008] Becker, T.: Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. Springer, Berlin [u.a.]: 2008.
- [Ben-2001] Bengtsson, J.: "Manufacturing flexibility and real options: A review". In: *International Journal of Production Economics* Jg. 74 (2001), S. 213–224.
- [Ben-2005] Ben-Gal, I.: "Outlier Detection". In: *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook – A Complete Guide for Practitioners and Researchers*. Hrsg. von Maimon, O. Z.; Rockach, L. Kluwer Academic Publishers, New York: 2005, S. 1–16.
- [Ben-2013] Benjaafar, S.; Li, Y.; Daskin, M.: "Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights From Simple Models". In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* Jg. 10, Nr. 1 (2013), S. 99–116.
- [Ber-2006] Berman, O.; Wang, Q.: "Inbound Logistic Planning: Minimizing Transportation and Inventory Cost". In: *Transportation Science* Jg. 40, Nr. 3 (2006), S. 287–299.
- [Ber-2007] Berret, M.: "The Value Chain Challenge: networks, the strategy for success". In: *Mastering automotive challenges*. Hrsg. von Gottschalk, B.; Kalmbach, R. Kogan Page, London: 2007, S. 69–102.
- [Ber-2008] Berk, R. A., Hrsg.: Statistical learning from a regression perspective. Springer series in statistics. Springer, New York: 2008.
- [Bir-2011] Birge, J. R.; Louveaux, F.: Introduction to stochastic programming. Springer series in operations research and financial engineering. Springer, New York: 2011.
- [Bla-2008] Blackstone, J. H.: APICS dictionary. APICS, Athens, GA: 2008.
- [Blo-2006] Blohm, H.; Lüder, K.; Schaefer, C.: Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Vahlen, München: 2006.

- [Bop-2007] Boppert, J.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A.: "Zukunftsorientierte Logistik durch adaptive Planung". In: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Hrsg. von Günthner, W. A. VDI. Springer, Berlin [u.a.]: 2007, S. 345–357.
- [Bop-2013a] Boppert, J.: "Wertstromdesign für die Logistik – ein Planungsleitfaden". In: *Lean Logistics*. Hrsg. von Günthner, W. A.; Boppert, J. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg: 2013, S. 145–161.
- [Bop-2013b] Boppert, J.; Durchholz, J.: "Null-Fehler-Prinzip in manuellen Logistikprozessen: Gestaltungsempfehlungen für den Planer". In: *Schlanke Logistikprozesse*. Hrsg. von Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E.; Boppert, J. Springer Vieweg, Berlin: 2013, S. 237–265.
- [Boy-2015] Boysen, N.; Emde, S.; Hoeck, M.; Kauderer, M.: "Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda". In: *European Journal of Operational Research* Jg. 242, Nr. 1 (2015), S. 107–120.
- [Boz-1992] Bozer, Y. A.; McGinnis, L. F.: "Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model". In: *International Journal of Production Economics* Jg. 28, Nr. 1 (1992), S. 1–19.
- [Bra-2013] Bravo, J. J.; Vidal, C. J.: "Freight transportation function in supply chain optimization models: A critical review of recent trends". In: *Expert Systems with Applications* Jg. 40, Nr. 17 (2013), S. 6742–6757.
- [Bre-2010] Bretzke, W.-R.; Barkawi, K.: *Nachhaltige Logistik: Antworten auf eine globale Herausforderung*. Springer, Berlin, Heidelberg: 2010.
- [Bre-2015] Bretzke, W.-R.: *Logistische Netzwerke*. Springer, Berlin, Heidelberg: 2015.
- [Bri-2017] Brieke, M.; Maas, C.: *Flexibilitätssteigerung in der Inbound-Logistik der Nutzfahrzeugindustrie*. Garching bei München, 2017.
- [Bro-1984] Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.; Stecke, K. E.: "Classification of flexible manufacturing systems". In: *The FMS Magazine* Jg. 2, Nr. 2 (1984), S. 114–117.
- [Bun-2017a] Bundesvereinigung Logistik: *Das ist Logistik: Erklärung und Definition*. 2017.  
URL: <https://www.bvl.de/wissen/logistik-definitionen>.
- [Bun-2017b] Bundesvereinigung Logistik, Hrsg.: *Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management: Chancen der digitalen Transformation*. DVV Media Group GmbH, Bremen: 2017.

- [Bur-2012] Burkschat, M.; Cramer, E.; Kamps, U.: Beschreibende Statistik: Grundlegende Methoden der Datenanalyse. EMIL@Astat: Medienreihe zur angewandten Statistik. Springer Spektrum, Berlin [u.a.]: 2012.
- [Bus-2015] Busse von Colbe, W.: Investitionstheorie und Investitionsrechnung. Lehrbuch. Springer, Berlin: 2015.
- [Cap-2011] Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.: "A methodology for selecting assembly systems feeding policy". In: *Industrial Management & Data Systems* Jg. 111, Nr. 1 (2011), S. 84–112.
- [Cap-2015a] Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.; Salini, P.: "A decision model for selecting parts feeding policies in assembly lines". In: *Industrial Management & Data Systems* Jg. 115, Nr. 6 (2015), S. 974–1003.
- [Cap-2015b] Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.; Salini, P.: "A model for kitting operations planning". In: *Assembly Automation* Jg. 35, Nr. 1 (2015), S. 69–80.
- [Cap-2015c] Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.; Salini, P.: "Planning models for continuous supply of parts in assembly systems". In: *Assembly Automation* Jg. 35, Nr. 1 (2015), S. 35–46.
- [Chr-1996] Chryssolouris, G.: "Flexibility and Its Measurement". In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* Jg. 45, Nr. 2 (1996), S. 581–587.
- [Chr-2000] Christopher, M.: "The Agile Supply Chain: Competing in Volatile Markets". In: *Industrial Marketing Management* Jg. 29, Nr. 1 (2000), S. 37–44.
- [Chr-2005] Christopher, M.: Logistics and supply chain management: Creating value-added networks. FT Prentice Hall, Harlow, England und New York: 2005.
- [Chr-2011] Christopher, M.; Holweg, M.: "Supply Chain 2.0: Managing supply chains in the era of turbulence". In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Jg. 41, Nr. 1 (2011), S. 63–82.
- [Cle-2015] Cleff, T.: Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse. Gabler, Wiesbaden: 2015.
- [Coc-2006] Cochran, J. K.; Ramanujam, B.: "Carrier-mode logistics optimization of inbound supply chains for electronics manufacturing". In: *International Journal of Production Economics* Jg. 103, Nr. 2 (2006), S. 826–840.
- [Con-2012] Conze, M.; Bystron, K.; Günthner, W. A.: "XYZ-Analyse für volatile Produktionsprogramme: Entwicklung und Anwendung einer neuar-

- tigen XYZ-Analyse, welche Schwächen bestehender Ansätze beheben kann". In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* Jg. 107, Nr. 10 (2012).
- [Con-2014] Conze, M. H.: Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge zur schlanken Versorgung der Automobilmontage. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching bei München: 2014.
- [Coo-1997] Cooper, M. C.; Lambert, D. M.; Pagh, J. D.: "Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics". In: *The International Journal of Logistics Management* Jg. 8, Nr. 1 (1997), S. 1–14.
- [Cop-2013] Copaciu, F. V.: Analyse der Wirkzusammenhänge in der Perlenkettenmethode in der Automobilindustrie. Unternehmenslogistik. Verlag Praxiswissen, Dortmund: 2013.
- [Cor-2007] Coronado M., A. E.; Lyons, A. C.: "Evaluating operations flexibility in industrial supply chains to support build-to-order initiatives". In: *Business Process Management Journal* Jg. 13, Nr. 4 (2007), S. 572–587.
- [Cot-2017] Cottle, R. W.; Eaves, B. C.; Thapa, M. N.: "Dantzig, George B. (1914-2005)". In: *The New Palgrave dictionary of economics*. Hrsg. von Blume, L. E.; Durlauf, S. N. Palgrave Macmillan, UK: 2017, S. 1–14.
- [Cox-1979] Cox, J. C.; Ross, S. A.; Rubinstein, M.: "Option Pricing: A Simplified Approach". In: *Journal of Financial Economics* Jg. 7, Nr. 3 (1979), S. 229–263.
- [Cra-1993] Crainic, T. G.; Gendreau, M.; Dejax, P.: "Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers". In: *Operations Research* Jg. 41, Nr. 1 (1993), S. 102–126.
- [Cri-2002] Cristianini, N.; Schölkopf; Bernhard: "Support Vector Machines and Kernel Methods: The New Generation of Learning Machines". In: *AI Magazine*. Jg. 23, Nr. 3 (2002), S. 31–42.
- [Dam-2002] Damisch, P. N.: Wertorientiertes Flexibilitätsmanagement durch den Realloptionsansatz. DUV Wirtschaftswissenschaft. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden: 2002.
- [Dan-1949] Dantzig, G. B.: "Programming in a Linear Struktur: Report of the Madison Meeting, September 7-10, 1948". In: *Econometrica* Jg. 17, Nr. 1 (1949), S. 73–74.

- [Dan-1955] Dantzig, G.; Orden, A.; Wolfe, P.: "The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality restraints". In: *Pacific Journal of Mathematics* Jg. 5, Nr. 2 (1955), S. 183–195.
- [DIN IEC 60050-351] Informationstechnik, D. K. E. E.: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik. DIN-IEC-Norm, Nr. 60050-351. 2014.
- [Dit-2015] Dittes, F.-M.: Optimierung: Wie man aus allem das Beste macht. Bd. 2. Technik im Fokus. Springer, Berlin: 2015.
- [Dom-2015a] Dombrowski, U.; Mielke, T., Hrsg.: Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin: 2015.
- [Dom-2015b] Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: Einführung in Operations Research. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg: 2015.
- [Dör-2017] Dörnhöfer, M.: Entwicklung eines modularen Kennzahlensystems für die Automobillogistik im Kontext der schlanken Logistik. Lehrstuhl fürördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching bei München: 2017.
- [Duc-2003] Duclos, L. K.; Vokurka, R. J.; Lummus, R. R.: "A conceptual model of supply chain flexibility". In: *Industrial Management & Data Systems* Jg. 103, Nr. 6 (2003), S. 446–456.
- [Dud-2017a] Duden online: Flexibilität: Rechtschreibung. 2017.  
URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Flexibilitaet>.
- [Dud-2017b] Duden online: Planen: Rechtschreibung. 2017.  
URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/planen>.
- [Dud-2017c] Duden online: Steuern: Rechtschreibung. 2017.  
URL: [http://www.duden.de/rechtschreibung/stuern\\_lenken\\_fuehren\\_dirigieren](http://www.duden.de/rechtschreibung/stuern_lenken_fuehren_dirigieren).
- [Ebe-2010] Ebert, C.: Systematisches Requirements-Engineering: Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten. dpunkt-Verlag, Heidelberg: 2010.
- [Eck-2016] Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler: Eine realdatenbasierte Einführung mit SPSS. Lehrbuch. Springer Gabler, Wiesbaden: 2016.
- [Eis-2003] Eisenführer, F.; Weber, M.: Rationales Entscheiden. Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg: 2003.
- [Eva-1991] Evans, J. S.: "Strategic Flexibility for High Technology Manoeuvres: A Conceptual Framework". In: *Journal of Management Studies* Jg. 28, Nr. 1 (1991), S. 69–89.

- [Fan-1993] Fandel, G.; François, P.: “Just-in-Time-Produktion und -Beschaffung Funktionsweise, Einsatzvoraussetzungen und Grenzen”. In: *Industrielles Management*. Hrsg. von Albacht, H. Gabler, Wiesbaden: 1993, S. 23–36.
- [Fle-1997] Fleischmann, M.; Bloemhof-Ruwaard, J. M.; Dekker, R.; van der Laan, E.; van Nunen, J. A.; van Wassenhove, L. N.: “Quantitative models for reverse logistics: A review”. In: *European Journal of Operational Research* Jg. 103, Nr. 1 (1997), S. 1–17.
- [Flo-1986] Flores, B. E.; Whybark, D. C.: “Multiple Criteria ABC Analysis”. In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 6, Nr. 3 (1986), S. 38–46.
- [fml-2015b] Forster, A.: “Entwicklung einer Bewertungsmethode für Flexibilität in der Inbound-Logistik der Nutzfahrzeugindustrie”. Master’s Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2015.
- [fml-2015c] Haid, C.: “Standardisierung des Prozesses zur Umstellung auf Just-in-Sequence Belieferung in der Nutzfahrzeugindustrie”. Semesterarbeit. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2015.
- [fml-2016a] Günther, J.: “Entwicklung einer Vorgehensweise zur Erkennung von Logistikpotenzialen und wirtschaftliche Bewertung alternativer Inbound Logistikkonzepte ausgewählter Bauteile: Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG”. Master’s Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2016.
- [fml-2016b] Legner, S.: “Entwicklung eines Modells zur wirtschaftlichen Bewertung von Belieferungskonzepten bei variierenden Einflussfaktoren: Eine Anwendung auf Beispielszenarien der MAN Truck & Bus AG”. Bachelor’s Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2016.
- [fml-2016d] Munz, J.: “Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Auswahl des Materialversorgungsprozesses und der Zeithaushaltberechnung von Just-in-Sequence-Anlieferungen für Bauteile in der Automobilindustrie”. Master’s Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2016.
- [fml-2016e] Tisch, A.: “Entwicklung eines Modells zur integrierten Optimierung von Transport- und Belieferungskonzepten der Inbound-Logistik: Ei-

- ne Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG". Master's Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2016.
- [fml-2016f] Minov, V.: "Entwicklung eines prozessorientierten Logistikkostenmodells zur Bewertung alternativer Belieferungskonzepte im Sourcing-Prozess". Master's Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2016.
- [fml-2017a] Berger, K.: "Monitoringmethode für Belieferungskonzepte der Inbound-Logistik von ausgewählten Bauteilen: Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG". Master's Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2017.
- [fml-2017b] Pokoj, S.: "Modell zur kostenbasierten Bewertung bei Umstellentscheidungen von Logistikkonzepten in der Inbound-Logistik: Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG". Master's Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2017.
- [fml-2017c] Müller, C.: "Flexible Umstellung von Logistikkonzepten in der Nutzfahrzeugindustrie". Bachelor's Thesis. Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2017.
- [Fot-2017] Fottner, J.: "Materialfluss und Logistik". Vorlesungsskript. Garching bei München: Technische Universität München, 2017.
- [Fra-2004] Franke, J.; Härdle, W.; Hafner, C.: "Das Binomialmodell für europäische Optionen". In: *Einführung in die Statistik der Finanzmärkte*. Hrsg. von Franke, J.; Härdle, W.; Hafner, C. Statistik und ihre Anwendungen. Springer, Berlin, Heidelberg: 2004, S. 97–107.
- [Gün-2015] Günthner, W. A.; Dörnhöfer, M.: Einsatz von Kennzahlensystemen in der Automobillogistik: Aktueller Entwicklungsstand und Handlungsbedarf. neue Ausg. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching b. München: 2015.
- [Gan-2009] Ganguly, A.; Nilchiani, R.; Farr, J. V.: "Evaluating agility in corporate enterprises". In: *International Journal of Production Economics* Jg. 118, Nr. 2 (2009), S. 410–423.
- [Ger-1993] Gerwin, D.: "Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective". In: *Management Science* Jg. 39, Nr. 4 (1993), S. 395–410.



- [Ges-2015] Geschka, H.; Lantelme, G.: "Kreativitätstechniken". In: *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement*. Hrsg. von Albers, S.; Grassmann, O. Gabler, Wiesbaden: 2015, S. 285–304.
- [Gle-2008] Gleißner, H.; Femerling, J. C.: *Logistik*. Gabler, Wiesbaden: 2008.
- [Gol-2000] Golden, W.; Powell, P.: "Towards a definition of flexibility: in search of the Holy Grail?" In: *Omega* Jg. 28, Nr. 4 (2000), S. 373–384.
- [Göp-2013a] Göpfert, I.: *Automobillogistik: Stand und Zukunftstrends*. Springer Gabler, Wiesbaden: 2013.
- [Göp-2013b] Göpfert, I., Hrsg.: *Logistik: Führungskonzeption und Management von Supply Chains*. Vahlen, München: 2013.
- [Göp-2013c] Göpfert, I.; Schulz, M.; Wellbrock, W.: "Trends in der Automobillogistik". In: *Automobillogistik*. Hrsg. von Göpfert, I.; Braun, D.; Schulz, M. Springer Gabler, Wiesbaden: 2013, S. 1–26.
- [Gos-2010] Gosling, J.; Purvis, L.; Naim, M. M.: "Supply chain flexibility as a determinant of supplier selection". In: *International Journal of Production Economics* Jg. 128, Nr. 1 (2010), S. 11–21.
- [Göt-2007] Götz, A.: "Zukunftsstandort Deutschland?" In: *Automobil-Produktion* Jg. 20, Nr. 2 (2007), S. 16–19.
- [Göt-2010] Götze, U.: *Kostenrechnung und Kostenmanagement*. Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg: 2010.
- [Göt-2014] Götze, U.: *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Lehrbuch. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg: 2014.
- [Gra-2004] Graf, H.; Putzlocher, S.: "DaimlerChrysler: Integrierte Beschaffungsnetzwerke". In: *Supply Chain Management erfolgreich umsetzen*. Hrsg. von Corsten, D.; Gabriel, C. Springer, Berlin, Heidelberg: 2004, S. 55–71.
- [Gri-2013] Gritzmann, P.: *Grundlagen der mathematischen Optimierung: Diskrete Strukturen, Komplexitätstheorie, Konvexitätstheorie, lineare Optimierung, Simplex-Algorithmus, Dualität*. Aufbaukurs Mathematik Lehrbuch. Springer, Wiesbaden: 2013.
- [Gru-2015] Grunewald, M.: *Planung von Milkruns in der Beschaffungslogistik der Automobilindustrie: Ein Ansatz zur Integration von Bestandsmanagement und Tourenplanung*. Produktion und Logistik. Gabler, Wiesbaden: 2015.
- [Gud-2005] Gudehus, T.: *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. Springer, Berlin [u.a.]: 2005.

- [Gün-2008] Günthner, W. A.: "Ereignisorientierte Logistik — Ein neuer Ansatz zur Steuerung von Logistiksystemen". In: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Hrsg. von Nyhuis, P. Springer, Berlin, Heidelberg: 2008, S. 373–390.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E.; Boppert, J.: *Schlanke Logistikprozesse: Handbuch für den Planer*. Springer Vieweg, Berlin: 2013.
- [Gün-2017] Günthner, W. A.; Fottner, J.: "Planung technischer Logistiksysteme". Vorlesungsskript. Garching bei München: Technische Universität München, 2017.
- [Han-2010] Handl, A.: *Multivariate Analysemethoden: Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS. Statistik und ihre Anwendungen*. Springer, Heidelberg: 2010.
- [Han-2013] Hanson, R.; Brolin, A.: "A comparison of kitting and continuous supply in in-plant materials supply". In: *International Journal of Production Research* Jg. 51, Nr. 4 (2013), S. 979–992.
- [Hed-2016] Hedderich, J.; Sachs, L.: *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. Springer, Berlin, Heidelberg: 2016.
- [Hei-2017] Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M.: *Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung*. Springer Vieweg, Wiesbaden: 2017.
- [Her-2005] Herold, L.: *Kundenorientierte Prozesssteuerung in der Automobilindustrie: Die Rolle von Logistik und Logistikcontrolling im Prozess "vom Kunden bis zum Kunden"*. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden: 2005.
- [Her-2015] Herrmann, F.; Englberger, J.: "Robuste Optimierung zur Produktionsprogrammplanung". In: *Produktionsplanung und -steuerung*. Hrsg. von Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. Springer Gabler, Wiesbaden: 2015, S. 25–45.
- [Hil-2005] Hild, R.: "Automobilindustrie: stark reduzierte Wertschöpfungsquote und gebremste Produktivitätsentwicklung". In: *ifo Schnelldienst* Jg. 58, Nr. 21 (2005), S. 39–46.
- [Hoc-2004] Hocke, S.: *Flexibilitätsmanagement in der Logistik: Systemtheoretische Fundierung und Simulation logistischer Gestaltungsparameter*. Bd. 25. Informationstechnologie und Ökonomie. Lang, Frankfurt am Main [u.a.]: 2004.
- [Hoe-2014] Hoen, K. M. R.; Tan, T.; Fransoo, J. C.; van Houtum, G. J.: "Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under sto-

- chastic demand". In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* Jg. 26, Nr. 1-2 (2014), S. 170–195.
- [Hof-2008] Hoffmeister, W.: *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen*. Berliner Wissenschafts-Verlag (BWV), Berlin: 2008.
- [Hom-1999] Hommel, U.; Pritsch, G.: "Marktorientierte Investitionsbewertung mit dem Realloptionsansatz: Ein Implementierungsleitfaden für die Praxis". In: *Schweizerische Gesellschaft für Finanzmarktforschung* Jg. 13, Nr. 2 (1999), S. 121–144.
- [Hom-2001] Hommel, U.; Lehmann, H.: "Die Bewertung von Investitionsprojekten mit dem Realloptionsansatz: Ein Methodenüberblick". In: *Realoptionen in der Unternehmenspraxis*. Hrsg. von Hommel, U.; Scholich, M.; Vollrath, R. Springer, Berlin, Heidelberg: 2001, S. 113–129.
- [Hop-2014] Hoppenheit, S.; Günthner, W. A.: "Entwicklung eines Ansatzes zur proaktiven Identifikation und Bestandsplanung von langsamdrehenden Materialien". In: *Logistics Journal: Proceedings* (2014), S. 1–16.
- [Hop-2017] Hoppenheit, S.: *System zum proaktiven Bestandsmanagement von Langsamdrehern*. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching bei München: 2017.
- [Hun-2015] Hundt, M.: *Investitionsplanung unter unsicheren Einflussgrößen*. Springer, Wiesbaden: 2015.
- [Ihm-2006] Ihme, J.: *Logistik im Automobilbau: Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. Carl Hanser Verlag, München, Wien: 2006.
- [Irr-2014] Irrenhauser, T.: *Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz*. Bd. 288. Forschungsberichte IWB. Herbert Utz Verlag, München: 2014.
- [Jaf-2015] Jafari, H.: "Logistics flexibility: A systematic review". In: *International Journal of Productivity and Performance Management* Jg. 64, Nr. 7 (2015), S. 947–970.
- [Jai-2013] Jain, A.; Jain, P. K.; Chan, F. T.; Singh, S.: "A review on manufacturing flexibility". In: *International Journal of Production Research* Jg. 51, Nr. 19 (2013), S. 5946–5970.
- [Jan-2007] Janssen, J.; Laatz, W.: *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows: Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul exakte Tests – mit 193 Tabellen*. Springer, Berlin [u.a.]: 2007.

- [Jin-2004] Jin, B.: "Achieving an optimal global versus domestic sourcing balance under demand uncertainty". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 24, Nr. 12 (2004), S. 1292–1305.
- [Kal-2011] Kall, P.; Mayer, J.: Stochastic linear programming: Models, theory, and computation. Bd. 156. International Series in Operations Research & Management Science. Springer, New York, London: 2011.
- [Kel-1989] Kelle, P.; Silver, E. A.: "Forecasting the returns of reusable containers". In: *Journal of Operations Management* Jg. 8, Nr. 1 (1989), S. 17–35.
- [Kem-2007] Kempkes, J. P.; Koberstein, A.; Sag, A.: "Kostenoptimierung für Transporte auf dem europäischen Festland am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers". In: *Management logistischer Netzwerke*. Hrsg. von Günther, H. O.; Mattfeld, D. C.; Suhl, L. Physica-Verlag, Heidelberg: 2007, S. 343–360.
- [Kem-2009] Kempkes, J. P.: Kostenoptimale Materialflüsse in der operativen Zulieferungslogistik in der Nutzfahrzeugindustrie. Universität Paderborn, Paderborn: 2009.
- [Ker-1974] Kern, W.: Investitionsrechnung. C. E. Poeschel, Stuttgart: 1974.
- [Kil-2012] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.: "Design of kitting system in lean-based assembly lines". In: *Assembly Automation* Jg. 32, Nr. 3 (2012), S. 226–234.
- [Kil-2015] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.: "Advances in assembly line parts feeding policies: A literature review". In: *Assembly Automation* Jg. 35, Nr. 1 (2015), S. 57–68.
- [Kle-2011] Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Vahlen, München: 2011.
- [Kle-2013] Klenk, E.: "Durchgängige Methodenanwendung zur Analyse und Planung schlanker Logistikprozesse". In: *Lean Logistics*. Hrsg. von Günthner, W. A.; Boppert, J. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg: 2013, S. 129–134.
- [Klu-2010] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Springer, Berlin, Heidelberg: 2010.
- [Klu-2011] Klug, F.: "Aktuelle Trends in der Automobillogistik". In: *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft (ZfAW)* Jg. 3 (2011), S. 60–68.

- [Kra-2010] Kraus, G.; Westermann, R.: Projektmanagement mit System: Organisation, Methoden, Steuerung. Gabler, Wiesbaden: 2010.
- [Kro-1995] Kroon, L.; Vrijens, G.: "Returnable containers: An example of reverse logistics". In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Jg. 25, Nr. 2 (1995), S. 56–68.
- [Kru-2009] Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Oldenbourg, München: 2009.
- [Kru-2014] Krumm, S.; Schopf, K. D.; Rennekamp, M.: "Komplexitätsmanagement in der Automobilindustrie – optimaler Fit von Vielfalt am Markt, Produktstruktur, Wertstrom und Ressourcen". In: *Automotive Management*. Hrsg. von Ebel, B.; Hofer, M. B. Springer, Berlin, Heidelberg: 2014, S. 189–205.
- [Küb-2016] Küber, C.; Westkämper, E.; Keller, B.; Jacobi, H.-F.: "Planning Method for the Design of Flexible as Well as Economic Assembly and Logistics Processes in the Automotive Industry". In: *Procedia CIRP* Jg. 41 (2016), S. 556–561.
- [Lan-1992] Langley, C. J.; Holcomb, M. C.: "Creating Logistics Customer Value". In: *Journal of Business Logistics* Jg. 13, Nr. 2 (1992), S. 1–27.
- [Lau-2014] Laux, H.: Entscheidungstheorie. Springer Gabler, Berlin Heidelberg: 2014.
- [Lia-2010] Liao, Y.; Hong, P.; Rao, S. S.: "Supply Management, Supply Flexibility and Performance Outcomes: An Empirical Investigation of Manufacturing Firms". In: *Journal of Supply Chain Management* Jg. 46, Nr. 3 (2010), S. 6–22.
- [Lik-2004] Liker, J. K.: The Toyota way: Fourteen management principles from the world's greatest manufacturer. Soundview Executive Book Summaries, Concordville, Norwood: 2004.
- [Lim-2012] Limère, V.; van Landeghem, H.; Goetschalckx, M.; Aghezzaf, E.-H.; McGinnis, L. F.: "Optimising part feeding in the automotive assembly industry: Deciding between kitting and line stocking". In: *International Journal of Production Research* Jg. 50, Nr. 15 (2012), S. 4046–4060.
- [Lim-2015] Limère, V.; van Landeghem, H.; Goetschalckx, M.: "A decision model for kitting and line stocking with variable operator walking distances". In: *Assembly Automation* Jg. 35, Nr. 1 (2015), S. 47–56.

- [Lum-2005] Lummus, R. R.; Vokurka, R. J.; Duclos, L. K.: "Delphi study on supply chain flexibility". In: *International Journal of Production Research* Jg. 43, Nr. 13 (2005), S. 2687–2708.
- [Lun-2013] Lunze, J.: Regelungstechnik. Lehrbuch. Springer, Berlin [u.a.]: 2013.
- [Maa-2016] Maas, C.; Günther, J.; Intra, C.; Günthner, W. A.: "Identification of parts with logistics potential regarding the inbound supply performance". In: *Joining P&OM forces worldwide*. P&OM: 2016.
- [Maa-2017a] Maas, C.; Fottner, J.: Flexibilität in der Inbound-Logistik der Automobilindustrie: Aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching: 2017.
- [Maa-2017b] Maas, C.; Intra, C.; Fottner, J.: "Decision-making for assessing flexible switches of inbound supply concepts in the automotive industry". In: *Proceedings of the 24th International Annual EurOMA Conference (2017)*.  
URL: [http://euroma2017.eiasm.org/userfiles/HJKMLKE\\_GDFJMK\\_VW8TH8GJ.pdf](http://euroma2017.eiasm.org/userfiles/HJKMLKE_GDFJMK_VW8TH8GJ.pdf).
- [Maa-2017c] Maas, C.; Tisch, A.; Intra, C.; Fottner, J.: "Integrated Optimization of Transportation and Supply Concepts in the Automotive Industry". In: *Proceedings 31st European Conference on Modelling and Simulation*. Hrsg. von Paprika, Z. Z.; Horák, P.; Váradi, K.; Zwierczyk, P. T.; Vidovics-Dancs, Á.; Rádics, J. P. ECMS, Deutschland: 2017, S. 495–501.
- [Mad-1960] Madansky, A.: "Inequalities for stochastic linear programming problems". In: *Management Science* Jg. 6, Nr. 2 (1960), S. 197–204.
- [Mas-2012] Mason, A. J.: "OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel". In: *Operations research proceedings 2011*. Hrsg. von Klatte, D.; Lüthi, H.-J.; Schmedders, K. Operations Research Proceedings, Gesellschaft für Operations Research e.V. (GOR). Springer, Berlin, Heidelberg: 2012, S. 401–406.
- [McG-1989] McGinnis, M. A.: "A Comparative Evaluation of Freight Transportation Choice Models". In: *Transportation Journal* Jg. 29, Nr. 2 (1989), S. 36–46.
- [Mei-2008] Meixell, M. J.; Norbis, M.: "A review of the transportation mode choice and carrier selection literature". In: *The International Journal of Logistics Management* Jg. 19, Nr. 2 (2008), S. 183–211.

- [Mei-2009] Meissner, S.: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching bei München: 2009.
- [Mei-2013] Meissner, S.: "Schlanke Materialversorgungsprozesse am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers". In: *Lean Logistics*. Hrsg. von Günthner, W. A.; Boppert, J. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg: 2013, S. 293–304.
- [Men-2007] Mendonça Tachizawa, E.; Giménez Thomsen, C.: "Drivers and sources of supply flexibility: An exploratory study". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 27, Nr. 10 (2007), S. 1115–1136.
- [Mer-2011] Merschmann, U.; Thonemann, U. W.: "Supply chain flexibility, uncertainty and firm performance: An empirical analysis of German manufacturing firms". In: *International Journal of Production Economics* Jg. 130, Nr. 1 (2011), S. 43–53.
- [Mit-2017] Mittag, H.-J.: Statistik: Eine Einführung mit interaktiven Elementen. Lehrbuch. Springer, Berlin: 2017.
- [Möh-2009] Möhrle, M. G.; Walter, L.: Patentierung von Geschäftsprozessen: Monitoring – Strategien – Schutz. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg: 2009.
- [Möl-2008] Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Bd. 212. Forschungsberichte IWB. Herbert Utz Verlag, München: 2008.
- [MöB-2007] Mößmer, H. E.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A.: "Die automobilen Welt im Umbruch". In: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Hrsg. von Günthner, W. A. VDI. Springer, Berlin [u.a.]: 2007, S. 3–15.
- [Mül-2014] Müller, D.: Investitionscontrolling. Springer Gabler, Berlin Heidelberg: 2014.
- [Nag-2003] Nagel, M.: Flexibilitätsmanagement: Ein systemdynamischer Ansatz zur quantitativen Bewertung von Produktionsflexibilität. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden: 2003.
- [Nem-2003] Nembhard, H.; Shi, L.; Aktan, M.: "A Real Options Design for Product Outsourcing". In: *The Engineering Economist* Jg. 48, Nr. 3 (2003), S. 199–217.
- [Nem-2005] Nembhard, H.; Shi, L.; Aktan, M.: "A real-options-based analysis for supply chain decisions". In: *IIE Transactions* Jg. 37, Nr. 10 (2005), S. 945–956.

- [Nem-2014] Nembhard, D. A.: "Cross training efficiency and flexibility with process change". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 34, Nr. 11 (2014), S. 1417–1439.
- [Nyh-2007] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Brieke, M.: "Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance". In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* Jg. 19, Nr. 3 (2007), S. 286–307.
- [Nyh-2008] Nyhuis, P.: "Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik". In: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Hrsg. von Nyhuis, P. Springer, Berlin, Heidelberg: 2008, S. 1–17.
- [Obo-2014] Oborski, P.: "Developments in integration of advanced monitoring systems". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Jg. 75, Nr. 9-12 (2014), S. 1613–1632.
- [Ōno-2009] Ōno, T.: *Das Toyota-Produktionssystem*. Campus-Verlag, Frankfurt a. M., New York: 2009.
- [Özs-2012] Özsahin, M. E.; Schukraft, S.; Scholz-Reiter, B.: "Wandlungsfähige Logistikstrukturen: Eine Vorgehensmethode zur Konfiguration und Bewertung wandlungsfähiger Logistikstrukturen in bestehenden Wertschöpfungsnetzwerken". In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* Jg. 107, Nr. 9 (2012), S. 608–612.
- [Pap-2015] Papageorgiou, M.; Leibold, M.; Buss, M.: *Optimierung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg: 2015.
- [Pfe-2016] Pfeiffer, D.: *Flexibility planning in distribution networks: A flexibility planning model for the consumer goods industry*. Bd. 53. *Advances in information systems and management science*. Logos Verlag, Berlin: 2016.
- [Pfo-1994] Pfohl, H.-C.: *Logistikmanagement – Funktionen und Instrumente*. Springer, Berlin, Heidelberg: 1994.
- [Pfo-2010] Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Springer, Berlin, Heidelberg: 2010.
- [Pra-2001] Prater, E.; Biehl, M.; Smith, M. A.: "International supply chain agility - Tradeoffs between flexibility and uncertainty". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 21, Nr. 5 (2001), S. 823–839.
- [Prz-2007] Przepadlo, T.: "In- und Outbound-Logistik eines 1st Tier Zulieferers: Logistikdienstleistereinsatz im automobilen Netzwerk". In: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Hrsg. von Günthner, W. A. VDI. Springer, Berlin [u.a.]: 2007, S. 231–243.



- [Puj-2004] Pujawan, N.: "Assessing supply chain flexibility: A conceptual framework and case study". In: *International Journal of Integrated Supply Management* Jg. 1, Nr. 1 (2004), S. 79–97.
- [Rab-2009] Rabl, M.: "Kreativitätstechniken". In: *Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement*. Hrsg. von Gaubinger, K.; Werani, T.; Rabl, M. Gabler, Wiesbaden: 2009, S. 75–90.
- [Rei-2002] Reith-Ahlemeier, G.: Ressourcenorientierte Bestellmengenplanung und Lieferantenauswahl: Modelle und Algorithmen für Supply Chain Optimierung und E-Commerce. Books on Demand, Norderstedt: 2002.
- [Röß-2016] Rößler, I.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler: Eine anwendungsorientierte Darstellung. Springer, Berlin, Heidelberg: 2016.
- [Ruh-2016] Ruh, D.: "Just-in-Time-Versorgung eines Just-in-Sequence-Produktionswerkes über eine Distanz von 2.500 km". In: *Logistik der Zukunft – Logistics for the Future*. Hrsg. von Göpfert, I. Springer, Wiesbaden: 2016, S. 251–268.
- [Run-2015] Runkler, T. A.: Data Mining: Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. Computational Intelligence. Springer, Wiesbaden: 2015.
- [Saa-1980] Saaty, T. L.: The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill International Book Co., New York, London: 1980.
- [Saa-1987] Saaty, R. W.: "The analytic hierarchy process – What it is and how it is used". In: *Mathematical Modelling* Jg. 9, Nr. 3-5 (1987), S. 161–176.
- [Saa-1990] Saaty, T. L.: "How to make a decision: The analytic hierarchy process". In: *European Journal of Operational Research* Jg. 48, Nr. 1 (1990), S. 9–26.
- [Sal-2015] Sali, M.; Sahin, E.; Patchong, A.: "An empirical assessment of the performances of three line feeding modes used in the automotive sector: Line stocking vs. kitting vs. sequencing". In: *International Journal of Production Research* Jg. 53, Nr. 5 (2015), S. 1439–1459.
- [Sam-2005] Sambasivan, M.; Yahya, S.: "A Lagrangean-based heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers". In: *Computers & Operations Research* Jg. 32, Nr. 3 (2005), S. 537–555.
- [Sán-2005] Sánchez, A. M.; Pérez, M. P.: "Supply chain flexibility and firm performance: A conceptual model and empirical study in the automo-

- tive industry". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 25, Nr. 7 (2005), S. 681–700.
- [Sch-2005] Schmölzer, T.; Schöfer, J.: "Bedarfsorientiertes Behältermanagement zur Kostenreduzierung in der Automobilindustrie". In: *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft (ZfAW)*, Nr. 5 (2005), S. 1–6.
- [Sch-2008a] Schedlbauer, M. J.: Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching bei München: 2008.
- [Sch-2008b] Scholz-Reiter, B.; Beer, C. de; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J. T.: "Dynamik logistischer Systeme". In: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Hrsg. von Nyhuis, P. Springer, Berlin, Heidelberg: 2008, S. 109–138.
- [Sch-2010a] Schendera, C. F. G.: Clusteranalyse mit SPSS – Mit Faktorenanalyse. Oldenbourg, München: 2010.
- [Sch-2010b] Schöneberg, T.; Koberstein, A.; Suhl, L.: "An optimization model for automated selection of economic and ecologic delivery profiles in area forwarding based inbound logistics networks". In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* Jg. 22, Nr. 3-4 (2010), S. 214–235.
- [Sch-2016] Schlott, S.; Klinker, C.: "Nutzfahrzeuge: Verschlungene Wege in die Zukunft". In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* Jg. 118, Nr. 5 (2016), S. 8–13.
- [Sch-2017a] Schröder, F.: Vorgehensweise zur Implementierung von logistischen Kennzahlensystemen im Umfeld der Automobilindustrie. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Garching bei München: 2017.
- [Sch-2017b] Schulte, C.: Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain. Vahlen, München: 2017.
- [See-2013] Seebacher, G.; Winkler, H.: "A Citation Analysis of the Research on Manufacturing and Supply Chain Flexibility". In: *International Journal of Production Research* Jg. 51, Nr. 11 (2013), S. 3415–3427.
- [Set-1990] Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: "Flexibility in manufacturing: A survey". In: *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* Jg. 2, Nr. 4 (1990).
- [Sha-2007] Sharma, M. K.; Bhagwat, R.: "An integrated BSC-AHP approach for supply chain management evaluation". In: *Measuring Business Excellence* Jg. 11, Nr. 3 (2007), S. 57–68.

- [Sla-1983] Slack, N.: "Flexibility as a Manufacturing Objective". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 3, Nr. 3 (1983), S. 4–13.
- [Smi-1995] Smith, J. E.; Nau, R. F.: "Valuing Risky Projects: Option Pricing Theory and Decision Analysis". In: *Management Science* Jg. 41, Nr. 5 (1995), S. 795–816.
- [Sny-1973] Snyder, R. D.: "The Classical Economic Order Quantity Formula". In: *Journal of the Operational Research Society* Jg. 24, Nr. 1 (1973), S. 125–127.
- [Sta-2010] Stadtler, H.: "Lineare und Gemischt-Ganzzahlige Optimierung". In: *Supply-Chain-Management und Advanced Planning*. Hrsg. von Stadtler, H. Springer, Berlin und Heidelberg: 2010, S. 427–440.
- [Ste-1971] Stempell, D.: Handbuch der Netzplantechnik. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Weisbaden: 1971.
- [Ste-2007] Stevenson, M.; Spring, M.: "Flexibility from a supply chain perspective: definition and review". In: *International Journal of Operations & Production Management* Jg. 27, Nr. 7 (2007), S. 685–713.
- [Sua-1995] Suarez, F. F.; Cusumano, M. A.; Fine, C. H.: "An Empirical Study of Flexibility in Manufacturing". In: *Sloan Management Review* Jg. 37, Nr. 1 (1995), S. 25–32.
- [Swa-2006] Swafford, P. M.; Ghosh, S.; Murthy, N.: "The antecedents of supply chain agility of a firm: Scale development and model testing". In: *Journal of Operations Management* Jg. 24, Nr. 2 (2006), S. 170–188.
- [Swa-2007] Swaminathan, J. M.; Nitsch, T. R.: "Managing Product Variety in Automobile Assembly: The Importance of the Sequencing Point". In: *Interfaces* Jg. 37, Nr. 4 (2007), S. 324–333.
- [Tem-2008] Tempelmeier, H.: *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen*. Springer, Berlin: 2008.
- [ten-2008] ten Hompel, M.; Heidenblut, V.: *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. VDI. Springer, Berlin, Heidelberg: 2008.
- [Thu-2007] Thun, J.; Marble, R. P.; Silveira-Camargos, V.: "A Conceptual Framework and Empirical Results of the Risk and Potential of Just in Sequence: A Study of the German Automotive Industry". In: *Journal of Operations and Logistics* Jg. 1, Nr. 2 (2007), S. I.1–I.13.

- [Tib-2006] Tibben-Lembke, R. S.; Rogers, D. S.: "Real options: Applications to logistics and transportation". In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Jg. 36, Nr. 4 (2006), S. 252–270.
- [Tiw-2015] Tiwari, A. K.; Tiwari, A.; Samuel, C.: "Supply chain flexibility: A comprehensive review". In: *Management Research Review* Jg. 38, Nr. 7 (2015), S. 767–792.
- [Ton-1998] Toni, A. de; Tonchia, S.: "Manufacturing flexibility: A literature review". In: *International Journal of Production Research* Jg. 36, Nr. 6 (1998), S. 1587–1617.
- [Tri-1996] Trigeorgis, L.: *Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation*. MIT Press, Cambridge, Mass. [u.a.]: 1996.
- [Tuk-1977] Tukey, J. W.: *Exploratory data analysis*. The Addison-Wesley series in behavioral science. Addison-Wesley, Reading, Mass. [u.a.]: 1977.
- [Upt-1994] Upton, D. M.: "The Management of Manufacturing Flexibility". In: *California Management Review* Jg. 36, Nr. 2 (1994), S. 72–89.
- [VDA-2014] Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA): *Jahresbericht 2014*. VDA, Berlin: 2014.
- [VDA-2016] Verband der Automobilindustrie (VDA) e. V.: *Jahresbericht 2016: Die Automobilindustrie in Daten und Fakten*. VDA, Berlin: 2016.
- [VDA 4905] Automobilindustrie e. V., V. der: *Daten-Fern-Übertragung von Lieferabrufen*. VDA-Richtlinie, Nr. 4905. 1996.
- [VDA 4915] Automobilindustrie e.V., V. der: *Daten-Fern-Übertragung von Feinabrufen*. VDA-Richtlinie, Nr. 4915. 1996.
- [VDA 4916] Automobilindustrie e.V., V. der: *Daten-Fern-Übertragung von Produktionssynchronen Abrufen*. VDA-Richtlinie, Nr. 4916. 1991.
- [VDA 5010] Automobilindustrie e. V., V. der: *5010 - Standardbelieferungsformen*. VDA-Richtlinie, Nr. 5010. 2008.
- [VDI 2512] Ingenieure, V. D.: *Just-in-Time-/Just-in-Sequence-Prinzipien zur Verknüpfung von Fertigungsstufen in der Produktion*. VDI-Richtlinie, Nr. 2512. 2012.
- [VDI 2691] Ingenieure, V. D.: *Optimale Bestellmenge*. VDI-Richtlinie, Nr. 2691. 1999.
- [VDI 2870-1] Ingenieure, V. D.: *Ganzheitliche Produktionssysteme – Grundlagen, Einführung und Bewertung*. VDI-Richtlinie, Nr. 2870 Blatt 1. 2012.
- [VDI 2870-2] Ingenieure, V. D.: *Ganzheitliche Produktionssysteme – Methodenkatalog*. VDI-Richtlinie, Nr. 2870 Blatt 2. 2013.

- [VDI 3330] Ingenieure, V. D.: Kosten des Materialflusses. VDI-Richtlinie, Nr. 3330. 2007.
- [VDI 3694] Ingenieure, V. D.: Lastenheft / Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen. VDI-Richtlinie, Nr. 3694. 2014.
- [VDI 6025] Ingenieure, V. D.: Betriebswirtschaftliche Berechnung für Investitionsgüter und Anlagen. VDI-Richtlinie, Nr. 6025. 2012.
- [Vic-1999] Vickery, S. K.; Calantone, R.; Droge, C.: "Supply Chain Flexibility: An Empirical Study". In: *The Journal of Supply Chain Management* Jg. 35, Nr. 3 (1999), S. 16–24.
- [Vis-2001] Viswanathan, S.; Piplani, R.: "Coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs". In: *European Journal of Operational Research* Jg. 129, Nr. 2 (2001), S. 277–286.
- [Vok-1998] Vokurka, R. J.; Fliedner, G.: "The journey toward agility". In: *Industrial Management & Data Systems* Jg. 98, Nr. 4 (1998), S. 165–171.
- [Vok-2000] Vokurka, R. J.; O'Leary-Kelly, S. W.: "A review of empirical research on manufacturing flexibility". In: *Journal of Operations Management* Jg. 18 (2000), S. 485–501.
- [Wag-2011] Wagner, S. M.; Silveira-Camargos, V.: "Decision model for the application of just-in-sequence". In: *International Journal of Production Research* Jg. 49, Nr. 19 (2011), S. 5713–5736.
- [Wag-2012] Wagner, S. M.; Silveira-Camargos, V.: "Managing Risks in Just-In-Sequence Supply Networks: Exploratory Evidence From Automakers". In: *IEEE Transactions on Engineering Management* Jg. 59, Nr. 1 (2012), S. 52–64.
- [Wan-2014] Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung. Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin: 2014.
- [Web-2012] Weber, J.: Logistikkostenrechnung: Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik. Springer Vieweg, Berlin: 2012.
- [Wer-2003] Werner, S.; Kellner, M.; Schenk, E.; Weigert, G.: "Just-in-sequence material supply – a simulation based solution in electronics production". In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Jg. 19, Nr. 1-2 (2003), S. 107–111.
- [Wer-2004] Werner, M.: Einflussfaktoren des Wissenstransfers in wissensintensiven Dienstleistungsunternehmen: Eine explorativ-empirische Untersuchung bei Unternehmensberatungen. Gabler Edition Wissenschaft. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden: 2004.

- [Wes-2015] Weskamp, M.; Braun, A.-T.; Bauernhansl, T.: "Real Option-based Evaluation of Eco-oriented Investment Using the Example of Closed-loop Supply Chains". In: *Procedia CIRP* Jg. 33 (2015), S. 151–156.
- [Wey-2002] Weyer, M.: Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem. Helmesverlag, Karlsruhe: 2002.
- [Wie-2002] Wiendahl, H.-P.: "Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik". In: *wt Werkstattstechnik online* Jg. 92, Nr. 4 (2002), S. 122–127.
- [Wie-2007] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: "Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation". In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* Jg. 56, Nr. 2 (2007), S. 783–809.
- [Wil-2001] Wildemann, H.: Das Just-in-time-Konzept: Produktion und Zulieferung auf Abruf. Bd. 4. TCW. Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management, München: 2001.
- [Wil-2004] Wildemann, H.: "Monitoring von Geschäftsprozessen". In: *VDI-Zeitschrift* Jg. 146, Nr. 10 (2004), S. 80–83.
- [Wil-2007] Wildemann, H.: "Die adaptive, kundenorientierte Value Chain". In: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Hrsg. von Günthner, W. A. VDI. Springer, Berlin [u.a.]: 2007, S. 103–121.
- [Wil-2011] Williams, G. J.: Data mining with Rattle and R: The art of excavating data for knowledge discovery. Springer, New York: 2011.
- [Wil-2013] Williams, H. P.: Model building in mathematical programming. John Wiley & Sons, Chichester, England: 2013.
- [Win-2009] Winkler, H.: "How to improve supply chain flexibility using strategic supply chain networks". In: *Logistics Research* Jg. 1, Nr. 1 (2009), S. 15–25.
- [Wit-2015] Wittenbrink, P., Hrsg.: Green Logistics. Springer, Wiesbaden: 2015.
- [Wom-2004] Womack, J. P.; Jones, D. T.: Lean thinking: Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern. Management. Campus-Verlag, Frankfurt a. M., New York: 2004.
- [Yi-2011] Yi, C. Y.; Ngai, E. W. T.; Moon, K. L.: "Supply chain flexibility in an uncertain environment: exploratory findings from five case studies". In: *Supply Chain Management: An International Journal* Jg. 16, Nr. 4 (2011), S. 271–283.
- [Zha-2005] Zhang, Q.; Vonderembse, M. A.; Lim, J.-S.: "Logistics flexibility and its impact on customer satisfaction". In: *The International Journal of Logistics Management* Jg. 16, Nr. 1 (2005), S. 71–95.

- [Zsi-2003] Zsidisin, G. A.; Ellram, L. M.: "An Agency Theory Investigation of Supply Risk Management". In: *The Journal of Supply Chain Management* Jg. 39, Nr. 3 (2003), S. 15–27.





## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

---

Im Rahmen der Anfertigung dieser Dissertation wurden die nachfolgenden Studienarbeiten am Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) unter wissenschaftlicher und inhaltlicher Leitung der Autorin erarbeitet. Inhalte und Gedanken, die bei der Betreuung entstanden und in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind, wurden an den entsprechenden Stellen vermerkt. Ein herzlicher Dank geht an dieser Stelle an die betreuten Studentinnen und Studenten für ihren Einsatz.

<b>Kurzbeleg</b>	<b>Titel</b>	<b>Autor</b>	<b>Art</b>	<b>Jahr</b>
[fml-2015a]	Development of a Forecasting Framework within a volatile Environment in the Commercial Vehicle Industry	Segarra Sánchez-Cutillas, Ernesto	Master's Thesis	03/2015
[fml-2015b]	Entwicklung einer Bewertungsmethode für Flexibilität in der Inbound-Logistik der Nutzfahrzeugindustrie	Forster, Annette	Master's Thesis	06/2015
[fml-2015c]	Standardisierung des Prozesses zur Umstellung auf Just-in-Sequence Belieferung in der Nutzfahrzeugindustrie	Haid, Charlotte	Semesterarbeit	06/2015
[fml-2015d]	Entwicklung eines Konzeptes für eine modulare Inbound-Logistik in der Nutzfahrzeugindustrie	Weißborn, Sebastian	Bachelor's Thesis	09/2015
[fml-2015e]	Variabilisierung von Inhouse Logistikpersonalkosten - Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Schiwall, Harald	Master's Thesis	09/2015
[fml-2015f]	Flexibilität in der schlanken Inbound-Logistik der Automobilindustrie	Klein, Stefan	Semesterarbeit	10/2015
[fml-2016a]	Entwicklung einer Vorgehensweise zur Erkennung von Logistikpotenzialen und wirtschaftliche Bewertung alternativer Inbound Logistikkonzepte ausgewählter Bauteile - Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Günther, Jan	Master's Thesis	01/2016

<b>Kurzbeleg</b>	<b>Titel</b>	<b>Autor</b>	<b>Art</b>	<b>Jahr</b>
[fml-2016b]	Entwicklung eines Modells zur wirtschaftlichen Bewertung von Belieferungskonzepten bei variierenden Einflussfaktoren - Eine Anwendung auf Beispielszenarien der MAN Truck & Bus AG	Legner, Sarah	Bachelor's Thesis	03/2016
[fml-2016c]	Untersuchung von Einflüssen auf die Inbound-Logistik im Kontext von Flexibilität	Knauer, Sophia	Bachelor's Thesis	06/2016
[fml-2016d]	Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Auswahl des Materialversorgungsprozesses und der Zeithaushaltberechnung von Just-in-Sequence-Anlieferungen für Bauteile in der Automobilindustrie	Munz, Josef	Master's Thesis	07/2016
[fml-2016e]	Entwicklung eines Modells zur integrierten Optimierung von Transport- und Belieferungskonzepten der Inbound-Logistik - Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Tisch, Andreas	Master's Thesis	09/2016
[fml-2016f]	Entwicklung eines prozessorientierten Logistikkostenmodells zur Bewertung alternativer Belieferungskonzepte im Sourcing-Prozess	Minov, Valentin	Master's Thesis	12/2016
[fml-2017a]	Monitoringmethode für Belieferungskonzepte der Inbound-Logistik von ausgewählten Bauteilen - Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Berger, Kai	Master's Thesis	01/2017
[fml-2017b]	Modell zur kostenbasierten Bewertung bei Umstellentscheidungen von Logistikkonzepten in der Inbound-Logistik - Eine Untersuchung am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Pokoj, Stephanie	Master's Thesis	09/2017
[fml-2017c]	Flexible Umstellung von Logistikkonzepten in der Nutzfahrzeugindustrie	Müller, Christiane	Bachelor's Thesis	11/2017
[fml-2018]	Validierung eines Steuerungskonzeptes für eine flexible Inbound-Logistik anhand einer standardisierten Implementierung in der Nutzfahrzeugindustrie	Burchardt, Solveigh Alexandra	Master's Thesis	01/2018

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1-1:	Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 2-1:	Abgrenzung verschiedener Logistiksysteme der Unternehmenslogistik	10
Abbildung 2-2:	Bestandteile der taktischen Materiallogistik	11
Abbildung 2-3:	Sourcing-Konzepte	12
Abbildung 2-4:	Belieferungskonzepte	13
Abbildung 2-5:	Transportkonzepte	16
Abbildung 2-6:	Schalenmodell zur Veränderlichkeit in der Fabrik	26
Abbildung 2-7:	Exemplarische Strukturierung von Supply Chain Flexibilität	28
Abbildung 2-8:	Haupterkenntnisse einer Praxisstudie	40
Abbildung 2-9:	Zwischenfazit zum Stand der Forschung und Technik	43
Abbildung 2-10:	Struktur des Kapitels über Planungsmethoden zur Konfiguration einer flexiblen Inbound-Logistik	44
Abbildung 2-11:	Schematische Darstellung der ABC-XYZ-GMK-Analyse	47
Abbildung 2-12:	Übersicht über Clusteranalyseverfahren	48
Abbildung 2-13:	Entscheidungsbaum für die Auswahl des Transportkonzeptes	54
Abbildung 2-14:	Exkurs-figure	57
Abbildung 2-15:	Übersicht der Investitionsrechenverfahren	64
Abbildung 3-1:	Wirkungsablauf der Steuerung	75
Abbildung 3-2:	Wirkungsablauf zur Steuerung der Inbound-Logistik	76
Abbildung 3-3:	Planungsbausteine des Steuerungskonzeptes	78
Abbildung 4-1:	Vorgehen zur Ermittlung der relevanten Einflussfaktoren	84
Abbildung 4-2:	Zusammenhang der verwendeten Methoden zur Identifikation der Grenzbauteile	90
Abbildung 4-3:	Schematische Darstellung eines Boxplots	93
Abbildung 4-4:	Grundidee der Grenzwertbestimmung von Einflussfaktoren	94
Abbildung 4-5:	Anwendungsvorgehen des k-Means-Verfahrens	98
Abbildung 4-6:	Exemplarische Darstellung eines Screeplots	99
Abbildung 4-7:	Vorgehensweise bei der Grenzbauteilidentifikation	101
Abbildung 4-8:	Schematischer Zusammenhang der univariaten und multivariaten Grenzbauteile	102

Abbildung 5-1:	Betrachtete Optimierungsszenarien im Rahmen des Steuerungskonzeptes	110
Abbildung 5-2:	Prozessaktivitäten der lagerhaltigen Belieferung	115
Abbildung 5-3:	Prozessaktivitäten der lagerlosen Belieferung	115
Abbildung 6-1:	Vorgehen zur Entwicklung des Flexibilitätsansatzes	137
Abbildung 6-2:	Vorgehen zur Bestimmung der Inhalte des Umstellprozesses	139
Abbildung 6-3:	Exemplarischer Netzplan der Arbeitspakete für die Umstellung von einer lagerhaltigen Belieferung auf eine JIS-Belieferung	143
Abbildung 6-4:	Schematische Darstellung der möglichen Umstellenszenarien	144
Abbildung 6-5:	Methode zur systematischen Bewertung der Kosten und Dauern von Umstellungen	147
Abbildung 6-6:	Vorgehensweise bei der Modellierung der Realoptionen von Logistikkonzeptumstellungen	152
Abbildung 6-7:	Veranschaulichung der Idee des Binomialmodells für einen exemplarischen Bauteilbedarf	155
Abbildung 6-8:	Exemplarische Darstellung der Logistikkosten je Logistikkonzept in Abhängigkeit von der Bedarfsgrenze	156
Abbildung 6-9:	Exemplarische Darstellung der Bedarfsentwicklung, der Zahlungsströme je Logistikkonzept und der Ausweisung des günstigeren Logistikkonzeptes	157
Abbildung 7-1:	Struktur des Anwendungskapitels	167
Abbildung 7-2:	Ergebnisse aus univariater Analyse	169
Abbildung 7-3:	Ergebnisse aus der AHP-Analyse und Priorisierung der univariaten Grenzbauteile	171
Abbildung 7-4:	Ergebnis der Validierung unterteilt nach multivariaten und univariaten Grenzbauteilen	175
Abbildung 7-5:	Ergebnisse des Optimierungsmodells zu den betrachteten Fallbeispielen	182
Abbildung 7-6:	Umstellkosten und Umstelldauer je Grenzbauteil vor und nach Flexibilisierung	189
Abbildung 7-7:	Barwert der Zahlungsströme bei Verwendung von $LK_1$ und $LK_2$ mit unterschiedlichen Bedarfsschwankungen	192
Abbildung 7-8:	Ergebnisse der Modellstufen 2a und 3	193
Abbildung 7-9:	Ergebnisse des Entscheidungsmodells für Frontklappen	195

---

Abbildung B-1:	Schematische Visualisierung zur Berechnung des Bestands einer Periode	B-1
Abbildung B-2:	Exemplarischer Verlauf der Transportkosten der Gebietsspedition	B-1
Abbildung B-3:	Exemplarische Darstellung des Effektes von Anlieferfrequenzen	B-6
Abbildung C-1:	Exemplarischer Balkenplan	C-1
Abbildung C-2:	Verdeutlichung des Realoptionsmodells der Stufe 1 anhand eines numerischen Beispiels	C-4
Abbildung D-1:	Auswertung der vorliegenden Daten und der Datenbereinigung	D-2
Abbildung D-2:	Fehlerwerte je Einflussfaktor und Datensätze beider Analysen	D-3
Abbildung D-3:	Vereinfachtes Beispiel der Problematik der Variantenanzahl auf SNR-Ebene	D-4
Abbildung D-4:	Boxplots für Bauteilgewicht und Bauteilvolumen	D-5
Abbildung D-5:	Boxplots für Bauteilpreis und Variantenanzahl	D-5
Abbildung D-6:	Boxplots für Bedarf und Bedarfsschwankungen	D-5
Abbildung D-7:	Modellprüfgrößen und Screeplot von Clusterlösungen	D-8
Abbildung D-8:	Exemplarischer Screenshot des in MS Excel implementierten Optimierungsmodells	D-11
Abbildung D-9:	Screenshot des Excel-Tools zur Bewertung von Umstellkosten und Umstell dauern	D-15
Abbildung D-10:	Entwicklung der zu verwendenden Logistikkonzepte entsprechend der Bedarfsentwicklung	D-19
Abbildung D-11:	Ergebnisse der Modellstufen 2a, 4a, 4b.1 und 4b.2	D-20
Abbildung D-12:	Ergebnisse der Modellstufen 5a.1, 5a.2, 5b.1 und 5b.2	D-20



## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2-1: Definitionen von Logistikflexibilität	28
Tabelle 2-2: Definitionen von Beschaffungsflexibilität	29
Tabelle 2-3: Definitionen von Belieferungs- und Lieferflexibilität	30
Tabelle 2-4: Hebel der Belieferungsflexibilität	32
Tabelle 2-5: Forschungsmatrix – Strukturierung der vorgestellten Ansätze	34
Tabelle 2-6: Kriterien für die qualitative Belieferungskonzeptauswahl	52
Tabelle 2-7: Ausgewählte Beiträge zur quantitativen Auswahl von Bereitstell- und Belieferungskonzepten	56
Tabelle 3-1: Forschungsleitende Fragestellung und untergeordnete Forschungsfragen	71
Tabelle 3-2: Anforderungen an das zu entwickelnde Steuerungskonzept	72
Tabelle 4-1: Anforderungen an die Methode zur Identifikation von Bauteilen mit Umstellpotenzial	82
Tabelle 4-2: Eigenschaften zur Strukturierung der Einflüsse	86
Tabelle 4-3: Relevante Einflussfaktoren für die Grenzbauteilidentifikation	88
Tabelle 4-4: Bewertung bestehender Materialklassifikationsansätze hinsichtlich der Anforderungen	89
Tabelle 4-5: Berechnungsgrundlage der Grenzwerte je Einflussfaktor und Belieferungsgruppe	95
Tabelle 4-6: Exemplarische Priorisierung der univariaten Grenzbauteile für zwei Einflussfaktoren	103
Tabelle 4-7: Kontrollfragen zur Validierung der Grenzbauteile	105
Tabelle 5-1: Anforderungen an das Optimierungsmodell	111
Tabelle 5-2: Zuordnung der Kostenkomponenten zu den verschiedenen Logistikkonzepten	117
Tabelle 5-3: Bedeutung der Nebenbedingungen des Optimierungsmodells	127
Tabelle 5-4: Ergänzende Nebenbedingungen zur Modellierung von Anlieferfrequenzen	132
Tabelle 6-1: Anforderungen an den Flexibilitätsansatz	135
Tabelle 6-2: Arbeitspakete von Logistikkonzeptumstellungen	140
Tabelle 6-3: Arten der Umstellkosten und Treiber der Umstelldauer je Arbeitspaket	145

Tabelle 6-4: Bewertung der Investitionsverfahren hinsichtlich der gestellten Anforderungen	149
Tabelle 7-1: Grenzwerte je Einflussfaktor und Belieferungsgruppe	168
Tabelle 7-2: Auswertung der 13-Clusterlösung	172
Tabelle 7-3: Mittelwerte der Einflussfaktoren je Grenzbauteil-Cluster	173
Tabelle 7-4: Auswertung der Grenzbauteillisten	174
Tabelle 7-5: Übersicht zu den Rahmenbedingungen der drei Fallbeispiele	180
Tabelle 7-6: Rahmenbedingungen von vier ausgewählten Grenzbauteilumstellungen	186
Tabelle 7-7: Kosten und Dauern vier ausgewählter Grenzbauteilumstellungen	187
Tabelle 7-8: Durchschnittliche Effekte aus Flexibilisierungsmaßnahmen	189
Tabelle 7-9: Spezifizierung der Modellstufen	190
Tabelle A-1: Identifizierung und Charakterisierung der Einflüsse auf die Inbound-Logistik	A-1
Tabelle C-1: Relevante Arbeitspakete bei der Erst-Umstellung	C-1
Tabelle C-2: Relevante Arbeitspakete bei einer Rück-Umstellung	C-2
Tabelle C-3: Relevante Arbeitspakete bei einer Erneut-Umstellung	C-2
Tabelle C-4: Input-Parameter für die Veranschaulichung von Stufe 1	C-4
Tabelle D-1: Input-Daten für die Anwendung der Identifikationsmethode	D-1
Tabelle D-2: Ergebnisse der AHP-Analyse	D-7
Tabelle D-3: Statistische Kennzahlen der 13-Clusterlösung	D-9
Tabelle D-4: Detaillierung der Arbeitspakete in Aktivitäten	D-12
Tabelle D-5: Zuordnung der Aktivitäten zu den verschiedenen Logistikkonzeptumstellungen	D-13
Tabelle D-6: Rahmenbedingungen der Grenzbauteilumstellungen	D-16
Tabelle D-7: Kosten und Dauern der Grenzbauteilumstellungen	D-17
Tabelle D-8: Input-Parameter für die Verhaltensanalyse des Entscheidungsmodells	D-18
Tabelle D-9: Input-Parameter für Frontklappen zur Anwendung des Entscheidungsmodells	D-21



## Anhang A Ergänzungen zur Identifikationsmethode

### Einflussfaktoren

Tabelle A-1 zeigt die identifizierten Einflüsse auf die Effizienz der Inbound-Logistik, die aus Literaturrecherche und Expertengesprächen resultiert sind (vgl. auch [fml-2016a, S. A-4 f. fml-2015b, S. 48 ff.]). Zudem sind die Einflüsse jeweils hinsichtlich der Eigenschaften aus Tabelle 4-2 charakterisiert. In der letzten Spalte *rel. EF* sind diejenigen Einflüsse mit *ja* gekennzeichnet, bei denen alle in Kapitel 4.2.3 festgelegten Ausprägungen zutreffend sind. Die Nummerierung der Kategorien (*Kat.*) besitzt folgende Bedeutung:

1 =	Bauteil	5 =	Kunden
2 =	Lieferanten	6 =	Produktionsprozess
3 =	Inbound-Prozess	7 =	Produktionsstandort
4 =	Inhouse-Prozess		

Tabelle A-1: Identifizierung und Charakterisierung der Einflüsse auf die Inbound-Logistik (Teil 1/3)

Nr.	Kat.	Einfluss	EA	B	M	VH	rel. EF
1	1	Bauteilgewicht	direkt	hoch	hoch	mittel	ja
2	1	Bauteilvolumen/-größe	direkt	hoch	hoch	mittel	ja
3	1	Bauteilpreis/-wert	direkt	hoch	hoch	mittel	ja
4	1	Bauteilqualität	direkt	hoch	gering	mittel	nein
5	1	Behälterfüllgrad	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
6	1	Behältergröße	direkt	mittel	hoch	mittel	nein
7	1	Behälterkosten	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
8	1	Behälterpacklos	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
9	1	Behälterreichweite	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
10	1	Behältergewicht	direkt	mittel	hoch	mittel	nein
11	1	Behälterstapelbarkeit	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
12	1	Gefahrgut / Sondercharakteristika	direkt	mittel	gering	selten	nein
13	1	Modularitätsgrad des Bauteils	direkt	mittel	gering	selten	nein
14	1	Oberflächenempfindlichkeit des Bauteils	direkt	mittel	gering	selten	nein
15	1	Variantenanzahl	direkt	hoch	hoch	mittel	ja
16	1	Verpackungszustand	direkt	mittel	gering	mittel	nein
17	1	Verpackungskosten	direkt	mittel	gering	mittel	nein
18	2	Outsourcing	indirekt	mittel	gering	selten	nein
19	2	Mindestbestellmenge	indirekt	gering	mittel	mittel	nein
20	2	Rahmenverträge mit Lieferanten	indirekt	hoch	gering	selten	nein
21	2	Liefranten mit großem Beschaffungsvolumen	indirekt	mittel	gering	selten	nein

EA = Einflussart, B = Bedeutsamkeit, M = Messbarkeit, VH = Veränderungshäufigkeit  
rel. EF = relevanter Einflussfaktor

Tabelle A-1: Identifizierung und Charakterisierung der Einflüsse auf die Inbound-Logistik (Teil 2/3)

Nr.	Kat.	Einfluss	EA	B	M	VH	rel. EF
22	2	Sourcing-Konzept	direkt	hoch	mittel	mittel	nein
23	2	Zollbedingungen	indirekt	mittel	gering	selten	nein
24	2	Anforderungen an Lieferanten	direkt	mittel	gering	mittel	nein
25	2	Lieferabruf-Zeitpunkte	indirekt	mittel	mittel	mittel	nein
26	2	Lieferantenstruktur/-netzwerk	indirekt	mittel	gering	mittel	nein
27	2	Entfernung Lieferant	indirekt	hoch	hoch	mittel	nein
28	2	Lieferzuverlässigkeit / Liefertreue	direkt	hoch	mittel	mittel	nein
29	2	Rüstkosten des Lieferanten	indirekt	gering	gering	selten	nein
30	3	Lieferabrufübermittlung	indirekt	gering	gering	mittel	nein
31	3	Dispositionsverantwortung	indirekt	gering	mittel	mittel	nein
32	3	Abrufsteuerung / Materialabruf	indirekt	mittel	mittel	selten	nein
33	3	Anlieferfrequenz/-rhythmus	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
34	3	Anlieferzeitpunkte	indirekt	gering	hoch	mittel	nein
35	3	Frachträger	direkt	mittel	hoch	selten	nein
36	3	Auslastung Frachträger/Trailer	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
37	3	Beladeschema Frachträger	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
38	3	Transportkosten	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
39	3	Leerguttransportkosten	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
40	3	Diesntleisterkosten	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
41	3	Transportvolumen	direkt	mittel	hoch	häufig	nein
42	3	Transporttarife	direkt	mittel	hoch	selten	nein
43	3	Transportzeit	indirekt	hoch	hoch	mittel	nein
44	3	Gebietsspediteur	direkt	mittel	hoch	selten	nein
45	3	Transportnetz	direkt	mittel	gering	mittel	nein
46	3	Verkehrsinfrastruktur	indirekt	mittel	gering	selten	nein
47	3	Umschlagspunkt / Hub	direkt	mittel	gering	selten	nein
48	3	Verfügbare Logistikkonzepte	indirekt	mittel	mittel	selten	nein
49	3	Weiderbeschaffungszeit	indirekt	hoch	mittel	mittel	nein
50	3	Leergutrückführung	indirekt	mittel	gering	mittel	nein
51	3	Gesetzliche Rahmenbedingungen	indirekt	gering	gering	selten	nein
52	3	Umweltfaktoren (z. B. CO2-Emissionen)	indirekt	mittel	gering	selten	nein
53	3	Incoterms / Gefahrenübergang	indirekt	mittel	gering	selten	nein
54	4	Bereitstellkonzept/-zustand an Montagelinie	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
55	4	Anzahl Sachnummern am Produktionsstandort	indirekt	gering	hoch	mittel	nein
56	4	Bestandskosten (Kapitalbindung)	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
57	4	Bestandsmenge	direkt	mittel	gering	mittel	nein
58	4	Bestandsreichweite	direkt	mittel	hoch	mittel	nein
59	4	Bestandswert	direkt	mittel	hoch	mittel	nein
60	4	Handlingsaufwand	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
61	4	Lagerkosten	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
62	4	Trailerplatzkosten	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
63	4	Trailerermiete	indirekt	mittel	hoch	mittel	nein
64	4	Trailerreichweite	indirekt	hoch	mittel	mittel	nein

EA = Einflussart, B = Bedeutsamkeit, M = Messbarkeit, VH = Veränderungshäufigkeit  
rel. EF = relevanter Einflussfaktor

Tabelle A-1: Identifizierung und Charakterisierung der Einflüsse auf die Inbound-Logistik (Teil 3/3)

Nr.	Kat.	Einfluss	EA	B	M	VH	rel. EF
65	4	Umschlagshäufigkeit	direkt	mittel	mittel	mittel	nein
66	4	Bedarfsvorlaufzeit	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
67	5	Bedarf (pro Jahr)	direkt	hoch	hoch	häufig	ja
68	5	Bedarfwert	indirekt	hoch	hoch	häufig	nein
69	5	Internationalisierung des Kunden	indirekt	gering	gering	mittel	nein
70	5	Liefertermin an Kunden	indirekt	gering	gering	mittel	nein
71	5	Nachfrageschwankungen (Volatilität der Nachfrage)	indirekt	mittel	gering	mittel	nein
72	5	Bedarfsschwankungen	direkt	hoch	hoch	mittel	ja
73	5	Verbrauchsschwankungen	direkt	hoch	hoch	mittel	nein
74	6	Durchlaufzeit / Taktzeit der Montage	direkt	gering	gering	mittel	nein
75	6	Ergonomische Anforderungen der Montage	indirekt	mittel	gering	mittel	nein
76	6	Fixierte Auftragsreihenfolge	direkt	gering	gering	selten	nein
77	6	Maschinenausfall / verhinderte Bandauflage	direkt	gering	mittel	selten	nein
78	6	Montagekosten	indirekt	gering	gering	selten	nein
79	6	Stabilität der Auftragsreihenfolge / Perlenkette	indirekt	mittel	mittel	mittel	nein
80	6	Verbaurate / Takerate	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
81	6	Verwechslungsgefahr bei Verbau	direkt	mittel	gering	selten	nein
82	7	Bereitstellfläche	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
83	7	Anzahl Trailer-Dock-Plätze	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
84	7	Kommissionierfläche / Supermarktkapazität	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
85	7	verfügbare Lagerfläche	indirekt	hoch	gering	mittel	nein
86	7	Traileryard-Kapazität	indirekt	hoch	gering	mittel	nein

EA = Einflussart, B = Bedeutsamkeit, M = Messbarkeit, VH = Veränderungshäufigkeit  
rel. EF = relevanter Einflussfaktor



### B.1 Veranschaulichung der Berechnung der Bestände

In Abbildung B-1 wird deutlich, wie sich Formel 5-17 ergibt. Die Differenz aus der Anzahl an gelieferten TE  $q_{TE}$  und dem Bedarf einer Periode  $d_{TE}$ , stellt lediglich den Bestand am Ende einer Periode dar. Der Bestand während dieser Periode ist somit höher als am Ende der Periode. Bei einem konstanten Bedarf und somit konstanten Verbrauch, wird der Bestand während einer Periode durch die Summe aus dem Bestand am Ende einer Periode und der Hälfte des Bedarfs in dieser Periode ermittelt.

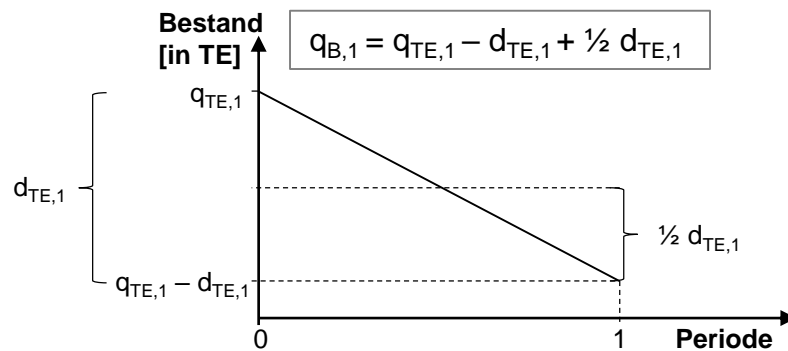


Abbildung B-1: Schematische Visualisierung zur Berechnung des Bestands einer Periode

### B.2 Exemplarische Stufenfunktion von Transportkosten

In Abbildung B-2 ist eine exemplarische Funktion der Transportkosten für die Gebietsspedition dargestellt. Die Stufenfunktion veranschaulicht die Wenn-Dann-Beziehungen, die zu einer erhöhten Komplexität bei der Optimierung der Transportkosten führen.

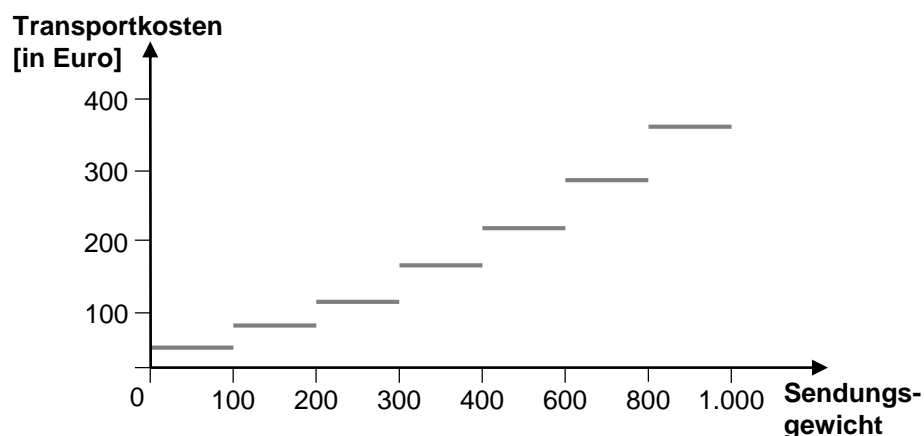


Abbildung B-2: Exemplarischer Verlauf der Transportkosten der Gebietsspedition

### B.3 Exemplarische Herleitung eines Zielfunktionskoeffizienten

Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, setzen sich die Logistikkosten der Inbound-Logistik je nach verwendetem Logistikkonzept anders zusammen (vgl. Tabelle 5-2). Dadurch variiert die Zielfunktion bei jedem Logistikkonzept. Um dennoch eine allgemeine Schreibweise der Zielfunktion zu ermöglichen, wurden Zielfunktionskoeffizienten  $\lambda$  je Kostentreiber (Anzahl der Transporte, gelieferte Transporteinheiten, Bestände) eingeführt.

Dies wird im Folgenden am Logistikkonzept lagerhaltiger Direkttransport (ohne Sequenzierung) veranschaulicht. Die Zielfunktion für dieses Logistikkonzept setzt sich zusammen aus den Transportkosten einer Komplettladung und dem Leergutrücktransport, der fixen und variablen Kapitalbindung, der fixen und variablen Lagerhaltungskosten sowie der Behältermiete:

$$\begin{aligned}
 c_{LH,FTL} &= c_{T,FTL} \cdot (1 + kv) + c_{KB,konst} + c_{KB,dyn} + c_{L,konst} + c_{L,dyn} + c_{LT} \\
 &= p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot (1 + kv) \cdot q_T \\
 &\quad + p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} \cdot q_{TE} + p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot q_B \\
 &\quad + \left[ p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} \right] \cdot q_{TE} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot q_B \\
 &\quad + p_{LT} \cdot t_{LT} \cdot q_{TE}
 \end{aligned}$$

Durch geschicktes Ausklammern der jeweiligen Kostentreiber ergeben sich folgende Formeln für die Zielfunktionskoeffizienten  $\lambda_B$ ,  $\lambda_T$  und  $\lambda_{TE}$  (bei lagerhaltigem Direkttransport ohne Sequenzierung):

$$\begin{aligned}
 \lambda_B &= p_{TE} \cdot r_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \\
 \lambda_T &= p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot (1 + kv) \\
 \lambda_{TE} &= p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} + p_{LT} \cdot t_{LT}
 \end{aligned}$$

### B.4 Zielfunktionskoeffizienten des Optimierungsmodells

Das Vorgehen zur Bestimmung der Zielfunktionskoeffizienten wurde analog für die anderen Logistikkonzepte durchgeführt. Dadurch ergeben sich die im Folgenden aufgeführten Zielfunktionskoeffizienten je Logistikkonzept.

**JIS Direkttransport**

Beim JIS Direkttransport fallen Kosten für die Komplettladung (englisch: *Full Truck Load*) (FTL) und den Leergutrücktransport an, konstante und dynamische Kapitalbindungskosten, Trailermiete, Ladungsträgermiete, Sequenzierkosten und Trailerbewegungskosten. Die Sequenzierkosten können entfallen, wenn sie im Bauteilpreis bereits vom Lieferanten inkludiert wurden.

$$\lambda_B [\text{JIS, FTL}] = p_{TE} \cdot r_{KB}$$

$$\lambda_T [\text{JIS, FTL}] = p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot (1 + kv) + p_{TM} \cdot t_{PF} + 2 \cdot p_{TB}$$

$$\lambda_{TE} [\text{JIS, FTL}] = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{LT} \cdot t_{LT} + p_{SQ} \cdot u_{TE}$$

**JIT Direkttransport**

Die Kosten für eine JIT Direkttransport berechnen sich fast identisch wie die Kosten für einen JIS Direkttransport, lediglich ohne Sequenzierkosten.

$$\lambda_B [\text{JIT, FTL}] = p_{TE} \cdot r_{KB}$$

$$\lambda_T [\text{JIT, FTL}] = p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot (1 + kv) + p_{TM} \cdot t_{PF} + 2 \cdot p_{TB}$$

$$\lambda_{TE} [\text{JIT, FTL}] = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{LT} \cdot t_{LT}$$

**Lagerhaltiger Direkttransport mit/ohne Sequenzierung (SQ)**

Die Kosten für den lagerhaltigen Direkttransport ergeben sich wie zuvor beschrieben. Ist bei den Bauteilen eine Sequenzierung vor der Bereitstellung erforderlich, so entstehen zusätzliche Sequenzierkosten, sodass sich der Zielfunktionskoeffizient der Transporteinheiten (TEs) ändern.

$$\lambda_B [\text{LH, FTL}] = p_{TE} \cdot r_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf}$$

$$\lambda_T [\text{LH, FTL}] = p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot (1 + kv)$$

$$\lambda_{TE} [\text{LH, FTL, mit SQ}] = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} + p_{LT} \cdot t_{LT} + p_{SQ} \cdot u_{TE}$$

$$\lambda_{TE} [\text{LH, FTL, ohne SQ}] = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} + p_{LT} \cdot t_{LT}$$

**Lagerhaltiger Milkrun mit/ohne Sequenzierung (SQ)**

Die Kosten für das Logistikkonzept lagerhaltiger Milkrun sind ähnlich zu denen des lagerhaltigen Direkttransports. Der Unterschied liegt in der Berechnung der Transportkosten: Beim

Milkrun ergibt sich durch die Tourenbildung eine andere den Transportkosten zugrunde gelegte Entfernung und es kommen zusätzliche Stoppkosten je Zwischenhalt hinzu.

$$\lambda_{B [LH, MR]} = p_{TE} \cdot r_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf}$$

$$\lambda_{T [LH, MR]} = p_{FTL} \cdot e_{MR} \cdot (1 + kv) + p_{Stopp}$$

$$\lambda_{TE [LH, MR, mit SQ]} = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} + p_{LT} \cdot t_{LT} + p_{SQ} \cdot u_{TE}$$

$$\lambda_{TE [LH, MR, ohne SQ]} = p_{TE} \cdot r_{KB} \cdot t_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf} \cdot t_{BV} + p_{EA} + p_{LT} \cdot t_{LT}$$

### Lagerhaltige Gebietsspedition mit/ohne Sequenzierung (SQ)

Die Kosten für das Logistikkonzept lagerhaltige Gebietsspedition (GS) sind ähnlich zu denen des lagerhaltigen Direkttransports. Der Unterschied liegt in der Berechnung der Transportkosten. Für die Transportkosten der GS erfolgt eine Günstiger-Prüfung der FTL- und LTL-Tarife, damit für den OEM der günstigere Transportkostentarif angesetzt werden. Die Transportkosten bei der GS unterliegen somit folgender Fallunterscheidung:

$$c_{T,GS} = \begin{cases} c_{T,FTL} \cdot (1 + kv) = p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot q_T \cdot (1 + kv) & , \text{ wenn } c_{T,FTL} \leq c_{T,LTL} \\ c_{T,LTL} \cdot (1 + kv) = p_{LTL} \cdot g_{FP} \cdot q_{TE} \cdot (1 + kv) & , \text{ wenn } c_{T,FTL} > c_{T,LTL} \end{cases}$$

Es ergeben sich folgende Zielfunktionskoeffizienten für die Anlieferung mit lagerhaltiger Gebietsspedition:

$$\lambda_{B [LH, GS]} = p_{TE} \cdot r_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf}$$

$$\lambda_{T [LH, GS]} = \begin{cases} p_{FTL} \cdot e_{DR} \cdot (1 + kv) & , \text{ wenn } c_{T,FTL} \leq c_{T,LTL} \\ 0 & , \text{ wenn } c_{T,FTL} > c_{T,LTL} \end{cases}$$

$$\lambda_{TE [LH, GS, mit/ohne SQ]} = \begin{cases} \lambda_{TE [LH, FTL, mit/ohne SQ]} & , \text{ wenn } c_{T,FTL} \leq c_{T,LTL} \\ \lambda_{TE [LH, FTL, mit/ohne SQ]} + p_{LTL} \cdot g_{FP} \cdot (1 + kv) & , \text{ wenn } c_{T,FTL} > c_{T,LTL} \end{cases}$$

### Lagerhaltiges Hub-and-Spoke mit/ohne Sequenzierung (SQ)

Die Kosten für das Logistikkonzept lagerhaltiges Hub-and-Spoke (HuS) sind ähnlich zu denen des lagerhaltigen Direkttransports. Wie bei der lagerhaltigen Gebietsspedition sind Fallunterscheidungen vorzunehmen, um die Günstiger-Prüfung der Transporttarife sowohl im Vorlauf (VL) als auch im Hauptlauf (HL) durchzuführen. Dazu werden folgende vier Fälle



unterschieden:

Fall 1:  $c_{T,FTL,VL} \leq c_{T,LTL}$  und  $c_{T,LTL,HL} \leq c_{T,FTL,DA}$

Fall 2:  $c_{T,FTL,VL} > c_{T,LTL}$  und  $c_{T,LTL,HL} > c_{T,FTL,DA}$

Fall 3:  $c_{T,FTL,VL} \leq c_{T,LTL}$  und  $c_{T,LTL,HL} > c_{T,FTL,DA}$

Fall 4:  $c_{T,FTL,VL} > c_{T,LTL}$  und  $c_{T,LTL,HL} \leq c_{T,FTL,DA}$

Für diese vier Fälle werden die Transportkosten beim HuS wie folgt berechnet:

$$c_{T,HuS} = \begin{cases} (c_{T,FTL,VL} + c_{T,LTL,HL}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 1} \\ (c_{T,LTL} + c_{T,FTL,DA}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 2} \\ (c_{T,FTL,VL} + c_{T,FTL,DA}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 3} \\ (c_{T,LTL} + c_{T,LTL,HL}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 4} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} (p_{FTL} \cdot e_{VL} \cdot q_T + p_{HL} \cdot g_{KG} \cdot q_{TE}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 1} \\ (p_{LTL} \cdot g_{FP} \cdot q_{TE} + p_{DA} \cdot e_{HL} \cdot q_T) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 2} \\ (p_{FTL} \cdot e_{VL} \cdot q_T + p_{DA} \cdot e_{HL} \cdot q_T) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 3} \\ (p_{LTL} \cdot g_{FP} \cdot q_{TE} + p_{HL} \cdot g_{KG} \cdot q_{TE}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 4} \end{cases}$$

Es ergeben sich folgende Zielfunktionskoeffizienten für die lagerhaltige Anlieferung über ein Hub-and-Spoke (HuS):

$$\lambda_{B[LH, HuS]} = p_{TE} \cdot r_{KB} + p_{FL} \cdot \frac{a_{LT}}{sf}$$

$$\lambda_{T[LH, HuS]} = \begin{cases} p_{FTL} \cdot e_{VL} \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 1} \\ p_{DA} \cdot e_{HL} \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 2} \\ (p_{FTL} \cdot e_{VL} + p_{DA} \cdot e_{HL}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 3} \\ 0 & , \text{ Fall 4} \end{cases}$$

$$\lambda_{TE[LH, HuS, mit/ohne SQ]} = \begin{cases} \lambda_{TE[LH, FTL, mit/ohne SQ]} + p_{HL} \cdot g_{KG} \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 1} \\ \lambda_{TE[LH, FTL, mit/ohne SQ]} + p_{LTL} \cdot g_{FP} \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 2} \\ \lambda_{TE[LH, FTL, mit/ohne SQ]} & , \text{ Fall 3} \\ \lambda_{TE[LH, FTL, mit/ohne SQ]} + (p_{HL} \cdot g_{KG} + p_{LTL} \cdot g_{FP}) \cdot (1 + kv) & , \text{ Fall 4} \end{cases}$$

## B.5 Effekt von Anlieferfrequenzen

In Abbildung B-3 ist der Effekt von Anlieferfrequenzen exemplarisch dargestellt. Es wird deutlich, dass durch die Festlegung der Anliefertage Montag und Donnerstag die Liefermengen ausgeglichen werden können, sodass der Effekt von Nachfrageschwankungen reduziert wird. Zudem kann bei sinnvoll gewählten Anliefertagen die durchschnittliche Auslastung der Transporte gesteigert werden [Sch-2010b, S. 218], sodass Lieferkosten reduziert werden [Vis-2001, S. 278]. Weiterhin gelten Anlieferfrequenzen als Steuermechanismus für Lagerbestände [Vis-2001, S. 278]. Ist besonders wenig Lagerplatz vorhanden, werden mehrere Anliefertage angestrebt. Wohingegen bei einer hohen Lagerplatzverfügbarkeit Lieferungen durch spezifische Anliefertage gebündelt werden.

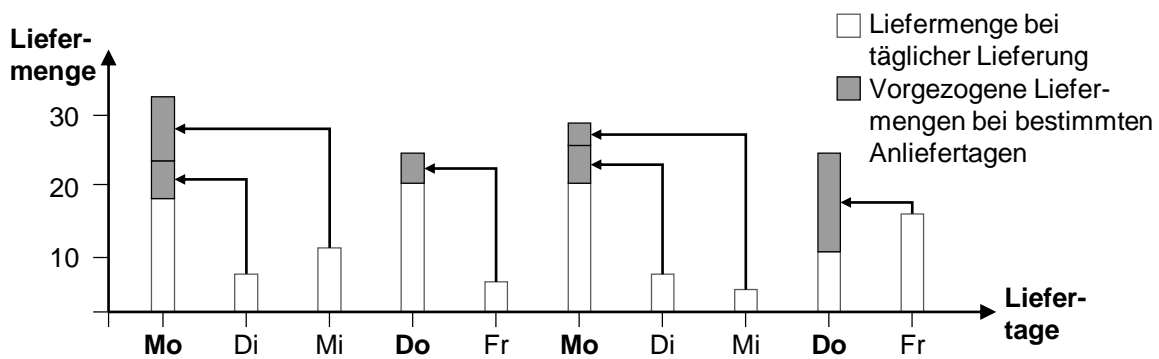


Abbildung B-3: Exemplarische Darstellung des Effektes von Anlieferfrequenzen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [Sch-2010b, S. 218; Bre-2015, S. 123])

## C.1 Ergänzungen zur Umstellbewertung

### Balkenplan

In diesem Abschnitt wird das Kapitel 6.2.1 durch weitere Ausführungen untermauert. Abbildung C-1 zeigt einen exemplarischen Balkenplan für die Aktivitäten der Arbeitspakete.

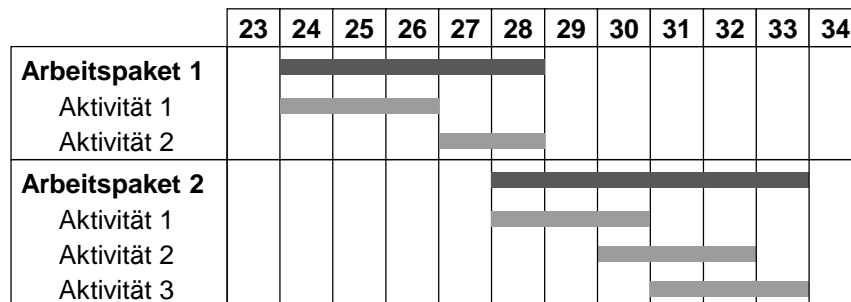


Abbildung C-1: Exemplarischer Balkenplan

### Relevante Arbeitspakete je Logistikkonzept und Umstellenszenario

In den Tabellen C-1, C-2 und C-3 sind jeweils die relevanten Arbeitspakete mit einem X gekennzeichnet, die bei der jeweiligen Umstellung zu bearbeiten sind. Diese Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Auch hier können unternehmensspezifische Gegebenheiten zum Tragen kommen. Die Ausführungen basieren auf einer Expertenbefragung bei einem Nutzfahrzeughersteller [fml-2017c, S. 35].

Tabelle C-1: Relevante Arbeitspakete bei der Erst-Umstellung

	von:	LH	LH	JIT	JIT	JIS	JIS
	nach:	JIT	JIS	LH	JIS	LH	JIT
Lastenheft		X	X		X		X
Logistikaudit		X	X		X		
Mitarbeiterinformation		X	X	X	X	X	X
IT-Anbindung (OEM)		X	X		X		X
IT-Anbindung (Lieferant)		X	X		X		X
Prozessbegleitung vor Roll-Out		X	X	X		X	
Werkslayout und Infrastruktur		X	X	X	X	X	X
Ladungsträgeranalyse			X		X	X	X
Beschaffung Logistikequipment			X		X	X	X
Ladungsträgerbeschaffung			X		X	X	X
Parameterbestimmung		X	X	X	X	X	X
Prozessbegleitung nach Roll-Out		X	X				

Tabelle C-2: Relevante Arbeitspakete bei einer Rück-Umstellung

	von:	JIT	JIS	LH	JIS	LH	JIT
	nach:	LH	LH	JIT	JIT	JIS	JIS
Lastenheft				X	X	X	X
Logistikaudit							
Mitarbeiterinformation	X	X	X	X	X	X	X
IT-Anbindung (OEM)				X	X	X	X
IT-Anbindung (Lieferant)				X	X	X	X
Prozessbegleitung vor Roll-Out	X	X	X			X	
Werkslayout und Infrastruktur	X	X	X	X	X	X	X
Ladungsträgeranalyse							
Beschaffung Logistikequipment							
Ladungsträgerbeschaffung							
Parameterbestimmung	X	X	X	X	X	X	X
Prozessbegleitung nach Roll-Out				X		X	

Tabelle C-3: Relevante Arbeitspakete bei einer Erneut-Umstellung

	von:	LH	LH	JIT	JIT	JIS	JIS
	nach:	JIT	JIS	LH	JIS	LH	JIT
Lastenheft	X	X			X		X
Logistikaudit							
Mitarbeiterinformation	X	X	X	X	X	X	X
IT-Anbindung (OEM)	X	X			X		X
IT-Anbindung (Lieferant)	X	X			X		X
Prozessbegleitung vor Roll-Out	X	X	X			X	
Werkslayout und Infrastruktur	X	X	X	X	X	X	X
Ladungsträgeranalyse							
Beschaffung Logistikequipment							
Ladungsträgerbeschaffung							
Parameterbestimmung	X	X	X	X	X	X	X
Prozessbegleitung nach Roll-Out	X	X					

Folgende Besonderheiten sind bei den Zuordnungen zu berücksichtigen:

- **Erst-Umstellung: Ladungsträger.** Bei nicht ausreichendem Ladungsträgerbestand sind zusätzliche Ladungsträger zu beschaffen.
- **Rück- und Erneut-Umstellung: Ladungsträger.** Wurden Ladungsträger bei der Erst-Umstellung eingelagert, entfallen die Beschaffungskosten.
- **Rück- und Erneut-Umstellung: Ladungsträger.** Es ist zu prüfen, ob der gleiche Behälter wie bei JIS oder der ursprüngliche Behälter zu verwenden ist.
- **Rück- und Erneut-Umstellung: Logistikequipment.** Wurde Logistikequipment bei der Erst-Umstellung eingelagert, entfallen die Beschaffungskosten.
- **Rück- und Erneut-Umstellung: Logistikaudit.** Ein Logistikaudit ist nur dann nötig, wenn der Lieferant zuvor noch nicht im anspruchsvolleren Belieferungskonzept angeliefert hat. Es gilt: am anspruchsvollsten ist JIS, dann JIT und dann lagerhaltig.

## PERT-Methode

Bei der *Program-Evaluation-and-Review-Technique (PERT)*-Methode geht es darum die stochastischen und zufälligen Vorgangszeiten von Aktivitäten zu modellieren. Es handelt sich um ein stochastisches Modell, mit dessen Hilfe komplexe Prozesse mit vielen zeitabhängigen und kostenintensiven Aktivitäten zeitlich koordiniert und geplant werden können [Ste-1971, S. 55 f.]. Für die Dauer einer Aktivität sind bei der PERT-Methode drei Schätzwerte zu bestimmen: die optimistische Zeitdauer, die wahrscheinliche Zeitdauer und die pessimistische Zeitdauer. Die *wahrscheinliche Zeitdauer* gibt an, wie lange die Durchführung einer Aktivität unter normalen Bedingungen dauert. Dabei sind Kontroll-, Transport-, Liege- sowie Verlustzeiten (z. B. bei fehlender Kapazität) zu berücksichtigen. Die *optimistische Zeitdauer* gibt die theoretisch kürzest mögliche Dauer an, die für die vollständige Durchführung einer Aktivität denkbar ist. In diesem optimalen Szenario werden entsprechend keine Verlustzeiten einkalkuliert. Bei der *pessimistischen Zeitdauer* wird von dem Worst-Case-Szenario ausgegangen. Es werden somit die schlechtesten Bedingungen und eine Vielzahl an Störungen angenommen, sodass sich die Durchlaufzeit der Aktivität verlängert. Die Schätzung der drei Werte sollte von dem für eine Aktivität verantwortlichen Bearbeiter durchgeführt werden [Ste-1971, S. 57 ff.]. Es wird angenommen dass die Verteilung der Zeitdauer zur Durchführung einer Aktivität einer Beta-Verteilung folgt. Entsprechend lassen sich die erwartete Dauer  $t_{ED}$  und die Varianz der Dauer  $t_{VD}$  mit Hilfe der pessimistischen Dauer  $t_{PD}$ , der wahrscheinlichen Dauer  $t_{WD}$  und der optimistischen Dauer  $t_{OD}$  wie folgt berechnen:

$$t_{ED} = \frac{t_{OD} + 4 \cdot t_{WD} + t_{PD}}{6},$$

$$t_{VD} = \left( \frac{t_{OD} - t_{PD}}{6} \right)^2.$$

Für weitere Ausführungen zur PERT-Methode sei z. B. auf die Arbeit von *Stempell* verwiesen [Ste-1971].

## C.2 Ergänzungen zum Entscheidungsmodell

### Veranschaulichung von Modellstufe 1 anhand eines Zahlenbeispiels

Die beschriebene Modellierung soll anhand eines Beispiels, das auf dem Zahlenbeispiel aus Abbildung 6-9 aufbaut, verdeutlicht werden. Die Input-Daten sind in Tabelle C-4 zusammengefasst.

Tabelle C-4: Input-Parameter für die Veranschaulichung von Stufe 1

Input	Symbol	Ausprägung
Anfangsbedarf	$B_0$	2.000 Stück
Bedarfsgrenze	$BG$	1.500 Stück
Bedarfsschwankung	$\sigma$	15 %
Risikoloser Zinssatz	$r$	1 %
Kostensatz für $LK_1$ , wenn Bedarf unterhalb von BG	$c_{LK_1, < BG}$	1,90 Euro
Kostensatz für $LK_2$ , wenn Bedarf unterhalb von BG	$c_{LK_2, < BG}$	2,20 Euro
Kostensatz für $LK_1$ , wenn Bedarf oberhalb von BG	$c_{LK_1, \geq BG}$	2,10 Euro
Kostensatz für $LK_2$ , wenn Bedarf oberhalb von BG	$c_{LK_2, \geq BG}$	1,60 Euro

Die Ergebnisse sind in Abbildung C-2 dargestellt. Die Darstellung ist analog zu Abbildung 6-9 aufgebaut, mit dem Unterschied, dass nicht die Entwicklung der Zahlungsströme sondern der Optionswerte und der resultierenden Barwerte der flexiblen und nicht flexiblen Inbound-Logistik abgebildet sind.

$t$	0	1	2	3	4
$E[C_t(LK_1)]$	-4.200	-4.243	-4.210	-4.296	-4.282
$\frac{E[C_t(LK_1)]}{(1+r)^t}$	-4.200	-4.201	-4.127	-4.170	-4.115
$PV(LK_1)$	-20.813				

$t$	0	1	2	3	4
$E[C_t(LK_2)]$	-3.200	-3.233	-3.491	-3.396	-3.599
$\frac{E[C_t(LK_2)]}{(1+r)^t}$	-3.200	-3.201	-3.422	-3.296	-3.459
$PV(LK_2)$	-16.578				

$s \backslash t$	0	1	2	3	4
1	1.000	1.162	1.350	1.569	1.823
2		861	1.000	1.162	1.350
3			0	861	1.000
4				0	0
5					0

$s \backslash t$	0	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0
3			445	0	0
4				383	445
5					329

$E[S_t(1 \rightarrow 2)]$	1.000	1.010	832	949	817
$PV[E[S_t(1 \rightarrow 2)]]$	1.000	1.000	816	921	785
$F(1 \rightarrow 2)$	4.522				
$E(F)$	-20.813 + 4.522 = -16.291				

$E[S_t(2 \rightarrow 1)]$	0	0	113	49	134
$PV[E[S_t(2 \rightarrow 1)]]$	0	0	111	48	129
$F(2 \rightarrow 1)$	287				
$E(F)$	-16.578 + 287 = -16.291				

Abbildung C-2: Verdeutlichung des Realoptionsmodells der Stufe 1 anhand eines numerischen Beispiels

Der Barwert einer nicht flexiblen Inbound-Logistik beträgt bei ausschließlicher  $LK_1$ -Verwendung -20.813 Euro und bei  $LK_2$ -Verwendung -16.578 Euro. Insgesamt ist  $LK_2$  somit vorteilhafter gegenüber  $LK_1$  und gilt als optimales initiales Logistikkonzept. Bei Betrachtung der diskontierten erwarteten Optionswerte  $PV[E[S_t]]$  wird deutlich, dass der Wert der Flexibilität  $F(i \rightarrow j)$  von  $LK_1$  zu  $LK_2$  zu wechseln mit 4.522 Euro wesentlich höher ist, als der Flexibilitätswert von 287 Euro für einen Wechsel von  $LK_2$  zu  $LK_1$ . Das liegt daran, dass der aus  $LK_2$  resultierende Zahlungsstrom höher ist, als der aus  $LK_1$ . Wird bereits  $LK_2$  verwendet, dann darf die Investition in die flexible Inbound-Logistik  $I(F)$  maximal 287 Euro betragen, da sonst der Barwert bei ausschließlicher Verwendung von  $LK_2$  höher ist.





### D.1 Ergänzungen zur Anwendung der Identifikationsmethode

#### D.1.1 Datenvorbereitung und -vorverarbeitung

##### Daten-Input

Der erste Schritt in der Datenvorbereitung besteht in der Beschaffung der relevanten Daten. Benötigt wird eine Liste mit allen SNR des betrachteten Produktionsstandortes des OEM, die sich in lagerhaltige und lagerlose SNR unterteilen lässt. Je SNR sind die Ausprägungen der sechs Einflussfaktoren (Bauteilgewicht, Bauteilvolumen, Bauteilpreis, Variantenanzahl, Bedarf und Bedarfsschwankungen) zu beschaffen. Weiterhin können zusätzliche Informationen bzgl. Lagerort, Lieferanten, Behälter für die Ergebnisinterpretation sinnvoll sein. Für die Anwendung der Methode sind diese Zusatzinformationen jedoch optional. Eine übersichtliche Auflistung der von dem untersuchten Unternehmen bereitzustellenden Input-Daten ist in Tabelle D-1 zu finden. Diese Daten wurden für das Fallbeispiel bei dem betrachteten OEM im Januar 2018 erhoben.

Tabelle D-1: Input-Daten für die Anwendung der Identifikationsmethode

Input	Spezifikation
<b>Allgemeine Informationen</b>	
● Werk	Betrachteter Produktionsstandort des Unternehmens
● SNR	Eindeutige Nummer eines Bauteils
● SNR-Bezeichnung	Bezeichnung des Bauteils
<b>Einflussfaktoren</b>	
● Bauteilgewicht	Nettogewicht eines einzelnen Bauteils
● Bauteilvolumen	Volumen eines einzelnen Bauteils
● Bauteilpreis	Einkaufspreis eines einzelnen Bauteils beim Lieferanten
● Variantenzahl	Anzahl an Varianten des Bauteils
● Bedarf	Jahresbedarf des Bauteils
● Bedarfsschwankungen	Variationskoeffizient des Bauteilsbedarfs
<b>Zusatzinformationen</b>	
○ ABC	ABC-Klassifikation der SNR
○ XYZ	XYZ-Klassifikation der SNR
○ Behältertyp	Verwendeter Behälter
○ Behältervolumen	Fassungsvolumen des Behälters
○ Packlos	Anzahl an SNR in einem Behälter
○ Lager	Lager, in dem das Bauteil gelagert wird
○ Lieferant	Name des Bauteillieferanten
○ Lieferstandort	Produktionsstandort des Bauteillieferanten
○ Lieferantenentfernung	Entfernung vom Lieferanten zum Produktionsstandort
● erforderlicher Input	○ optionaler Input

### Datenbereinigung

Bei der Datenbereinigung werden aus dem gesamten Datensatz irrelevante Datensätze (d. h. Zeilen, wobei eine Zeile einer SNR entspricht) entfernt. Dazu gehören beispielsweise Bauteile, die nicht für die Serienfertigung erforderlich sind, bei denen eine flexible Belieferung ausgeschlossen werden kann, oder für die in Zukunft kein Bedarf vorliegt. Zusammenfassend wird der Datensatz um folgende SNR bereinigt: Inaktive SNR (d. h. SNR, die aktuell nicht mehr verbaut werden), Schüttgüter, allgemeines Material (dazu gehören z. B. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe), Bauteile für Prototypen- oder Vorserienfahrzeuge und Dienstleistungen. Die Ergebnisse sind in Abbildung D-1 visualisiert, wobei links die Auswertung der Datenbeschaffung und rechts die der Datenbereinigung zu sehen ist. Insgesamt sind beim betrachteten OEM 187.174 SNR systemisch erfasst. Davon sind 54.272 SNR dem relevanten Produktionsstandort zuzuordnen, wovon wiederum nur 20.316 SNR zu den aktiven SNR zählen. Auf der rechten Seite der Grafik ist die Anzahl an SNR je Bereinigungskriterium aufgeführt. Prototypen- und Vorserienbauteile stellen mit 4.606 SNR die Gruppe mit den meisten ausgeschlossenen SNR dar. Nach der Datenbereinigung sind noch 12.461 SNR im Datensatz enthalten. Es sei darauf hingewiesen, dass die Summe an ausgeschlossenen SNR (9.761 SNR, siehe Abbildung D-1 rechts) nicht der Differenz aus aktiven SNR des relevanten Produktionsstandortes und der aktiven, bereinigten SNR des relevanten Produktionsstandortes (7.855 SNR, siehe Abbildung D-1 links) entspricht. Dies ist auf die Vorgehensweisen zur Identifikation der zu bereinigenden Datensätze zurückzuführen. So können beispielsweise Dienstleistungen gleichzeitig Dienstleistungen für Prototypen und Vorserienfahrzeuge sein. Dadurch ist die Summe an ausgeschlossenen SNR in der Übersicht kleiner als die Summe aller SNR in der Datenbereinigung.

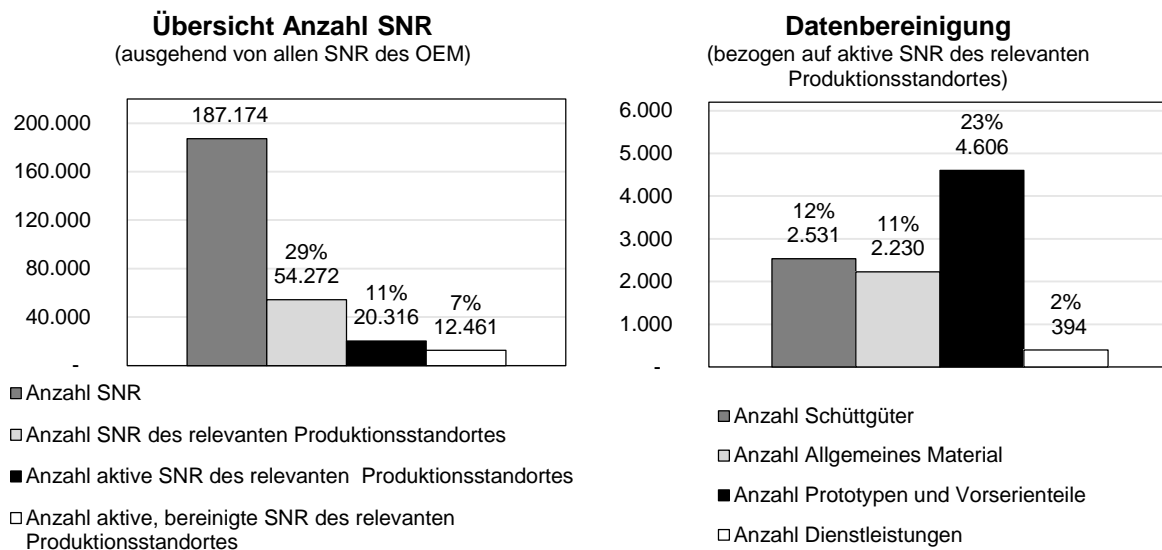


Abbildung D-1: Auswertung der vorliegenden Daten (links) und der Datenbereinigung (rechts)

## Datenvorverarbeitung

Bei der Datenvorverarbeitung werden diejenigen Datensätze von der weiteren Analyse ausgeschlossen, die Fehlwerte aufweisen. Dies ist wichtig, um die Anwendung der Datenanalysen zu ermöglichen. Die univariate Analyse erfordert, dass für jede SNR das BelK (lagerhaltig oder lagerlos) vorliegt. Bei der multivariaten Clusteranalyse ist zusätzlich erforderlich, dass jede SNR bei jedem der sechs Einflussfaktoren einen Wert aufweist – eine Anwendung der Clusteranalyse ist sonst nicht möglich. Entsprechend ergeben sich die in Abbildung D-2 visualisierten Auswertungen der Datenvorbereitung. Auf der linken Seite der Abbildung ist zu sehen, bei wie vielen SNR keine Einträge bei den Einflussfaktoren und beim BelK vorliegen. Das Bauteilgewicht weist mit 4.313 SNR die meisten Fehleinträge auf. Grund hierfür ist, dass das Gewicht einer einzelnen SNR nicht automatisch in den Daten hinterlegt wird. Die rechte Seite der Abbildung zeigt die beiden Datensätze für die univariate und die multivariate Analyse – jeweils unterteilt in lagerhaltige und lagerlose SNR. Aufgrund der stärkeren Restriktionen ist der multivariate Datensatz mit insgesamt 6.595 SNR etwa halb so groß wie der univariate Datensatz mit 12.344 SNR. Während beim univariaten Datensatz die Aufteilung von lagerhaltig zu lagerlos belieferten SNR mit 55 % zu 45 % recht ausgeglichen ist, enthält der multivariate Datensatz – mit einer Aufteilung von 62 % zu 38 % – verhältnismäßig mehr lagerhaltige SNR.

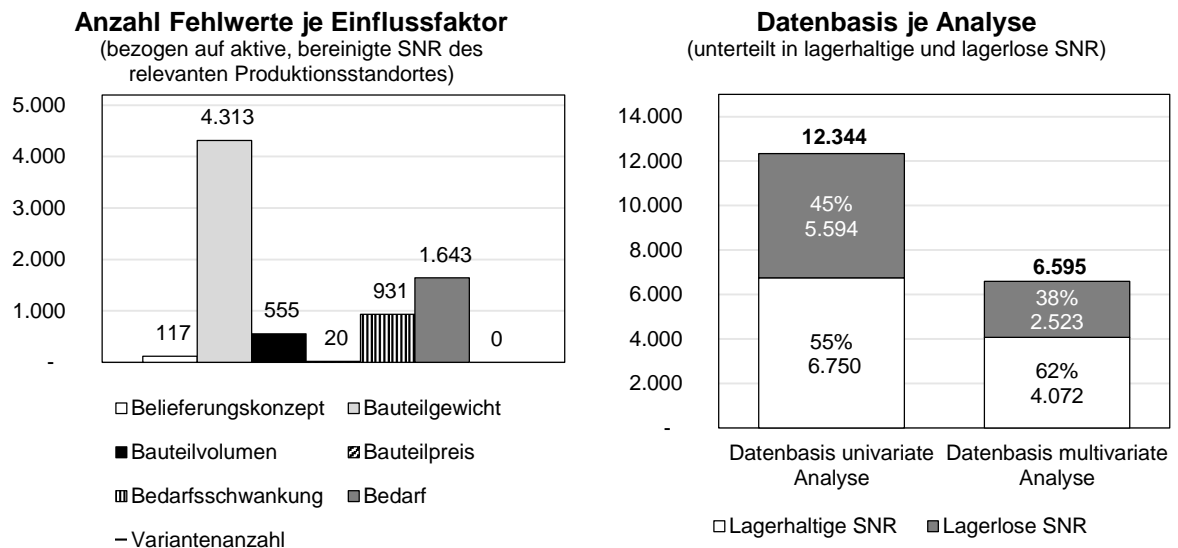


Abbildung D-2: Anzahl an Fehlwerten je Einflussfaktor (links), Datensätze für univariate und multivariate Analyse (rechts)

## D.1.2 Ergänzungen zur univariaten Datenanalyse

### Kalkulation der Grenzwerte für den Einflussfaktor Variantenanzahl

Der Grenzwert für die Variantenanzahl ist nicht auf SNR-Ebene, sondern auf Bauteilgruppenebene zu berechnen. Der Grund hierfür soll anhand des Rechenbeispiels in Abbildung D-3 verdeutlicht werden. Eine Berechnung der Quartile und des Mittelwertes führen auf SNR-Ebene (linke Seite der Abbildung) zu verzerrten Ergebnissen. Im Beispiel liegen 4 Bauteilgruppen mit den Variantenanzahlen 5, 1, 1 und 2 vor. Auf SNR-Ebene betragen der Median 5 und der Mittelwert 3,6, wohingegen auf der Bauteilgruppenebene der Median 1,5 und der Mittelwert 2,25 betragen. Die verzerrten Werte auf SNR-Ebene sind damit zu erklären, dass die Variantenanzahl 5 bei den SNR der Bauteilgruppe A fünffach in die Kalkulation eingeht. Entsprechend wurden die Grenzwerte für den Einflussfaktor Variantenanzahl auf Bauteilgruppenebene berechnet.

SNR-Ebene			Bauteilgruppenebene	
Bauteilgruppe	SNR	Variantenanzahl	Bauteilgruppe	Variantenanzahl
A	11	5	A	5
A	12	5	B	1
A	13	5	C	1
A	14	5	D	2
A	15	5		
B	21	1		
C	31	1		
D	41	2		
D	42	2		
<b>Mittelwert</b>		<b>3,6</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>2,25</b>
<b>Median</b>		<b>5</b>	<b>Median</b>	<b>1,5</b>

Abbildung D-3: Vereinfachtes Beispiel der Problematik der Variantenanzahl auf SNR-Ebene

### Darstellung der Verteilungen der Einflussfaktoren als Boxplots

Die Verteilungen der Einflussfaktoren je Belieferungsgruppe lassen sich in Boxplots (vgl. Kapitel 4.3.2.2) darstellen. In den Abbildungen D-4, D-5 und D-6 sind diese Boxplots für das Fallbeispiel illustriert.

Die Boxplots vom *Bauteilgewicht* und *Bauteilvolumen* (vgl. Abbildung D-4) spiegeln deutlich die erwarteten Tendenzen aus der Literatur wider (vgl. Tabelle 2-6 in Kapitel 2.4.2): Die lagerhaltigen Bauteile sind leichtere und kleinvolumigere Bauteile (Mittelwert von 4 kg und  $0,021 m^3$ ), während es sich bei den lagerlosen Bauteilen um schwerere und großvolumigere Bauteile handelt (Mittelwert von 103 kg und  $0,817 m^3$ ). Ebenso liegen beim Einflussfaktor *Bauteilpreis* die erwarteten Verteilungen mit günstigeren lagerhaltigen Bauteilen (Mittelwert

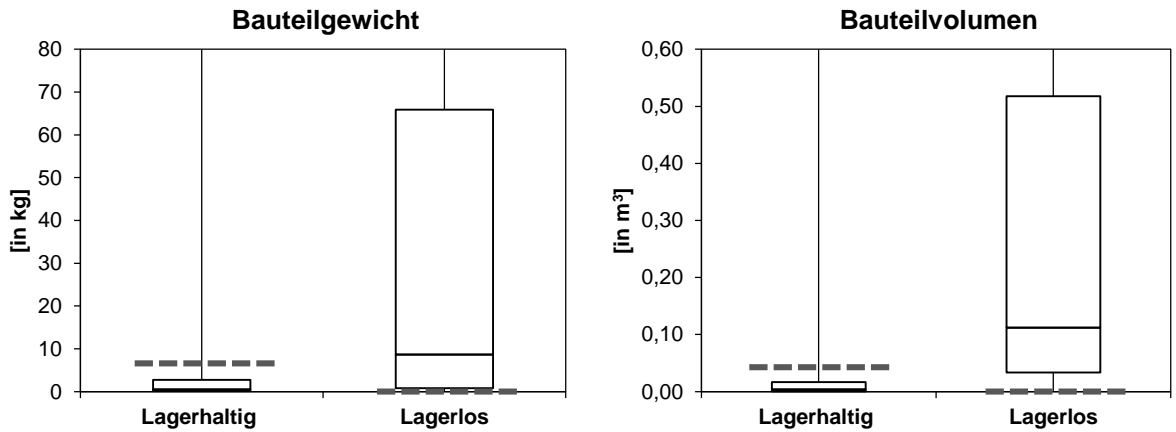


Abbildung D-4: Boxplots für Bauteilgewicht (links) und Bauteilvolumen (rechts) – Grenzwerte als gestrichelte Linien

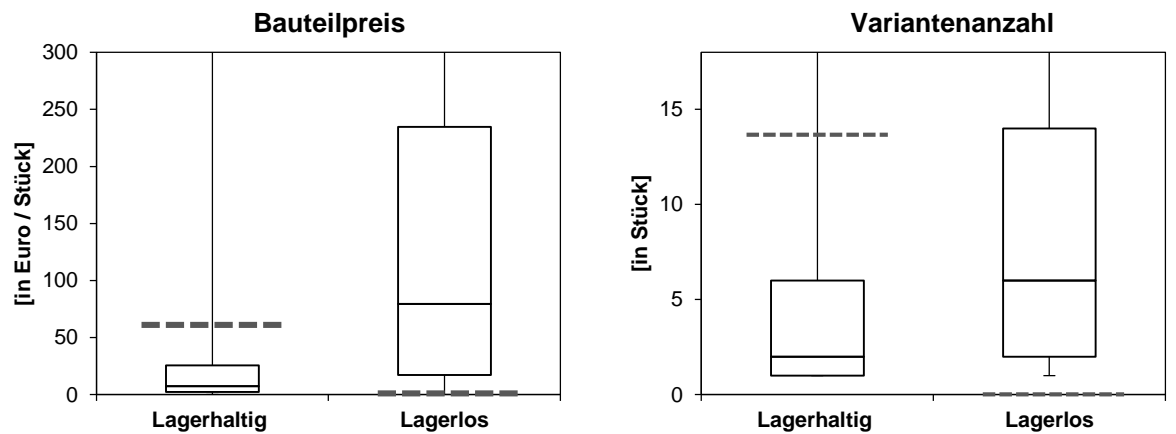


Abbildung D-5: Boxplots für Bauteilpreis (links) und Variantenanzahl (rechts) – Grenzwerte als gestrichelte Linien

von 33,30 Euro) und teureren lagerlosen Bauteilen (Mittelwert von 365,24 Euro) vor. Beim Einflussfaktor *Variantenanzahl* besitzen lagerhaltige Bauteile im Durchschnitt 5,81 Varianten und lagerlose Bauteile 17,60 Varianten (vgl. Abbildung D-5). Die Verteilungen für die

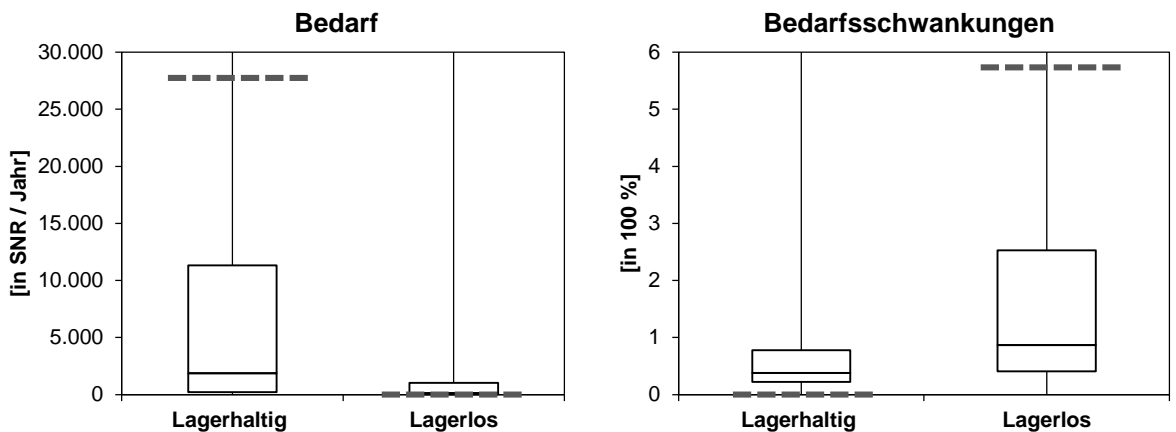


Abbildung D-6: Boxplots für Bedarf (links) und Bedarfsschwankungen (rechts) – Grenzwerte als gestrichelte Linien

Einflussfaktoren *Bedarf* und *Bedarfsschwankungen* sind anders als erwartet (vgl. Abbildung D-6). Statt eines hohen Jahresbedarfs bei den lagerlosen Bauteilen, besitzen 75 % der lagerhaltigen Bauteile einen Bedarf von bis zu 11.312 SNR pro Jahr (entspricht dem 0,75-Quantil). Bei den lagerlosen Bauteilen entspricht das 0,75-Quantil 1.018 SNR pro Jahr. Entsprechend müssten viele lagerhaltige SNRs aufgrund der Bedarfshöhe als Exoten eingestuft werden. Allerdings liegt der lagerhaltige obere Grenzwert so hoch, dass eine nicht so große Anzahl an Exoten zu erwarten ist. Bei den Bedarfsschwankungen (gemessen mit dem Variationskoeffizienten) fällt auf, dass die lagerlos gelieferten Bauteile höhere Bedarfsschwankungen aufweisen (Mittelwert von 169 %) als die lagerhaltig gelieferten Bauteile (Mittelwert von 85 %). Dies widerspricht den Aussagen der Literatur, dass nur Bauteile mit möglichst geringen Bedarfsschwankungen lagerlos angeliefert werden sollten.

### **AHP-Analyse**

Zur Bestimmung der Relevanz der sechs Einflussfaktoren in Bezug auf die Auswahl des Belieferungskonzeptes wurde bei dem betrachteten OEM mit verschiedenen Logistikexperten eine AHP-Analyse durchgeführt. Dazu wurden die Einflussfaktoren in einem paarweisen Vergleich gegenübergestellt und bewertet. Die Bewertung beim Vergleich zweier Einflussfaktoren folgt der vorgeschlagenen Punkte-Skala nach *Saaty*: 1 = gleichbedeutend, 3 = geringfügig bedeutender, 5 = wesentlich bedeutender, 7 = stark bedeutender und 9 = extrem bedeutender [Saa-1987, S. 163]. Analog beschreibt der Kehrwert der Punkte, wie viel unbedeutender ein Einflussfaktor gegenüber einem anderen ist (z. B. 1/9 = extrem unbedeutender). Gerade Werte (2, 4, 6, 8) drücken die entsprechende Bedeutung zwischen zwei Werten aus. Aus den paarweisen Vergleichen mit den Logistikexperten wurde sich auf eine Bewertung der Einflussfaktoren geeinigt – diese ist in Tabelle D-2 dargestellt. Die Matrix ist wie folgt zu lesen: Bedarf ist geringfügig bedeutender als Bedarfsschwankungen (3), Bauteilpreis ist wesentlich bedeutender als Bauteilvolumen (5), Bauteilgewicht ist extrem unbedeutender als Variantenanzahl (1/9).

Abschließend ist zu prüfen, ob die Ergebnisse der AHP-Analyse konsistent sind. Der Begriff Konsistenz sei an folgendem Beispiel kurz erläutert: Wenn die Variantenanzahl bedeutender als der Bauteilpreis und der Bauteilpreis bedeutender als das Bauteilvolumen ist, dann muss auch die Variantenanzahl bedeutender als das Bauteilvolumen sein. Um die Konsistenz der AHP-Analyse formal zu bestätigen, schlägt *Saaty* vor, den Konsistenzverhältnis (englisch: *consistency ratio*, *C.R.*) zu berechnen. Bei einem Konsistenzverhältnis kleiner als 10 % gelten die AHP-Ergebnisse als konsistent. Für die Berechnung des Konsistenzverhältnisses ist zunächst der maximale Eigenwert der AHP-Matrix zu bestimmen. Dieser beträgt

Tabelle D-2: Ergebnisse der AHP-Analyse

	Bedarfs- schwankung	Bedarf	Varianten- anzahl	Bauteilpreis	Bauteil- volumen	Bauteil- gewicht	AHP-Gewicht
<b>Bedarfsschwankung</b>	<b>1</b>	1/3	1/7	1/3	3	5	<b>9,69 %</b>
<b>Bedarf</b>	3	<b>1</b>	1/5	1	2	3	<b>13,17 %</b>
<b>Variantenanzahl</b>	7	5	<b>1</b>	5	7	9	<b>50,25 %</b>
<b>Bauteilpreis</b>	3	1	1/5	<b>1</b>	5	6	<b>17,75 %</b>
<b>Bauteilvolumen</b>	1/3	1/2	1/7	1/5	<b>1</b>	3	<b>5,92 %</b>
<b>Bauteilgewicht</b>	1/5	1/3	1/9	1/6	1/3	<b>1</b>	<b>3,22 %</b>

für die obige Matrix 6,4973. Daraus resultiert ein Konsistenzverhältnis von  $C.R. = 8,02 \%$ . Für die genaue Kalkulation sei an dieser Stelle auf die Ausführungen von Saaty verwiesen [Saa-1987, S. 171 f.].

### D.1.3 Ergänzungen zur multivariaten Datenanalyse

#### Ausführungen zur Bestimmung der Clusteranzahl

Für die Bestimmung der Clusteranzahl wurden mit Hilfe des k-Means-Verfahrens die Clusterlösungen  $K = 1, 2, \dots, 16$  (d. h. für Lösungen mit unterschiedlicher Anzahl an Clustern) berechnet. Als initiale Clusterzentren wurden 1000 zufällig generierte Clusterzentren verwendet. Die Berechnung wurde mittels mehrerer R-Skripte durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung D-7 veranschaulicht. Die linke Seite der Abbildung zeigt die verschiedenen Modellprüfgrößen je Clusterlösung und die rechte Seite der Abbildung zeigt den Screeplot der 16 verschiedenen Clusterlösungen. Die Heterogenität im Screeplot entspricht der SQS innerhalb der Cluster (d. h.  $SQS_{in}(K)$ ).

Ein erster Anhaltspunkt zur Identifikation der Clusteranzahl stellt die optische Identifikation mit Hilfe des Screeplots dar. Im Screeplot ist zu sehen, dass ein besonders starker Anstieg der Heterogenität zwischen der Clusteranzahl 6 und 5 liegt. Nach dem *Ellbogen-Kriterium* ist somit die Clusterlösung mit 6 Clustern zu wählen. Neben dem Ellbogen-Kriterium können die berechneten Kennzahlen als Entscheidungshilfe für die Auswahl der Clusteranzahl dienen. Bei Verwendung der durch die Clusterlösung erklärte Streuung  $\eta_K^2$ , wird die Clusterlösung ausgewählt, die als erstes einen bestimmten Schwellenwert übersteigt. Solche Schwellenwerte können z. B. 70 %, 80 % oder 90 % sein. Die entsprechenden Werte sind

$K$	$SQS_{in}(K)$	$\eta_K^2$	$PRE_K$	$F_{max_K}$
1	39.564			
2	28.332	0,284	0,284	2.614
3	22.050	0,443	0,222	2.618
4	17.627	0,554	0,201	2.734
5	14.042	0,645	0,203	2.994
6	10.524	0,734	0,251	3.636
7	9.048	0,771	0,140	3.703
8	8.092	0,795	0,106	3.660
9	7.153	0,819	0,116	3.730
10	6.433	0,837	0,101	3.768
11	5.768	0,854	0,103	3.858
12	5.124	0,870	0,112	4.022
13	4.477	0,887	0,126	4.299
14	4.178	0,894	0,067	4.288
15	3.900	0,901	0,066	4.298
16	3.693	0,907	0,053	4.260

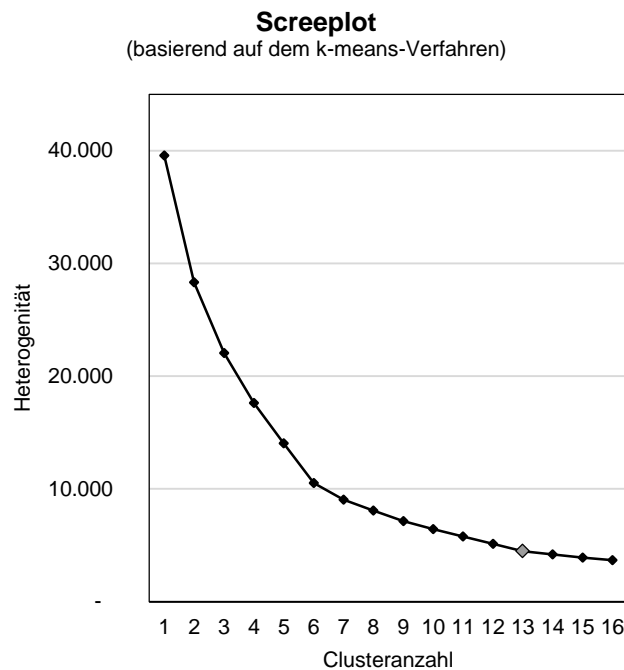


Abbildung D-7: Modellprüfgrößen der Clusterlösungen (links) und Screepplot (rechts) bei Anwendung des k-Means-Verfahrens

in der Abbildung grau hinterlegt, sodass nach dieser Logik die Clusterlösungen 6, 9 oder 15 zu wählen wären. Es ist jedoch anzumerken, dass die Festlegung eines Schwellenwertes subjektiv und schwierig ist, sodass von dieser Entscheidungshilfe abzusehen ist [Bac-2010, S. 308]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Clusterlösungen auszuwählen, nach welcher der PRE-Koeffizient (d. h. die prozentuale Verbesserung gegenüber der vorherigen Clusterlösung; vgl. Kapitel 4.3.3.2) deutlich absinkt. Der Koeffizient sinkt am stärksten nach den Clusterlösungen 2, 6, 7 und 13. Die entsprechenden Werte des PRE-Koeffizienten sind grau hinterlegt. Eine dritte Möglichkeit zur Bestimmung der Clusteranzahl bietet die maximale F-Statistik. Da bei der Clusteranalyse die Streuung zwischen den Clustern maximiert wird, wird auch der F-Wert maximiert. Entsprechend ist die Clusterlösung mit dem höchsten F-Wert zu wählen. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel ist das Clusterlösung 13 mit einem F-Wert von 4.299. Da die Modellprüfgröße der durch die Clusterlösung erklärten Streuung  $\eta_K^2$  kein objektives Kriterium zur Auswahl der Clusteranzahl darstellt, werden ausschließlich der PRE-Koeffizient und der F-Wert für diese Entscheidung herangezogen. Eine Übereinstimmung beider Kennzahlen hinsichtlich einer geeigneten Clusteranzahl liegt bei Clusterlösung 13 vor. Somit wird diese Clusterlösung zur Ermittlung der Grenzbauteile verwendet.



### Statistische Kennzahlen der 13-Clusterlösung

Die folgende Tabelle D-3 zeigt die Eigenschaften der 13 Cluster. Es sind jeweils das arithmetische Mittel, der Median, die Standardabweichung, der Minimalwert und der Maximalwert je Einflussfaktor und je Cluster angegeben.

Tabelle D-3: Statistische Kennzahlen der 13-Clusterlösung (Teil 1/2)

	BD	BG	BV	VAR	BDS	BP
<b>Cluster 1</b>	n = 754					
Arithm. Mittel	1.869	60,0	0,35	173	0,81	91,1
Median	205	3,0	0,24	163	0,65	11,4
Std.abw.	5.469	91,5	0,39	34	0,54	136,3
Min	1	0,0	0,00	131	0,00	0,5
Max	48.088	324,9	1,28	223	2,47	1.559,7
<b>Cluster 2</b>	n = 647					
Arithm. Mittel	46.813	2,44	0,02	15	0,26	7,7
Median	43.318	0,2	0,00	9	0,22	2,4
Std.abw.	15.429	15,5	0,08	18	0,21	15,5
Min	24.967	0,0	0,00	1	0,00	0,00
Max	89.847	372,0	1,20	99	1,83	178,7
<b>Cluster 3</b>	n = 49					
Arithm. Mittel	8	2.494,5	0,00	95	3,67	7.991,5
Median	4	2.465,0	0,00	95	3,07	8.219,1
Std.abw.	15	329,1	0,00	0	2,29	1.324,3
Min	1	1.760,0	0,00	95	0,00	5.517,6
Max	103	3.240,0	0,00	95	7,14	10.186,6
<b>Cluster 4</b>	n = 106					
Arithm. Mittel	133.427	1,3	0,00	13	0,26	3,0
Median	126.137	0,1	0,00	6	0,23	0,9
Std.abw.	33.194	6,1	0,01	25	0,17	8,2
Min	90.512	0,0	0,00	1	0,00	0,0
Max	240.080	38,0	0,10	223	1,05	46,4
<b>Cluster 5</b>	n = 204					
Arithm. Mittel	73	36,7	0,15	31	6,09	201,5
Median	2	6,3	0,01	23	6,11	84,0
Std.abw.	655	67,0	0,44	27	1,06	399,2
Min	1	0,0	0,00	1	4,30	0,0
Max	8.820	290,0	3,28	98	7,14	3.112,3
<b>Cluster 6</b>	n = 13					
Arithm. Mittel	355.104	0,0	0,00	14	0,24	0,2
Median	337.344	0,0	0,00	6	0,22	0,1
Std.abw.	101.621	0,0	0,00	12	0,06	0,3
Min	250.810	0,0	0,00	1	0,10	0,0
Max	504.104	0,1	0,00	38	0,34	0,9

BD - Bedarf, BG - Bauteilgewicht, BV - Bauteilvolumen, VAR - Variantenanzahl  
 BDS - Bedarfsschwankung, BP - Bauteilpreis

Tabelle D-3: Statistische Kennzahlen der 13-Clusterlösung (Teil 2/2)

	BD	BG	BV	VAR	BDS	BP
<b>Cluster 7</b>	n = 691					
Arithm. Mittel	492	23,4	0,07	25	2,43	101,1
Median	24	4,2	0,01	16	2,22	35,4
Std.abw.	1.810	50,4	0,17	23	0,77	190,0
Min	1	0,0	0,00	1	1,41	0,0
Max	19.565	266,0	1,72	99	4,26	2.039,5
<b>Cluster 8</b>	n = 112					
Arithm. Mittel	5.262	26,0	2,67	31	0,82	174,2
Median	880	5,5	2,66	19	0,58	52,7
Std.abw.	12.869	54,6	0,83	30	0,76	302,8
Min	1	0,0	1,48	1	0,00	0,4
Max	66.276	382,0	4,68	99	3,46	1.388,6
<b>Cluster 9</b>	n = 2.691					
Arithm. Mittel	4.400	10,1	0,05	14	0,51	51,6
Median	1.835	1,1	0,00	10	0,43	13,4
Std.abw.	5.727	23,5	0,12	11	0,32	112,0
Min	0	0,0	0,00	1	0,00	0,0
Max	25.386	188,5	1,28	41	1,52	1.198,1
<b>Cluster 10</b>	n = 44					
Arithm. Mittel	37	355,2	0,24	34	2,35	3.737,7
Median	14	259,6	0,00	32	2,17	3.313,0
Std.abw.	70	363,1	0,47	16	1,38	1.421,9
Min	1	0,0	0,00	2	0,48	2.173,8
Max	342	960,0	1,28	61	5,28	7.648,9
<b>Cluster 11</b>	n = 243					
Arithm. Mittel	91	46,5	0,58	164	3,78	306,2
Median	6	19,0	0,24	175	3,97	227,2
Std.abw.	522	75,8	0,55	39	0,94	315,9
Min	1	0,0	0,00	88	2,13	1,5
Max	5.047	264,8	1,28	233	7,14	1.559,7
<b>Cluster 12</b>	n = 993					
Arithm. Mittel	3.626	18,3	0,08	66	0,65	48,9
Median	768	0,9	0,01	62	0,57	17,6
Std.abw.	6.432	54,9	0,17	20	0,41	103,3
Min	1	0,0	0,00	36	0,00	0,0
Max	34.920	283,1	1,27	99	2,06	1.697,9
<b>Cluster 13</b>	n = 48					
Arithm. Mittel	483	11,6	8,88	103	1,25	131,6
Median	98	5,6	7,73	123	0,69	119,3
Std.abw.	1.035	15,9	1,92	35	1,19	120,2
Min	1	0,0	7,73	9	0,00	16,0
Max	5.206	45,0	12,10	123	5,28	814,4

BD - Bedarf, BG - Bauteilgewicht, BV - Bauteilvolumen, VAR - Variantenanzahl  
 BDS - Bedarfsschwankung, BP - Bauteilpreis

## D.2 Ergänzungen zur Anwendung des Optimierungsmodells

### Veranschaulichung des Optimierungsmodells im Excel-Tool

In Abbildung D-8 ist exemplarisch der Screenshot des in MS Excel implementierten Optimierungsmodells dargestellt. Da es sich um einen Screenshot handelt, ist hier nur ein Ausschnitt abgebildet. Es sind somit nicht alle Nebenbedingungen ersichtlich.

Zielfunktion	min	3510,26€			Werk	M
<b>Transportkonzepte</b>						
<b>Transportkonzepte</b>						
x_1 (FTL)	x_2 (GS)	x_3 (HUB)				
	1	0	0			
<b>Kostenblöcke</b>						
<b>Kostenübersicht</b>						
Transportkosten	4,19 €	Lagerkosten	34,04 €	Trailerrente	0,00 €	
Direkt	4,19 €	Fix	0,20 €	Pufferzeit	0,00 €	
Vorlauf	0,00 €	Variabel	0,50 €	Standzeit	0,00 €	
Hauptlauf	0,00 €	Ein-/Auslagerung	33,33 €	Dienstleisterkosten	0,00 €	
Kapitalbindung	1,78 €	Behälterkosten	0,40 €	intern	0,00 €	
Fix	1,09 €	Miete	0,40 €	extern	0,00 €	
Variabel	0,69 €	Leerguttransport	0,00 €			
<b>Parameter - Relation</b>						
<b>Kostensätze</b>			<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Zeiten</b>	
Zinssatz		10,00	%	Wareneingangszeit		1
Miete Lager		10	€/m <sup>2</sup> je MN	Transitzeit		2
Miete Trailer		720	€/MN	Vollgut beim LF		3
Dienstleisterkosten (intern)		15	€/Transport	Leergutpuffer beim LF		5
Dienstleisterkosten (extern)		0,103	€/BT	Pufferzeit_LL		0,54
Sequenzierungskosten (intern)		0,103	€/BT			
Sequenzierungskosten (extern)		0,103	€/BT			
Ein-/Auslagerungssatz		10	€/TE			
Zuschlag Direkt		0,691	%			
Zuschlag Hub Vorlauf		0	%			
Zuschlag Hub Hauptlauf		0	%			
FTL Minimum		0	€			
					$\lambda_{q\_T}$	$\lambda_{q\_B}$
<b>Lambda</b>						
Lambda	$\lambda_{T\_FTL}$	$\lambda_{T\_GS}$	$\lambda_{T\_HUB\_VL}$	$\lambda_{T\_HUB\_HL}$	$\lambda_{B\_KB\_FIX}$	
Wert	1596,27	0,00	0,0000	0,0000	0,3269	
Lambda	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{EM1}$	$\lambda_{EM2}$	$\lambda_{DL\_IN}$	$\lambda_{DL\_EX}$	
Wert	0,12	562,69	1,7107	30	1,442	
<b>Konfigurationen (KV + NB)</b>						
<b>Anlieferfrequenzen</b>			<b>EV/KV</b>	<b>Belieferungskonzept</b>		<b>KV</b>
	11			Sequenzierung (intern)		0
	20			Sequenzierung (extern)		0

Abbildung D-8: Exemplarischer Screenshot des in MS Excel implementierten Optimierungsmodells

## D.3 Ergänzungen zur Anwendung des Flexibilitätsansatzes

### D.3.1 Ergänzungen zur Umstellbewertung

#### Detaillierung der Arbeitspakete in Aktivitäten

Tabelle D-4 zeigt die Aktivitäten, die in jedem Arbeitspaket einer Logistikkonzeptumstellung durchzuführen sind.

Tabelle D-4: *Detaillierung der Arbeitspakete in Aktivitäten (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. B-1])*

Nr.	Arbeitspaket	Aktivitäten
1	Lastenheft	Erstellung Lastenheft für neues Belieferungskonzept
2	Logistikaudit	Auditierung des Lieferanten
3	Mitarbeiterinformation	Information an IT, Disposition, Lager, Projektplanung (Trailer-Dock und Trailer-Yard), Prozessplanung in Montage, Sequenzierlogistik, Einkauf, Transportlogistik, Materialfluss, Wareneingang
4	IT-Anbindung (OEM)	Parameter für Betriebsstellenfilter anlegen, Anlage/Löschen Transport- und Teilefamilie, Parameterpflege
5	IT-Anbindung (Lieferant)	Anbindung Lieferanten an OEM-System, Testdatenversand, Datenpflege
6	Prozessbegleitung vor Roll-Out	Physische Anpassung des Lagerbestands, Prüfung des Lagerbestands
7	Werkslayout und Infrastruktur	Stellfläche für Trailer schaffen, Supermarkt-Zone, Sequenzierlager
8	Ladungsträgeranalyse	Analyse des bestehenden Ladungsträgers auf Weiterverwendbarkeit
9	Beschaffung Logistikequipment	Beschaffung von Handlingsgeräten (z. B. Manipulator)
10	Ladungsträgerbeschaffung	Beauftragung des Einkaufs zur Ladungsträgerentwicklung, Vergabe der Ladungsträgerentwicklung durch Einkauf, Ladungsträgerentwicklung (inkl. Prototypen), Beauftragung, Vergabe und Bau von Serienladungsträgern
11	Parameterbestimmung	Bestimmung Ladungsträgertyp, Ladungsträgergröße, Packlos, Ladungsträgergewicht, Lieferantenstandort, Beladeschema des Trailers, Trailerreichweite, Gesamtgewicht pro Trailer, Teilebedarfe pro Jahr,
12	Transportkonzept	Leistungsbeschreibung erstellen, Transportausschreibung erstellen (falls erforderlich), Einbindung des neuen Transportdienstleisters (falls erforderlich)
13	Prozessbegleitung nach Roll-Out	manuelle Bestandsbereinigung im Lager

### Aktivitäten je nach Logistikkonzeptumstellung

In Tabelle D-5 sind alle bei dem Nutzfahrzeughersteller identifizierten Aktivitäten von Logistikkonzeptumstellungen aufgeführt. Zudem ist dargestellt, welche Aktivität für welche Umstellung relevant ist. Abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen, kann diese Zuordnung allerdings leicht variieren. Die Spalte *Vorgänger* gibt an, welche Aktivitäten direkt vor der entsprechenden Aktivität durchzuführen sind.

Tabelle D-5: Zuordnung der Aktivitäten zu den verschiedenen Logistikkonzeptumstellungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 56, B-1]) (Teil 1/2)

Nr.	Aktivität	von:	LH	LH	JIT	JIT	JIS	JIS
		nach:	JIT	JIS	LH	JIS	LH	JIT
		Vorgänger						
1	Erstellung Lastenheft		X	X		X		X
2	Auditierung des Lieferanten	1	X	X		X		
3	Information IT	2	X	X	X	X	X	X
4	Information Dispo	2	X	X	X	X	X	X
5	Parameter für Betriebsstellenfilter anlegen	4	X	X		X		X
6	Anlegen von Transport- und Teilefamilie	5	X	X				
7	Löschen von Transport- und Teilefamilie	5			X		X	
8	Parameter im Abruf-System pflegen/ändern	5				X		X
9	Anbindung des Lieferanten an Abruf-System	3, 6, 7, 8	X	X		X		X
10	Installation der Systeme beim Lieferanten (inkl. Testdatenversand)	9	X	X		X		X
11	Pflege und Eingabe der Daten im Host	10	X	X	X	X	X	X
12	Information Lager	2	X	X	X		X	
13	Physische Anpassung des Lagerbestands	12	X	X				
14	Prüfung des Lagerbestands	12			X		X	
15	Information Projektplanung (Dock, Trailer Yard)	2	X	X	X	X	X	X
16	Stellfläche für Trailer schaffen	15	X	X	X	X	X	X
17	Information Prozessplanung in Montage	2		X		X	X	X
18	Platz in Supermarkt schaffen	17, 19					X	X
19	Information Sequenzierlogistik	2	X	X	X	X	X	X
20	Information Einkauf (Neuverhandlung)	2	X	X	X	X	X	X
21	Analyse des Ladungsträgers auf Wiederverwendbarkeit	20		X		X	X	X
22	Bestimmung Behälter (SLT, ULT, etc.)	21	X	X	X	X	X	X
23	Bestimmung Teilebedarfe pro Jahr	21	X	X	X	X	X	X
24	Beauftragung Einkauf, Vergabe der Ladungsträgerentwicklung durch Einkauf	22, 23		X		X	X	X
25	Ladungsträgerentwicklung (inkl. Prototyp)	24		X		X	X	X

Tabelle D-5: Zuordnung der Aktivitäten zu den verschiedenen Logistikkonzeptumstellungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 56, B-1]) (Teil 2/2)

Nr.	Aktivität	von:	LH	LH	JIT	JIT	JIS	JIS
		nach:	JIT	JIS	LH	JIS	LH	JIT
		Vorgänger						
26	Beschaffung Handlingsgeräte (Manipulator)	19, 25		X		X	X	X
27	Beauftragung, Vergabe, Bau Serienladungsträger	25		X		X	X	X
28	Identifikation Behältergröße (für Transportkosten)	25	X	X	X	X	X	X
29	Bestimmung Packlos	25	X	X	X	X	X	X
30	Bestimmung max. Gewicht je Behälter	25	X	X	X	X	X	X
31	Bestimmung Lieferantenstandort	25	X	X	X	X	X	X
32	Bestimmung Beladeschema	25	X	X	X	X	X	X
33	Beschaffung Routenequipment	25, 42		X		X	X	X
34	Bestimmung Trailerreichweite	29	X	X	X	X	X	X
35	Bestimmung Gesamtgewicht pro Trailer	30	X	X	X	X	X	X
36	Leistungsbeschreibung für Transportkonzept erstellen	28, 34, 35	X	X	X	X	X	X
37	keine Ausschreibung nötig: Transport wird nicht ausgeschrieben	36	abhängig von Transportkonzeptumstellung					
38	Ausschreibung nötig: Transport wird ausgeschrieben	36	abhängig von Transportkonzeptumstellung					
39	Ausschreibungsunterlage für Transportkonzept erstellen	38	abhängig von Transportkonzeptumstellung					
40	Einbindung des neuen Transportdienstleisters	37, 39	abhängig von Transportkonzeptumstellung					
41	Information Transportlogistik	2	X	X	X	X	X	X
42	Information Materialfluss	2	X	X	X	X	X	X
43	Information Wareneingang	2	X	X	X	X	X	X
44	Bestandsbereinigung im Lager nach Prozess-Roll-Out	Umstellung	X	X				

### Darstellung des Excel-Tools zur Bewertung von Umstellungen

In Abbildung D-9 ist ein Ausschnitt des Umstelltools zur Bewertung von Umstellkosten und Umstelldauern abgebildet. In dem Tool sind sämtliche Abhängigkeiten durch Wenn-Dann-Verknüpfungen hinterlegt. Je nach getroffener Auswahl bei bestimmten Fragen werden zusätzliche Fragen für den Anwender eingeblendet.

Schätzung von Umstellkosten und Umstelldauer für die Umstellung von Logistikkonzepten											
Bauteil / Teilefamilie: XYZ		IST		Belieferungs-konzept: <i>lagerhaltig</i>		SOLL		JIS		bisheriger Behälter:	
				GS / Hub				FTL		ULT-GLT 0579	
Identifikation der Parameter				Kostenparameter			Kosten		Dauer		
							min Ø max		min Ø max Planwert		
<b>1.) Behälterabhängige Aktivitäten</b>											
Behälteränderung nötig?		nein					€				
<b>1.a) wenn ja:</b>											
Gibt es den Behälter schon?		ja									
Behälternummer				Ladungsträger-entwicklung		entfällt					
Stückpreis		unbekannt		Ladungsträger-neubeschaffung		entfällt					
circa zu beschaffende Behälter				Werkzeug für EPP		entfällt					
neuer Behälter wird...		SLT Stahl									
<b>1.b) wenn ja:</b>											
Wird Bauteil bisher mit Manipulator bewegt oder wiegt es >12kg ?		ja									
Ändert sich die Zugriffsrichtung im neuen Behälter?		ja									
Ist Neubeschaffung oder Änderung des Manipulators nötig?		Neubeschaffung		Manipulator		entfällt					
<b>1.c) wenn ja und neuer Behälter wird SLT:</b>											
Maße des SLT:		DB-Maße		Routenequipment: Materialtransportwägen		entfällt					

Abbildung D-9: Screenshot des Excel-Tools zur Bewertung von Umstellkosten und Umstelldauern

### Rahmenbedingungen der Umstellungen der Grenzbauteile

In Tabelle D-6 sind die Rahmenbedingungen je betrachtetem Grenzbauteil aufgeführt. Die Rahmenbedingungen sind in die Kategorien *Belieferungskonzept*, *Ladungsträger*, *IT*, *Lieferant* und *Transportkonzept* unterteilt.

Tabelle D-6: Rahmenbedingungen der Grenzbauteilumstellungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 69])

Teilefamilie	BelK		LT		IT		Lieferant		TK	
	vorher	nachher	Änderung	Entwicklung	Neuanbindung	Anpassung	Audit	Standort	vorher	nachher
Abgasrohr	LH	JIS				intern				intern
Ablage (Beifahrer, Mitte)	LH	JIT				X			FTL	FTL
Achsbrücke (Rohteil, Mittelteil)	LH	JIS	X	SLT	X		X	Europa	GS	FTL
Batteriekastendeckel	LH	JIT				X			GS	FTL
Druckluftbehälter	LH	JIS	X	SLT		X	X	Europa	GS	FTL
Hinterradnabe Rohteil	LH	JIT			X		X	Europa	GS	FTL
Innenkotflügel (links, rechts)	LH	JIT			X		X	Europa	GS	FTL
Laufschiene	LH	JIS			X		X	Europa	GS	FTL
Motorhaubenisolierung	LH	JIT				X			GS	FTL
Rahmenverstärkung	LH	JIS				X			GS	FTL
ZSB Achslenker	LH	JIS				X			GS	FTL
ZSB Bremsleitung	LH	JIS				intern				intern
ZSB Federbock	LH	JIS				X			GS	FTL
ZSB Kühlanlage	LH	JIS				X			GS	FTL
ZSB Luftfeder	LH	JIS			X		X	Europa	GS	FTL
ZSB Schublade	LH	JIS				X			GS	FTL
ZSB Stirnwandverkleidung	LH	JIS				X	X	Europa	GS	FTL

BelK = Belieferungskonzept, LT = Ladungsträger, IT = IT-Anbindung, TK = Transportkonzept



## Ergebnisse des Umstelltools

In Tabelle D-7 sind die Umstellkosten und Umstell Dauern je Umstellscenario für die 17 Grenzbauteile aufgeführt.

Tabelle D-7: *Kosten und Dauern der Grenzbauteilumstellungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [fml-2017c, S. 70])*

Teilefamilie	Erst-Umstellung		Rück-Umstellung		Erneut-Umstellung	
	Kosten	Dauer	Kosten	Dauer	Kosten	Dauer
Abgasrohr	7.060	71	30.810	87	7.060	71
Ablage (Beifahrer, Mitte)	17.820	71	4.030	9	17.820	71
Achsbrücke (Rohteil, Mittelteil)	270.240	331	30.810	87	17.930	71
Batteriekastendeckel	17.820	187	4.030	9	17.820	71
Druckluftbehälter	253.840	331	30.810	87	17.930	71
Hinterradnabe Rohteil	39.220	189	4.030	9	17.820	71
Innenkotflügel (links, rechts)	39.220	189	4.030	9	17.820	71
Laufschiene	39.330	189	30.810	87	17.930	71
Motorhaubenisolierung	17.820	187	4.030	9	17.820	71
Rahmenverstärkung	17.930	187	30.810	87	17.930	71
ZSB Achslenker	17.930	187	30.810	87	17.930	71
ZSB Bremsleitung	7.060	71	30.810	87	7.060	71
ZSB Federbock	17.930	187	30.810	87	17.930	71
ZSB Kühlanlage	17.930	187	30.810	87	17.930	71
ZSB Luftfeder	39.330	189	30.810	87	17.930	71
ZSB Schublade	17.930	187	30.810	87	17.930	71
ZSB Stirnwandverkleidung	22.930	189	30.810	87	17.930	71

[Kosten in Euro] [Dauer in AT]

### D.3.2 Ergänzungen zur Anwendung des Entscheidungsmodells

#### Input-Daten für das Entscheidungsmodell

In Tabelle D-8 sind die Input-Daten für die Analyse des Verhaltens des Entscheidungsmodells zusammengefasst. In der letzten Spalte ist jeweils kommentiert, für welche der Modellstufen der jeweilige Input-Parameter relevant ist.

Tabelle D-8: Input-Parameter für die Verhaltensanalyse des Entscheidungsmodells

Inputparameter	Notation	Wert	Modellstufe
Anfangsbedarf	$B_0$	2.000	alle Stufen
Bedarfsgrenze	$BG$	1.500	alle Stufen
Bedarfsschwankung	$\sigma$	15 %	alle Stufen
Faktor für positive Bedarfsentwicklung	$u$	1,16	alle Stufen
Faktor für negative Bedarfsentwicklung	$d$	0,86	alle Stufen
Wahrscheinlichkeit für positive Entwicklung	$\pi_u$	0,496	alle Stufen
Wahrscheinlichkeit für negative Entwicklung	$\pi_d$	0,504	alle Stufen
Logistikkostensatz für $LK_1$ , Bedarf kleiner BG	$c_{LK_1, < BG}$	1,90	alle Stufen
Logistikkostensatz für $LK_1$ , Bedarf größer BG	$c_{LK_1, > BG}$	2,10	alle Stufen
Logistikkostensatz für $LK_2$ , Bedarf kleiner BG	$c_{LK_2, < BG}$	2,20	alle Stufen
Logistikkostensatz für $LK_2$ , Bedarf größer BG	$c_{LK_2, > BG}$	1,60	alle Stufen
Diskontierungssatz	$r$	1 %	alle Stufen
Umstellkosten Erstumstellung (von $LK_1$ zu $LK_2$ )	$I(1 \rightarrow 2)$	3.000	Stufe 2a
Umstellkosten Rückumstellung (von $LK_2$ zu $LK_1$ )	$I(2 \rightarrow 1)$	200	Stufe 2a
Umstellkosten Erneut-Umstellung (von $LK_1$ zu $LK_2$ )	$I^{re}(1 \rightarrow 2)$	1.000	Stufe 2b
Investition in Flexibilisierungsmaßnahme(n)	$I(FM)$	3.000	Stufe 3
Umstellkosten nach FM für Erstumstellung	$I^*(1 \rightarrow 2)$	1.500	Stufe 3
Umstellkosten nach FM für Rückumstellung	$I^*(2 \rightarrow 1)$	100	Stufe 3
Umstellkosten nach FM für Erneut-Umstellung	$I^{re,*}(1 \rightarrow 2)$	1.000	Stufe 3
Änderungsfaktor des Bedarfs zum Zeitpunkt $t = 5$	$\beta_5$	0,3	Stufe 5a
Periode, ab der sich die Logistikkosten ändern	$t^{nK}$	4	Stufe 5b
Periode, ab der wieder die ursprünglichen Logistikkosten gelten	$t^{aK}$	8	Stufe 5b
neuer Logistikkostensatz ab $t^{nK}$ für $LK_1$ , Bedarf kleiner BG	$c_{LK_1, < BG}^*$	1,70	Stufe 5b
neuer Logistikkostensatz ab $t^{nK}$ für $LK_1$ , Bedarf größer BG	$c_{LK_1, > BG}^*$	1,80	Stufe 5b
neuer Logistikkostensatz ab $t^{nK}$ für $LK_2$ , Bedarf kleiner BG	$c_{LK_2, < BG}^*$	2,10	Stufe 5b
neuer Logistikkostensatz ab $t^{nK}$ für $LK_2$ , Bedarf größer BG	$c_{LK_2, > BG}^*$	1,85	Stufe 5b

### Logistikkonzeptpläne

In Abbildung D-10 sind die Logistikkonzeptpläne der Modellstufen 2a und 3 abgebildet. Der Logistikkonzeptplan ist analog zur Entwicklung des Bedarfs aufgebaut (vgl. Abbildung 6-9). Beispielsweise sollte bei Stufe 3 bei einer down-Bewegung in Periode 1  $LK_2$  verwendet werden. In Periode 2 sollte bei einer up-Bewegung des Bedarfs weiterhin in  $LK_2$  angeliefert werden, während bei einer down-Bewegung des Bedarfs auf  $LK_1$  umgestellt werden sollte.

**Logistikkonzeptplan Stufe 2a**

s \ t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
2		LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
3			LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
4				LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
5					LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
6						LK1	LK1	LK1	LK2	LK2	LK2	LK2
7							LK1	LK1	LK1	LK1	LK2	LK2
8								LK1	LK1	LK1	LK1	LK1
9									LK1	LK1	LK1	LK1
10										LK1	LK1	LK1
11											LK1	LK2
12												LK2

**Logistikkonzeptplan Stufe 3**

s \ t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
2		LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
3			LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
4				LK1	LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
5					LK1	LK1	LK1	LK2	LK2	LK2	LK2	LK2
6						LK1	LK1	LK1	LK1	LK2	LK2	LK2
7							LK1	LK1	LK1	LK1	LK1	LK1
8								LK1	LK1	LK1	LK1	LK1
9									LK1	LK1	LK1	LK1
10										LK1	LK1	LK1
11											LK1	LK1
12												LK1

Abbildung D-10: Entwicklung der zu verwendenden Logistikkonzepte entsprechend der Bedarfsentwicklung

### Ergebnisse bei Berücksichtigung der Umstelldauer

In Abbildung D-11 sind die numerischen Ergebnisse der Modellstufen mit Umstellkosten (Stufe 2a) und mit Berücksichtigung der Umstelldauer von 1 Monat (Stufe 4a, 4b.1) bzw. 3 Monaten (Stufe 4b.2) dargestellt.

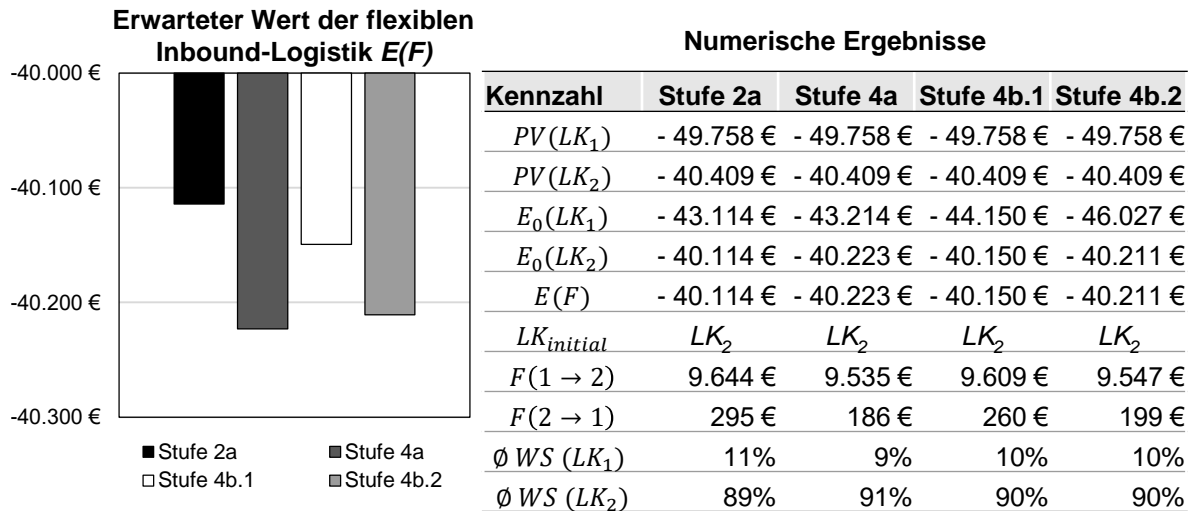


Abbildung D-11: Ergebnisse der Modellstufen 2a, 4a, 4b.1 und 4b.2

### Ergebnisse bei Veränderung der Einflussgrößen

In Abbildung D-12 sind die numerischen Ergebnisse der Modellierung sprunghafter Bedarfsveränderungen mit (Stufe 5a.1) und ohne Flexibilisierungsmaßnahme (Stufe 5a.2) sowie der Modellierung sprunghafter Logistikkostenveränderungen mit (Stufe 5b.1) und ohne Flexibilisierungsmaßnahme (Stufe 5b.2) dargestellt.

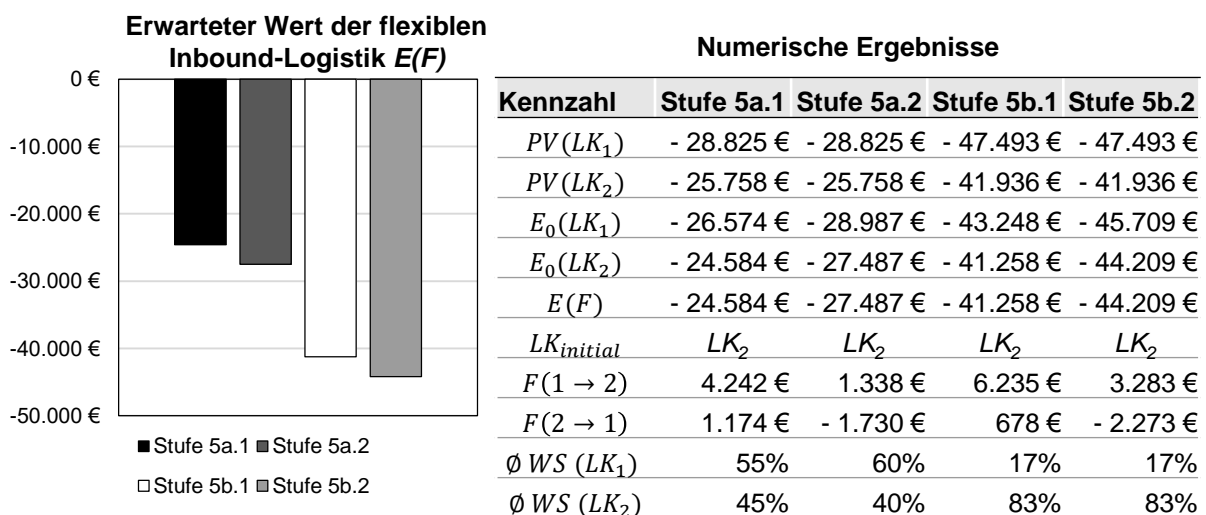


Abbildung D-12: Ergebnisse der Modellstufen 5a.1, 5a.2, 5b.1 und 5b.2

### Input-Daten für die Anwendung des Entscheidungsmodells auf die Grenzbauteile

In Tabelle D-9 sind die Input-Daten für das Grenzbauteil *Frontklappen* aufgeführt.

Tabelle D-9: *Input-Parameter für Frontklappen zur Anwendung des Entscheidungsmodells*

<b>Input-Parameter</b>	<b>Notation</b>	<b>Wert</b>
Anfangsbedarf	$B_0$	2.808
Bedarfsgrenze	$BG$	1.800
Bedarfsschwankung	$\sigma$	20 %
Faktor für positive Bedarfsentwicklung	$u$	1,22
Faktor für negative Bedarfsentwicklung	$d$	0,82
Wahrscheinlichkeit für positive Entwicklung	$\pi_u$	0,475
Wahrscheinlichkeit für negative Entwicklung	$\pi_d$	0,525
Logistikkostensatz für $LK_1$ , Bedarf kleiner BG	$c_{LK_1, < BG}$	2,85
Logistikkostensatz für $LK_1$ , Bedarf größer BG	$c_{LK_1, \geq BG}$	3,52
Logistikkostensatz für $LK_2$ , Bedarf kleiner BG	$c_{LK_2, < BG}$	3,05
Logistikkostensatz für $LK_2$ , Bedarf größer BG	$c_{LK_2, \geq BG}$	2,52
Diskontierungssatz	$r$	1 %
Umstellkosten (Erst) (von $LK_1$ zu $LK_2$ )	$I(1 \rightarrow 2)$	29.000
Umstellkosten (Rück) (von $LK_2$ zu $LK_1$ )	$I(2 \rightarrow 1)$	25.000
Umstellkosten (Erneut) (von $LK_1$ zu $LK_2$ )	$I^{re}(1 \rightarrow 2)$	15.000
Investition in Flexibilisierungsmaßnahme(n)	$I(FM)$	20.000
Umstellkosten (Erst) nach FM	$I^*(1 \rightarrow 2)$	22.000
Umstellkosten (Rück) nach FM	$I^*(2 \rightarrow 1)$	18.000
Umstellkosten (Erneut) nach FM	$I^{re,*}(1 \rightarrow 2)$	8.000