

**DOMINIK BERBIG**

**Entwicklung eines Kosten und Nutzen umfassenden  
Modells zur Wahl des optimalen Behälters**

**BAND 84**

**Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Fördertechnik und  
Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)**

 **KIT** Scientific  
Publishing



Dominik Berbig

**Entwicklung eines Kosten und Nutzen umfassenden  
Modells zur Wahl des optimalen Behälters**

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme  
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

BAND 84

# **Entwicklung eines Kosten und Nutzen umfassenden Modells zur Wahl des optimalen Behälters**

von  
Dominik Berbig

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Fakultät für Maschinenbau, 2014  
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Prof. Dr. Karl-Heinz Waldmann

## Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe  
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover – is licensed under the  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License  
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 0171-2772

ISBN 978-3-7315-0324-8

DOI: 10.5445/KSP/1000044973





# **Entwicklung eines Kosten und Nutzen umfassenden Modells zur Wahl des optimalen Behälters**

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
genehmigte

**Dissertation**

von

**Dipl.-Wi.-Ing. Dominik Berbig**

aus Stutensee

Tag der mündlichen Prüfung:

03.09.2014

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Korreferent:

Prof. Dr. Karl-Heinz Waldmann



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme, gilt mein besonderer Dank für die Übernahme des Hauptreferats sowie für die Unterstützung meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, insbesondere für die Einstellung zu Hochzeiten der Krise und damit verbundener Einstellungsstopps Anfang 2009. Die Möglichkeit zum selbstständigen Arbeiten, die zielführenden Diskussionen sowie die richtigen Fragen haben maßgeblich dazu beigetragen, meine Promotion erfolgreich abzuschließen.

Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Waldmann danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie die interessanten Diskussionen zu den Modellen. Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus möchte ich mich besonders bei Herrn Hoyer, Herrn von Langen und Herrn Langendorf bedanken, ohne deren Unterstützung, Risikobereitschaft und „Neugier“ die Entwicklung des Modells und damit die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Mein herzlicher Dank gilt allen ehemaligen Kollegen für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre, ihre Unterstützung sowie die zahlreichen Anregungen und wichtigen Diskussionen. Hervorheben möchte ich hier Judith Weiblen, Melanie Schwab und Christoph Nobbe, mit denen ich das „Diss Team 201X“ bilden konnte und bei denen ich stets ein offenes Ohr für Fragen und Diskussionen fand. Ebenso danke ich den studentischen Kräften, die meine Forschungsarbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie und insbesondere meinen Eltern, die mir den eingeschlagenen Bildungsweg als Grundstein dieser Arbeit ermöglicht haben. Sie, sowie auch meine Schwiegereltern, haben mich stets unterstützt, Interesse am Fortschritt meiner Arbeit gezeigt und an mich geglaubt.

Mein größter und herzlichster Dank jedoch gilt meiner Frau Katharina sowie unseren Kindern Maximilian und Konstantin. Ich danke ihnen für ihre bedingungslose Liebe, ihre stete und große Unterstützung sowie für ihr Verständnis. Sie haben mir die notwendige Kraft, Motivation und Freiräume zum Gelingen dieser Arbeit gegeben. Ein Lachen von ihnen entschädigt für unzählige Widrigkeiten des Arbeits- und Forschungsalltags. Ihre Freude ist meine Freude.

Liebe Katharina, lieber Maximilian und lieber Konstantin, vielen Dank für alles. Ihr führt mir täglich vor Augen, worauf es wirklich ankommt. Ihr zeigt mir, was die wirklich entscheidenden, wichtigen Dinge in meinem Leben sind.

Stutensee, September 2014

Dominik Berbig

# Kurzfassung

*Dominik Berbig*

## **Entwicklung eines Kosten und Nutzen umfassenden Modells zur Wahl des optimalen Behälters**

Behälter spielen zur Materialbereitstellung in der Montage eine wichtige Rolle. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Festlegung auf einen Behälter häufig ohne Berücksichtigung der durch die Behältergröße beeinflussbaren Faktoren und Zusammenhänge erfolgt. Dies lässt die Vermutung zu, dass die bei der Bestimmung des (kosten-)optimalen Behälters verwendeten Verfahren unzureichend sind. So werden zwar selbstverständlich die Abmessungen des in den Behälter zu legenden Teils selbst und möglicherweise auch Verbrauchsdaten zur Behälterauswahl herangezogen. Eine Betrachtung aller beeinflussbaren Faktoren und Kosten bleibt aber aus. Auch wenn dem Thema Ladungsträger und Ladungsträgerauswahl in der Literatur und Forschung mittlerweile mehr Aufmerksamkeit gewidmet wird und die Wichtigkeit eines umfassenden Modells zur Behälterauswahl erkannt wurde, findet sich bisher jedoch noch kein geeignetes, ganzheitliches Modell zur Auswahl des für die Materialversorgung einer Montagelinie zu verwendenden Behälters. Wie sich im Rahmen der Untersuchungen zu dieser Arbeit darüber hinaus gezeigt hat, ist ein solches Modell auch der Industrie nicht bekannt, wie Untersuchungen bei großen Unternehmen der Automobilindustrie belegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Lücke nicht nur identifiziert und verifiziert, sondern auch durch die Erstellung eines praxistauglichen Modells zur Behälterauswahl geschlossen. Dieses Modell umfasst die in

der Arbeit identifizierten quantitativen wie qualitativen Einflussfaktoren. Somit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Entscheidung für oder gegen einen Behälter nicht nur Kosten verursacht, sondern auch über die reinen Kosten hinausgehende Effekte (bspw. ergonomische oder qualitätsbezogene) mit sich bringt. Die Ermittlung dieser Faktoren sowie die Bewertung ihrer Bedeutung im Rahmen des Prozesses der Behälterauswahl erfolgen dabei mittels einer Expertenbefragung. Das verwendete Modellierungsverfahren wird anhand einer umfassenden Literaturrecherche vorgestellt und ausgewählt. Um das Modell schließlich verifizieren und validieren zu können, wird es in realen Fertigungslinien angewendet. Hierbei zeigt es sich, dass die Verwendung eines solchen Modells einfach möglich ist und Vorteile - hierzu gehören nicht nur Kostensenkungen sondern bspw. auch Zeiteinsparungen im Planungsprozess - erzielt werden können. Zur einfachen Verwendung wird das Modell in Java implementiert und dabei so generisch wie möglich aufgebaut, so dass es leicht für unterschiedliche reale Fertigungen angepasst und genutzt werden kann.

Mit dieser Arbeit wird somit ein - wenn auch Einschränkungen unterliegendes - erstes, umfassendes, praxistaugliches, einfach und vielseitig anwendbares Modell zur Auswahl des bestmöglichen Behälters erstellt. Sie liefert somit das Fundament sowohl für die Nutzung von Optimierungspotenzialen in realen Praxisfällen einerseits als auch für weitere, über diese Arbeit hinausgehende und das Modell erweiternde Untersuchungen.

# Abstract

*Dominik Berbig*

## **Development of a comprehensive approach for choosing proper tote carriers**

In order to guarantee the efficient material supply of assembly lines, it is crucial to choose the right tote carrier. This decision has got manifold effects - and there are many aspects influencing this decision. However, regarding real cases, one can find that in the process of choosing a tote carrier not all of the impacts on the size of a bin or the impacts the chosen bin has on its environment are taken into account. This leads to the assumption that currently applicated methods are not sufficient. Of course, the size of the goods which have to be transported in this tote carrier is regarded and also eventually consumption data. But a consideration of all aspects does not take place.

Even if the topic of bins is getting more and more important in the scientific literature as well as in recent researches, there is still the lack for a comprehensive model for choosing the proper tote carrier. Further investigations concerning this fact which have been conducted in real manufacturing companies show that also industrial companies do not use or even know such a model.

As a consequence, with this work we do not only identify this gap, we bridge it by developing a practically applicable model. This model includes all the relevant aspects which are identified throughout this work. In order to fulfill the demand of a broad systematics, the aspects taken into account are of both, a quantitative (meaning cost-related) and a qualitative (meaning use-related) nature. The identification of these relevant aspects is done via the conduction of an interview with experts. The decision on

the way of modeling we use is based on a detailed literature research. In order to verify and validate the identified model, it is applicated in real manufacturing plants. These applications show that the model can be applied well and implies advantages such as: costs can be reduced or time can be saved during the planning phase. In order to enable a „straight forward“ useage of the developed model, it gets implemented in Java and is made up as generic as possible such that it can be applied in different facilities.

Concluding, one can say that with this work we create a first, widespread and practically suited model for choosing the proper tote carrier. This means that with this work we create the basis for using optimization potentials as well as for further research activities beyond the scope of this doctoral thesis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung sowie Motivation der Arbeit . . . . .	1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Definitionen und Grundlagen . . . . .	5
2.1.1 Definition Behälter . . . . .	5
2.1.2 Auswahl des Betrachtungsgegenstandes und Zieldefinition . . . . .	7
2.1.3 Definition und Bedeutung der Ganzheitlichkeit in der Logistik . . . . .	11
2.2 Aktuelle, wesentliche Arbeiten bezüglich des Behältermanagements . . . . .	13
2.2.1 St. Galler Behälter Management Studie . . . . .	14
2.2.2 Fraunhofer IML . . . . .	15
2.2.3 Ermittlung und Bedeutung der Interaktion zwischen Verpackung und Logistik . . . . .	17
2.2.4 Untersuchung des Einflusses der Material- bereitstellung auf die Leistung am Verbauort . . . . .	19
2.3 Betrachtung der gegenwärtigen Vorgehensweise zur Behälterauswahl . . . . .	20
2.3.1 Unternehmen 1 . . . . .	21
2.3.2 Unternehmen 2 . . . . .	23

2.4	Ausgewählte, verwandte Forschungsaktivitäten . . . . .	25
2.4.1	Gesamtwirtschaftlicher Effizienzvergleich alternativer Transportketten . . . . .	25
2.4.2	„Carrier-Mode logistics optimization of inbound supply chains for electronics manufacturing“ . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Bestimmung des Modellumfangs sowie der Leistungsanforderungen</b>	<b>33</b>
3.1	Bestimmung und Festlegung der relevanten Einflussfaktoren	34
3.1.1	Intuitive Ermittlung . . . . .	34
3.1.2	Expertenbefragung . . . . .	39
3.1.3	Auswertung der Expertenbefragung . . . . .	41
3.2	Bestimmung der abzubildenden Kreisläufe . . . . .	45
3.3	Ermittlung der durch die Behälterauswahl verursachten Kosten . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Modellierungsmöglichkeiten</b>	<b>51</b>
4.1	Der „Analytic Hierarchy Process“ . . . . .	51
4.1.1	Der absolute Vergleich . . . . .	54
4.1.2	Ein Beispiel . . . . .	55
4.1.3	Der relative Vergleich . . . . .	59
4.1.4	Ein zweites Beispiel . . . . .	60
4.2	Total Cost of Ownership . . . . .	61
4.2.1	Anwendung und Durchführung einer TCO-Analyse	62
4.2.2	Bestandteile der TCO-Analyse . . . . .	64
4.2.3	Monetärbasierter Ansatz . . . . .	65
4.2.4	Wertbasierter Ansatz . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Ein Kosten und Nutzen umfassendes Modell zur Wahl des optimalen Behälters</b>	<b>69</b>
5.1	Auswahl der Modellierungsmöglichkeit . . . . .	69
5.1.1	Auswahl der Modellierungsmöglichkeit hinsichtlich der entstehenden Kosten . . . . .	70
5.1.2	Auswahl der Modellierungsmöglichkeit hinsichtlich des resultierenden Nutzens . . . . .	71

5.2	Praxiseinsatz eines vereinfachten Modells zur Wahl des optimalen Behälters . . . . .	71
5.2.1	Auswahl der Fertigungslinie und der betrachteten Teile sowie Abbildung im Modell . . . . .	72
5.2.2	Kostenbestandteile der verschiedenen Prozessketten	74
5.2.3	Ergebnisse der Analyse . . . . .	76
5.3	Integration quantitativer Aspekte - Ein neues Modell zur Kostenberechnung . . . . .	81
5.3.1	Prozessanalyse . . . . .	81
5.3.2	Kostenermittlung . . . . .	87
5.3.3	Berechnung der Gesamtkosten - Aggregation der Prozesskosten . . . . .	102
5.4	Ein neues Modell zur Nutzenberechnung unterschiedlicher Ladungsträger . . . . .	106
5.5	Ein Kosten und Nutzen umfassender Ansatz - Das finale Modell . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Praxiseinsatz und Überarbeitung des Modells</b>	<b>111</b>
6.1	Überprüfung der Rahmenbedingungen des Modells . . . . .	111
6.2	Überarbeitung und Anpassung der Berechnungsformeln . . . . .	114
6.2.1	Ladungsträgerkosten . . . . .	115
6.2.2	Transportsystem . . . . .	117
6.2.3	Lagersystem . . . . .	120
6.2.4	Umschlagsystem . . . . .	120
6.2.5	Kommissioniersystem . . . . .	121
6.2.6	Rückführsystem . . . . .	122
6.2.7	Gesamtkosten . . . . .	123
6.2.8	Berechnung des Nutzenwertes . . . . .	123
6.3	Ergebnisse des Praxiseinsatzes . . . . .	124
<b>7</b>	<b>Gleichzeitige Optimierung mehrerer Teile</b>	<b>139</b>
7.1	Mögliche Verfahren des „Operations Research“ . . . . .	139
7.1.1	Grundlagen des OR . . . . .	139
7.1.2	Lineare Optimierung . . . . .	141
7.1.3	Ganzzahlige lineare, dynamische sowie nichtlineare Optimierung . . . . .	145
7.2	Entscheidungstheorie . . . . .	150
7.2.1	Definition . . . . .	150

7.2.2	Grundlagen der Entscheidungstheorie . . . . .	151
7.2.3	Entscheidungskriterien . . . . .	156
7.2.4	Mögliche Vereinfachungen der Entscheidungsfindung . . . . .	161
7.3	Erweiterung des Modells zu einem Optimierungsmodell . . . . .	161
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>163</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>181</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>183</b>
<b>A</b>	<b>Gesamtüberblick über die betrachteten Modellierungsmöglichkeiten</b>	<b>185</b>
A.1	Qualitative Modellierungsmethoden . . . . .	185
A.1.1	Die Nutzwert-Kosten-Analyse . . . . .	185
A.1.2	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution . . . . .	200
A.1.3	Die Methode des „Quality Function Deployment“ . . . . .	204
A.1.4	„Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing“ . . . . .	209
A.1.5	Kosten-Nutzen-Analyse . . . . .	215
A.2	Quantitative Modellierungsmethoden . . . . .	226
A.2.1	Total Value of Ownership-Analyse . . . . .	226

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung sowie Motivation der Arbeit

Behälter sowie auch Ladungsträger im Allgemeinen spielen bei der Materialversorgung von Montage- oder Fertigungslinien eine entscheidende Rolle, da über sie die Materialversorgung der einzelnen Stationen erfolgt. Fehlt ein Behälter, so fehlt damit das entsprechende Material am Band, es kann zu Produktionsstillständen und nicht erforderlichen Handlungsaufwänden kommen. Ist der Behälter zu groß, so wird zu viel Platz benötigt und zu viele Teile werden transportiert. Dies führt zu einer Erhöhung des an der Linie gebundenen Kapitals in Form von Beständen. Sind die Behälter zu klein gewählt, so wird eine zu hohe Anzahl an Transporten erforderlich. Darüber hinaus können Skaleneffekte genutzt sowie Vereinfachungen des logistischen Ablaufs beim Versorgungsprozess erreicht werden, wenn ein Behälter nicht produktspezifisch ist, sondern für verschiedene Materialien verwendet und somit in hohen Stückzahlen beschafft werden kann. Zusätzlich wird direkt ersichtlich, dass die „richtige“ Anzahl an Behältern im Umlauf sein sollte, da eine zu große Zahl an Behältern zu Fehlinvestitionen führt, eine zu geringe jedoch aufwändige Umpackvorgänge mit sich bringen kann. Auch wenn ein einzelner Behälter keine allzu große Investition darstellt, zeigt sich, dass aufgrund der für ein Unternehmen wie VW oder Bosch erforderlichen sehr großen konzernweiten Anzahl an Ladungsträgern die mit den Ladungsträgern verbundenen Gesamtkosten und somit das in Form der Ladungsträger gebundene Kapital sehr hoch sind: So hat bspw. der größte Automobilhersteller Europas, Volkswagen, 200 Millionen Euro an Kapital in Form von Behältern gebunden (Wannewetsch 2007, S. 3). Zudem werden die Trägermedien der Fahrzeugbauteile,

spricht die Behälter, signifikant bedeutender im Hinblick auf allgemein steigende Warenwerte sowie der sich verlängernden Transportentfernungen (Engelhardt-Nowitzki and Lackner 2006, S. 243f).

In der Praxis zeigt sich allerdings, dass die Festlegung auf einen Behälter häufig ohne Berücksichtigung aller der durch die Behältergröße beeinflussbaren und beeinflussten Faktoren erfolgt (s. dazu Kapitel 2 (Literaturrecherche und eigene Interviews)). So werden selbstverständlich die Abmessungen des Teils selbst und möglicherweise auch Verbrauchsdaten zur Bestimmung herangezogen. Eine Betrachtung aller beeinflussbaren Faktoren, insbesondere auch solcher mit qualitativer Natur, bleibt aber aus. Somit ergibt sich die These, dass die bei der Bestimmung des optimalen Behälters verwendeten Verfahren unzureichend sind. Das Ziel dieser Arbeit ist daher, in Form eines zwar Einschränkungen unterliegenden, allerdings umfassenden, praxistauglichen Modells das Fundament zur Entwicklung eines Kosten und Nutzen umfassenden Modells zur Wahl des optimalen Behälters für die Materialversorgung insbesondere von Montagelinien zu liefern. Dieses Modell soll dabei nicht auf einen Einzelfall beschränkt, sondern umfassend für verschiedene Unternehmen anwendbar sein. Daher wird es so generisch wie möglich und so konkret wie nötig aufgebaut sowie in Java implementiert.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in die folgenden Kapitel.

In **Kapitel zwei** erfolgt eine umfassende Recherche zum aktuellen Stand bei der Behälterauswahl, sowohl hinsichtlich aktueller und vergangener Forschungen als auch bezüglich des Status-quo anhand von zwei Praxisfällen aus der Industrie. Dies soll dazu dienen, das grundlegende Verständnis für diese Thematik zu schaffen sowie die oben genannten These zu untermauern und die Notwendigkeit eines neuen Modells zu verdeutlichen.

In **Kapitel 3** werden schließlich der erforderliche Modellumfang sowie die Leistungsanforderungen beschrieben. Hierzu werden in einem ersten Schritt die relevanten Einflussfaktoren insbesondere im Rahmen von Experteninterviews ermittelt. Danach werden die abzubildenden Kreisläufe,

das heißt, welche Stufen der Supply Chain wie mit einbezogen werden, bestimmt. Darüber hinaus werden die mit der Behälterauswahl zusammenhängenden Cashflows ermittelt.

**Kapitel 4** befasst sich als Grundlage für das in der Arbeit entwickelte Modell mit der Untersuchung möglicher Modellierungsmöglichkeiten. Hier wird umfassend auf die verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten eingegangen. Diese Möglichkeiten werden umfassend erklärt und mittels Beispielen illustriert. Somit wird eine fundierte Entscheidung über die zu verwendende Vorgehensweise möglich.

Das auf diesen Grundlagen basierende Modell wird schließlich in **Kapitel fünf** erstellt: Zuerst wird ein ausschließlich die Kosten betrachtendes Modell basierend auf der TCO-Analyse entwickelt. Bereits mit einem solchen Kostenmodell können interessante Ergebnisse erzielt und Verschwendungen aufgezeigt werden, was an einem Beispiel verdeutlicht wird. Da ein reines Kostenmodell jedoch zu kurz greift, wird dieses Basismodell anschließend um weitere Kostenfaktoren und Kreisläufe sowie insbesondere auch um Nutzenaspekte erweitert. Abschließend erfolgt die Synthese des Modells.

Die Verifikation dieses Modells erfolgt in **Kapitel sechs** durch einen Praxiseinsatz bei einem bedeutenden, international agierenden deutschen Unternehmen. Das Modell wird hierdurch auf die Praxistauglichkeit hin getestet. Im Anschluss daran werden die mit dem Modell im Praxisfall erzielten Ergebnisse dargestellt. Hiermit werden der Nutzen, die Praxistauglichkeit und die Erforderlichkeit eines solchen Modells sowie die erreichbaren Vorteile aufgezeigt.

Eine Erweiterung des Modells hin zur Ermöglichung der gleichzeitigen Betrachtung mehrerer Teile und Behälter findet sich in **Kapitel sieben**. Das hier entwickelte Optimierungsmodell garantiert, dass gegenseitige Einflussfaktoren (bspw. Flächenkonkurrenz am Band) direkt mit betrachtet werden. Die Ermittlung des optimalen Behälterspektrums ist damit nicht mehr nur ex-post und nur durch Enumeration möglich.

Den abschließenden Teil dieser Arbeit stellt **Kapitel acht** dar, welches die gesamte Arbeit und die erzielten Ergebnisse zusammenfasst.



# 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden im ersten Schritt notwendige Definitionen beschrieben und getroffen. Anschließend werden die Notwendigkeit dieser Arbeit sowie ihr Ziel und Betrachtungsrahmen verdeutlicht. Darüber hinaus werden verwandte Arbeiten sowie die aktuelle Situation exemplarisch ausgewählter Industrieunternehmen vorgestellt.

## 2.1 Definitionen und Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Begrifflichkeiten sowie das Ziel und das betrachtete Spektrum dieser Schrift erläutert.

### 2.1.1 Definition Behälter

Der Begriff „Behälter“ wird in der deutschen Sprache sehr vielseitig verwendet, ist jedoch nicht eindeutig belegt. Synonym werden die Begriffe „Ladungsträger“ oder „Lademittel“ verwendet (Hofmann and Bachmann 2006). Er stellt also einen umschlossenen Gegenstand dar, welcher im Inneren einen von außen zugänglichen Hohlraum hat. Ein Behälter kann sowohl eine Produktverpackung (z.B. Tetra Pak) als auch ein Kleinladungsträger (KLT) oder ein Transportcontainer bzw. im weiteren Sinne ein Ladehilfsmittel (z.B. Europalette, diese gehört allerdings nicht zur Gruppe der umschließenden Ladungsträger) sein (Hofmann und Bachmann 2006). Unabhängig von der konkreten Ausprägung, muss er drei für die Logistik äußerst wichtige Funktionen erfüllen:

1. Transportfunktion: Herstellung sowie Unterstützung der Transportfähigkeit von Gütern

2. Schutzfunktion: Schutz des im Behälter befindlichen Gutes vor äußeren Einflüssen, Schutz der Umwelt vor dem im Behälter gelagerten Gut
3. Lagerfunktion: Ermöglichung und Vereinfachung der Lagerfähigkeit des enthaltenen Produktes
4. Gruppierungsfunktion: Behälter ermöglichen das Zusammenhalten mehrerer Einzelteile (bspw. Schrauben oder Bauteile)

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Versorgungskette bis hin zur Endmontage insbesondere der Automobil- und Zuliefererindustrie, kann aber auch auf andere Bereiche (bspw. Produktion von Elektrowerkzeugen oder Haushalts- sowie Elektrogeräten) ausgedehnt werden. Nicht zum Betrachtungsgegenstand gehören somit Versand- oder Kundenverpackungen. Die verwendeten Behälter können sowohl Einwegbehälter (z.B. Verpackungskartons) als auch Mehrwegbehälter (z.B. KLT entsprechend VDA 4500 (2011)) sein. In der Praxis war in den vergangenen Jahren zwar eine Tendenz in Richtung Einwegbehältnisse festzustellen. Jedoch wird der Einsatz von Mehrwegbehältern durch gesetzliche Vorgaben zunehmend gefördert und gefordert (Engelhardt-Nowitzki, Lackner 2006)<sup>1</sup>. Bei beiden Typen stellt sich jedenfalls die Frage nach der optimalen Dimension des verwendeten Behälters. Unabhängig davon können die in der Logistik eingesetzten Behälter in tragende, umschließende und abschließende Behälter unterteilt werden.

1. (Ausschließlich) Tragende Behälter: Die besondere Eigenschaft der tragenden Behälter liegt darin, dass sie ein zu transportierendes Gut lediglich an der Unterseite schützen, nicht jedoch an den Seiten. Dieser „Behälter“ kann also nicht als „im Innern hohler Gegenstand“, sondern lediglich als Lagermittel verstanden werden. Ein Beispiel hierfür ist die Europalette. Diese eignet sich besonders für den Transport von stabilen Gütern mit einem Flurfahrzeug, bspw. einem Gabelstapler. Lose Ware kann nicht direkt transportiert werden. Es besteht allerdings die Möglichkeit, mehrere kleinere Behälter auf einer

---

<sup>1</sup>Damit ein Behälter als Mehrwegbehälter eingesetzt werden darf, muss er für ein und denselben Zweck ohne wesentliche Veränderungen mehrfach einsetzbar sein (Stölzle 1993). Außerdem darf die mehrfache Benutzung des Behälters gemäß DIN 55405 nicht zu einer Beeinträchtigung der Funktionen des Mehrwegbehälters führen (Lützebauer 1994).

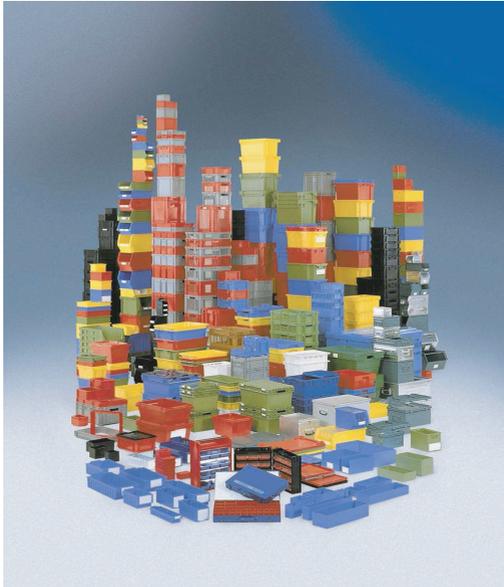
Palette zu stapeln und somit eine logistische Einheit, eine so genannte Ladeinheit (LE), zu bilden. Um das Transportgut gegen Herunterfallen zu sichern und von seitlichen Einflüssen etwas zu schützen, müssen zusätzliche Packhilfsmittel (z. B. Schrumpffolie) verwendet werden (Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier and Furmans 2008).

2. Umschließende Behälter: Umschließende Behälter begrenzen das Gut auch seitlich, sind jedoch nach oben offen. In der Praxis finden unterschiedliche umschließende Behältertypen Verwendung, z.B. Gitterboxen, Kleinladungsträger oder nach oben offene Container (Stölzle 1993). Vorteile dieser Behältertypen sind der Schutz vor Beschädigungen sowie vor dem Herunterfallen des Gutes. Sie eignen sich auch für den Transport von Schüttgütern und losen Waren. Des Weiteren bieten umschließende Behälter oft besondere Zusatzfunktionen, beispielsweise Stapelbarkeit (Arnold et al 2008).
3. Abschließende Behälter: Behälter, die einen komplett umschlossenen Raum darstellen, werden als abschließende Behälter bezeichnet. Hierzu gehören u. a. ISO-Container wie der 20'-Standard See Container (TEU). Sie zeichnen sich durch ihre feste Bauweise aus. Diese führt zu einem besonders guten Schutz des transportierten Guts. Außerdem können sie sehr gut gestapelt werden (es können bspw. bis zu fünf oder sechs ISO-Container übereinander gestapelt werden) (Pfohl 2010). Oftmals werden die zu transportierenden Güter jedoch nicht direkt in den Container verladen, sondern zur Vereinfachung des Be- und Entladungsvorgangs auf Paletten oder in Gitterboxen eingelagert (vgl. Arnold et al. 2008). Abschließende Behälter werden in der Praxis eher für den (außerbetrieblichen) Transport als für den Einsatz zur Materialversodnung von bspw. Endmontagelinien verwendet, da der Zugriff auf die Güter in nach oben hin geöffneten Behältnissen wesentlich leichter und schneller erfolgen kann, als dies bei einem komplett geschlossenen Behälter der Fall ist.

### **2.1.2 Auswahl des Betrachtungsgegenstandes und Zieldefinition**

Aus den obigen Ausführungen wird klar, dass es eine sehr große Anzahl und Varianten von „Behältern“ gibt. Diese Vielfalt an Behältern wird wei-

ter erhöht, wenn weitere Verfeinerungen der Unterteilung in beispielsweise Einweg- oder Mehrwegbehälter, Kunststoff- oder Metallbehälter, KLT oder Großladungsträger (GLT), usw. erfolgen. Die folgende Abbildung 2.1 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus der Vielfalt an Kunststoff-KLT.



**Abbildung 2.1:** Vielfältigkeit des Behälterspektrums (Quelle: SSI Schäfer)

Dieses gesamte Spektrum in einer Arbeit zu erfassen, ist nicht möglich. Daher muss in diesem ersten, grundlegenden Schritt eine klare Abgrenzung und Zieldefinition erfolgen. Es ergeben sich drei Aspekte: zum einen das betrachtete Spektrum an Behältern, der betrachtete Industriezweig sowie die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.

**Auswahl des betrachteten Behälterspektrums** Wie oben geschrieben, gibt es eine nahezu unerschöpfliche Anzahl verschiedener Behälter. Diese Vielfalt an Behältern in einem einzigen Unternehmen ist darüber hinaus

oftmals nicht erfasst. So konnten beispielsweise in ersten Projekten zur Effizienzverbesserung durch ein verbessertes Behältermanagement eine Senkung von Behälterbeständen und damit verbunden eine Senkung von Behältermieten um 50 Prozent erreicht werden (Schmölzer and Schöler 2005, S. 6). Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass die Fertigung eines Produkts vom Rohmaterial bis hin zum fertigen Endprodukt über mehrere Stufen und damit verbunden auch bei (oftmals) vielen verschiedenen Zulieferern erfolgt, bietet sich eine Standardisierung an. Diese Standardisierung ist in der Automobilindustrie im Rahmen der VDA-Empfehlung 4500 erfolgt (diese ist mittlerweile in der 9. Auflage erschienen). Diese Empfehlung beinhaltet eine Auswahl an einigen Mehrweg-KLT sowie entsprechendem „Zubehör“ wie Deckel oder Sicherungsplatten. Diese Empfehlung hat sich auch bereits bei vielen Firmen durchgesetzt. So werden beispielsweise, soweit möglich, in einem bestimmten Geschäftsfeld eines im Rahmen der Erstellung dieser Dissertation näher betrachteten Unternehmens (s. unten) nur noch Ladungsträger, die dieser Empfehlung entsprechen, verwendet. In einem Werk eines anderen, im Laufe der Arbeit betrachteten Unternehmens werden bspw. knapp 37% der verwendeten Teile in fünf verschiedenen KLTs, die dieser Empfehlung entsprechen, angeliefert. In einem weiteren Werk jener AG werden pro Produkt im Schnitt 25,36 Ladungsträger mit Material für die Endmontage benötigt. Hiervon sind 46% entsprechend VDA-Empfehlung 4500. Aus diesem Grund wird sich das entwickelte Modell auf diese Ladungsträger beziehen, erweitert um den VDA-GLT 121010, auch wenn es sich bei diesen Behältern nicht um die eigentlichen Kostentreiber der Logistikkosten handelt (Quelle: jeweils eigene Gespräche mit entsprechenden Experten). Ein weiterer Grund für die Beschränkung auf Mehrweg-Ladungsträger ist, dass aufgrund von Kostenvorteilen sowie umweltpolitischer Aspekte in der Automobilindustrie ausschließlich Mehrwegbehälter verwendet werden (Engelhardt-Nowitzki, Lackner 2006, S. 245ff)<sup>2</sup>. Da das in den folgenden Kapiteln erstellte Modell leicht verallgemeinerbar ist, können weitere, bestehende Ladungsträger ohne Probleme mit einbezogen werden.

---

<sup>2</sup>Diese Aussage gilt zumindest für den Standardprozess, sofern also alles „ordnungsgemäß“ verläuft. Sollte es, aus welchem Grund auch immer, zu einem Versorgungsengpass an Ladungsträgern kommen, können in einem solchen Fall auch Einmallaadungsträger als Ausnahme verwendet werden. Dies ist jedoch nicht der Regelfall und wird unter allen Umständen aufgrund der Mehraufwände und -kosten zu vermeiden versucht.

**Auswahl des betrachteten Industriezweiges** Begründet durch die Tatsache, dass das IFL viele Kontakte zur und Projekte in der Automobilindustrie hat, wurde das Modell insbesondere im Hinblick auf diese entwickelt. Da dieser Industriezweig von sehr großer Bedeutung ist und viele große wie auch kleine Firmen hier tätig sind, kann damit bereits ein umfassendes Spektrum an Möglichkeiten abgedeckt werden. Eine Erweiterung auf andere Unternehmen, auch außerhalb der Automobilindustrie, ist daher und aufgrund der modularen Struktur leicht möglich.

**Zielsetzung** Die Auswahl des Ladungsträgers muss in mehreren Abschnitten des Produktlebens- bzw. Fertigungszyklus erfolgen. So muss bei der Planung einer neuen Fertigungs- oder Montagelinie nicht nur ein Montage-, sondern auch ein Versorgungskonzept erstellt werden. Dies ist verbunden mit der Auswahl der/des entsprechenden Behälter(s) für die Materialversorgung. Darüber hinaus werden Änderungen am Behälterpektrum, die Auswahl neuer Behälter bei Umgestaltungen der Linie oder bei der Einführung neuer Teile für die Fertigung notwendig. Ebenso kann bei einer bereits existierenden Linie die Optimalität der gewählten Behälter überprüft werden. Da eine Änderung an bereits bestehenden Behälterpools jedoch mit Kosten verbunden ist, die Planung und Auswahl der Behälter heutzutage „stiefmütterlich“ erfolgt (s. unten), bieten sich die größten Vorteile, wenn noch keine Anschaffungen getätigt worden sind. Somit zielt die in dieser Arbeit erstellte Methodik auf die Planungsphase ab, in der die Entscheidungen zur Anschaffung von Ladungsträgern getroffen werden. Sie soll den Planern dabei helfen, schnell und auch bereits in frühen Planungsphasen die richtigen Behälter auszuwählen, sodass keine unnötigen Kosten verursacht werden. Ebenso soll es dazu dienen, die Auswahl an Behältern auf eine einfach und schnell anwendbare, jedoch auch wissenschaftlich fundierte Basis zu stellen. Dass es durch solch ein Vorgehen tatsächlich möglich ist, Kosten- und Nutzenvorteile in erheblichem Umfang zu generieren, wird im abschließenden Kapitel anhand von realen Fallbeispielen gezeigt.

### 2.1.3 Definition und Bedeutung der Ganzheitlichkeit in der Logistik

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Kosten- und Nutzenfaktoren abdeckendes, allgemeingültiges Modell zur Auswahl des optimalen Behälters zu erstellen. Diese Überlegung führt zu der Frage, ob und warum die Ganzheitlichkeit auch in der Logistik wichtig ist:

Die „Logistik“ kann als ein Gesamtsystem verstanden werden, welches aus mehreren Komponenten aufgebaut ist (Bramel and Simchi-Levi 1997, S. 3). Dabei unterscheidet sie sich von anderen Unternehmensbereichen insbesondere dadurch, dass sie versucht, Waren- und Materialflüsse integrativ, systemisch und ganzheitlich zu gestalten (Isermann 1998, S. 61f). Vier Charakteristika ergeben sich aufbauend auf dieser Systemperspektive, welche die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung (in) der Logistik unterstreichen (Bowersox 1978, S. 41):

1. Die Leistung des Gesamtsystems hat primäre Bedeutung.
2. Die Systemkomponenten selbst müssen nicht notwendigerweise ihr jeweiliges Maximum erreichen, sondern das Gesamtsystem.
3. Zwischen den einzelnen Systemkomponenten gibt es unterstützende und gegenläufige Effekte („Trade-offs“).
4. Zwischen den einzelnen Systemkomponenten existieren darüber hinaus Synergieeffekte.

Die Vorstellung dessen, was unter den Systemelementen im Bereich der Logistik zu verstehen ist, variiert trotz dieser klaren Systemvorstellung in der Literatur recht stark: Bowersox 1978, S. 42 zählt hierzu die Anlagenstruktur, den Transport, den (Lager)Bestand, die Kommunikation sowie Lagerung und Handling. Magee, Copacino and Rosenfield 1985, S. 3f hingegen definieren sieben Systembestandteile:

1. Produktinventar
2. Rohmaterial und Halbzeugbeschaffung und -kontrolle
3. Transport und lokale Liefermittel
4. Herstell- und Konvertierfähigkeit

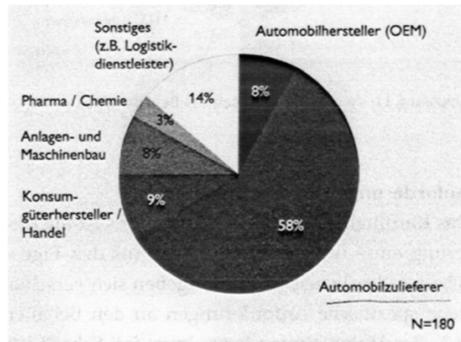
5. Distributionszentren
6. Kommunikation und Kontrolle
7. Beschäftigte

Unabhängig von dieser Anzahl an Systembestandteilen ist eine integrative, ganzheitliche Betrachtung aufgrund der starken Verknüpfung einzelner Systemelemente und der Vielzahl an Trade-offs von zentraler Bedeutung für die Logistik. In der Literatur lassen sich daher bereits vereinzelt Ansätze finden, die versuchen, diesem Aspekt der Ganzheitlichkeit gerecht zu werden (Isermann 1998, S. 63ff). Hierzu zählen bspw. aufbauorganisatorische Maßnahmen (z. B. die Integration von Versand und Lagerwesen in die Logistik), die Integration technischer und informationstechnischer Systeme (wie z. B. Just-In-Sequence-Anlieferung oder Vendor-Managed-Inventory) sowie verhaltensorientierte Interventionen in Organisationen. Ein bekanntes Beispiel für den zweiten Punkt, die Integration, ist das Lean Management. Trotz dieser theoretischen Ansätze existierte noch bis in die Mitte der 1980er Jahre eine mangelnde praktische Integration logistischer Funktionen und Bereiche in die Logistik (Isermann 1998, S. 65f). Ein erster Ansatz zur ganzheitlichen Betrachtung der Logistik kann auf die von Porter in den 80er Jahren entwickelte „Value-Chain“ zurückgeführt werden (Porter 1985, S. 33). Ziel dieses Ansatzes ist es, Prozesse in Unternehmen in deren einzelne Bestandteile zu zerlegen und somit wertschöpfende Aktivitäten von nicht-wertschöpfenden zu trennen. Der wesentliche Unterschied zu den bis dahin existierenden Ansätzen besteht in der Betrachtung von Flüssen und Prozessen in Unternehmen (Isermann 1998, S. 66). Die zentralen Vorteile dieses Prozessdenkens sind dabei in der Komplexitätsreduktion sowie in einer erhöhten Reaktionsfähigkeit auf Kundenanforderungen zu sehen (Strigl 2001, S. 11). Parallel hierzu entwickelte sich die Prozesskostenrechnung in den Wirtschaftswissenschaften (Cooper and Kaplan 1987, S. 225f). Unternehmen als Ganzes (und damit auch die Logistik) wurden zunehmend als Netzwerk aus Flüssen interpretiert. Hierbei erbringen die einzelnen Knoten innerhalb dieser Netzwerke Transformations- und Transferleistungen (Isermann 1998, S. 67f). Somit wird es ermöglicht, den Leistungen einzelner Knoten und Ketten ihre Kosten gegenüberzustellen. Diese Form der Integration von unterschiedlichen Leistungsstufen stellt ein sehr hohes Maß an ganzheitlicher Betrachtung dar. Sie ist nicht auf einzelne organisatorische Bereiche beschränkt. Eine

im Bereich der Logistik sehr verbreitete Umsetzung dieses Prozessansatzes und somit des Ganzheitlichkeitsaspekts ist im Bereich des Supply Chain Managements zu finden (Rebitzer 2002, S. 192 f), wobei Supply Chain Management wie folgend definiert wird: „Supply Chain Management is a set of approaches utilized to efficiently integrate suppliers, manufacturers, warehouses, and stores, so that merchandise is produced and distributed at the right quantities, to the right locations, and at the right time, in order to minimize system wide costs while satisfying service level requirements.“ (Simchi-Levi, Kaminsky and Simchi-Levi 1999, S. 1). Konkret findet sich diese ganzheitliche Betrachtung der Lieferkette zum Beispiel im Rahmen der Produktentwicklung: Bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung werden bei Toyota die Lieferanten mit einbezogen, um so die Zielkosten von Halbzeugen verringern zu können (Womack, Jones and Roos 1990, S. 151ff). Für die weiterführenden Untersuchungen zur optimalen Auslegung von Behältern ist dieser Ansatz der Fluss- oder Prozessorientierung von zentraler Bedeutung. Dies gilt insbesondere daher, dass er als einziger Ansatz geeignet zu sein scheint, Kosten und Leistungen tatsächlich auch ganzheitlich zu erfassen. Aufgrund der Tatsache, dass besonders das Behältermanagement und somit auch die Behälterausslegung und -auswahl in ihren Wirkungen über einzelne Unternehmen hinausgehen und in jedem Fall mehrere (auch unternehmensexterne) Supply-Chain-Stufen (z. B. Zulieferer) hiervon betroffen sind, wird die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung dieses Themas besonders deutlich (Wardecki 2007, S. 80).

## 2.2 Aktuelle, wesentliche Arbeiten bezüglich des Behältermanagements

Das Behältermanagement erlangt in letzter Zeit eine wachsende Bedeutung. Daher werden nun einige grundlegende Arbeiten hierzu vorgestellt.



**Abbildung 2.2:** Branchenverteilung (Hoffmann, Bachmann 2006)

## 2.2.1 St. Galler Behälter Management Studie

Die St. Galler Behältermanagement Studie wurde im Jahr 2006 von der Universität St. Gallen durchgeführt (einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf Hofmann, Bachmann 2006). Die Ziele der Studie waren die Erfassung des Status Quo im Behältermanagement sowie die Identifikation von aktuellen Entwicklungstendenzen im Bereich des Behältermanagements (S. 22). In einem ersten Schritt wurde hierzu ein Fragenkatalog entwickelt, der aus 36 Fragen zu verschiedenen Bereichen des Behältermanagements besteht. Diese Fragen wurden vor Beginn der Umfrage von Experten verifiziert (S. 22). Im zweiten Schritt wurde dieser Fragebogen online an insgesamt 967 Logistiker versendet, 188 dieser Fragebögen wurden beantwortet (dies entspricht einer Rücklaufquote von knapp 20%). Von den 188 Logistikern, die die Fragebögen beantworteten, arbeiteten 58 Prozent in der Automobilzuliefererbranche. Die genaue Verteilung kann aus Abbildung 2.2 entnommen werden.

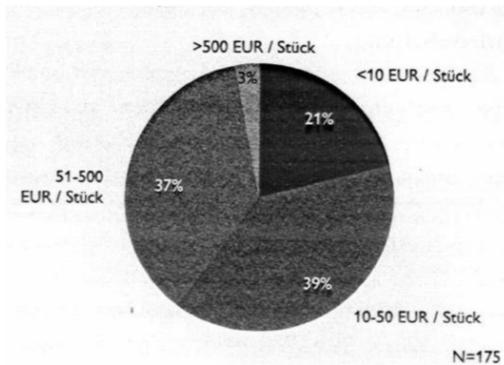
Die Bedeutung der Automobilindustrie zeigt der Prozentsatz von über 60% der Befragten aus diesem Bereich. Weiterhin arbeiteten 50 Prozent in Unternehmen, die einen Jahresumsatz zwischen 50 Mio. und 500 Mio. Euro erwirtschaften (S. 23). Im Folgenden werden die zentralen, für diese Arbeit relevanten Ergebnisse der Studie kurz dargestellt:

1. 52% der befragten Unternehmen setzen grundsätzlich mehr als 20 verschiedene Behältertypen ein (S. 24).
2. Als bedeutendste Anforderungen an die Behälter selbst werden zu 86 Prozent der Schutz vor mechanischen Beschädigungen genannt sowie zu 58% der Schutz vor Feuchtigkeit und elektrostatischer Beschädigung (S. 24).
3. 80 Prozent der Befragten bewerten die Bedeutung der Zielkategorie „Kostensenkung“ für das Behälter- Management als hoch bis sehr hoch (S. 25).
4. Die Eigenschaften der Behälter oder Ladungsträger werden in 41 Prozent aller Fälle bei der Entwicklung neuer Produkte berücksichtigt (S. 43).

Bei den antwortenden Unternehmen gibt es demzufolge eine hohe Anzahl an verschiedenen Behältertypen. Bei der Gestaltung von Neuprodukten wird jedoch durch eine frühzeitige Berücksichtigung der Eigenschaften verfügbarer Behälter versucht, die Anzahl an Behältertypen zu senken oder zumindest nicht zu erhöhen. Eine solche Standardisierung könnte folglich einen Versuch darstellen, der hohen Bedeutung des Ziels der Kostensenkung gerecht zu werden. Als Anreiz und Begründung für die Erstellung einer Methodik zur ganzheitlichen, optimalen Auswahl von Behältern lässt sich zum einen die hohe Notwendigkeit der optimalen Auslegung von Behältern vor dem in der Studie erfassten Kostenziel ableiten. Zum anderen liefert diese Studie konkrete Anhaltspunkte zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Behälter selbst. Aus der weiteren Erkenntnis, dass nahezu 80% der eingesetzten Behälter 10€ oder mehr kosten, lässt sich folgern, dass eine Investition in einen „falschen“ Behälter hohe und unnötige Kosten verursacht.

## 2.2.2 Fraunhofer IML

Bereits seit einiger Zeit finden am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund Forschungen auf dem Gebiet des Verpackungsbereichs statt. Vor allem zwei dieser Aktivitäten sind für diese Arbeit von Interesse: repac sowie PackComplex.



**Abbildung 2.3:** Stückwert der eingesetzten Behälter (Quelle: Hoffmann, Bachmann 2006)

**repac** Obwohl repac auf die (Versand-)Verpackung abzielt, können aus den Ergebnissen interessante Anhaltspunkte für diese Arbeit entnommen werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt (IML 2010), dass Verpackungsspektren häufig nicht an die Produkte angepasst sind. Die Verpackung und das Produkt sind nur schlecht aufeinander abgestimmt. Zusätzlich existieren Bereiche, bei denen Verpackungen noch vorhanden sind, obwohl die entsprechenden Produkte längst nicht mehr vertrieben werden. Dies verdeutlicht die Bedeutung einer ganzheitlichen, vereinheitlichten Methodik auch auf dem Gebiet der Behälterauswahl.

**PackComplex** PackComplex ist ein Bestandteil der sogenannten „UNIT Software“. Es handelt sich hierbei um rechnergestütztes Hilfsmittel zur Lösung von (klassischen) Packproblemen. Es steht „...zur Verfügung, um die maximale Packdichte im Packraum zu erreichen“ (IML 010b, S. 3). Es ermöglicht, den für ein Teil idealen Behälter oder Ladungsträger beziehungsweise zugleich die optimale Kombination von Ladungsträger und Transportmittel zu ermitteln (Quelle: <http://www.unit-software.de/index.php/produkte/packcomplex>, Zugriff am 06. Oktober 2010). Diese Entscheidung wird jedoch nur über einen Vergleich der Packdichte des Produkts in mehreren verfügbaren Behältern erreicht (IML 2010b, S. 3), weitere Details bleiben unberücksichtigt. Somit ermöglicht

es PackComplex, für die Verpackung eines Produkts die (allerdings ausschließlich bezüglich der Packdichte) „best geeignete Schachtel für das Produkt auszusuchen“ (IML 2010b, S.6). Hieraus wird deutlich, dass die Wichtigkeit der richtigen Auswahl von Behältern, Ladungsträgern oder Verpackungen als relevanter Faktor erkannt wurde und bereits intensiv erforscht wird. Dennoch zeigt sich auch hier, dass die verfolgte Optimierung nur eine sehr begrenzte Aussagekraft hat, da nicht alle relevanten Fragen berücksichtigt und geklärt werden. Zusätzlich werden nicht alle Kriterien erfasst. Der Fokus liegt im Bereich der Verpackungs- und Versandlogistik hin zum (End-)Kunden und nicht, wie in der nun vorgelegten Arbeit, im Bereich der Supply Chain vom Zulieferern bis zum Produzenten und wieder zurück (eine genaue Abgrenzung des betrachteten Ausschnitts der Versorgungskette findet sich in Kapitel 4). Allerdings könnten diese Ergebnisse perspektivisch als Grundlage für eine genauere Berechnung der Teileanzahl pro Behälter für das in den folgenden Kapiteln entwickelte Modell verwendet werden.

### **2.2.3 Ermittlung und Bedeutung der Interaktion zwischen Verpackung und Logistik**

Ein Ansatz zur ganzheitlichen Auswahl von Verpackungen wurde an der Universität Lund in Schweden entwickelt (Hellström and Saghir 2006). Auch wenn der Fokus dieses Ansatzes auf der Untersuchung der Verpackungslogistik liegt, ist das vorgestellte grundsätzliche Vorgehen auch auf die Beschaffungslogistik und damit die Untersuchung von Behältern übertragbar. Grundlagen des gesamten Ansatzes sind die Prozessorientierung sowie die Verbindung zwischen verschiedenen Verpackungssystemen und logistischen Aktivitäten (Hellström, Saghir 2006, S. 197; einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf dieselbe Quelle). In einem ersten Schritt wird für die gesamte Prozesskette, die ein Produkt von seiner Herstellung bis zum Kunden durchläuft, eine Prozesskarte erstellt (S. 200). Anschließend wird eine sogenannte „Interaktionsmatrix“ zwischen den zu durchlaufenden Prozessstufen, -ketten und den verschiedenen Verpackungssystemen erstellt (S. 210). Dabei findet eine Unterscheidung zwischen primären (Verpackungen, die in direktem Kontakt zum Produkt stehen), sekundären (sie enthalten mehrere primäre Verpackungen, bspw.

**Table 2. The interactions between the packaging system and the logistics processes**

Supply chain members	Manufacturer			Distribution centre				Retail outlet			
Logistics Processes	Filling process	Warehousing process	Transport	Receiving process	Storing process	Picking process	Shipping process	Transport	Receiving and shipping	Replenishing process	Re-use and recycle
Packaging system											
Primary	X					X			X	X	X
Secondary	X					X			X	X	X
Tertiary	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Abbildung 2.4:** Interaktionsmatrix zwischen Verpackungssystemen und logistischen Aktivitäten (Hellström, Saghir 2006, S. 210)

Umverpackung eines Gebindes) und tertiären Verpackungssystemen (hierzu gehören bspw. Container oder Paletten) statt (S. 198). Abbildung 2.4 zeigt eine mögliche Interaktionsmatrix, welche den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Verpackungssystemen und den Prozessschritten abbildet.

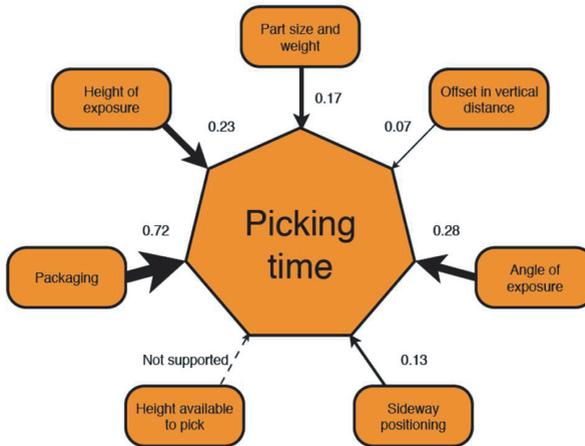
Die hier dargestellte Integration von Verpackung und logistischen Aktivitäten bietet mehrere Vorteile: Sie ermöglicht einerseits eine Bewertung von verschiedenen Verpackungssystemen, andererseits erlaubt sie es, Verbesserungspotentiale zu identifizieren (S. 211). Darüber hinaus werden wichtige Wechselbeziehungen aufgezeigt. Gilt es bspw., eine Verbesserung der sekundären Verpackung mit dem Ziel, den Nachschub im Einzelhandel zu erleichtern, zu erreichen, so würde die Interaktionsmatrix etwaige mit der Verbesserung einhergehende Veränderungen (bspw. im Picking-Prozess des Distributionszentrums) aufzeigen (S. 213). Eine isolierte Verbesserung in einer einzelnen Stufe der Prozesskette wird damit verhindert, eine Gesamtsystembetrachtung gefördert.

## 2.2.4 Untersuchung des Einflusses der Materialbereitstellung auf die Leistung am Verbauort

Ebenfalls in Schweden, allerdings an der Universität Göteborg, wurden mehrere Studien zum Zusammenhang zwischen der Leistung am Verbauort und der Art der Materialbereitstellung durchgeführt (Finsgard 2009) (einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf dieselbe Quelle). Diese Studien liefern zwei zentrale Ergebnisse: So wurde zum einen festgestellt, dass der größte Einfluss auf die „Picking-Zeit“ von der Art der Verpackung, in der die Komponenten am Verbauort bereitgestellt werden, herrührt (S. 49). Die „Picking-Zeit“ bezeichnet dabei den Zeitraum, die der Monteur benötigt, um die einzelnen Komponenten vom Bereitstellort bis hin zum Verbauort zu transportieren. Der Einfluss der Verpackung auf diese liegt deutlich über dem Einfluss der Größe und des Gewichts der bereitgestellten Teile. In Abbildung 2.5 sind als Übersicht sämtliche Einflussfaktoren dargestellt sowie die jeweilige Stärke ihres Einflusses auf die Picking-Zeit.

Des Weiteren wurden auch Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit am Verbauort bei verschiedenen Behältern untersucht (Finsgard, Wänström and Medbo 2008)(Finnsgard, Wänström, Medbo 2008). Zu dieser Beurteilung wurden verschiedene Kriterien (bspw. die benötigte Fläche, der am Verbauort zurückgelegte Weg, die Picking-Zeit und ergonomische Kriterien) herangezogen (Finnsgard, Wänström, Medbo 2008, S. 18). In einem Experiment bei einem beteiligten Unternehmen wurde die Materialbereitstellung von GLT auf KLT umgestellt. Das so umgestaltete System benötigte bis zu 75 Prozent weniger Fläche, wobei der zurückgelegte Weg im Mittel um 52 Prozent reduziert werden konnte (jeweils im Vergleich zur Ausgangssituation). Die Picking-Zeit wurde um 50 Prozent reduziert, die Anzahl der in der potentiell „schädigenden Zone“ bereitgestellten Komponenten konnte um 92 Prozent gesenkt werden (Finnsgard, Wänström, Medbo 2008, S. 18).

Aus den hier dargelegten Ergebnissen ergeben sich somit zwei zentrale Implikationen für das weitere Vorgehen dieser Arbeit: Durch die angeführten Untersuchungen wird deutlich, welchen Einfluss ein Behälter auf die Pro-



**Abbildung 2.5:** Beeinflussung der Greifzeit durch unterschiedliche Faktoren (Finnsgard 2009, S. 49)

zesse am Verbauort hat. Für die Auswahl potentieller Behälter sollten die am Verbauort durchzuführenden Prozesse folglich berücksichtigt werden. Ebenso belegen die Untersuchungen der Universität Göteborg, dass die Konsequenzen, welche durch unterschiedliche Behälter am Verbauort ausgelöst werden, nicht immer rein monetär zu erfassen sind, als einfaches Beispiel kann hier die Ergonomie angeführt werden. Somit geben bereits diese Untersuchungen Hinweise darauf, dass auch qualitative Aspekte in die Untersuchung mit einbezogen werden müssen (genauere Details hierzu s. Kapitel 3).

## 2.3 Betrachtung der gegenwärtigen Vorgehensweise zur Behälterauswahl

Dieses Unterkapitel erläutert am Beispiel von zwei Unternehmen, folgend U1 bzw. U2 genannt, wie die Behälterauswahl zum Zeitpunkt der Untersuchung (Mitte/Ende 2010) erfolgt. Es soll einerseits die Notwendigkeit für

ein Kosten und Nutzen umfassendes Modell zur Auswahl des optimalen Behälters unterstreichen. Andererseits dient es zur Untermauerung der These, dass die Beschränkung auf VDA-KLT gerechtfertigt und sinnvoll ist.

### 2.3.1 Unternehmen 1

Im Folgenden wird der Prozess der Behälterauslegung bei U1 dargestellt. Die hier gezeigte Darstellung basiert auf drei Quellen: Ein Gespräch mit Herrn F. (30.6.2010), ein Gespräch mit Herrn J. (8.7.2010) sowie den Logistikstandards von U1, Stand März 2007. Bei U1 werden insgesamt 35 Prozent aller Bauteile in Spezialladungsträgern und somit 65 Prozent aller Teile in Universalladungsträgern angeliefert. Von diesen 65 Prozent werden wiederum 90% in acht Behältertypen angeliefert. Bei diesen acht Behältertypen handelt es sich um 3 GLT- bzw. 5 KLT-Typen. Die GLT-Typen sind U1- spezifische Ladungsträger, die KLT-Typen entsprechen der genannten VDA-Norm. Für die eigentliche Auswahl der jeweiligen Ladungsträger existiert bei U1 keine Software. Die Auswahl erfolgt unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen, die in Form eines Entscheidungsbaumes festgelegt sind. Im Folgenden werden in einem ersten Schritt diese Randbedingungen dargestellt. Danach wird der Prozess der Behälterauswahl für ein Neuprodukt und abschließend das Vorgehen bei der Änderung des Ladungsträgers während des Produktlebenszyklus dargestellt.

**Randbedingungen bei der Ladungsträgerauswahl** Im Prozess der Behälterauswahl gibt es drei Randbedingungen, die vor jeder Entscheidung in drei aufeinanderfolgenden Schritten überprüft werden. Sollte eine der Randbedingungen nicht erfüllt sein, so wird in jedem Fall ein Spezialladungsträger ausgewählt. Im ersten Schritt wird geprüft, ob der potentielle Behälter eine automatische Entnahme durchlaufen muss oder nicht. Sollte dies an irgendeiner Stelle erforderlich sein, wird ein individueller Spezialladungsträger entworfen. Im folgenden Schritt werden die Anforderungen an die zu verpackenden Bauteile im Bezug auf Restschmutzanforderungen überprüft. Im Falle des Vorliegens besonderer Restschmutzanforderungen werden für die jeweiligen Bauteile entsprechende Sonderladungsträger entworfen. Im dritten und letzten Schritt werden schließlich die Anforderun-

gen der Qualitätssicherung überprüft und müssen gewährleistet werden. Dies führt genau dann zur Konstruktion von Sonderladungsträgern, wenn bestimmte Anforderungen hinsichtlich der Qualität der zu transportierenden Bauteile bestehen.

**Prozess der Ladungsträgerauswahl bei Neuprodukten** Auch die Ladungsträgerauswahl für Neuprodukte erfolgt in mehreren Schritten: Im ersten Schritt werden die bereits angeführten Randbedingungen erfasst und auf diese Weise Sonderladungsträger als potentielle Ladungsträger ausgeschlossen (s. oben). In der Regel wird die konkrete Auswahl eines Ladungsträgers aus einer Vielzahl an Universalladungsträgern unter Beteiligung von Vertretern verschiedener Bereiche (Fertigungsplaner, Logistiker, Entwickler, ...) getroffen. Diese Auswahl erfolgt im Gesamtzusammenhang der Fertigungsplanung als letzter von drei Schritten: In einem ersten Schritt werden die Fertigungsanlage sowie die entsprechenden Maschinen geplant. Ergebnis dieser Planung ist die Taktzeit, die im späteren Verlauf der Behälterauswahl von Bedeutung sein wird, da aus ihr der Teilebedarf pro Zeiteinheit abgeleitet werden kann. Anschließend an diese Anlagenplanung wird der eigentliche Verbauort geplant. Je nach dem, wie viele und welche Teile am jeweiligen Ort zu verbauen sind, werden bspw. die für diesen benötigten Flächen geplant. Im dritten und wiederum letzten Schritt erfolgt nun die Behälter- oder Ladungsträgerauswahl. Ziel hierbei ist es, die Ladungsträger so klein wie möglich zu gestalten, um den Materialbestand und möglichst auch den Flächenbedarf am Band so gering wie möglich zu halten. Folglich wird bei der Ladungsträgerauswahl grundsätzlich mit dem kleinsten Ladungsträger begonnen: Ausgehend von diesem kleinstmöglichen Ladungsträger werden als Erstes die Geometrie des Bauteils, als Zweites die aus ergonomischen Gründen festgelegte Gewichtsobergrenze von 12 kg (Behälter + Inhalt) und abschließend die Reichweite der Bauteile pro Ladungsträger am Band überprüft. Hier kommt die bereits erwähnte Taktzeit zum Tragen, da diese den Verbrauch am Verbauort bestimmt. Falls die erreichbare Reichweite eines Bauteils auch durch mehrere Ladungsträger in einem Regalfach einen Zeitraum von einer Stunde nicht übersteigt, wird der gesamte Zyklus für einen größeren Ladungsträger erneut vollzogen. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis ein adäquater Ladungsträger (entweder KLT oder GLT) identifiziert werden konnte.

**Prozess der Änderung von Ladungsträgern** Während des Produktlebenszyklus existieren drei Fälle, die eine Änderung des Ladungsträgers erforderlich machen: Im ersten Fall wird diese Änderung des Ladungsträgers auf Lieferantenwunsch notwendig. Ein möglicher Grund für diesen Änderungswunsch kann bspw. eine Produktionsumstellung beim Lieferanten sein. In Folge dieses Änderungswunsches werden bei U1 die Auswirkungen hinsichtlich der durch die Umstellung verursachten zusätzlichen Kosten überprüft. Im zweiten Fall stammen die Änderungswünsche von der internen Qualitätssicherung; Sollten Qualitäts- oder Restschmutzanforderungen durch den ursprünglichen Ladungsträger entgegen der Planungen nicht erfüllt werden können oder durch veränderte Rahmenbedingungen steigen, werden die bereits verwendeten Ladungsträger entweder mit Zusatzverpackungen versehen oder es wird ein neuer Ladungsträger entsprechend dem oben dargestellten Vorgehen ausgewählt. Der dritte Auslöser für eine Änderung des Ladungsträgers kann schließlich die Produktion selbst sein: In bestimmten Fällen kann es der Fall sein, dass neue Produktvarianten entwickelt werden, für die die Bauteile an einem bereits existierenden Verbauort montiert werden müssen. Aus Platzgründen wird in diesem Falle versucht, das Volumen der am Verbauort bereitgestellten Ladungsträger zu reduzieren, sodass auch die Bauteile für die neuen Varianten am Verbauort bereitgestellt werden können. Auch in diesem Fall erfolgt eine gründliche Untersuchung der zusätzlich entstehenden Kosten.

### 2.3.2 Unternehmen 2

Bei Unternehmen 2 (folgend „U2“ genannt) gestaltet sich die Behälterauswahl wie folgt (sofern keine weiteren Angaben erfolgen, stammen die Informationen hierzu aus einem Gespräch, das am 05. August 2010 stattfand). Für die Auswahl der Behälter bei U2 wurden im Rahmen des U2 Produktionssystems (U2PS) Empfehlungen und Festlegungen getroffen. Es wurde festgelegt, dass (zumindest werksintern) nur KLT entsprechend der VDA-Empfehlung 4500 verwendet werden, in diesem Falle „RL-KLT“. Da auch in dieser Kategorie mehrere Behälter vertreten sind, wird zur konkreten Auswahl eines Ladungsträgers (LT) ein Excel-Tool verwendet. Diesem Programm liegen einerseits zentrale Vorgaben zugrunde, andererseits definierte Kriterien: Zentrale Vorgabe seitens des Verpackungszentralwerks ist, dass der Behälterkreislauf eine Umlaufzeit von genau 40 Tagen

hat. Der Kreislauf umfasst dabei die Kette eines Zulieferers zum U2-Werk, oder die Kette von einem U2-Werk zu einem anderen. Hieraus ergibt sich die Mindestanzahl von benötigten Behältern. Eine wesentliche Vorgabe in diesem Kreislauf ist, dass bis zur Montage keine Umpackvorgänge stattfinden. Dies wird dadurch erreicht, dass die Anlieferung der KLT auf Paletten erfolgt (entweder 24 oder 48 Stück pro Palette). Diese KLT sind bereits aus dem Spektrum der RL-KLT und somit kann bei Bedarf die entsprechende Anzahl an LT entnommen werden, ohne dass weitere Handhabungsschritte nötig werden. Ein Umpacken oder zumindest Vereinzeln der einzelnen Bauteile wird somit, wenn überhaupt, erstmalig zu Beginn der Bearbeitung notwendig. Fertig bearbeitete Kundenprodukte verlassen U2 dann in GLT oder kundenspezifischen Ladungsträgern bzw. Versandgebinden. Die betrachteten Kriterien für die eigentliche Behälterauswahl sind:

1. Größe (der zu transportierenden Teile)
2. Gewicht (der Teile sowie maximal zulässiges Gesamtgewicht des Behälters)
3. Anforderungen der Linie (bspw. Sauberkeits- oder Produktionsanforderungen)

Anhand dieser Anforderungen werden dann der eigentliche LT sowie die notwendige Anzahl bestimmt. Weitere Eigenschaften werden nicht erfasst, auf tiefer gehende Untersuchungen wird verzichtet. Ist der Behälter einmal bestimmt, so wird er im Laufe des Produktlebenszyklus nicht mehr angepasst, die Auswahl bleibt also unverändert. Sollte ein verwendeter Behälter nicht mehr einsatzfähig sein, wird er recycled. Durch diese Ausführungen werden zwei Dinge klar: Zum einen gibt es einen standardisierten Behälterpool entsprechend der VDA-Empfehlung 4500, zum anderen ein standardisiertes Vorgehen bei der Auswahl des Behälters. Hierbei werden allerdings nicht alle relevanten Kriterien erfasst: Umpackvorgänge finden in der Regel manuell statt. Allerdings werden weder die Anzahl an notwendigen Umpackvorgängen berücksichtigt, noch die Kosten, die dadurch verursacht werden. Anschaffungs- oder Reinigungskosten der Behälter werden nicht erfasst. Weitere Kriterien, wie beispielsweise Ergonomie oder die notwendige Anzahl an Wiederauffüll- und Nachschubvorgängen an der Linie werden nicht erfasst. Zusätzlich werden auch Gegebenheiten des Produk-

tionssysteme wie beispielsweise Milkruns oder das Just-in-Time-Konzept (JIT) vernachlässigt. Ganz zu schweigen von der Erfassung des Transports vom Zulieferer und wieder zurück oder gar der gesamten Versorgungskette. Dies sind allerdings nur einige Einflussfaktoren, die bei kurzem Nachdenken sofort offensichtlich werden. Die genaue Identifikation aller durch die Behälterauswahl beeinflussten und diese beeinflussenden Kriterien und Faktoren findet sich in Kapitel 3 und verdeutlicht die beschränkte Aussagekraft der vorgestellten Vorgehensweisen. Zusammenfassend bedeutet dies, dass zwar die Wichtigkeit für das entsprechende Teil „geeigneter“ Behälter und standardisierter Auswahlmethoden erkannt wurde, allerdings wesentliche Kriterien nicht erfasst werden. Somit besteht also auch hier eine gravierende Lücke, die es zu schließen gilt. Das Potential für ein Kosten und Nutzen umfassendes Modell wird deutlich.

## **2.4 Ausgewählte, verwandte Forschungsaktivitäten**

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass dem Behältermanagement eine wachsende Bedeutung zukommt, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis. Aufgrund dieser wachsenden Bedeutung und vor dem Hintergrund der Ganzheitlichkeit des zu erstellenden Modells sowie im Hinblick auf das weitere Vorgehen werden nun verwandte Arbeiten vorgestellt, die vielversprechende Ansatzpunkte für die weitere Arbeit liefern oder ähnliche Fragestellungen aufweisen.

### **2.4.1 Gesamtwirtschaftlicher Effizienzvergleich alternativer Transportketten**

Die Studie „Gesamtwirtschaftlicher Effizienzvergleich alternativer Transportketten“ von (Fonger 1993, S. 18) (einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf diese Quelle) ist eine Untersuchung alternativer Transportketten anhand von Fallstudien. Zielsetzung der Untersuchung ist es, zu ermitteln, welche Art des Transports vor dem gesamtwirtschaftlichen Hintergrund am sinnvollsten ist. In Zusammenhang mit dieser Arbeit ist die Effizienzbetrachtung in erster Linie aufgrund der eingesetzten

Methode und der Ganzheitlichkeit der Effizienzbetrachtung sehr interessant. Zunächst wird im folgenden Abschnitt die Ausgangssituation der Untersuchung von Fonger näher erläutert. Anschließend werden die Vorgehensweise anhand des konkreten Beispiels dargestellt und abschließend eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse gegeben. Hierbei wird auf den konkreten Aufbau der im Rahmen dieser Studie eingesetzten Methode, die sogenannte Kosten-Nutzen-Analyse, nur kurz eingegangen. Ihre genaue Erläuterung findet sich im Anhang.

**Ausgangssituation** Zentrales Anliegen der Arbeit von Fonger ist die Untersuchung einer Verkehrsverlagerung hin zu einem multimodalen Verkehr, der zum Zeitpunkt der Untersuchung eher selten eingesetzt wird. Daher wird zwischen „unimodalem“ (durchgeführt ausschließlich mit einem Transportmittel, bspw. ein LKW) und „multimodalem Transport“ (kombinierter Transport, bspw. LKW und Schiene) unterschieden (S. 19). Diese Transportalternativen verursachen sowohl unterschiedliche Kosten als auch einen unterschiedlichen Nutzen für die beteiligten Unternehmen. Um nun den angestrebten Effizienzvergleich durchführen zu können, wurde die Kosten-Nutzen-Analyse als geeignete Methode herausgestellt (S. 36).

**Vorgehensweise** Der gewünschte Vergleich alternativer Transportketten erfolgt anhand konkreter Städteverbindungen in Deutschland, so zum Beispiel die Verbindungen zwischen Rheine und Mannheim/Ludwigshafen sowie zwischen Düsseldorf/ Krefeld und Stuttgart (S. 74). Zur erfolgreichen Durchführung der Kosten-Nutzen-Analyse mussten nun eine exakte Nutzenquantifizierung sowie eine Erfassung sämtlicher, durch die Wahl des Transportmodus erzeugten Kosten erfolgen. Um dabei dem Anspruch der Ganzheitlichkeit gerecht zu werden, wurden sämtliche untersuchte Transportketten in ihre einzelnen Wertschöpfungsstufen zerlegt (S. 109). Hiermit sollten sämtliche anfallende Kosten erfasst und ein Vergleich derselben innerhalb der einzelnen Wertschöpfungsstufen ermöglicht werden. Neben dieser Zerlegung in die einzelnen Wertschöpfungsstufen ist die ganzheitliche Kostenerfassung von zentraler Bedeutung für die Aussagekraft der Untersuchung. Im Rahmen dieser Kostenerfassung wurden daher nicht nur die in den Unternehmen anfallenden internen Kosten in die Betrachtung mit einbezogen, sondern auch negative externe Effekte (S. 80f). Zu diesen

negativen externen Effekten zählen unter anderem die Schadstoffbelastung der Luft mit Kohlenmono- oder Schwefeldioxid. Zusätzlich zur Erfassung sämtlicher anfallender Kosten ist die Erfassung der Vorteile der alternativen Transportketten von hoher Bedeutung (S. 169). Diese gelang auf Basis einer empirischen Untersuchung von 119 Transportnachfragenden. Dabei wurden die Befragten hinsichtlich ihrer Nutzenpräferenz für drei alternative Transportketten befragt. Hierbei handelte es sich um unimodalen Straßenverkehr, kombinierten Verkehr und unimodalen Schienengüterverkehr. Des Weiteren erfolgte eine Einordnung dieser Transportnachfrager in drei Segmente: LKW-affine Nachfrager, preisorientierte Nachfrager und terminsensible Nachfrager (S. 172).

**Ergebnisse** Hinsichtlich des Nutzens konnte der Effizienzvergleich drei zentrale Ergebnisse liefern (S. 245):

1. Bei „LKW-affinen Nachfragern“ (20 Prozent des Nachfragevolumens) zeigte sich eine Nutzendifferenz von mehr als 40 Prozent zwischen dem ausschließlichen Straßentransport und dem kombinierten, multimodalen Transport.
2. In der Gruppe der „preisorientierten Nachfrager“ (70 Prozent des Nachfragevolumens), konnte nur eine marginale, unbedeutende Nutzendifferenz zwischen Straßengüterverkehr und multimodalem Transport festgestellt werden.
3. „Terminsensible Nachfrager“ schließlich wiesen dem Straßengüterverkehr einen um 15 Prozent höheren Nutzen als dem kombinierten Verkehr zu.

Abschließend kann festgestellt werden, dass zwar Nutzenunterschiede existieren, in der größten Gruppe der Transportnachfrager (preisorientierte Nachfrager) ist die Differenz zwischen uni- und multimodalem Transport jedoch verschwindend gering.

Die Kostenbetrachtung des Effizienzvergleichs schließlich erbrachte die folgenden vier zentralen Ergebnisse (S. 239ff):

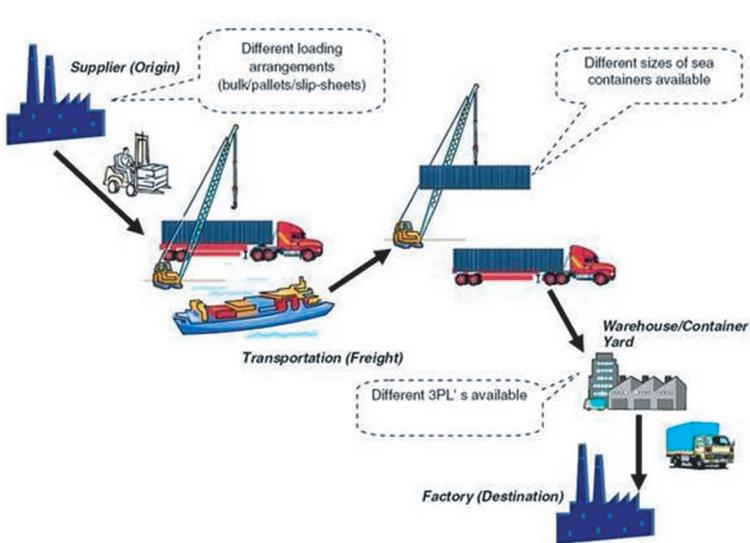
1. Der Schienengüterverkehr erwies sich als bis zu 32 Prozent günstiger als der Straßengüterverkehr.
2. Bei Transportentfernungen unter 500 Kilometern ist der Straßengüterverkehr volkswirtschaftlich am günstigsten, ab Strecken von 500 Kilometern konnte der kombinierte Verkehr als rentabelste Variante identifiziert werden.
3. Externe Kosten werden durch kombinierte oder Schienengüterverkehre in weitaus geringerem Maße verursacht als durch Straßengüterverkehre.
4. Der Straßengüterverkehr weist dafür in der Regel deutlich geringere interne Kosten, die über den Markt geregelt werden, auf, als die anderen Transportalternativen.

Zusammenfassend liefert dieser Vergleich das Ergebnis, dass der multimodale Verkehr im größten Marktbereich keine Nutzenverringering für die beteiligten Unternehmen bringt. Aufgrund der höheren internen Kosten wird er jedoch durch andere Transportalternativen, z. B. den Straßengüterverkehr, ersetzt. Diese geringeren internen Kosten bilden jedoch volkswirtschaftlich nur einen Teil der Gesamtkosten ab. Somit scheint eine zunehmende Internalisierung der anfallenden externen Kosten sinnvoll, um den multimodalen Verkehr zu stärken (S. 284f).

Die hier dargestellten Erkenntnisse haben für die hier vorliegende Arbeit die Bedeutung, dass eine ganzheitliche Betrachtung sämtlicher Kosten einen großen Einfluss auf die Auswahl eines Transportmodus (oder -behältnisses) haben kann. Nur diese Art der umfassenden Kostenerfassung ermöglicht es, aussagekräftige und zutreffende Informationen über die vorliegende Situation in der eigenen Logistik zu erhalten und auf dieser Basis sinnvolle Entscheidungen zu treffen.

## 2.4.2 „Carrier-Mode logistics optimization of inbound supply chains for electronics manufacturing“

Cochran und Ramanujam (2006) (einfache Seitenangaben beziehen sich jeweils auf diese Quelle) stellen in dieser Untersuchung eine Methodik vor, die es ermöglicht, verschiedene Anlieferungsformen im Bereich der Beschaffungslogistik miteinander zu vergleichen. Hierfür wird ein Optimierungsmodell entwickelt, das darauf abzielt, die anfallenden Transportkosten zu minimieren (S. 838). In diesem Modell wird der Materialfluss vom Verpackungsbereich beim Lieferanten über einen Schiffstransport in Containern bis zum Wareneingang(slager) des Herstellers betrachtet (S. 828). Die folgende Abbildung 2.6 verdeutlicht den hier betrachteten Ausschnitt der Supply Chain.

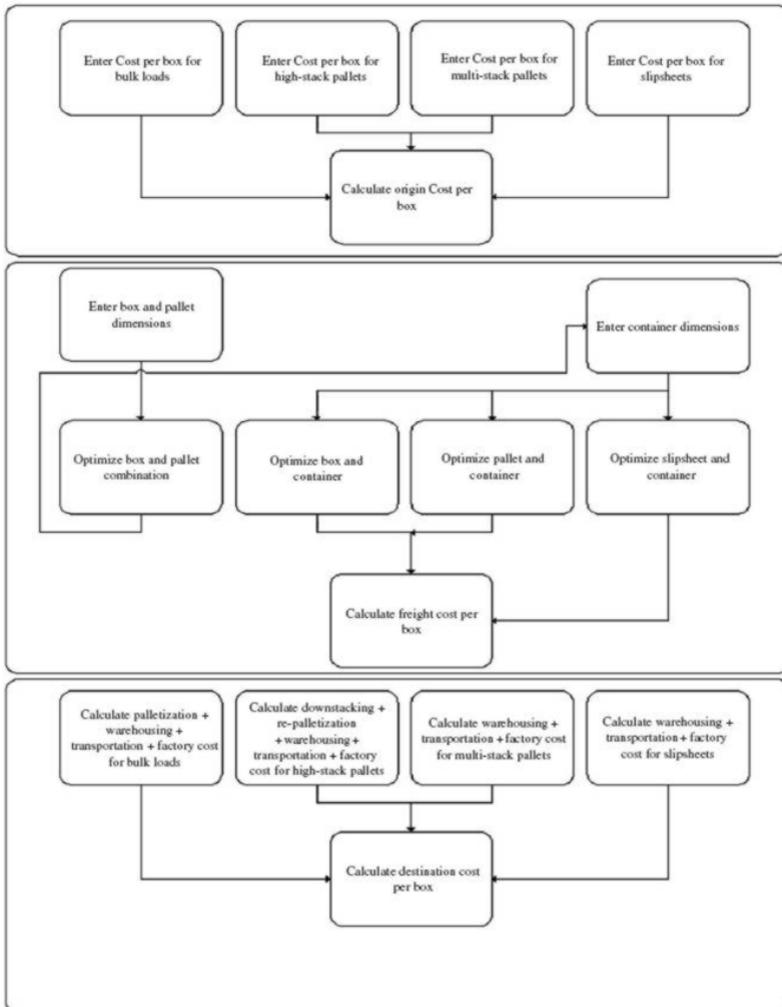


**Abbildung 2.6:** Betrachteter Ausschnitt der Supply Chain (Quelle Cochran und Ramanujam (2006))

Die hier vorgestellte Methodik basiert im Endeffekt auf zwei Elementen (S. 830): zum einen aus dem eigentlichen Optimierungsmodell, zum anderen aus einer „Packheuristik“. Dieses Modell ist ein Modell aus dem Bereich der ganzzahligen Programmierung bzw. Optimierung. Ziel ist es, die entstehenden Kosten zu minimieren. Die Zielfunktion (S. 832) besteht dabei aus den Kosten, die beim Hersteller entstehen, jenen, die durch den Transport verursacht werden und den am Ziel entstehenden Kosten. Diese Kostenbestandteile werden addiert. Die einzelnen Bestandteile der Zielfunktion werden anschließend in Abhängigkeit der Kosten für die Behälter, der LHM sowie des verwendeten Containers genau berechnet (S. 832). Hierfür ist es notwendig, zu wissen, wie viele Behälter auf ein LHM passen, wie viele LHM in einen Container bzw. wie viele Behälter in einen Container. Diese Zahlen werden mittels der Packheuristik ermittelt. Hierbei handelt es sich um eine modifizierte „BD-Heuristik“, die auf den Ergebnissen von (Bischoff and Dowsland 1982) basiert und in (Morabito and Morales 1998) erweitert wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht es somit, „to select the best combination of options available to a manufacturer to reduce the overall transportation cost from suppliers including packaging“ (S. 838). Abschließend verdeutlicht ein Fallbeispiel die praktische Anwend- und Umsetzbarkeit der Methode (S. 835 ff). Die folgende Abbildung 2.7 fasst das hier gewählte Vorgehen zusammen. Auch diese Arbeit verdeutlicht somit, dass es notwendig ist, die richtigen Behälter auszuwählen und auch, dass es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Kosten bei Verwendung unterschiedlicher Behälter gibt. Darüber hinaus ist diese Methodik klar strukturiert, durch den (quasi) modularen Aufbau vielseitig einsetzbar und kann für das weitere Vorgehen hilfreiche Ansätze liefern. Allerdings eignet sie sich als ganzheitliches Modell zur Auswahl des geeigneten Behälters im Produktionsablauf nicht. Dies ist zum Einen darin begründet, dass nur der Transport vom Zulieferer zum Hersteller betrachtet wird, also ein sehr begrenzter Teil der Supply Chain. Weitere Bestandteile der Supply Chain werden vernachlässigt, insbesondere werksinterne Abläufe. Diese spielen jedoch eine wesentliche Rolle. Kosten werden zwar erfasst, allerdings werden nicht alle Kosten im Behälterkreislauf erfasst und es erscheint fraglich, ob Kosten auf der gewählten Aggregationsstufe verfügbar sind (bspw. „costs of Warehousing (includes pallet movement and storage costs)“ (S. 830)). Eine weitere Einschränkung ist, dass nur Behälter eines Typs in einen Container verladen werden, was insbesondere im Straßenverkehr bei Beladung eines LKW nicht der Fall ist.

Ebenso ist das Modell auf JIT-Kreisläufe beschränkt (S. 839). Es ist also wesentlich, festzustellen, dass das Hauptaugenmerk auf der Auswahl des geeigneten Containers und der idealen Beladung desselben liegt (S. 828) und somit nicht für die ganzheitliche Behälterauswahl geeignet ist. Wenn überhaupt können nur Ansatzpunkte übernommen werden. Abschließend stellt Abbildung 2.7 zusammenfassend den Ablauf der Methodik dar.

Es zeigt sich somit auch bei Betrachtung verwandter Forschungstätigkeiten, dass es sinnvoll und wichtig ist, Kosten und Nutzen in ein Modell zur Auswahl des optimalen Behälters einzubeziehen. Allerdings konnte auch diese Literaturrecherche nur Ansatzpunkte für ein solches Modell liefern und keine direkt anwendbaren Modelle aufzeigen.



**Abbildung 2.7:** Funktionsweise und Ablauf des Modells (Quelle Cochran und Ramanujam (2006))

# 3 Bestimmung des Modellumfangs sowie der Leistungsanforderungen

Nach der Beschreibung des aktuellen Stands hinsichtlich der Behälterdimensionierung stellt sich nun die Frage, was ein Modell zur Auswahl des optimalen Behälters leisten können muss. Es ergeben sich mehrere Teilfragen. Unmittelbar ins Auge fällt hier natürlich die Ermittlung und Bestimmung der relevanten und wesentlichen Einflussfaktoren. Diese sind zweierlei Natur: Zum Einen gibt es Faktoren, die sich auf die Größe des zu wählenden Behälters auswirken, zum Anderen gibt es Eigenschaften der Behälter, die sich auf die Umgebung auswirken. Exemplarisch sei hier die Größe des Behälters genannt: Je größer die Grundfläche eines Behälters ist, umso mehr Abstellfläche wird für ihn benötigt. Umgekehrt darf bei einer verfügbaren Fläche von bspw. 50 \* 50 cm die Kantenlänge des verwendeten Behälters 50 cm nicht überschreiten.

Ein weiterer Aspekt ist die Frage, welche Kreisläufe abgebildet werden müssen: Ist die Abbildung werksinterner Prozesse und Kreisläufe ausreichend, oder müssen auch Zulieferer (und wenn ja, wie und bis zu welcher Stufe) in die Betrachtung mit einbezogen werden?

Darüber hinaus ist eine Entscheidungsfrage, welche Cashflows durch die verwendeten Behälter verursacht werden, seien es z. B. entstehende Anschaffungskosten oder bei der Bewegung von Behältern entstehende Kosten.

Diese Aspekte und Fragen werden in diesem Kapitel betrachtet und beantwortet.

## 3.1 Bestimmung und Festlegung der relevanten Einflussfaktoren

Welchen Nutzen besitzt ein Modell, wenn nicht einmal klar ist, was es leisten können muss? Dieser Teilabschnitt beantwortet einen ersten Teilaspekt dieser Frage: Welches sind die wirklich entscheidenden Einflussfaktoren? Welche können vernachlässigt werden? Sowie ganz allgemein: Welche Einflussfaktoren gibt es tatsächlich? Die Literatur hierzu ist, so wie es auch bereits bezüglich der Behälterdimensionierung in Kapitel 2 gezeigt wurde, äußerst spärlich. Um dennoch fundierte Aussagen treffen zu können, wird daher folgendes Vorgehen gewählt: In einem ersten Schritt werden „intuitiv“ klare Faktoren ermittelt und kurz beschrieben. Anschließend wird eine Expertenbefragung in Form eines Fragebogens und persönlicher Gespräche durchgeführt. Bei den Experten handelt es sich um Planer zweier Unternehmen. Diese Planer waren direkt in den Prozess der Ladungsträgerauswahl und -gestaltung (sowohl von Sonder- wie auch Universalladungsträgern) einbezogen oder sind es immer noch.

### 3.1.1 Intuitive Ermittlung

Die Einflussfaktoren lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: Kosten- sowie Nutzenfaktoren. Beide Gruppen müssen berücksichtigt werden und werden hier erläutert:

**Kostenaspekte** Vereinfachend gesagt, lassen sich die verschiedenen Kostenaspekte, die von der Auswahl eines Ladungsträgers beeinflusst werden und umgekehrt, in drei Kostenkategorien einteilen. Dies sind erstens die „Anschaffungskosten“ für den Behälter an sich, zweitens „Flächen- und Inventarkosten“ sowie drittens „Prozesskosten“. Flächen- und Inventarkosten werden hier zusammengefasst, obwohl es sich eigentlich um zwei unterschiedliche Aspekte handelt. Dies liegt darin begründet, dass tendenziell ein höherer Flächenbedarf einem größeren Behälter entspricht (und umgekehrt). Somit sollte die Vergrößerung des Flächenbedarfs auch zu einer Erhöhung des in Form von Material am Band gebundenen Kapitals führen, da sich in einem größeren Behälter auch mehr Teile befinden

sollten. Aufgrund dieser wechselseitigen Beziehung können diese Aspekte somit gemeinsam betrachtet werden.

- **Anschaffungskosten:** Diese Kosten sind die Kosten für den Behälter selbst. Dies können der Kaufpreis bzw. Mietkosten sein (Lai, Harjati, McGinnis, Zhou and Guldborg 2008, S. 1642). Darüber hinaus kann es zusätzlich sinnvoll sein, auch weitere Kosten, die mit der Nutzung von Ladungsträgern verbunden sind, zu berücksichtigen, sofern sich diese bei unterschiedlichen Ladungsträgern unterscheiden. Dies können bspw. Kosten für den Verwaltungs- oder Planungsaufwand unterschiedlicher Behälter bzw. eventuell benötigte RFID-Tags sein.
- **Flächen- und Inventarkosten:** Im strengen Sinn handelt es sich hierbei nicht um Kosten, die direkt monetär anfallen, sondern um Opportunitätskosten, die in Form von gebundenem Kapital vorliegen. Das heißt, hierfür musste Kapital (ob eigenes oder fremd finanziertes) eingesetzt werden und konnte somit nicht anderweitig angelegt werden. Dies hat zur Folge, dass somit Gewinn in Form einer Rendite entgangen ist. Diese und weitere Aspekte zu Flächen- und Inventarkosten finden sich bspw. in (Finsgard, Wänström and Medbo 2009, S. 18) sowie Lai et al (2008, S. 1642).
- **Prozesskosten:** In Abschnitt 2.1.3 (Ganzheitlichkeit) wurde bereits dargelegt, dass der Prozessgedanke eine sinnvolle Möglichkeit zur ganzheitlichen Erfassung der Kosten bietet. Vom Zulieferer zum Verbauort und wieder zurück durchläuft ein Behälter eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse. Hellström und Saghir (2006, S. 191ff) betrachten hier bspw. die Kosten für den Transport, die Lagerung sowie die Kommissionierung von Ladungsträgern. Eine mögliche Stufe des Prozesses, die viele Ladungsträger durchlaufen, sind Distributionszentren. In diesen fallen wiederum für die unterschiedlichen Aktivitäten Kosten an, bspw. für den Wareneingang und das Handling von Ladungsträgern sowie die Entnahme (Picking) am Verbauort (Hellström, Saghir 2006, S. 205ff). Ebenso erfolgen in Distributionszentren Umpackvorgänge, welche ebenfalls Kosten verursachen (Finsgard, Wänström, Medbo 2009, S. 5). Sind sämtliche Bauteile am Verbauort entnommen worden, der Ladungsträger also leer geworden, werden die Ladungsträger entweder recyclet bzw. verschrot-

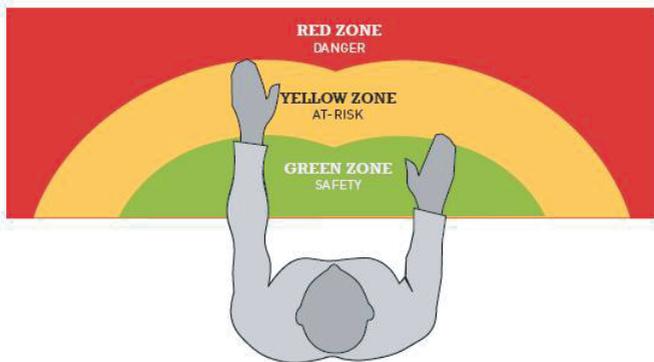
tet (sofern es sich dabei um Einwegladungsträger bzw. nicht mehr verwendbare Mehrfach-LT handelt), oder werden über den Leergutkreislauf in den LT-Kreislauf rückgeführt (bspw. durch Reinigung oder durch erneutes Einlegen der an dieser Station montierten Teile). Auch für diese Prozesse fallen wiederum Kosten an, die je nach Ladungsträgertyp so wie die Prozesse sehr unterschiedlich sein können (Gespräch in U1 am 6.7.2010).

Es kann somit zusammenfassend gesagt werden, dass die Prozesse, welche ein Behälter durchläuft, von entscheidendem Einfluss dafür sind, welcher Ladungsträger der kostengünstigste ist. Dies hat zur Folge, dass zur Kosten und Nutzen umfassenden Auswahl des bestmöglichen Behälters sämtliche Prozessschritte sowie die in diesen Prozessschritten verursachten Kosten erfasst werden. Diese müssen anschließend zur endgültigen Entscheidungsfindung aggregiert werden. Diese Tatsache beeinflusst daher das erstellte Modell.

**Nutzenaspekte** Genauso wie oben bei den Kostenfaktoren erfolgt, können auch die Nutzenaspekte in Untergruppen eingeteilt werden, welche nun näher betrachtet werden sollen:

- **Ergonomie:** Ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl von Behältern zur Materialbereitstellung ist die Ergonomie. Laut (ISO 2004) handelt es sich dabei um eine „...wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkung zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst und der Berufszweig, der Theorie, Prinzipien, Daten und Methoden auf die Gestaltung von Arbeitssystemen anwendet mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren“. Bezüglich der Behälterauswahl und somit direkt der Materialbereitstellung wird sie in der Regel durch die Festlegung eines Maximalgewichts (bspw. 12 - 15kg pro KLT, sodass er noch manuell gehandhabt werden kann) berücksichtigt. Doch ist das Gewicht alleine noch nicht ausreichend zur Beurteilung und Bewertung der Ergonomie, da sie noch weiteren Einflüssen unterliegt. Hierzu gehören unter anderem die Charakteristika des Behälters an sich (Verletzungsgefahr durch scharfe Kanten o. ä.) sowie der eigentliche Bereitstellort, da dieser wesentlichen Einfluss auf die Belastung von Schulter- oder

Rückenmuskulatur hat. Um dies zu bewerten, kann das sogenannte „VASA-Modell“ verwendet werden (Backman 2008). In diesem wird der Arbeitsraum in drei Zonen (in Analogie zu einer Verkehrsampel rot, gelb oder grün markiert) aufgeteilt (Finnsgard, Wänström und Medbo 2008, S. 6). Bei dieser Einteilung wird sowohl die Entfernung des zu greifenden Materials als auch die Greifhöhe berücksichtigt. In Abbildung 3.1 ist diese Unterteilung visualisiert. Befindet sich das Material in der grünen Zone, so ist der Greifvorgang für den Arbeiter problemlos durchführbar. Befindet es sich jedoch in der roten Zone, so werden der Rücken und die Muskulatur sehr stark beansprucht. Somit ist eine Materialbereitstellung in dieser Zone zu vermeiden, da sie potenziell schädigend wirkt<sup>1</sup>.



**Abbildung 3.1:** „Zoneneinteilung“ der Ergonomie entsprechend des VASA-Modells (Quelle: SAIF Corporation)

- **Flexibilität:** Flexibilität ist insbesondere bei sogenannten „Mix-Fertigungen“ von Bedeutung (Finnsgard, Wänström, Medbo 2009, S. 5): Die Fertigung verschiedener Produkte oder eine eventuell erforderliche regelmäßige Umstellung derselben erfordert, dass auch die Materialbereitstellung flexibel angepasst werden kann, sprich, dass die verwendeten Behälter idealer Weise für unterschiedliche Produk-

<sup>1</sup>Die folgende Grafik ist (Corporation 2008) entnommen.

te verwendet oder zumindest schnell ausgetauscht werden können<sup>2</sup>. Somit bedeutet dies, dass ein für mehrere Teilearten verwendbarer Behälter einen wesentlichen Vorteil gegenüber einem produktspezifischen (welcher evtl. ganz andere Abmessungen besitzt) - ganz zu schweigen von einer Ladungsträgerneuplanung. Somit ist die Erfassung des Nutzenaspekts Flexibilität bei der Behälterauswahl gerechtfertigt und wird daher auch in der Expertenbefragung im Sinne der Anpassungsfähigkeit auf eine veränderte Produktion abgefragt.

- **Wiederverwendbarkeit:** Die Wiederverwendbarkeit ist eng mit der Flexibilität verknüpft: Kann der zur Materialanlieferung verwendete Behälter auch direkt zum Transport (bspw. zur nachfolgenden Station) des an der Station gefertigten Produkts genutzt werden, können ansonsten erforderliche Leerguttransporte eingespart werden. Aufgrund des reduzierten Transportaufwands hat dies direkt eine Vereinfachung des Materialflusses insgesamt zur Folge. Mit diesem qualitativen Faktor wird somit die in Kapitel zwei bereits erläuterte Systemperspektive, also der Anspruch an eine ganzheitliche Lösung, verfolgt: Kann für einen einzelnen Verbauort ein kleinerer Behälter sinnvoll sein, so könnte ein größerer Behälter jedoch für nachfolgende Materialtransporte derart von Vorteil sein, dass die Verwendung dieses größeren Behälters bezogen auf das Gesamtsystem von so großem Vorteil ist, dass die nicht-optimale Lösung am einzelnen Verbauort überkompensiert wird.
- **Qualität:** Ein äußerst wichtiger Nutzenaspekt ist der Schutz der im Behälter transportierten Bauteile, sprich die Einhaltung von Qualitätsstandards. Da jegliche Bauteilbeschädigung direkte Kosten für das Bauteil selbst (es ist ja nicht mehr verwendbar und muss ersetzt werden) sowie im schlimmsten Falle auch indirekte Kosten in Form von Maschinenstillständen oder Produktionsausfällen zur Folge hat, ist der Faktor Qualität für den Fertigungs- und somit auch Ladungsträgerauswahlprozess von zentraler Bedeutung (Finnsgard, Wänström und Medbo 2009, S. 5). Wie in Kapitel zwei bereits erläutert, bieten Behälter grundsätzlich einen gewissen Schutz vor unterschiedlichen Umwelteinflüssen (Schmutz, mechanische oder thermische Beanspruchung, elektrostatische Einflussfaktoren, ...). Somit

---

<sup>2</sup>Hierbei sollte auch dieselbe Infrastruktur (Regale & Co.) verwendet werden können.

haben sie direkten Einfluss auf den Faktor „Qualität“ der transportierten Bauteile. Eine Möglichkeit zur Messung dieses Faktors kann bspw. die durch unzureichenden Schutz verursachte Ausschussquote sein.

- **Lebensdauer:** Die Lebensdauer eines Behälters hat indirekt Auswirkungen auf eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren wie bspw. Anschaffungs- oder Recyclingkosten: Diese Kosten sind umso höher, je geringer die Lebensdauer des einzelnen Behälters ist. Folglich ist es sehr wichtig, sie in Form einer qualitativen Einflussgröße im später zu entwickelnden Modell abzubilden, da sie die reine Kostenbetrachtung um eine zeitliche Dimension (Lebensdauer des Behälters an sich sowie Betrachtungszeitraum des Modells) erweitert.

### 3.1.2 Expertenbefragung

Nachdem einige „offensichtliche“ und dem Anschein nach wichtige Einflussfaktoren ermittelt wurden, sollen diese nun mittels einer Expertenbefragung genauer untersucht sowie um eventuell weitere (wichtige) Faktoren ergänzt werden. Im Rahmen dieser Befragung, es handelt sich wie geschrieben um ein Experteninterview, wurden acht Ladungsträgerplaner zweier global agierender Unternehmen aus Baden-Württemberg befragt. Drei Ziele werden hier verfolgt: die Quantifizierung der einzelnen Faktoren, die Unterscheidbarkeit derselben bei unterschiedlichen Behältern sowie die Einschätzung darüber, welche Faktoren bereits heute berücksichtigt werden (und wie). Dadurch kann ein mögliches Verbesserungspotenzial aufgezeigt werden, wenn Faktoren zwar als wichtig eingestuft, allerdings bisher noch nicht bei der Ladungsträgerauswahl berücksichtigt werden. Die Quantifizierung erfolgt hier derart, dass die Experten unter Anwendung einer fünfstufigen Skala („sehr wichtig“ bis „sehr unwichtig“) die einzelnen Faktoren bewerten. Durch diese Bewertung soll die Identifikation der Faktoren erreicht werden, die so wichtig sind, dass sie auf jeden Fall in einem Modell abgebildet werden müssen. Ebenso können die Faktoren bestimmt werden, die vernachlässigt werden könnten. Ein weiteres Ziel dieser Experteninterviews ist es, weitere, noch nicht genannte Einflussfaktoren zu identifizieren. Hinsichtlich der Unterscheidbarkeit der Einflussfaktoren bei unterschiedlichen Behältern soll schließlich mit der

Befragung ermittelt werden, ob Faktoren trotz ihrer Wichtigkeit nicht in einem Modell berücksichtigt werden müssen. Dies kann bspw. der Fall sein, wenn die Qualität der am Verbauort bereitgestellten Teile unabhängig vom verwendeten Behälter ist. Die Durchführung der Befragung ist zweigeteilt: Der erste Teil der Befragung besteht in der Zusendung eines Fragebogens, welcher es den Experten ermöglichen soll, sich vor dem eigentlichen Experteninterview, dem zweiten Teil, mit den Inhalten desselben vertraut zu machen.

Damit aus den Ergebnissen der Interviews überhaupt zutreffende und aussagekräftige Schlussfolgerungen gezogen werden können, ist es bei der Gestaltung des Fragebogens erforderlich, zwei zentrale Aspekte zu beachten (Weinreich and von Lindern 2008, S. 19ff): Ein Fragebogen sollte möglichst präzise sein, damit Unklarheiten oder Missverständnisse bei den einzelnen Fragen (weitestgehend) ausgeschlossen werden können. Darüber hinaus sollten mit ihm ausschließlich solche Informationen abgefragt werden, die noch nicht bekannt sind bzw. nicht bereits anderweitig abgefragt wurden<sup>3</sup>.

Bei den durchgeführten Gesprächen handelt es sich, wie bereits erwähnt, aus methodischer Sicht um Expertenbefragungen. Expertenbefragungen bieten im Gegensatz zu schriftlichen Befragungen ohne persönlichen Kontakt den Vorteil, dass im persönlichen Gespräch direkt Fragen und Unklarheiten ausgeräumt werden können. Allerdings hat auch eine solche einmalige Form der Befragung, in der es keine Rückmeldung der Ergebnisse der anderen Experten gibt, wie sie bspw. bei einer Delphi-Befragung vorkommt, den Nachteil, dass recht unterschiedliche Ergebnisse erreicht werden können. Ein Konsens, wie er bspw. durch eine Delphi-Befragung ermöglicht würde, kann somit bei dieser Form der Befragung nicht erzielt werden (Häder 2009, S. 60ff). Dennoch kann für diese Untersuchung festgehalten werden, dass eine Expertenbefragung gerechtfertigt ist, da sie mit einem vertretbaren Aufwand wichtige Ergebnisse für das zu erstellende Modell liefern kann.

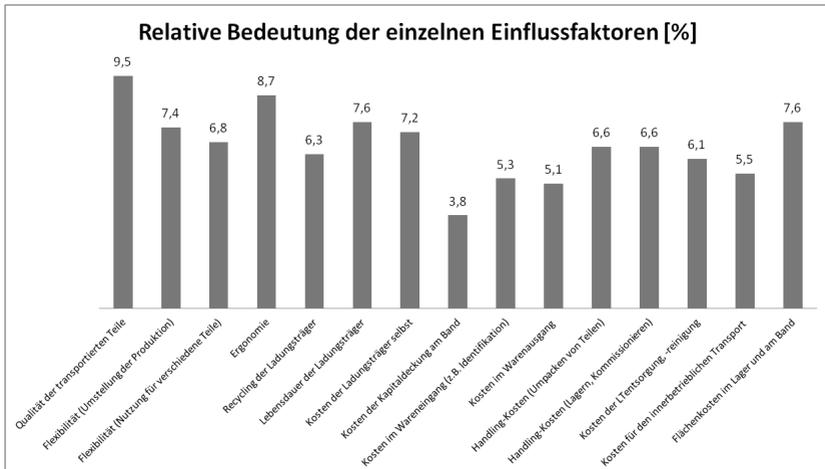
---

<sup>3</sup>Weitergehende Informationen zu möglichen Fehlerquellen bei der Gestaltung von Fragebögen finden sich bspw. in Weinreich & von Lindern (2008, S. 15ff).

### 3.1.3 Auswertung der Expertenbefragung

Dieser Abschnitt beschäftigt sich in drei Schritten mit der Vorstellung und Auswertung der Ergebnisse der Befragungen (vgl. hierzu auch Berbig et al. (2012)). Im ersten Schritt werden die allgemeinen Ergebnisse dargelegt. Anschließend werden die Ergebnisse getrennt hinsichtlich der Kosten- und Nutzenaspekte genauer betrachtet.

**Allgemeine Ergebnisse** Ein Ziel der Befragung war, die Ermittlung der Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren. Als bedeutendster Faktor wurde dabei der Faktor „Qualität“ identifiziert, der von allen Befragten als sehr wichtig bewertet wurde. Die genauen Auswertungen zur Bedeutung der einzelnen Faktoren findet sich in den folgenden Abschnitten. Hier sollen nun in einem ersten Schritt konkrete, aggregierte Aussagen über die relative Bedeutung sämtlicher Einflussfaktoren getroffen werden. Hierfür wurde der Mittelwert für jeden einzelnen Einflussfaktor berechnet. Diese Mittelwerte wurden anschließend aufsummiert und damit die relative Bedeutung des jeweiligen Einflussfaktors bestimmt. Es ergeben sich die folgenden Ergebnisse:



**Abbildung 3.2:** Relative Bedeutung der Einflussfaktoren

Diese Übersicht zeigt, dass die „Qualität“ mit einer Bedeutung von knapp 10% der wichtigste Faktor ist, gefolgt von der Ergonomie mit 8,7% relativer Bedeutung. Interessant ist, dass der „unwichtigste“ Einflussfaktor ein quantitativer ist, nämlich die „Kosten der Kapitaldeckung am Band“ (3,8 % relativer Anteil). Generell fällt auf, dass die qualitativen Faktoren als bedeutender eingeschätzt werden als die quantitativen. Über diese eigentliche Bewertung der Bedeutung der Faktoren hinaus konnten durch die Expertenbefragung weitere, noch nicht identifizierte Einflussfaktoren ermittelt werden. Hierbei handelt es sich um die folgenden Faktoren:

1. Verfügbare Fläche (= Darstellbarkeit) am Verbauort
2. Stapelfähigkeit der LT
3. Schutz von Elektroteilen vor elektrostatischer Aufladung
4. Vermeidung von nichtwertschöpfenden Tätigkeiten am Verbauort
5. Identifikationsmöglichkeiten der Behälter im Prozess
6. Packungsdichte

Da der Faktor „Schutz vor elektrostatischer Aufladung“, der spezifische Sonderladungsträger zwingend erforderlich macht, bereits als Randbedingung in den Planungsprozess eingeht, kann er in einem Modell vernachlässigt werden. Des Weiteren kann bei Universalladungsträgern, allerdings auch bei Sonderladungsträgern, von einer grundsätzlichen Stapelfähigkeit ausgegangen werden. Somit kann auch dieser Einflussfaktor bei der Modelerstellung außer Acht gelassen werden. Eine Differenzierung und genauere Betrachtung scheint jedoch bei den übrigen Einflussfaktoren sinnvoll. So können bspw. Kunststoffladungsträger recht gut mittels RFID-Technik identifiziert werden, GLTs aus Metall sind hierfür allerdings kaum bzw. nur unter erhöhtem Aufwand geeignet. Auch die Vermeidung von nichtwertschöpfender Arbeit am Verbauort sollte berücksichtigt werden, da hierzu auch Transporte vom Bereitstell- zum eigentlichen Verbauort zählen: KLT können in der Regel kompakter und näher bereitgestellt werden, als dies bei GLT möglich ist. Somit sind für KLT kürzere, idealerweise gar keine, „Transporte“ erforderlich, nichtwertschöpfende Tätigkeiten können reduziert werden. Ähnliches gilt für die verfügbare Fläche, sprich für die Darstellbarkeit am Verbauort: KLT, die weniger Fläche benötigen, können besser bereitgestellt werden, als großflächige GLT. Daher sollte auch dieser Faktor mit berücksichtigt werden.

**Kostenfaktoren** Betrachtet man den Mittelwert der Einschätzungen zur Wichtigkeit der Faktoren, so fällt auf, dass die untersuchten Kostenaspekte (Mittelwert = 3,2) weniger wichtig eingeschätzt werden als die Nutzenaspekte (Mittelwert = 4,1; s. folgender Abschnitt). Es wird ersichtlich, dass von den hier untersuchten neun Einflussfaktoren lediglich vier als zumindest wichtig beurteilt werden. Darüber hinaus wurde insgesamt nur ein einziger Faktor, die „Kosten der Kapitaldeckung am Band“, im Mittel als unwichtig eingestuft. Die folgende Tabelle 3.1 stellt als Ergebnis die in der Expertenbefragung ermittelte Bewertung der einzelnen Faktoren detailliert dar.

Vergleicht man die Ergebnisse zu den Kosten- mit denen der Nutzenfaktoren (s. unten), so fällt auf, dass diese je nach Behältertyp in der Regel zwar unterschiedlich sind. Allerdings herrscht eine große Intransparenz bezüglich der durch die Behälterausslegung verursachten Kosten, da lediglich drei

Einflussfaktoren	Bedeutung der einzelnen Aspekte [Nennungen]						Mittelwert
	sehr wichtig (5)	wichtig (4)	neutral (3)	unwichtig (2)	sehr unwichtig (1)	keine Angabe	
<b>auf die Behälterauslegung</b>							
Kosten (der LT selbst)	3	2	1	1	-	1	4,0
Kosten (Kapitaldeckung am Band)	-	1	-	2	2	3	2,0
Kosten (Warenausgang)	-	1	1	-	2	4	2,25
Handlingkosten (Umpacken)	1	4	1	-	1	1	3,6
Handlingkosten (Einlagern, Puffern, ...)	1	4	-	2	-	1	3,6
Kosten (Entsorgung/Reinigung)	-	4	2	-	1	1	3,3
Kosten (innerbetrieblicher Transport)	-	3	2,5	0,5	1	1	3,1
Flächenkosten (im Lager/am Band)	3	2	2	-	-	1	4,1

**Tabelle 3.1:** Ergebnisse der Expertenbefragung - Kosten

dieser Einflussfaktoren bei der Behälterauswahl bzw. -auslegung verwendet werden. Ebenso konnte über die Hälfte der Experten bei einigen der Faktoren („Kosten im Wareneingang“, „Kosten im Warenausgang“ und „Kosten der Kapitaldeckung am Band“) überhaupt keine Einschätzung bezüglich der Verwendung im aktuellen Prozess geben. Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass die Kostenfaktoren gegenüber den Nutzenfaktoren weniger bedeutend sind und seltener im aktuellen Auswahlprozess verwendet werden.

**Nutzenfaktoren** Im Unterschied zu den Kostenfaktoren wurden fünf der sechs Nutzenfaktoren, also die überwiegende Mehrheit, von den Experten als mindestens wichtig eingestuft. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass bei allen Faktoren eine Unterscheidbarkeit für verschiedene Behältertypen vorliegt und somit sämtliche Faktoren berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich sind sie auch bereits im aktuellen Prozess der Behälterauslegung direkt von hoher Bedeutung. Die Ergebnisse der Expertenbefragung bezüglich der Relevanz der Nutzenfaktoren werden in Tabelle 3.2 detailliert vorgestellt.

Die Tabelle zeigt, dass, abgesehen vom Faktor „Recycling der Ladungsträger“ (Mittelwert = 3,3), die absolute Bedeutung der einzelnen Faktoren zumindest „wichtig“ ist.

Sie zeigt auch auf, dass die Nutzenfaktoren bereits direkt in den aktuellen Prozess integriert sind, wenn auch ausschließlich in Form von Randbedingungen wie dem maximal zulässigen Gesamtgewicht eines Ladungsträgers. Eine tiefer gehende Berücksichtigung dieser Faktoren sowie die Untersuchung der Eignung der verschiedenen Ladungsträger, diesen Anforderungen gerecht zu werden, erfolgt allerdings nicht. Es handelt sich bei diesen Randbedingungen vielmehr um Ausschlusskriterien für einige Behältertypen.

Einflussfaktoren	Wie wichtig sind die einzelnen Aspekte					
	sehr wichtig (5)	wichtig (4)	neutral (3)	unwichtig (2)	sehr unwichtig (1)	keine Angabe
<b>auf die Behälterauslegung</b>						<b>Mittelwert</b>
Qualität (Vermeidung von Beschädigungen)	8	-	-	-	-	5,0
Flexibilität (Umstellung der Produktion)	3	3	1	1	-	4,0
Flexibilität (verschiedene Teile/Produkte)	1	5	1	0,5	0,5	3,7
Ergonomie (Belastung der Mitarbeiter)	6	1,5	0,5	-	-	4,7
Recycling der LT	-	2	5	1	1	3,3
Lebensdauer der LT	-	8	-	-	-	4,0

**Tabelle 3.2:** Ergebnisse der Expertenbefragung - Nutzen

## 3.2 Bestimmung der abzubildenden Kreisläufe

Um ein aussagekräftiges Ergebnis erzielen zu können, ist es erforderlich, dass der Behälterkreislauf richtig und umfassend abgebildet wird. Das bedeutet, dass nicht nur der Kreislauf von einem vorgelagerten Supermarkt zur Bearbeitungsstation abgebildet werden darf, sondern weiter gegangen werden muss. Auch die alleinige Beschränkung auf ein Werk ist nicht umfassend genug: Es fallen bereits vorher, nämlich durch die Anlieferung der Teile und bereits beim Lieferanten, Kosten an - und ebenso auch nach dem Leerwerden des Behälters am Montageband (oder sonstigem Zielort). Somit müssen die Behälter auch wieder zurückgeführt werden, entweder als Leerbehälter bspw. zurück zu einem Lieferanten, oder sie werden erneut befüllt und danach weiter transportiert. Folglich muss also auch die Behälterrückführung mit einbezogen werden. Wo beginnt also die zu betrachtende Prozesskette? Ideal wäre es, die gesamte Prozesskette erfassen zu können. Dies ist jedoch in der Praxis nur schwer vorstellbar, da Kosten in der Regel ein absolutes Betriebsgeheimnis darstellen. Somit stellt es sich in der Praxis bereits als Herausforderung dar (bzw. seitens der Kartellbehörden nicht einmal als erlaubt (Quelle: eigenes Gespräch u.a. am 27.04.2012)), die Kosten beim direkten Lieferanten zu erfassen. Der erste Prozess, der erfasst werden kann, ist somit der Warenausgang des Lieferanten. Von hier müssen alle Prozesse erfasst werden. Aus demselben Grund ist es auch nicht möglich, weitere Kosten erfassen zu können, wenn der Behälter nach der Leergutrückführung extern neu befüllt wird.

Somit ergibt sich, dass die genaue Betrachtung der Prozesskette im Rahmen dieser Arbeit beim Warenausgang des 1<sup>st</sup>-Tier-Suppliers beginnt, dann sämtliche Prozesse vom Transport über die Lagerung bis hin zur Entnahme betrachtet werden müssen, um schlussendlich bei der Ankunft der (leeren oder vollen) Behälter beim Kunden bzw. Lieferanten zu enden. Dieser Kreislauf muss vollständig und „universal einsetzbar“ betrachtet werden. Ansonsten kann das Modell nicht erfolgreich entwickelt werden bzw. die gewünschten Ergebnisse liefern. Die genaue Beschreibung, welche Prozesse wie abgebildet werden, erfolgt in Kapitel 5.3 und den ihm folgenden.

### 3.3 Ermittlung der durch die Behälterauswahl verursachten Kosten

Welche Kosten spielen im Kontext dieser Arbeit eine wesentliche Rolle? Um diese Frage beantworten zu können, werden nun, in Anlehnung an (Gudehus 2007), mögliche und vor allem wesentliche Kostenkategorien bzw. -bereiche ermittelt. Hierdurch wird ein besseres Verständnis der später beschriebenen, durch die Behälterwahl verursachten Kostenarten erreicht.

**Personalkosten** Sämtliche Vorgänge, die den Einsatz von Personal erfordern, verursachen Personalkosten. Wie bereits oben erwähnt wurde, haben bspw. die Ergonomie oder die Vermeidung nichtwertschöpfender Tätigkeiten Einfluss auf die Personalkosten (je weniger gelaufen werden muss, umso „effizienter“ wird das Personal eingesetzt).

**Transportkosten** Transportkosten entstehen für alle Arten inner- sowie außerbetrieblicher Transporte. Die Transportfrequenz wird dabei von der Behältergröße beeinflusst (je kleiner der Behälter, desto häufiger die Transporte). Die erforderlichen Strecken werden ihrerseits auch durch die Bereitstellung und den Flächenbedarf am Band mit beeinflusst.

**Raum- und Flächenkosten** Die zur randbedingungsgemäßen Materialbereitstellung erforderliche Fläche bestimmt die Raum- und Flächenkosten. Großen Einfluss hierauf haben die Behältergröße oder auch die festgelegte Beschaffungs- und Bereitstellungsstrategie. Sie sind auch insofern von Relevanz, dass die zur Bereitstellung benötigten Flächen nicht für andere Zwecke verwendet werden können (vgl. Opportunitätskosten) und zudem durch eine sich ändernde Behältergröße direkt beeinflusst werden.

**Bestandskosten** Sie entstehen durch das Vorhalten des Materials in der gesamten Logistikkette und entsprechen somit Kapitalbindungskosten. Sie stehen insofern im Zusammenhang mit der Behältergröße, als dass in einem größeren (kleineren) Behälter tendenziell mehr (weniger) Teile transportiert werden können und somit mehr (weniger) Kapital gebunden ist.

**Fremdleistungskosten** <sup>4</sup> Hierunter fallen sämtliche Kosten, die durch Dienstleister verursacht werden. Sie sind oftmals nach dem „Bausteinprinzip“ aufgebaut (bspw. Kosten pro Transport pro Gebinde). Rein theoretisch kann dabei jeder Teil der Prozesskette fremdvergeben werden (wird es logischer Weise allerdings nicht).

**Betriebsmittelkosten** Betriebsmittelkosten sind Kosten, die für die im Betrieb eingesetzten „technischen Hilfsmittel“ wie bspw. Stapler, Regale oder weitere Transportmittel, erforderlich sind. Sie beinhalten somit auch Abschreibungs-, Energie oder Wartungskosten. Somit hat bspw. die Behältergröße Einfluss auf diese Kosten, da sie die erforderliche Transportfrequenz und damit wiederum die erforderliche Anzahl an Transporthilfsmitteln (mehr oder weniger direkt) beeinflusst. Eine detaillierte Kalkulation der Betriebsmittelkosten kann bei Interesse bspw. in Gudehus (2007, S. 152ff) nachgelesen werden.

**Ladungsträgerkosten** Dies sind die Kosten der Ladungsträger selbst. Sie hängen somit direkt mit dem gewählten Behälter zusammen. Es kann sich hierbei bspw. um Mietkosten bzw. Abschreibungen, Kosten für Instandhaltung oder Reinigung handeln. Sie hängen in der Regel direkt von der Behältergröße ab (ein größerer Behälter ist tendenziell teurer in der Anschaffung als ein kleinerer).

**Vorlauf- und Planungskosten** Vorlauf- und Planungskosten sind die Kosten, die bei der Planung sowie beim Anlauf einer Linie oder auch für die Nachbestellung von Material anfallen. Somit beeinflussen wiederum bspw. die Behältergröße (je kleiner der Behälter, desto häufiger muss nachbestellt werden) sowie die Ergonomie (wo kann der Behälter abgestellt und wie muss er dann gehandhabt werden) diese Kosten.

Dies sind die wesentlichen Kostenstrukturen, die im Modell noch verfeinert werden. Nach Gudehus (2007, S. 148ff) können noch weitere Kostenkategorien unterschieden werden, die für diese Arbeit allerdings nicht von Bedeutung sind, da sie durch eine Veränderung der Behältergröße oder

---

<sup>4</sup>Streng genommen handelt es sich hierbei um ein eigenes Gliederungsmerkmal. Es wird jedoch hier so aufgeführt wie in der Originalquelle.

der -auswahl nicht oder nicht wesentlich beeinflusst werden. Dies sind: Sachkosten, IT-Kosten, Steuern, Abgaben, Versicherungen und Gebühren, Strecken- und Netzkosten.

Nachdem somit die eigentlichen Kostenstrukturen bekannt sind, stellt sich nun die Frage, ob wirklich Kosten die richtige Bezugsgröße sind - oder Cashflows. Diese Frage ist an dieser Stelle schwer zu beantworten, sie kann aber einfacher beantwortet werden, wenn bereits hier auf die Erfahrungen aus den Praxiseinsätzen eingegangen wird. In den Praxisfällen zeigte sich, dass eine Mischung aus insbesondere Kosten und (weniger) Cashflows zielführend ist: Anschaffungskosten der Ladungsträger sind relevant und müssen als Kosten (=Zahl) erfasst werden. Personal ist erforderlich, dafür entstehen zeitabhängige Kosten, also ein Geldfluss. Dies muss entsprechend mit berücksichtigt werden. Kapitalbindungskosten wiederum müssen auch betrachtet werden, da sie einen entscheidenden Einfluss haben. Diese (im späteren Verlauf der Arbeit noch verfeinerte und detailliertere) Aufschlüsselung der Kostenarten, ist zielführend und richtig, wie in den folgenden Kapiteln gezeigt wird. Die genaue Detaillierung erfolgt in Kapitel 5.

# 4 Modellierungsmöglichkeiten

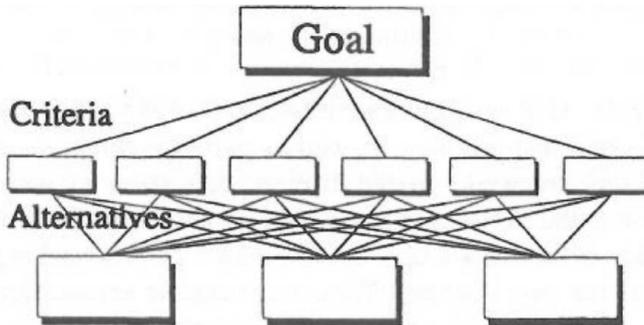
In den vorhergehenden Kapiteln wurde beschrieben, welchen Anforderungen ein umfassendes Modell gerecht werden muss. Es stellt sich somit die Frage, welche Modellierungsarten hierfür überhaupt in Frage kommen. Dieses Kapitel stellt verschiedene Modellierungsmöglichkeiten vor. Hierbei müssen zwei Dinge beachtet werden: Erstens muss das Modell leicht anwendbar, aber dennoch umfassend sein, sodass es auch für den Praxis-einsatz tauglich ist. Zweitens muss es in kurzer Zeit verlässliche Ergebnisse liefern können, auch bei eventuell ungenauen Eingangsdaten. In diesem Kapitel werden nur die beiden für diese Arbeit wesentlichen, die Methode der „Total Cost of Ownership“ sowie der „Analytic Hierarchy Process“ vorgestellt. Die weiterhin untersuchten Ansätze finden sich im Anhang.

## 4.1 Der „Analytic Hierarchy Process“

Der Analytic Hierarchy Process (AHP) ist ein systematisches Vorgehen zur Entscheidungsfindung. Basis ist entweder ein paarweiser oder ein absoluter Vergleich zwischen den zu untersuchenden Alternativen (Saaty and Vargas 2001, S. 1)(einfache Seitenangaben im Text beziehen sich auf diese Quelle<sup>1</sup>). Der AHP besteht aus den drei Hierarchieebenen „Ziel“, „Kriterien“ und „Alternativen“ eines Entscheidungsproblems (S. 3). Die „höchste“ Ebene des AHP stellt dabei das Ziel dar, die Kriterien bilden die mittlere und die Alternativen befinden sich auf der untersten Hierarchieebene. Somit ergibt sich vor der Durchführung des AHPs die Notwendigkeit, diese Ebenen klar zu definieren und zu trennen. Die Zusammenstellung der sowie den Zusammenhang zwischen den einzelnen Hierarchieebenen zeigt Abbildung 4.1.

---

<sup>1</sup>Die genauen mathematischen Berechnungen können (Saaty 1990) entnommen werden.



**Abbildung 4.1:** Die drei Hierarchieebenen des AHP (Quelle: Saaty, Vargas (2001), S. 3)

Damit die Bedeutung zweier Kriterien miteinander verglichen werden kann, ist in jedem Fall eine standardisierte Skala erforderlich, deren Werte von 1 („gleich wichtig“) bis 9 („ein Kriterium ist bedeutend wichtiger als das andere“) reichen (S. 6). Die folgende Abbildung zeigt die zusammenfassende Darstellung der Skala.

Wie bereits oben erwähnt, kann der AHP sowohl für einen relativen als auch für einen absoluten Vergleich zwischen verschiedenen Alternativen durchgeführt werden (S. 4). Beim absoluten Vergleich erfolgt die Alternativenbewertung auf Grundlage eines Standards, der relative erfolgt paarweise zwischen den einzelnen Alternativen. Diese beiden Ansätze werden in den folgenden Abschnitten erläutert und anhand eines Beispiels verdeutlicht.

<b>Intensity of Importance</b>	<b>Definition</b>	<b>Explanation</b>
1	Equal Importance	Two activities contribute equally to the objective
2	Weak	
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another
4	Moderate plus	
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
6	Strong plus	
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favored very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
8	Very, very strong	
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
<b>Reciprocals of above</b>	If activity $i$ has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with activity $j$ , then $j$ has the reciprocal value when compared with $i$	A reasonable assumption
<b>Rationals</b>	Ratios arising from the scale	If consistency were to be forced by obtaining $n$ numerical values to span the matrix

**Abbildung 4.2:** Bewertungsskala des AHP (Quelle: Saaty, Vargas (2001), S. 6)

### 4.1.1 Der absolute Vergleich

Zur Durchführung eines absoluten Vergleichs ist eine weitere Untergliederung der Hierarchieebene „Kriterien“ erforderlich. Dabei werden sogenannte „Intensitäten“ oder „Subkriterien“ erstellt (S. 17). In diesen Intensitäten spiegeln sich die möglichen Ausprägungen des dazugehörigen Kriteriums wider. Beispielsweise können für das Kriterium „Bildung“ der akademische Grad eines Doktors, Masters oder Bachelors mögliche Intensitäten darstellen (S. 18). Anschließend an diesen ersten Schritt, in dem alle denkbaren Kriterien sowie die dazugehörigen Intensitäten erfasst wurden, erfolgt nun als zweiter Schritt ein paarweiser Vergleich zwischen den einzelnen Kriterien. Dieser Vergleich basiert auf der oben beschriebenen neunstufigen Skala. Anschließend werden diese Ergebnisse in einer Matrix zusammengefasst. Hierbei gilt, dass eine Bewertung von bspw. 7 beim paarweisen Vergleich von Kriterium A und Kriterium B (Zelle  $Z_{AB}$ ) für den entsprechenden Vergleich zwischen den Kriterien B und A den Kehrwert, in diesem Falle also  $1/7$  (Zelle  $Z_{BA}$ ), als Matrixeintrag liefert. Logischerweise besteht die „Hauptdiagonale“ der Matrix ausschließlich aus „1“en (S. 18). Im folgenden Schritt drei erfolgt die Berechnung der Prioritäten bzw. Gewichtungsvektoren der einzelnen Kriterien auf Basis der so ermittelten Matrix (S. 17f): Zunächst werden alle Spaltensummen berechnet und anschließend die Einträge der einzelnen Matrixzellen durch die entsprechende Spaltensumme dividiert. Somit kann der Prioritätsvektor jedes Kriteriums durch das Aufsummieren der Quotienten für die entsprechenden Zeilen bzw. Kriterien bestimmt werden. Dividiert man anschließend diesen Prioritätsvektor noch durch die Anzahl der untersuchten Kriterien, erhält man als Ergebnis den relativen Gewichtungsfaktor aller Kriterien. In Summe ergibt sich somit ein „Gesamtgewichtungsfaktor“ von eins. Im Anschluss an die Berechnung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien erfolgt in Schritt vier auf vergleichbare Weise die Berechnung der Prioritäten zwischen den einzelnen Intensitäten (S. 18). Der Prioritätsvektor wird nun jedoch nicht nur durch die Anzahl der untersuchten Kriterien geteilt, sondern auch mit dem relativen Gewichtungsfaktor des zu den Intensitäten gehörenden Kriteriums multipliziert. Durch Summation dieser Produkte ergibt sich anschließend der Gewichtungsfaktor des zu den einzelnen Intensitäten gehörenden Kriteriums. Abschließend wird dieses für jede Intensität berechnete Produkt durch das größte Produkt des jeweili-

gen Kriteriums dividiert. Mit dieser Vorgehensweise werden die Produkte in Punktwerte des Intervalls zwischen null und eins übertragen. Die endgültige Auswahl einer Alternative erfolgt schließlich im fünften Schritt (S. 19). Für diese Auswahl sind sowohl die Ergebnisse aus Schritt vier als auch die Ergebnisse des dritten Schrittes erforderlich: Beide Ergebnisse werden für jedes Kriterium miteinander multipliziert und anschließend aufsummiert. Diese Summe ist der Ergebniswert für die betrachtete Alternative und wird für sämtliche Alternativen ermittelt. Die Alternative mit dem größten Ergebniswert ist folglicherweise die zu realisierende.

### 4.1.2 Ein Beispiel

In diesem Beispiel wird die Entscheidungssituation einer möglichen Beförderung betrachtet. Es wurde aus Saaty und Vargas (2001, S. 17ff) übernommen. Das sich ergebende Grundproblem besteht in diesem Fall darin, dass ein Vorgesetzter eine Entscheidung darüber treffen muss, welcher seiner Mitarbeiter befördert wird. Um diese Entscheidung zu treffen, identifiziert er sämtliche beförderungswürdige Kandidaten. Als Kriterien dienen deren „Zuverlässigkeit“, „Bildung“, „Erfahrung“ und „Qualität“ (der Arbeit). Zusätzlich definiert er für diese Kriterien je fünf Intensitäten: Beispielsweise legt er für das Kriterium „Zuverlässigkeit“ die Intensitäten „außergewöhnlich“, „überdurchschnittlich“, „durchschnittlich“, „unterdurchschnittlich“ sowie „nicht zufriedenstellend“ fest. Danach führt er im zweiten Schritt den paarweisen Vergleich zwischen den einzelnen Kriterien durch (genauere Details hierzu werden im späteren Verlauf dieses Abschnitts erklärt). Durch das Ergebnis dieses paarweisen Vergleichs werden konkrete Aussagen darüber möglich, wie wichtig die einzelnen Kriterien für die Entscheidung sind. Diese Bedeutung wird in Form von quantitativen Prioritäten abgebildet. Schritt drei beinhaltet anschließend die Bestimmung der Prioritäten für die einzelnen Intensitäten eines jeden Kriteriums.

Zur Verdeutlichung soll dieses Vorgehen beim paarweisen Vergleich an dieser Stelle mittels des Kriteriums „Zuverlässigkeit“ erläutert werden, innerhalb dessen ein paarweiser Vergleich zwischen den einzelnen Intensitäten durchgeführt wird. Diese Intensitäten, die Ergebnisse des paarweisen Vergleichs, sowie die für das weitere Vorgehen notwendigen Spaltensummen sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

<b>Intensitäten</b>	<b>außergewöhnlich</b>	<b>überdurchschnittlich</b>	<b>durchschnittlich</b>	<b>unterdurchschnittlich</b>	<b>nicht zufriedenstellend</b>
außergewöhnlich	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
überdurchschnittlich	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00
durchschnittlich	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00
unterdurchschnittlich	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00
nicht zufriedenstellend	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00
<b>Spaltensumme</b>	<b>2,28</b>	<b>4,08</b>	<b>6,83</b>	<b>10,50</b>	<b>15,00</b>

**Tabelle 4.1:** Beispielhafte Matrix mit Bestimmung der Spaltensummen (nach Saaty, Vargas (2001), S. 17)

Nachdem die Spaltensummen errechnet wurden (Schritt 3), werden nun die Werte aller Zellen durch die jeweiligen Spaltensummen dividiert. Die resultierende Ergebnismatrix ist in der folgenden Tabelle 4.2 dargestellt.

Zusätzlich werden die Zeilensummen aller Intensitäten berechnet. Diese Summen werden durch die Anzahl der untersuchten Intensitäten (in diesem Beispiel fünf) dividiert. Als Ergebnis liefert dieser dritte Schritt des AHP die Prioritäten der einzelnen Intensitäten (s. hierzu Tabelle 4.3).

Im Anschluss werden nun in Schritt vier für sämtliche Intensitäten aller Kriterien die entsprechenden Punktwerte zwischen eins und null berechnet. Um dies zu erreichen, werden die Produkte aus den Prioritäten der Intensitäten und dem entsprechenden Gewichtungsfaktor des dazugehörigen

<b>Intensitäten</b>	<b>außergewöhnlich</b>	<b>überdurchschnittlich</b>	<b>durchschnittlich</b>	<b>unterdurchschnittlich</b>	<b>nicht zufriedenstellend</b>
außergewöhnlich	0,44	0,49	0,44	0,38	0,33
überdurchschnittlich	0,22	0,25	0,29	0,29	0,27
durchschnittlich	0,14	0,12	0,15	0,19	0,20
unterdurchschnittlich	0,11	0,08	0,07	0,10	0,13
nicht zufriedenstellend	0,09	0,06	0,05	0,05	0,07

**Tabelle 4.2:** Beispielhafte Matrix nach Division (nach Saaty, Vargas (2001), S. 19)

<b>Intensitäten</b>	<b>Zeilensumme</b>	<b>Prioritäten</b>
außergewöhnlich	2,08	0,42
überdurchschnittlich	1,31	0,26
durchschnittlich	0,8	0,16
unterdurchschnittlich	0,49	0,10
nicht zufriedenstellend	0,31	0,06

**Tabelle 4.3:** Ermittelte Prioritäten (nach Saaty, Vargas (2001), S. 20)

Kriteriums berechnet. Bspw. ergibt sich für die Intensität „außergewöhnlich“ aus dem Gewichtungsfaktor des Kriteriums Zuverlässigkeit von 0,43 und der Priorität der Intensität „außergewöhnlich“ von 0,42 ein Wert von 0,18. Die so ermittelten Produkte werden anschließend durch den maximalen Gewichtungsfaktor des jeweiligen Kriteriums dividiert. Somit werden ebenfalls Punktwerte zwischen eins und null errechnet. Für das Kriterium „Zuverlässigkeit“ ergeben sich als Konsequenz die in Tabelle 4.4 als Beispiel dargestellten Ergebnisse.

<b>Intensitäten</b>	<b>Prioritäten</b>	<b>Gewichtungsfaktor Zuverlässigkeit</b>	<b>Produkt</b>	<b>Größtes Produkt</b>	<b>Punktwert</b>
außergewöhnlich	0,42	0,43	0,18	0,18	1,00
überdurchschnittlich	0,26	0,43	0,11	0,18	0,64
durchschnittlich	0,16	0,43	0,07	0,18	0,39
unterdurchschnittlich	0,10	0,43	0,04	0,18	0,23
nicht zufriedenstellend	0,06	0,43	0,03	0,18	0,15

**Tabelle 4.4:** Punktwerte (nach Saaty, Vargas (2001), S. 22)

Analog werden in diesem Schritt die Punktwerte für die Intensitäten aller Kriterien bestimmt. Im fünften und letzten Schritt werden Ergebniswerte für die zu bewertenden Alternativen berechnet. Hierzu wird der Punktwert für die Intensität dieses Kriteriums mit dem entsprechenden Gewichtungsfaktor multipliziert. Für das betrachtete Beispiel würde somit der Gewich-

tungsfaktor des Kriteriums „Zuverlässigkeit“ (0,43) bei Vorliegen einer „überdurchschnittlichen“ Intensität eines Kandidaten mit einem Punktwert von 0,64 multipliziert und zu einem Ergebnis von  $(0,43 * 0,64 =) 0,28$  führen. Dieses Ergebnis wird anschließend mit den Produkten der anderen Kriterien aufsummiert und somit ein konkreter Ergebniswert für den gerade betrachteten Kandidaten berechnet. Dieses Vorgehen wird für alle in Betracht kommenden Kandidaten auf gleiche Weise durchgeführt. Befördert wird somit derjenige Kandidat, der den höchsten Ergebniswert aufweist.

### 4.1.3 Der relative Vergleich

Der relative Vergleich unterscheidet sich vom absoluten Vergleich dahingehend, dass dem relativen Vergleich keine Standards zugrunde liegen. Dieser Vergleich erfolgt ausschließlich paarweise. Seine Anwendung besteht aus vier Schritten. In Schritt eins werden auch hier zuerst die für die Entscheidung erforderlichen Kriterien sowie die zu bewertenden Alternativen bestimmt (S. 13). Die festgelegten Kriterien werden im zweiten Schritt paarweise miteinander verglichen, wiederum basierend auf der (oben erläuterten) neunstufigen Skala. Auch hier werden die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien aus dieser „Vergleichsmatrix“ in analoger Weise zum absoluten Vergleich berechnet (S. 14). Der nun folgende dritte Schritt besteht für jedes in Schritt eins festgelegte Kriterium aus der Durchführung eines paarweisen Vergleichs zwischen den zu bewertenden Alternativen. Basierend auf diesen paarweisen Vergleichen werden - identisch zum Vorgehen beim absoluten Vergleich - die Prioritäten der einzelnen Alternativen berechnet (S. 16). Im vierten und letzten Schritt werden abschließend konkrete Aussagen zur Eignung der einzelnen Alternativen hinsichtlich der untersuchten Kriterien getroffen. Hierzu werden die in Schritt drei berechneten Prioritäten der einzelnen Alternativen mit den in Schritt zwei berechneten Gewichtungsfaktoren aller Kriterien multipliziert. Die so berechneten Punktwerte der einzelnen Kriterien jeder Alternative werden abschließend für sämtliche Alternativen über alle Kriterien aufsummiert. Als Ergebnis liefert dieser letzte Prozessschritt damit konkrete (auf der betrachteten Situation basierende) Aussagen über die Eignung einzelner Alternativen in Form eines Ergebniswertes (S. 17).

#### 4.1.4 Ein zweites Beispiel

Zur Verdeutlichung dieses Vorgehens bei einem relativen Vergleich dient das folgende Beispiel, das sich mit der Entscheidung zwischen verschiedenen Häusern beschäftigt. Als Kriterien zur Entscheidungsfindung wurden die „Größe“ des Hauses, die Anbindung an den öffentlichen „Nahverkehr“, die „Nachbarschaft“, das „Alter“ des Hauses, die „Grundstückgröße“, die „Inneneinrichtung“ des Hauses, der „Zustand“ des Hauses und zusätzlich die „Finanzierung“ identifiziert. Zur Wahl stehen im vorliegenden Fall drei Häuser als potentielle Alternativen (Häuser A, B und C) (Saaty, Vargas (2001), S. 13ff). Die einzelnen Kriterien werden nun im zweiten Schritt paarweise miteinander verglichen, was als Ergebnis zu den Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien führt. Die Ergebnisse des Beispiels können der folgenden Tabelle 4.5 entnommen werden.

Kriterien	Gewichtungsfaktor
Größe	0,17
Nahverkehr	0,05
Nachbarschaft	0,19
Alter	0,02
Grundstückgröße	0,03
Einrichtung	0,04
Zustand	0,17
Finanzierung	0,33

**Tabelle 4.5:** Gewichtungsfaktoren zu Beispiel 2 (nach Saaty, Vargas (2001), S. 14)

Danach erfolgt als dritter Schritt ein paarweiser Vergleich zwischen den einzelnen Alternativen (Häuser A, B und C) hinsichtlich der einzelnen Kriterien. Dieser Vergleich liefert, ebenso wie Schritt zwei, als Ergebnis Aussagen bezüglich der Prioritäten der einzelnen Kriterien. Tabelle 4.6 stellt die Ergebnisse eines Vergleichs zwischen den drei Alternativen bezüglich der „Größe“ des Hauses dar.

Größe des Hauses	A	B	C	Prioritäten
A	1,00	6,00	8,00	<b>0,75</b>
B	0,17	1,00	4,00	<b>0,18</b>
C	0,13	0,25	1,00	<b>0,07</b>

**Tabelle 4.6:** Ein Ergebnis zu Beispiel 2 (nach Saaty, Vargas (2001), S. 15)

Im finalen vierten Schritt werden schließlich für sämtliche Kriterien und Alternativen die Produkte der Prioritäten der Alternativen aus dem paarweisen Vergleich bezogen auf das entsprechende Kriterium sowie der Gewichtungsfaktoren der Kriterien berechnet. Für Haus A berechnet sich dieses aus 0,75 (Priorität des Kriteriums „Größe“) und 0,17 (entsprechender Gewichtungsfaktor). Haus A erhält als Ergebnis in diesem Fall somit einen Wert von 0,13. Diese Produkte der einzelnen Kriterien werden für jede Alternative aufsummiert und hiermit jeder Alternative ein eindeutiger Ergebniswert zugeordnet. Mit diesen kann abschließend eine fundierte Entscheidung getroffen werden.

## 4.2 Total Cost of Ownership

Das Verfahren der „Total Cost of Ownership“-Analyse (TCO) hat zum Ziel (ebenso wie die im Anhang geschilderte „Total Value of Ownership“-Vorgehensweise (TVO)), tatsächliche Kosten oder Anschaffungswerte eines Produktes bzw. einer Dienstleistung zu erfassen (Ellram 1995, S. 4). Dieses Verfahren basiert auf der Überlegung, dass die tatsächlichen, mit einer Anschaffung verbundenen Kosten unter Umständen merklich den „reinen“ Preis dieses Produktes übersteigen. Solche Kostenbestandteile, die den eigentlichen Preis des Produktes übertreffen, können bspw. in Form von Qualitäts- bzw. Instandhaltungskosten oder Zinsen auftreten (Hurkens and Wynstra na, S. 51). Folglich ist das Ziel einer TCO-Analyse „eine Minimierung der Kosten, die aus der Vergabe von Leistungsumfängen an den Lieferanten resultieren. Die zu minimierende Zielgröße bezieht sich dabei nicht nur auf Kosten im Bereich der Beschaffung, sondern integriert auch Kosten anderer Fachbereiche“ (Wildemann 1998, S. 99). Bei der Durchführung einer TCO-Analyse können grundsätzlich zwei unter-

schiedliche Arten der Kostenintegration angewendet werden (Ellram 1995, S. 11ff): zum einen der monetärbasierte Ansatz („dollar-based approach“) sowie zum anderen der wertbasierte Ansatz („value-based approach“). Zunächst werden nun die Vorgehensweise bei der Durchführung einer TCO-Analyse sowie mögliche (exemplarische) Kostenbestandteile erklärt. Im Anschluss daran werden, wiederum anhand eines Beispiels verdeutlicht, der monetär- ebenso wie der wertbasierte Ansatz beschrieben.

### 4.2.1 Anwendung und Durchführung einer TCO-Analyse

Eine TCO-Analyse wird in sieben Schritten durchgeführt (Ellram 2002, S. 665ff):

**Schritt eins** Als ersten Schritt ist es erforderlich, das Projekt (= Investition in Produkte oder Dienstleistungen) zu identifizieren, dessen Kostenbestandteile mittels einer TCO-Analyse untersucht werden sollen. Insbesondere Projekte, welche einen hohen Mitteleinsatz erfordern oder für die besonders hohe Transaktionskosten erwartet werden, welche aktuell aber noch nicht erfasst werden, eignen sich besonders für eine TCO-Analyse (Ellram 2002, S. 664).

**Schritt zwei** Nach der Auswahl des zu betrachtenden Projektes ist es nun erforderlich, die Personen zu bestimmen, die an der TCO-Analyse beteiligt sein sollen. Diese können bspw. Mitarbeiter der Abteilungen „Finanzen“, „Einkauf“ oder die späteren Nutzer des zu beschaffenden Produktes sein.

**Schritt drei** Aufgrund des mit der Durchführung einer TCO-Analyse verbundenen (recht) hohen Aufwands gilt es in diesem Schritt zu überlegen, ob der Nutzen der Durchführung einer TCO-Analyse (dies können bspw. erzielbare Kostensenkungen sein) die mit der Anwendung der TCO-Analyse entstehenden Kosten übersteigen wird. Hierdurch soll die Sinnhaftigkeit der Durchführung einer TCO-Analyse für das jeweilige Projekt überprüft und somit Ressourcenfehlnutzung vermieden werden.

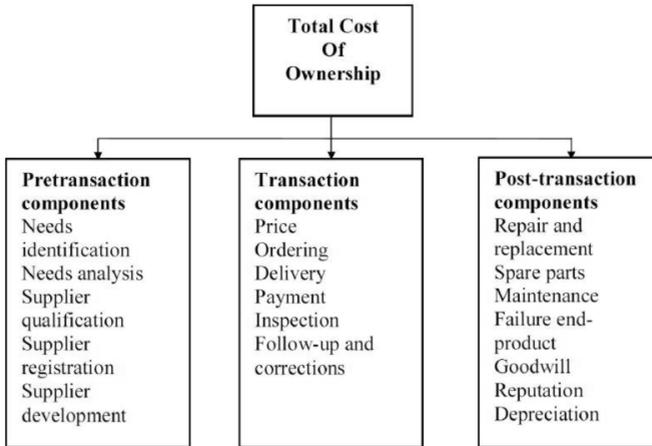
**Schritt vier** Ergibt diese Untersuchung, dass die Anwendung der TCO-Analyse sinnvoll zu sein scheint, werden nun alle mit der Anschaffung des betrachteten Produkt entstehende Kosten bspw. mittels eines Brainstormings der beteiligten Personen oder einer Prozesskarte ermittelt.<sup>2</sup> Diejenigen Kosten, die hierbei mit eingeschlossen werden sollten, werden anschließend an die Beschreibung des Ablaufs der TCO-Analyse im folgenden Unterkapitel „Bestandteile einer TCO-Analyse“ näher erläutert.

**Schritt fünf** Das Ziel dieses fünften Schrittes ist, die Anzahl der soeben erfassten Kosten und somit die Komplexität der noch folgenden Analyseschritte zu senken. Hierzu werden sie sowohl bezüglich ihrer Bedeutung für das eigene Unternehmen als auch bezogen auf die Schwankungen, die sich zwischen verschiedenen Alternativen ergeben, untersucht. Dabei stellt die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse auch hier eine Möglichkeit dar, tatsächlich relevante Kosten zu ermitteln. Im Rahmen derselben werden bei wiederholter Anwendung des TCO-Ansatzes die Kostenschätzungen variiert. Sollte sich dabei herausstellen, dass die Variation einer einzelnen Kostenschätzung eine andere Empfehlung als Ergebnis der TCO-Analyse mit sich bringt, liegt somit ein besonders wichtiger Kostenbestandteil vor.

**Schritte sechs und sieben** Im sechsten Schritt werden nun sämtliche, als relevant identifizierte Kosten wertmäßig erfasst. Hiermit werden im siebten Schritt sämtliche mit der Anschaffung verbundene Kosten und damit der TCO-Wert als Summe derselben berechnet. Diese beiden Schritte werden für sämtliche zu betrachtende Alternativen durchgeführt. Als Ergebnis der TCO-Analyse wird schließlich diejenige Alternative, welche den kleinsten TCO-Wert aufweist, als die durchzuführende identifiziert. Die folgenden Unterkapitel „Monetärbasierter Ansatz“ sowie „Wertbasierter Ansatz“ verdeutlichen diese Vorgehensweise mittels eines konkreten Beispiels.

---

<sup>2</sup>Mithilfe einer Prozesskarte können sämtliche, in den einzelnen Prozessabschnitten entstehende Kosten ermittelt werden.



**Abbildung 4.3:** Beispiele für Transaktionskosten (Quelle: (Wynstra, Hurkens 2010, S. 465))

## 4.2.2 Bestandteile der TCO-Analyse

Mit der TCO-Analyse soll die Erfassung sämtlicher, mit einer Alternative verbundener Kosten erreicht werden. Hierzu gehören sowohl die Kosten, die vor der Anschaffung eines Produktes bzw. Dienstleistung anfallen, als auch diejenigen, welche während und nach der Anschaffung entstehen. Diese Kostenbestandteile werden folglich als Prä-, Post- bzw. Transaktionskosten bezeichnet (Ellram 2002, S. 666). Abbildung 4.3 zeigt, welche Kostenarten diese drei Kostenbestandteile umfassen.

Da durch die TCO-Analyse sämtliche Kosten, die mit einer Anschaffung verbunden sind, erfasst werden (also auch die Folgekosten), sind die erzielten Ergebnisse besonders aussagekräftig und gehen weit über einen reinen Preisvergleich hinaus.

### 4.2.3 Monetärbasierter Ansatz

Bei Verfolgung des monetärbasierten Ansatzes werden ausschließlich die tatsächlich anfallenden Kosten in die Untersuchung einbezogen (Ellram 1995, S. 11). Diese Kosten können dabei entweder abgeschätzt oder basierend auf Vergangenheitserfahrungswerten ermittelt werden. Dieser Ansatz kann dabei durch die Integration eines Prozess(kosten)ansatzes erweitert werden (Ellram 1995, S. 11), was zur Folge hat, dass die Kosten für die einzelnen Prozesse ermittelt werden und damit der TCO-Wert<sup>3</sup>. Der monetäre Ansatz bietet dabei die Vorteile, dass die berechneten Ergebnisse gut interpretierbar sind und dass er „flexibel“ ist, also bspw. die Möglichkeit der Integration eines Prozessansatzes bietet (Ellram 1995, S. 11ff). Abbildung 4.4 illustriert die Anwendung dieser „monetärbasierten“ TCO-Analyse am Beispiel des Prozesses der Lieferantenauswahl. Dieses Beispiel zeigt auch deutlich, dass der ermittelte TCO-Wert in Höhe von 15,32 US-\$ für eine Einheit des zu beschaffenden Gutes deutlich über dem reinen „Listenpreis“ von 12,63 US-\$ liegt. Somit kann die Durchführung einer TCO-Analyse durchaus einen Lieferantenwechsel mit sich bringen bzw. zu anderen Entscheidungen als eine ausschließlich auf Endpreisen beruhende Betrachtung führen.

### 4.2.4 Wertbasierter Ansatz

Bei der Anwendung des wertbasierten Ansatzes werden zusätzlich zu den tatsächlichen Kosten einer Anschaffung auch andere Leistungsdaten (bspw. Qualität, Liefertreue, eingesetzte Technologie) mit einbezogen (Ellram 1995, S. 12). Da diese Einbeziehung - verglichen zum (rein) monetärbasierten Ansatz - eine deutliche Steigerung der Komplexität bei der Berechnung des TCO-Wertes mit sich bringt, schlägt Ellram eine Beschränkung der nicht monetär erfassbaren Leistungsdaten auf drei oder vier vor (Ellram 1995, S. 14). Aufgrund der erforderlichen Integration dieser Daten unterscheidet sich der Prozess der Berechnung des TCO-Wertes leicht von dem bisher dargestellten Vorgehen: In einem ersten Schritt werden die nicht monetär erfassbaren Leistungsdaten gewichtet und bekommen

---

<sup>3</sup>Dies hat auch zur Folge, dass die genauen Ursachen der Kostenentstehung detaillierter abgebildet werden.

Price paid, F.O.B. origin (12.632/unit)		\$12,000.00
Delivery charge		500.00
Quality:		
Cost to return defects	\$100.00	
Inspection (in-house)	300.00	
Delay costs (downtime)	-	
Rework parts	-	
Rework finished goods	200.00	_____
Subtotal quality costs		\$600.00
Technology		
Our engineers at their facility	\$1,500.00	
<credit> Their engineers at our facility	<300.00>	
<credit> Their design change to improve yield	_____	_____
Subtotal technology		\$1,200.00
Support/service		
Cost of delivery delays	\$104.00	
Charge for not using EDI (\$50.00/order)	150.00	_____
Subtotal support/service		\$254.00
Total costs		\$14,554.00
Units shipped		950
TCO per unit (total costs/units shipped)		<u>\$15.32</u>

**Abbildung 4.4:** Beispiel (Ellram 1995, S. 12)

Total cost of item per dollar purchased = $[(100 - \text{score})/100] + 1$		
<i>Category</i>	<i>Maximum points</i>	
Quality	30	
Delivery	20	
Technology	30	
Support	<u>20</u>	
	<u>100</u>	
Example: Delivery "% of line items delivered on time"  (A)	Percentage of maximum points allotted  (B)	Score  (A x B)
100%	100% of maximum	20
99%	95%	19
95-98%	85%	17
90-94%	70%	14
85-89%	45%	9
80-84%	25%	5
<80%	0%	0

**Abbildung 4.5:** Beispiel einer Bewertungsskala der Liefertreue (Ellram 1995, S. 13)

einen Punktwert zwischen 1 und 100 zugeordnet, wobei darauf zu achten ist, dass die Summe der verteilten Punktwerte genau 100 ergibt. Im Anschluss daran erfolgt die Definition einer Bewertungsskala für jedes nicht monetär erfassbare „Leistungsdatum“, welche einen Zusammenhang zwischen der Erfüllung des einzelnen „Leistungsdatums“ und dem hierfür maximal zu vergebenden Punktwert herstellt<sup>4</sup>. Die folgende Abbildung 4.5 zeigt ein mögliches Beispiel für eine solche Bewertungsskala.

<sup>4</sup>Das heißt, dass bspw. für eine Zielerreichung von 100% auch 100% des maximalen Punktwerts vergeben werden.

Analog zur Vorgehensweise beim hier gezeigten Beispiel können alle zu untersuchenden Alternativen mittels einer Bewertungsskala bewertet und folglich der pro Alternative erreichbare Gesamtpunktwert (GPW) zwischen 0 und 100 errechnet werden. Dieser GPW kann als geschätzte Kosten der nicht monetär erfassbaren Leistungselemente interpretiert werden, welche zusätzlich zu dem eigentlichen Preis einer Leistung anfallen (Ellram 1995, S. 13). Um die Umwandlung des GPW in eben diese monetäre Größe zu erreichen, erfolgt anschließend die Berechnung eines Kostenfaktors (KF) wie folgt (Ellram 1995, S. 13):

$$KF = \frac{100 - GPW}{100} + 1 \quad (4.1)$$

Aus obiger Formel wird ersichtlich, dass KF einen Minimalwert von 1 (bei  $GPW = 100$ ) bzw. einen Maximalwert von 2 (wenn  $GPW = 0$ ) besitzt. Dieser Kostenfaktor wird anschließend für jede Alternative mit den bereits errechneten, tatsächlich anfallenden Kosten multipliziert, so dass nun die korrigierten Kosten für alle Alternativen vorliegen (Ellram 1995, S. 13). Diese korrigierten Kosten beinhalten somit die direkt monetär erfassbaren Leistungselemente sowie auch die nicht monetär erfassbaren. Vorteilhaft bei der Anwendung des wertbasierten Ansatzes gegenüber dem monetärbasierten ist somit, dass diese Betrachtungsweise umfassender ist, da monetäre und nichtmonetäre Elemente berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden die Bedeutungen verschiedener Faktoren in die abschließende Berechnung und Entscheidung mit einbezogen. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand sowie besonders die diesem Ansatz innewohnende Subjektivität.

# 5 Ein Kosten und Nutzen umfassendes Modell zur Wahl des optimalen Behälters

Mit den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel ist es nun möglich, das Modell zur Wahl des optimalen Behälters zu erstellen. Hierzu wird zuerst die richtige Modellierungsalternative in Kapitel 5.1 festgelegt. Der weitere Aufbau dieses Kapitels orientiert sich danach an der „Entstehungsgeschichte“ dieser Dissertation: In Kapitel 5.2 erfolgt ein Praxiseinsatz eines vereinfachten Modells, die erzielten Ergebnisse werden illustriert. Diese Analyse war (zeitlich gesehen) der Ausgangspunkt für sämtliche im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Untersuchungen. Sie zeigt die Vorteile auf, die ein umfassendes Modell zur Behälterauswahl bietet. Im Anschluss an diese erste Untersuchung wird nun das eigentliche, umfassende Modell erstellt. Dieser zentrale Punkt der Arbeit erfolgt hinsichtlich der Kosten in Kapitel 5.3. Anschließend erfolgt die Integration der qualitativen Aspekte in Kapitel 5.4, sodass somit das gesamte Modell in Kapitel 5.5 vorliegt. Dieses wird anschließend in Kapitel 6 einem Praxiseinsatz unterzogen.

## 5.1 Auswahl der Modellierungsmöglichkeit

Aus den Schilderungen in Kapitel 4 wird deutlich, dass es eine Vielzahl von Modellierungsmöglichkeiten gibt. Darüber hinaus zeigte die Expertenbefragung, dass sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte berücksichtigt werden müssen. Somit stellt sich die Frage, wie dies gelingen kann. Dabei erscheint es wenig sinnvoll, Kosten, welche im Gegensatz zu Nutzeinschätzungen nicht subjektiv, aber direkt quantifizierbar sind, in Nutzen zu übertragen. Die umgekehrte Übertragung von Nutzen in Kosten

ist nicht frei von Subjektivität und daher nicht eindeutig. Somit werden die Kosten und die Nutzen getrennt erfasst.

### 5.1.1 Auswahl der Modellierungsmöglichkeit hinsichtlich der entstehenden Kosten

In komplexen Systemen, wie sie Logistiksysteme darstellen, kann es zu gegenseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen kommen. So können bspw. Kostensenkungen in einem Teilsystem zu Kostensteigerungen in einem anderen führen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die Kosten der möglichen Ladungsträger über die gesamte Logistikkette miteinander verglichen werden (Pfohl 2010, S. 30). Diese Gesamtkosten können dabei mittels unterschiedlicher Kostenrechnungsverfahren ermittelt werden. Ganz allgemein wird hierbei zwischen statischen und dynamischen Verfahren unterschieden. Eine „dynamische Vorgehensweise“ bedeutet, dass die anfallenden Zahlungsströme im zeitlichen Ablauf betrachtet und gewichtet werden. Daher führen sie zwar zu genaueren Ergebnissen, erfordern allerdings auch einen erhöhten Rechenaufwand. Da bei einer Auswahl des bestgeeignetsten Ladungsträgers allerdings keine Einzahlungen berücksichtigt werden müssen<sup>1</sup> und die entstehenden Kosten gleichzeitig auftreten, kann für diese Arbeit ein statisches Kostenrechnungsverfahren verwendet werden (auch, da es sich um ein erstes solches Modell handelt und diese Arbeit somit die Grundlage für weitere Untersuchungen liefern kann). Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass keine „klassische Kostenrechnung“ angewendet werden darf, da die Logistikkosten in einer solchen pauschal als Gemeinkosten über indirekte Bezugsgrößen (bspw. den Materialwert) verrechnet werden (Siepermann 2005, S. 292). Daher wird zur Kostenbetrachtung die monetärbasierte, durch einen Prozesskostenansatz erweiterte TCO-Analyse verwendet. In einer solchen Betrachtung wird die Logistikkette in die einzelnen Bestandteile zerlegt, die einzelnen Kostentreiber können separat dargestellt werden. Der Aufbau und die Durchführung dieser „erweiterten TCO-Analyse“ orientiert sich an der VDI-Richtlinie 4405 „Prozessorientierte Kostenanalyse in der in-

---

<sup>1</sup>Alle betrachteten Behälter sind Mehrwegbehälter und somit erzielen sie alle einen Recyclingerlös, der somit vernachlässigt werden kann. Dies gilt insbesondere daher, dass sie aus demselben Material bestehen.

nerbetrieblichen Logistik“ ((VDI 003b)). Auch wenn sich diese Richtlinie auf die innerbetriebliche Logistik fokussiert, so kann die zugrundeliegende Idee leicht auf die gesamte Logistikkette erweitert werden. Somit ist die Grundlage zur Kostenmodellierung die TCO-Analyse.

### **5.1.2 Auswahl der Modellierungsmöglichkeit hinsichtlich des resultierenden Nutzens**

Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, sind Nutzenbetrachtungen nie gänzlich objektiv. Sie unterliegen immer einer gewissen Subjektivität. Diese muss so gering wie möglich gehalten werden. Darüber hinaus zeigten die Untersuchungen, dass insbesondere die Nutzenaspekte für die Entscheidung wichtig sind, also eine Art „qualitatives Entscheidungsproblem“ darstellen. Aus diesen Gründen wird im Modell die Methodik des „Analytic Hierarchy Process“ verwendet. Die Auswahl des AHP erfolgt aus mehreren Gründen: Erstens ist er mittlerweile sehr weit verbreitet. Zweitens könnte man ihn quasi als „Bindeglied“ zwischen der Entscheidungstheorie und den qualitativen Verfahren sehen, sodass er sich ideal zur Entscheidungsfindung eignet. Drittens werden mit dieser Methodik Entscheidungsprozesse standardisiert durchgeführt, vereinfacht und schließlich auch analytisch gelöst. Hierzu wird, viertens, die Subjektivität dahingehend verringert, dass er ein hierarchisches Vorgehen darstellt, die einzelnen Faktoren paarweise miteinander verglichen werden und anschließend mathematisch umgeformt werden. Dieser Vergleich kann auch von mehreren Experten unabhängig oder in einer Gruppe erfolgen, sodass die Subjektivität noch weiter eingegrenzt wird. Abschließend sei erwähnt, dass zum AHP bereits umfangreiche Softwarelösungen existieren.

## **5.2 Praxiseinsatz eines vereinfachten Modells zur Wahl des optimalen Behälters**

In diesem Unterkapitel sollen nun, quasi als Motivation des folgenden Modells sowie zur Verdeutlichung der Vorteile einer umfassenden Betrachtung

tungsweise, die Ergebnisse einer ersten, vereinfachten Analyse betrachtet werden<sup>2</sup>.

### 5.2.1 Auswahl der Fertigungslinie und der betrachteten Teile sowie Abbildung im Modell

Für dieses Praxisbeispiel wurde eine Montagelinie ausgewählt, an der die benötigten Teile in KLT sowie in GLT angeliefert werden. An dieser Linie werden variantenreiche und variantenarme Teile verbaut. Ebenso Teile, die eine hohe Nachfrage aufweisen, als auch selten nachgefragte Teile. Somit kann ein breites Spektrum an Teilen ausgewählt werden. Die Materialversorgung der Linie erfolgt mittels eines Sammeltransports, der die jeweiligen Verbauorte entweder mit einzelnen KLT oder speziellen Anlieferungseinheiten, sogenannten „Roller“ beliefert. Die Nachschubsteuerung erfolgt hier mittels eines Kanbansystems über einen den Stationen vorgelagerten Supermarkt. Hier werden die später anzuliefernden Einheiten auf Paletten angeliefert, sie müssen also vor dem Weitertransport noch vereinzelt werden. Der Supermarkt selbst wird wiederum vom zentralen Werkslager mit Material versorgt, in welches verschiedene Lieferanten anliefern.

Zusammengefasst seien hier nochmals die Gründe angegeben, welche zur Auswahl dieser Linie führten:

- Kleinteile werden über KLT bereitgestellt
- Diese Bereitstellung erfolgt über zwei unterschiedliche Versorgungskonzepte
- Es wird sowohl Stapel- als auch Schüttgut angeliefert
- Es gibt Teile mit hohem sowie Teile mit niedrigem Verbrauch
- Die Linie wird über Kanban gesteuert und über einen vorgelagerten Supermarkt versorgt
- Es wird seitens der zuständigen Logistikabteilung vermutet, dass diese Linie Optimierungspotenzial bietet

---

<sup>2</sup>Weitere Details hierzu finden sich in (Berbig, Furmans, Köker, Gehrke and Altefrohn 2012).

## Auswahl repräsentativer Teile und möglicher Behälter

Nach der Identifikation der Fertigungslinie wurden die zu betrachtenden Teile anhand verschiedener Kriterien ausgewählt. Ausgewählt wurden Teile, die in KLTs oder Rollern zur Versorgung einer Montage dienen (also intern) und nicht zum Versand zu einem Endkunden (also nicht einem Versandverpackungsprozess unterliegen). Zusätzlich wurden die Teile dahingehend ausgewählt, dass so viele unterschiedliche KLTs in der gegenwärtigen Situation verwendet werden wie möglich. Darüber hinaus wurden Teile mit recht gleichmäßigem Verbrauch, der allerdings hoch oder gering sein kann, ausgewählt. Ebenso sollten die Teile über die beiden möglichen, oben geschilderten Prozessketten angeliefert werden können. Diese Kriterien führten zur Auswahl von sechs unterschiedlichen Teilen, die im Rahmen der Ergebnisinterpretation in Abschnitt 5.2.3 ab Seite 76 näher beschrieben werden.

**Kenndaten der Behälter** Die Kenndaten der Behälter entsprechen weitestgehend der VDA-Empfehlung 4500. Jedoch werden an der Linie anstelle der R-KLT 4315 bzw. 6429 die („veralteten“) C-KLT 4314 und 6428 verwendet. Daher wurde die in Frage kommende Menge möglicher Behälter um diese beiden erweitert. Die mögliche Stapelbarkeit dieser KLT, also die Anzahl an Lagen von KLT pro Palette, zeigt Tabelle 5.2 auf S. 85 (sie gilt analog für die C-KLT).

## Abbildung der realen Linie in einem TCO-Modell

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die grundlegenden Annahmen des Modells hergeleitet und insbesondere mögliche Kostenarten beschrieben. Anhand dieser gliedert sich die TCO-Analyse dieses Modells<sup>3</sup>. Die Erhebung der relevanten Daten erfolgt in separaten Bereichen, welche den geschilderten Kostenarten aus Kapitel 3 entsprechen. Die genauen Kosten dürfen aus Vertraulichkeitsgründen nicht genannt werden. Abbildung 5.1 zeigt jedoch eine vergleichende Darstellung mit der heutigen Lösung.

---

<sup>3</sup>Die hierfür verwendeten Formeln werden hier allerdings nicht mehr genannt. Dies würde den Rahmen der Arbeit sprengen, insbesondere, da sie, wie sich im Laufe der weiteren Untersuchungen zeigte, nicht in das geschilderte Rahmenwerk passen und zu stark abstrahierend sind.

## 5.2.2 Kostenbestandteile der verschiedenen Prozessketten

In den folgenden Abschnitten wird nun dargelegt, wie die jeweiligen Kostenbestandteile der einzelnen Prozessketten ermittelt wurden.

### Transportkosten

Die Berechnung der Transportkosten, die für die Belieferung des Werkslagers anfallen, erfolgte über einen gewichts- und entfernungsabhängigen Preisspiegel, der im betrachteten Unternehmen für Frachten entwickelt wurde. Aufgrund der immer gleichen Entfernung sowie der dieser Betrachtung zugrunde gelegten Annahme einer gleichmäßigen Auslastung wurde für diesen Transport pro Palette ein Pauschalbetrag angesetzt. Für den Transport zum Supermarkt sowie vom Supermarkt zum Verbauort fallen wegstreckenabhängige Kosten an, wobei aufgrund der sehr kurzen Wegstrecke vom Wareneingang der Fertigungshalle bis zum Lagerort im Supermarkt diese direkt in den Handlingskosten und nicht in den Transportkosten erfasst werden.

### Flächenkosten

Die Flächenkosten wurden für die einzelnen Lagerorte separat erfasst. Im Werkslager berechnen sie sich (quasi „normiert“) mittels der Kosten, die pro Palette für einen Tag Lagerung anfallen, multipliziert mit dem mittleren Bestand. Die Kosten am Verbauort sowie im Supermarkt werden über den notwendigen Flächenbedarf je nach Versorgungskonzept (also Roller oder KLT) berechnet, da hier eine Normierung auf Paletten nicht mehr zielführend wäre. Der hier zu Grunde gelegte Quadratmeterkostensatz ergab sich unter der Annahme eines Drei-Schicht-Modells sowie von 20 Arbeitstagen pro Monat, und wurde auf Flächenkosten pro Stunde normiert.

## **Bestandskosten**

Diese Kosten werden als Kapitalbindungskosten, bezogen auf den jeweiligen Einkaufspreis, berücksichtigt. Hierfür wurde, basierend auf Gesprächen mit der Controlling-Abteilung sowie der in Gudehus (2007, S. 376) aufgeführten Tabelle, ein Satz von 8% p.a. festgelegt. Dieser gilt über die gesamte Prozesskette hinweg.

## **Handlingkosten**

Handlingkosten sind die Kosten, die (zumindest in diesem Falle) am aufwändigsten bestimmbar sind. In Gesprächen mit den Lieferanten zeigte sich, dass die Behälter direkt von den Produktionsmaschinen befüllt werden. Das heißt also, dass hier keine Umpackvorgänge erforderlich sind. Da die Lieferanten ihre tatsächlichen Kosten nicht bekannt gegeben haben, allerdings die anfallenden Aufwände dennoch berücksichtigt werden sollen, werden die für die Bereitstellung im Werkslager erhobenen Kosten veranschlagt.

Für die restlichen Handhabungsschritte, also die intern im betrachteten Unternehmen anfallenden Aufwände, werden die Zeiten für die jeweiligen Vorgänge ermittelt und diese über die Kosten für eine menschliche Arbeitskraft monetär erfasst. Hierbei wird eine - zwar optimistische, aber für alle Fälle gleiche und somit vergleichbare - Auslastung der Arbeitskraft in Höhe von 100% zu Grunde gelegt. Die erforderlichen Zeiten werden hier mittels einer MTM-Analyse bestimmt<sup>4</sup>. Anschließend werden die bestimmten Zeiten mit den entsprechenden Mitarbeiterkosten verrechnet. Hierfür werden eine tägliche Arbeitszeit von 7 Stunden sowie 220 Arbeitstage pro Jahr zu Grunde gelegt.

---

<sup>4</sup>MTM steht für „Methods-Time Measurement“, also eine Arbeitszeitanalyse. Sie ist ein System zur Beschreibung und Strukturierung von Arbeitssystemen mittels definierter Prozessbausteine. Genauere Details finden sich bspw. in (Bokranz and Landau 2006)

### 5.2.3 Ergebnisse der Analyse

Mit den entsprechend der oben geschilderten Vorgehensweise ermittelten Daten konnte anschließend durch Betrachtung aller sich ergebenden Möglichkeiten eine TCO-Analyse durchgeführt werden. Die dabei verwendeten Kostenparameter sowie die weiteren Inputfaktoren dürfen allerdings aus Datenschutzgründen hier nicht explizit dargelegt werden. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse ausschließlich als normierte Prozentangaben angegeben (100% entsprechen dabei den aktuell anfallenden Kosten). Diese Normierung ermöglicht darüber hinaus die unmittelbare Darstellung der prozentualen Veränderungen zwischen der aktuellen und der laut TCO-Analyse kostenminimalen Lösung.

#### Detaillierte Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Damit auch der Einfluss des Behältergewichts (und damit direkt auch Ergonomieaspekte) dargestellt werden kann, wurden die Berechnungen sowohl für zulässige Gesamtgewichte der KLT von 12 als auch von 15 kg durchgeführt. Die folgende Übersicht 5.1 auf S. 77 stellt die erzielten Analyseergebnisse übersichtlich dar, nach den jeweiligen Materialnummern (MR) und möglichen Füllgewichten getrennt<sup>5</sup>.

Diese Ergebnisse werden nun für jede einzelne MR interpretiert. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Einordnung der Verbräuche sowie der Stückpreise aus Datenschutzgründen auf den Vergleich der Materialnummern untereinander bezieht und nicht auf die tatsächlichen Größen.

---

<sup>5</sup>Der Volumenfüllgrad ergibt sich durch eine triviale Rechnung, also stark vereinfacht: Die Produkte werden, entsprechend der eingegebenen Abmessungen, als kubisch angenommen und so das Volumen errechnet. Das zur Verfügung stehende Innenvolumen des Behälters wird anschließend durch das Volumen des Teils geteilt und so die transportierbare Anzahl an Teilen berechnet. Sollte diese das Maximalgewicht überschreiten, so wird sie entsprechend an dieses angepasst, es ergeben sich Volumenfüllgrade, die von eins merklich abweichen.

MR	max. zul. Gewicht [kg]	Lösung	KLT	Anzahl Lagen pro Palette	Füllgrad	Gewicht [kg]	Prozesskette
MR 1	12	optimal	4329	1	0,53	12,00	1: KLT
		aktuell	4314	1	1	8,63	1: KLT
	15	optimal	6415	1	0,67	14,99	1: KLT
		aktuell	4314	1	1	8,63	1: KLT
MR 2	12	optimal	3215	4	0,82	11,99	2: Roller
		aktuell	3215	4	0,82	11,99	2: Roller
	15	optimal	3215	4	1	14,55	2: Roller
		aktuell	3215	4	1	14,55	2: Roller
MR 3	12	optimal	3215	2	1	8,63	1: KLT
		aktuell	4314	5	0,8	12,00	1: KLT
	15	optimal	4314	2	1	14,55	2: Roller
		aktuell	4314	5	1	14,55	1: KLT
MR 4	12	optimal	4329	3	1	6,74	2: Roller
		aktuell	6428	3	0,78	12,00	2: Roller
	15	optimal	4329	3	1	6,70	2: Roller
		aktuell	6428	3	1	14,13	2: Roller
MR 5	12	optimal	3215	2	0,51	11,71	2: Roller
		aktuell	3215	3	0,51	11,71	2: Roller
	15	optimal	3215	1	0,66	14,81	1: KLT
		aktuell	3215	3	0,66	14,81	2: Roller
MR 6	12	optimal	4329	3	1	5,60	2: Roller
		aktuell	6428	3	1	11,84	2: Roller
	15	optimal	4329	3	1	5,60	2: Roller
		aktuell	6428	3	1	11,84	2: Roller

Abbildung 5.1: Ergebnisse der Analyse am realen Fallbeispiel

### 1. Materialnummer 1

MR 1 weist einen geringen Stückpreis und einen Verbrauch von weniger als 100 Teilen pro Stunde auf. Somit ist es ideal, nur eine Lage pro Palette bereitzustellen. Die Berechnungen ergaben, dass jedoch für beide Maximalgewichte ein größerer Behälter als der aktuell verwendete günstiger ist. Dies ist in der Tatsache begründet, dass hierdurch die Gewichtsgrenze besser ausgenutzt werden kann. Die Flächenkosten bleiben für ein zulässiges **Höchstgewicht von 12 kg** gleich, da der ideale Behälter nur eine größere Höhe aufweist. Da in diesem größeren Behälter mehr Teile enthalten sind, sinken somit die Handlings- und Transportkosten, allerdings steigen dadurch die Bestandskosten. Betrachtet man die Situation mit einem zulässigen **Maximalgewicht von 15 kg** pro Behälter, so wird ein höherer und auch von der Grundfläche her größerer Behälter ideal. Da somit jedoch auch hier mehr Teile pro Behälter transportiert werden können, sinken neben den Transport- und Handlingskosten auch die Flächen sowie die Bestandskosten, da insgesamt weniger Behälter und Teile im Umlauf bzw. am Bedarfsort befindlich sein müssen.

### 2. Materialnummer 2

Bedingt durch einen hohen stündlichen Verbrauch von mehr als 1000 Teilen bei einem gleichzeitig sehr geringen Stückpreis, ist es optimal, die maximale mögliche Anzahl an Lagen je Palette auch auszunutzen. Hierdurch sinken die Transportkosten, da pro Anlieferung mehr Behälter bereitgestellt werden können. Der kleinstmögliche VDA-Behälter ist hier der ideale, da bedingt durch das Teilegewicht und -volumen die Gewichtseinschränkungen in beiden Fällen schon vor dem Erreichen des Maximalfüllgrads erreicht sind. Somit könnten auch bei Verwendung von größeren Behältern nicht mehr Teile pro Behälter transportiert werden, es würden ausschließlich höhere Kosten anfallen.

### 3. Materialnummer 3

MR 3 weist einen mittleren Stückpreis sowie einen stündlichen Verbrauch, der unter 100 Teilen liegt, auf. Somit ist (vgl. MR 1) auch hier eine geringe Anzahl an Lagen optimal. Obwohl hierdurch die Transport- und Handlingkosten merklich steigen, ist bei einem maximal zulässigen **Gesamtgewicht von 12 kg** der kleinste Behälter, dann mit einem Füllgrad von 1, optimal. Bedingt durch diesen klei-

nen Behälter können nämlich deutliche Reduktionen der Flächen- und Bestandskosten erzielt werden, die die Erhöhung der anderen Kosten überkompensieren. Liegt das zulässige **Maximalgewicht bei 15 kg**, so stellt sich heraus, dass bedingt durch die optimale Ausnutzung des Gewichts und des Füllgrads von 1 der aktuell verwendete Behälter auch der optimale ist. Allerdings ist aufgrund des geringen Verbrauchs eine geringere Anzahl an Lagen pro Palette optimal, wodurch sowohl die Bestands- als auch die Handlingkosten gesenkt werden können.

#### 4. Materialnummer 4

Teile dieser Materialnummer weisen einen hohen Stückpreis auf, allerdings werden auch von dieser MR nur weniger als 100 Teile stündlich verbaut. Bei einer **Gewichtsgrenze von 12 kg** ergibt sich, dass die Handlings-, Transport- und Flächenkosten bedingt durch den höheren Füllgrad abnehmen und so die leicht steigenden Bestandskosten überkompensieren können. Bei einer **Gewichtsgrenze i. H. v. 15 kg** ist ein kleinerer Behälter etwas kostengünstiger, da die gewichtsabhängigen Transportkosten vom Lieferanten zum Werkslager sinken.

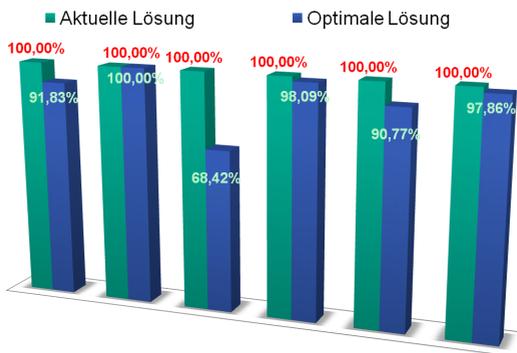
#### 5. Materialnummer 5

MR 5 weist einen sehr niedrigen Verbrauch von weniger als 10 Teilen pro Stunde, jedoch ein sehr hohes Gewicht sowie einen sehr hohen Stückpreis auf. Durch das sehr hohe Gewicht kann für keinen Behälter bei keiner Gewichtsgrenze ein Füllgrad von 1 erreicht werden. Daher ist der kleinstmögliche Behälter ideal. Da die Bestandskosten, bedingt durch den sehr hohen Stückpreis, durch eine Reduktion der Anzahl an Lagen pro Palette drastisch gesenkt werden können, können so die Steigerungen sowohl der Handlings- als auch der Transportkosten mehr als ausgeglichen werden. Liegt eine **Gewichtsobergrenze von 15 kg** vor, so ist der Wechsel vom Roller zum KLT-Prozess bei einer gleichzeitigen Reduktion der Anzahl an Lagen pro Palette optimal. Hierdurch werden insbesondere die Bestandskosten sehr stark gesenkt, sodass die höheren Handlingkosten ausgeglichen werden können.

## 6. Materialnummer 6

Sie weist einen sehr hohen Stückpreis bei einem stündlichen Verbrauch kleiner 100 Teile auf. Aus diesem Grunde können in beiden „Maximalgewichtsfällen“ die Transportkosten gesenkt werden, da der optimale Behälter trotz des halben Außenvolumens weniger als die Hälfte wiegt und dennoch mehr als die Hälfte der Kapazität aufweist. Die Auswahl dieses Behälters führt daher zu einer Senkung der gewichtsabhängigen Transportkosten vom Lieferanten zum Werkslager.

Die folgende Grafik 5.2 stellt die erzielten Ergebnisse zusammenfassend dar.



**Abbildung 5.2:** Ergebnisse einer ersten TCO-Analyse (Quelle: Berbig et al 2012)

Diese Abbildung zeigt das Potenzial, das in einer umfassenden Methodik und insbesondere der TCO-Analyse steckt - selbst bei dieser noch vereinfachten Betrachtung. Aus diesem Grund wird diese Methodik weiter verfolgt und in den folgenden Abschnitten weiter detailliert.

## 5.3 Integration quantitativer Aspekte - Ein neues Modell zur Kostenberechnung

Wie bereits erwähnt, wird zur Modellierung der in Zahlen erfassbaren Faktoren eine TCO-Methodik, erweitert um eine Prozessbetrachtung, angewendet. Das Modell wird nun Schritt für Schritt vorgestellt. Hierbei gilt zu beachten, dass mit einer solchen Kostenanalyse auf Prozessebene zwar die durch den Umlauf der Ladungsträger entstehenden Kosten vergleichbar werden. Allerdings berücksichtigen diese die Kosten der Ladungsträger selbst nicht, da diese nicht einem einzelnen Subsystem zugeschrieben werden können. Die Beschaffungskosten der Ladungsträger werden deshalb separat berechnet und zu den Prozesskosten addiert.

### 5.3.1 Prozessanalyse

Vor einer konkreten Modellerstellung ist es erforderlich, zuerst die konkreten Rahmenbedingungen festzulegen. Auf diesen basierend kann dann das eigentliche Modell entworfen werden. Aus diesem Grund werden nun zuerst die konkreten Rahmenbedingungen beschrieben.

#### Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen sollen in diesem Fall zwei Dinge erreichen: Zum einen soll mit ihnen die Komplexität des Modells reduziert werden, damit der Einfluss unterschiedlicher Ladungsträger bestimmt werden kann, ohne dabei zu sehr vereinfachend und verfremdend zu sein, damit die Ergebnisse auch noch aussagekräftig bleiben. Zum anderen sind sie die Grundlage, auf der das Modell sowie dann auch die Ergebnisberechnung und Auswertung basieren.

Wie bereits in Kapitel 3.2 dargelegt wurde, beginnt die abzubildende Logistikkette beim Warenausgang des „1<sup>st</sup>-tier-suppliers“, also dem Zulieferer, der direkt das Werk beliefert. Sie endet schließlich mit der Ankunft der Waren an der Zielmontagestation im Werk. Darüber hinaus muss die

Rückführlogistik mit berücksichtigt werden, da leer gewordene Ladungsträger auch wieder zurück zum Lieferanten oder zu anderen Werken transportiert werden können. Diese Begrenzung der betrachteten Lieferkette stellt somit die erste Rahmenbedingung dar.

Zusätzlich zur Festlegung des betrachteten Teils der Supply Chain ist es auch erforderlich, für die genaue Kostenberechnung einen Betrachtungszeitraum festzulegen. Dieser darf nicht zu kurz sein, da sonst nicht alle Einflüsse erfasst werden können. Ebenso darf er nicht zu lange sein, da sonst die Ergebnisse zu ungenau werden (bspw. da zukünftige Kosten nicht genau beziffert werden können) sowie die Komplexität deutlich steigt (es müssen mehr Zahlungsströme erfasst sowie evtl. auch abgezinst werden - ein weiterer Ungenauigkeitsfaktor). Für den Fall eines Ladungsträgers können die Prozesskosten eines Durchlaufs ermittelt und anschließend für die einzelnen Varianten verglichen werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sich die Umlaufdauer eines Ladungsträgers sowie die Anzahl an insgesamt erforderlichen Ladungsträgern mit der Größe desselben ändert: Kleine Ladungsträger zirkulieren schneller als große und sind in einer höheren Anzahl erforderlich. Von daher ist es sinnvoll, gleich lange Betrachtungszeiträume zu wählen, in denen der Ladungsträger mindestens ein Mal zirkuliert. Sie sollten idealer Weise allerdings etwas länger sein, um mögliche Eventualitäten abdecken zu können. Aus diesem Grund und aufgrund von auf die Ladungsträger zu leistenden Abschreibungen ist es sinnvoll, einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr zu wählen und so das Modell zu erstellen. Hierbei wird der Betrachtungszeitraum dennoch variabel gehalten, sodass erforderliche Anpassungen der Betrachtungszeiträume möglich werden.

Die dritte Rahmenbedingung stellt die Auswahl potentieller Ladungsträger dar. Wie bereits in Kapitel 2 geschildert, sind diese Ladungsträger entsprechend der VDA-Empfehlung 4500. VDA-C-KLT werden allerdings vom VDA nicht mehr zum flächendeckenden Einsatz empfohlen. Daher werden im Modell die VDA-R-KLT aller Größen berücksichtigt (diese Gruppe stellt die mit Abstand am häufigsten produzierte und abgesetzte Gruppe an VDA-Ladungsträgern dar (vgl. die Produktionsstatistik des VDA)). Aufgrund der hiermit möglichen Volumenreduktion bei Leertransporten wird zusätzlich noch der VDA-F-KLT mit einbezogen. Die Menge möglicher Ladungsträger wird schließlich durch den VDA-GLT abgeschlossen, da somit das komplette Größenspektrum an standardisierten

Ladungsträgern enthalten ist. Die folgende Tabelle 5.1 auf Seite 84 beinhaltet die im Modell standardmäßig hinterlegten Ladungsträger. Die Anzahl möglicher Lagen auf einer Palette, sprich die Stapelbarkeit der LT, zeigt Tabelle 5.2 auf S. 85.

Eine weitere Rahmenbedingung stellt die Annahme dar, dass die betrachteten Güter innerhalb des Betrachtungszeitraums einen (mehr oder weniger) stetigen Verbrauch aufweisen. Ausschließlich über diesen Verbrauch wird die Anzahl an Nachschubbewegungen in (bzw. zwischen) den einzelnen Teilsystemen der Kette unter Berücksichtigung der pro System definierten Mengen - und Flächenvorgaben sowie der Füllmenge der festgelegten Ladungsträger berechnet. Beim Durchlaufen der Prozesskette ist es möglich, dass sich die Abmessungen oder der Wert eines Produktes ändern, bspw. wenn ein wertschöpfender Arbeitsvorgang wie ein Montageprozess o. ä. erfolgt, und dass die so veränderten Teile wieder in denselben Ladungsträger zurückgelegt werden. Dies muss und wird im Modell berücksichtigt werden durch die Möglichkeit, die Produkteigenschaften ab dem entsprechenden Teilprozess zu ändern.

Schließlich wird noch davon ausgegangen, dass stets eine sortenreine Befüllung und Anlieferung erfolgt (also keine Mischpaletten oder -KLT). Es gilt dabei zu beachten, dass nicht das gesamte zur Verfügung stehende Innenvolumen des Behälters genutzt werden kann. Diese Thematik und erzielbare Packgutvolumen werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

Zusammenfassend gibt es somit Randbedingungen bezüglich...

- der betrachteten Logistikkette,
- des Betrachtungszeitraums,
- der betrachteten Ladungsträger,
- der Unterstellung eines gleichmäßigen Verbrauchs sowie
- der Annahme einer sortenreinen Belieferung.

Ladungsträger	Nennmaße L x B x H (mm)	Innenvolumen (dm <sup>3</sup> )	Leergewicht (kg)	Füllgewicht (kg)	Auffast (kg)
VDA-R-KLT 6429	600 x 400 x 280	48	3	20	600
VDA-R-KLT 6415	600 x 400 x 147	22	2,1	20	600
VDA-R-KLT 4329	400 x 300 x 280	22	1,9	20	600
VDA-R-KLT 4315	400 x 300 x 147	10	1,3	20	600
VDA-R-KLT 3215	300 x 200 x 147	5,3	0,6	20	400
VDA-F-KLT 6410	600 x 400 x 280 (600 x 400 x 94,5)	46	3,4	20	250
VDA-GLT 121010	1200 x 1000 x 975	851	52,5	500	2800

**Tabelle 5.1:** Betrachtete Ladungsträger, Quelle: entsprechende VDA-Normen (insbesondere 4500)

Ladungsträger	Anzahl Ladungsträger je Lage	Max. Anzahl Lagen auf ISO-Palette
VDA-R-KLT 6429	5	3
VDA-R-KLT 6415	5	6
VDA-R-KLT 4329	10	3
VDA-R-KLT 4315	10	6
VDA-R-KLT 3215	20	6
VDA-F-KLT 6410	5	1
VDA-GLT 121010	1	1

**Tabelle 5.2:** Stapelbarkeit der Ladungsträger, Quelle: entsprechende VDA-Normen

## Relevante Teilsysteme der Prozesskette

Die VDI-Richtlinie 4405 gibt konkrete Angaben zur Durchführung einer (innerbetrieblichen) Prozesskostenberechnung. Ihr entsprechend besteht die erste Handlung in der Identifikation der zu betrachtenden Kostenstellen. Diese Kostenstellen entsprechen gleichzeitig den relevanten Teilsystemen bzw. -prozessen, die in der Logistikkette zu betrachten sind. Diese Untergliederung kann natürlich auch sehr einfach auf unternehmensexterne Teilsysteme, bspw. externe Transporte o. ä., erweitert werden. Damit das ermittelte Kostenmodell jedoch so generell wie möglich anwendbar ist, werden hier - im Gegensatz zur Richtlinie - keine konkreten Prozessketten abgebildet, sondern die einzelnen Teilsysteme abstrahiert. Um das Modell schließlich an das jeweilige Unternehmen anpassen zu können, müssen dann einfach die einzelnen Parameter (s. folgende Abschnitte) für das Unternehmen entsprechend angepasst werden. Aus diesem Grund wurden fünf relevante Teilsysteme ermittelt und im Modell hinterlegt. Diese können beliebig miteinander kombiniert werden (auch mehrfach), sodass jeweils die komplette Prozesskette des Unternehmens abgebildet werden kann. Die Subsysteme sind:

- **Transportsystem:** Sämtliche Vorgänge, in denen Ladungsträger transportiert oder ganz allgemein befördert werden, können als Transportsysteme dargestellt werden.
- **Lagersystem:** Hiermit können Prozesse abgebildet werden, in denen Ladungsträger gelagert werden. Dies können sämtliche Lagerorte sein.
- **Umschlagsystem:** Mittels dieses Teilsystems können alle Vorgänge, bei denen es zu einem Wechsel des Transportmittels kommt, abgebildet werden.
- **Kommissioniersystem:** Sämtliche Vorgänge, bei denen es zu einer Änderung der Zusammensetzung der Güter kommt (also auch Umpackvorgänge), können hiermit abgebildet werden.
- **Rückführsystem:** Hiermit können alle Tätigkeiten abgebildet werden, die mit der Rückführung von Leergut zusammenhängen.

## 5.3.2 Kostenermittlung

### Kostenarten

In diesem Abschnitt werden nun, nach der Bestimmung der einzelnen Teilsysteme, die verschiedenen Kostenarten beschrieben. Dabei können unterschiedliche Ausprägungen der Kosten vorliegen. Zum einen kann es sich um direkte oder indirekte Kosten handeln. Laut (VDI4405 (2003b), S. 10) handelt es sich hinsichtlich der Logistik dann um direkte Kosten, sofern sie einer Logistikleistung unmittelbar zugerechnet werden können. Diese Kosten werden auch, im Gegensatz zu den indirekten Kosten, im Modell betrachtet. Dies resultiert aus der Tatsache, dass indirekte Kosten durch administrative Vorgänge oder Stellen verursacht werden. Somit werden sie durch die Ladungsträgerwahl nicht beeinflusst, da diese Vorgänge für alle Ladungsträger erforderlich sind und vergleichbare Aufwände mit sich bringen. Darüber hinaus können Fremdleistungskosten sowie Eigenleistungskosten unterschieden werden. Fremdleistungskosten sind dabei hauptsächlich in der Beschaffungs- und Distributionslogistik auffindbar und können dem einzelnen Produkt direkt als Einzelkosten zugerechnet werden (Weber 2002, S. 106). Bezüglich der genauen Kostenarten können in der Literatur (vgl. Kapitel 3) verschiedene Einordnungen gefunden werden (s. Tabelle 5.3 auf S. 88, Quellen: (Wildemann 1995, S. 51), (Kuhn, Lange and Zimmermann 2005, S. 104), (VDI4405 (2003b), S. 10f), (Gudehus 2011, S. 146f).

Für das Modell werden die Kosten zum einen entsprechend der Ergebnisse der Expertenbefragung sowie zum anderen nach dem Prinzip ausgewählt, dass die Auswirkungen einer Ladungsträgerauswahl so genau wie möglich erfasst werden können, ohne dass dabei das Modell zu umfangreich und damit nicht mehr handhabbar wird. Im Modell werden daher die folgenden Kostenarten betrachtet:

1. Ladungsträgerkosten
2. Personalkosten
3. Betriebsmittelkosten
4. Transportkosten

Kuhn	VDI 4405	Gudehus	Wildemann
Material Nutzung Personal Transport Maschine Raum	Material  Personal  Betriebsmittel Flächen	Ladungsträger  Personal Strecken/Netz Betriebsmittel Flächen	Material  Personal Transport Handling
Entsorgung/Reparatur Reinigung Folgekosten Verrichtung Sonstige	Instandhaltung/Reparatur  Fremdleistung Gebäude Energie Sonstige	Fremdleistung Bestand  Sonstige	Entsorgung Aufbereitung Folgekosten

**Table 5.3:** Unterschiedliche Kategorien der Kostenarten (Quellen: Wildemann 1995 (S. 51), Kuhn 2005 (S. 104), VDI4405 (S. 10f), Gudehus 2011 (S. 146f))

5. Raum- und Flächenkosten
6. Bestandskosten
7. Fremdleistungskosten

Die detaillierte Beschreibung dieser Kostenarten erfolgte bereits in Kapitel 3.3 auf Seite 48ff. Hier werden daher nur noch eventuelle Ergänzungen aufgeführt: Ladungsträgerkosten gehören zu den fixen Kosten. Da sie direkt von der Ladungsträgerwahl abhängen, jedoch nicht den anderen Gruppen sinnvoll zugeordnet werden können, gehen sie direkt als Eingabeparameter in das Modell ein. Alle oben erwähnten Teilsysteme sind mehr oder weniger personalintensiv, verursachen also jeweils Personalkosten, die somit zu erfassen sind. Dasselbe gilt für die Bestandskosten. Laut Gudehus (2011, S. 146) umfassen Betriebsmittelkosten sämtliche Kosten, die durch Förder-, Lager- und Handhabungsmittel verursacht werden. Allerdings unterliegen außerbetriebliche Transporte anderen Kostentreibern, sodass sie über die Transportkosten erfasst werden. Ebenso ist es aus Gründen der Übersichtlichkeit und Transparenz sinnvoll, die „reinen“ Flächen- und Raumkosten separat auszuweisen. Die Betriebsmittelkosten werden daher entsprechend angepasst. Den letzten wesentlichen Kostenaspekt stellen Fremdleistungskosten dar, die zwar oftmals ausschließlich in Rückführsystemen auftreten (bspw. in Form von Entsorgungskosten), allerdings auch intern auftreten können, sollten einzelne Teilprozesse fremdvergeben sein. Somit sind alle relevanten Kosten hiermit abgedeckt.

### **Grundlegende Informationen - Erforderliche Eingabeparameter**

Wie bereits oben geschrieben, kann die Anpassung an die jeweiligen Gegebenheiten des Unternehmens durch die Anpassung entsprechender Parameter erfolgen. Diese müssen daher definiert werden - und zwar so, dass sie die relevanten Rahmenbedingungen erfassen, aussagekräftig sind und zu den richtigen Ergebnissen führen. Diese Eingaben stellen die Grundlage für die jeweiligen Berechnungen in den einzelnen Teilsystemen dar. Hierbei ist zu beachten, dass aus Gründen der Transparenz davon ausgegangen wird, dass die Personalkosten über alle Systeme gleich sind. Daher werden sie nur einmalig, nämlich zu Beginn, erfasst. Somit sind die Eingangsparameter die folgenden:

$L_P$	Länge des Teils [mm]
$B_P$	Breite des Teils [mm]
$H_P$	Höhe des Teils [mm]
$G_P$	Gewicht des Teils [g]
$G_{Lt,max}$	Zulässiges Gesamtgewicht [g]
$W_P$	Wert des Teiles [€]
$t$	Dauer der Betrachtung [d]
$VE_P$	Täglicher Verbrauch [Stück]
$t_U$	Umlaufzeit pro Ladungsträger [d]
$AW_{Lt}$	Stückpreis des Ladungsträgers [€]
$t_{Ab}$	Abschreibungszeitraum [a]
$k_{Per,h}$	Personalkosten [€/Std]
$z$	Kapitalbindungssatz [%/a]
$m_{Sich}$	Sicherheitsbestand (an Ladungsträgern)
$Q_{Sch}$	Durchschnittliche Schwundquote (über alle Ladungsträger)

## Herleitung und Beschreibung der erforderlichen Berechnungsformeln der einzelnen Subsysteme

### Ladungsträgerkosten

Zur Bestimmung der Ladungsträgerkosten ist es erforderlich, zu wissen, wie viele Ladungsträger genau benötigt werden. Hierzu muss zuerst ermittelt werden, wie viele Teile in einen Ladungsträger passen. Dabei muss beachtet werden, dass ein Ladungsträger nie zu 100% gefüllt werden kann, sondern dass immer auch Leervolumen enthalten sein wird. Aus diesem Grund muss der Anpassungsgrad für die Produkthanordnung berücksichtigt werden (Gerstner 1999, S. 31). Da es sich bei den für diese Arbeit relevanten Ladungsträger um Behälter, also umschließende Ladungsträger handelt, ist die relevante Kennzahl der sogenannte „Volumenanpassungsgrad“ (Gerstner 1999, S. 41). Um diesen berechnen zu können, müssen sowohl die Behälter- als auch die Produktabmessungen bekannt sein. Diese Kennzahl ist dabei jedoch nicht zu verwechseln mit dem in anderen Quellen auffindbaren „Volumennutzungsgrad“, da dieser lediglich das Verhältnis von Innen- und Außenvolumen angibt, also insbesondere nicht teileabhängig ist (Lützebauer 1994, S. 63). Somit wird direkt offensichtlich, dass der Volumenanpassungsgrad stark von den Produktabmessungen abhängt:

Liegen bspw. würfelförmige Teile vor, so sinkt er mit einer steigenden Kantenlänge. Allerdings „steigt er nach dem Durchlaufen eines Minimums bei wachsender Produktkantenlänge wieder an, da bei einer konstanten Teileanzahl und einer dann größeren Produktgeometrie ein besserer Quotient zwischen dem zur Verfügung stehenden und verbrauchten Volumen entsteht.“ (Gerstner 1999, S. 42). Zusätzlich ergeben sich verschiedene Anpassungsgrade je nach Art der Befüllung der Ladungsträger: Gerstner (1999, S. 53) betrachtet ein Referenzprodukt mit den Maßen 86 x 55 x 22 mm<sup>6</sup>. Hiermit werden Schütt-, Stapel- und Setzversuche in den VDA-KLT 4314 durchgeführt. Hierbei ergaben sich deutliche Unterschiede in den Volumen Anpassungsgraden: Liegt dieser bei einer Stapelung der Produkte noch bei 76%, so sinkt er beim Einsetzen der Teile in Inlets auf 54% bis hinunter auf 39% bei einer Schüttung. Diese Werte für eine Schüttung sowie eine Stapelung werden im Modell übernommen. Da die Betrachtung von zusätzlichen Einlagen, also das Setzen von Produkten, sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann, würde dies nur zu einer Erhöhung der Komplexität des Modells bei nur geringem Zusatznutzen führen. Daher wird diese Möglichkeit, auch weil sie für KLT eher unüblich ist, nicht weiterverfolgt. Somit kann schließlich die Anzahl an Teilen, die ein Ladungsträger aufnehmen kann, berechnet werden, indem der Quotient aus zur Verfügung stehendem Innenvolumen multipliziert mit dem Volumen Anpassungsgrad sowie dem (quaderförmig angenommenem) Teilvervolumen gebildet wird. Es ergeben sich somit die folgenden Berechnungsvorschriften:

Entsprechend der Teileabmessungen berechnet sich das Produktvolumen  $V_P$  als:

$$V_P = L_P \cdot H_P \cdot B_P \quad (5.1)$$

$V_P$	Volumen des Produktes [mm <sup>3</sup> ]
$L_P$	Länge des Produktes [mm]
$H_P$	Höhe des Produktes [mm]
$B_P$	Breite des Produktes [mm]

---

<sup>6</sup>Da kein besserer Vergleich zur Referenz gefunden werden konnte, werden diese Ergebnisse als Grundlage verwendet.

Somit ergibt sich eine mögliche aufnehmbare Teileanzahl pro Behälter,  $m_{PLT}$ , als:

$$m_{PLT} = \left\lfloor \frac{V_{Lt} \cdot VA}{V_P} \right\rfloor \quad (5.2)$$

Hierbei gilt es jedoch, die zulässige Gewichtsobergrenze des Ladungsträgers nicht zu überschreiten:

$$m_{PLT} \cdot G_P + G_{Lt} < G_{Lt,max} \quad (5.3)$$

$m_{PLT}$	Teileanzahl pro Ladungsträger [Stück]
$V_{Lt}$	Ladungsträgerinnenvolumen [ $mm^3$ ]
$VA$	Volumenanpassungsgrad [%]
$G_P$	Teilegewicht [g]
$G_{Lt}$	Gewicht des Ladungsträgers [g]
$G_{Lt,max}$	max. zulässiges Gesamtgewicht [g]

Mit der so ermittelten maximal möglichen Anzahl an aufnehmbaren Teilen pro Behälter kann anschließend die benötigte Anzahl an Ladungsträgern berechnet werden. Diese hängt von der Umlaufzeit des Ladungsträgers durch die gesamte Prozesskette sowie dem täglichen Verbrauch ab (Klug 2010, S. 156f). Wie oben bereits erwähnt, handelt es sich bei der Umlaufzeit um einen zu Beginn der Berechnung einzugebenden Parameter. Laut (Lange 2010, S. 11) wird die Umlaufdauer bereits in 67% der Unternehmen erfasst, kann also als bekannt vorausgesetzt werden. Sollte sie dies nicht sein, so kann sie zumindest abgeschätzt werden. Es ergibt sich die folgende Formel (Klug 2010, S. 156f):

$$m_{Lt} = \left\lceil \frac{VE_P \cdot t_U}{m_{PLT}} \right\rceil + m_{Sich} \quad (5.4)$$

$m_{Lt}$	Anzahl an Ladungsträgern [Stück]
$VE_P$	Täglicher Verbrauch [Stück/d]
$t_U$	Umlaufzeit pro Ladungsträger [d]
$m_{PLT}$	Teileanzahl pro Ladungsträger [Stück]
$m_{Sich}$	Sicherheitsbestand [Stück]

Nachdem nun die erforderliche Anzahl an Ladungsträgern bekannt ist, können nun die für die Ladungsträger anfallenden Kosten berechnet werden. Diese beinhalten Abschreibungen, Schwund- und Kapitalbindungskosten (Lützebauer 1994, S. 113). Laut (IML 2010, S. 11) handelt es sich bei der Schwundquote um die am häufigsten erfasste, ladungsträgerspezifische Kennzahl. Sie wird als Eingabeparameter übernommen und als konstant für alle Ladungsträger angesehen. Kosten (bzw. Recyclingerlöse) für eine etwaige Entsorgung der Ladungsträger werden hier allerdings nicht erfasst, da sie zum einen schwer prognostizierbar sind und zum anderen auch vernachlässigbar bezogen auf die Gesamtkosten (wenige €/t an Material (Quelle: eigene Gespräche, u.a. im Juni 2012)).

$$K_{Lt} = m_{Lt} \cdot \frac{1}{Q_{Sch}} \cdot AW_{Lt} \cdot t \left( \frac{1}{t_{Ab} \cdot 365} + \frac{z}{365} \right) \quad (5.5)$$

$K_{Lt}$	Ladungsträgerkosten im Betrachtungszeitraum [€]
$Q_{Sch}$	Schwundquote
$m_{Lt}$	Anzahl an Ladungsträgern [Stück]
$AW_{Lt}$	Stückpreis des Ladungsträgers [€]
$t$	Dauer der Betrachtung [d]
$t_{Ab}$	Abschreibungszeitraum [a]
$z$	Kapitalbindungssatz [%]

## Transportsystem

Dieses Teilsystem umfasst ausschließlich reine Transportkosten. Be- und Entladevorgänge werden in den angrenzenden Teilsystemen erfasst. Somit umfasst dieses System Personal- (sofern diese nicht in den anderen Kostenbestandteilen beinhaltet sind), Betriebsmittel- (innerbetrieblich) und Transportkosten (außerbetrieblich). Die transportierte Produktmenge pro Transportvorgang hängt dabei von der Art der Ladeinheit (einzelner LT oder Verbundstapel) ab. Es ergeben sich somit die folgenden Formeln:

Bei **innerbetrieblichen Transporten** gilt:

Wird nur ein einzelner Ladungsträger transportiert, so ist die in ihm enthaltene Anzahl an Teilen gleich der transportierten Menge:

$$m_{P,Bm} = m_{PLT} \quad (5.6)$$

Wird jedoch eine Palette, auf der KLT gestapelt sind, transportiert, so hängt die transportierte Menge zusätzlich von der Anzahl an Lagen pro Palette sowie der Anzahl an Ladungsträgern pro Lage ab:

$$m_{P,Bm} = m_{PLT} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} \quad (5.7)$$

Ist vom Transportmittel ausschließlich die verfügbare Transportfläche bekannt<sup>7</sup>, so ergibt sich:

$$m_{P,Bm} = m_{PLT} \cdot \left[ \frac{C_{Bm} \cdot 1000000 \frac{mm^2}{m^2}}{L_{Lt} \cdot B_{Lt}} \right] \quad (5.8)$$

Bei einem **außerbetrieblichen Transport** ist ausschließlich folgende Formel relevant:

$$m_{P,Tm} = m_{PLT} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} \quad (5.9)$$

Somit können die im Transportsystem anfallenden Kosten mittels der folgenden „Teilkostenarten“ berechnet werden:

$$K_{Bm} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,Bm}} \cdot \frac{t_{Tr}}{60} \right] \cdot k_{Bm,h} \quad (5.10)$$

---

<sup>7</sup>Da VDA-KLT nur im Verbundstapel selbstsichernd sind, ist die verfügbare Fläche und nicht das verfügbare Transportvolumen entscheidend. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Transportmittel geeignet gewählt wird.

$$K_{Tr} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,Tm}} \right] \cdot (d_{Tr} \cdot \frac{m_{P,Tm} \cdot G_P + G_{Lt} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} + G_{LHM}}{1000} \cdot k_{Tm,km,kg} + k_{Tr}) \quad (5.11)$$

$$K_{Per} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,Bm}} \right] \cdot \frac{t_{Tr}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (5.12)$$

$$K_{Bs} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{PLT}} \right] \cdot m_{PLT}^8 \cdot \frac{t_{Tr}}{60 \cdot 24 \cdot 365} \cdot W_P \cdot z \quad (5.13)$$

---

<sup>8</sup>Damit auch hier der Einfluss unterschiedlicher Ladungsträgergrößen deutlich wird, werden die pro Tag zu transportierenden Behälter berechnet, damit der Tagesverbrauch befördert wird. Da im Schnitt jedoch nur der tatsächliche Verbrauch nachgeliefert wird, wird es Tage geben, an denen auch weniger geliefert wird. Somit könnte auch einfach nur  $VE_P$  stehen. Dies wäre jedoch ungenauer.

$K_{Bm}$	Betriebsmittelkosten (innerbetr.) Transportsystem [€]
$K_{Tr}$	Transportkosten (außerbetriebl.) Transportsystem [€]
$K_{Per}$	Personalkosten des Transportsystems [€]
$K_{Bs}$	Bestandskosten des Transportsystems [€]
$k_{Per,h}$	Personalkostensatz [€/Std]
$k_{Bm,h}$	Betriebsmittelkostensatz [€/Std]
$k_{Tm,km,kg}$	Transportmittelkostensatz [€/km*kg]
$k_{Tr}$	Kosten pro Transport [€/Transportvorgang]
$d_{Tr}$	Transportweg [km]
$C_{Bm}$	Verfügbare Transportfläche des Betriebsmittels [ $m^2$ ]
$t_{Tr}$	Dauer des Transportvorgangs [min]
$m_{P,Bm}$	Teile pro Betriebsmittel [Stück]
$m_{P,Tm}$	Teile pro Transportmittel [Stück]
$m_{PLT}$	Teile pro Ladungsträger [Stück]
$m_{Lg,Pl}$	Lagen pro Palette [Stück]
$m_{Lt,Lg}$	Kleinladungsträger pro Lage [Stück]
$G_{LHM}$	Gewicht des Ladehilfsmittels [g]
$L_{Lt}$	Länge des Ladungsträgers [mm]
$B_{Lt}$	Breite des Ladungsträgers [mm]
$W_P$	Produktwert [€]
$z$	Kapitalbindungssatz [%]

Somit ergeben sich die Kosten des Transportsystems als Summe dieser Teilkosten:

$$K_{Trans} = K_{Bm} + K_{Tr} + K_{Per} + K_{Bs} \quad (5.14)$$

mit

$K_{Trans}$  Kosten des Transportsystems [€]

## Lagersystem

Laut (Gudehus 2011, S. 344) bestehen die Lagerlogistikkosten aus den Nachschub- und den Lagerhaltungskosten. Sämtliche Kosten für das Lagersystem, also auch die Flächenkosten, werden im Lagerkostensatz flä-

chenabhängig erfasst<sup>9</sup>. So können die Einflüsse unterschiedlicher Größen der Ladungsträger erfasst werden. Auch hier gilt wieder, dass KLT auf Paletten nur modular gestapelt werden dürfen. Zusätzlich werden die Annahmen getroffen, dass Ein- und Auslagerung gleich lange dauern und Personalkosten nur für diese Vorgänge anfallen.

Damit nun die genauen Kosten berechnet werden können, wird der mittlere Lagerbestand benötigt, der sich nach (Gudehus 2011, S. 340) aus dem Sicherheitsbestand sowie der halben Nachschubmenge ergibt. Dieser Sicherheitsbestand kann dabei aus der erforderlichen Bestandsreichweite (in Stunden) durch Normierung mit dem täglichen Verbrauch berechnet und in [Stück] angegeben werden:

$$m_S = \frac{R_S}{24} \cdot V E_P \quad (5.15)$$

Für die zu liefernde Nachschubmenge  $m_{P,N}$  gelten analog zum Transportsystem die folgenden Formeln<sup>10</sup>:

Für den Fall der Einlagerung eines einzelnen Ladungsträgers ergibt sie sich als:

$$m_{P,N} = m_{PLT} \quad (5.16)$$

Werden hingegen Paletten eingelagert, so beträgt sie:

$$m_{P,N} = m_{PLT} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} \quad (5.17)$$

---

<sup>9</sup>Sollte der Lagerplatz jedoch ausschließlich ein einfacher Stellplatz sein, der nur Flächen- und/oder Raumkosten verursacht, so wird dieser separat betrachtet.

<sup>10</sup>Es wird hier davon ausgegangen, dass der Nachschub mittels einer Verbrauchssteuerung, also über Kanban, ausgelöst wird. Ein solches System kann als (s,S)-Base-Stock-Politik aufgefasst werden. Das heißt, dass der Nachschub ausgelöst wird, sobald eine Einheit entnommen wurde. Hierbei kann es sich um einen einzelnen Ladungsträger oder eine ganze Ladeinheit handeln. Weitergehende Details zu dieser Bestellpolitik sowie zu Bestandsmanagement im Allgemeinen finden sich in (Tempelmeier 2005, S. 101ff)

Somit ergibt sich der mittlere Lagerbestand  $m_B$  als:

$$m_B = m_S + \frac{m_{P,N}}{2} \quad (5.18)$$

$R_S$	Reichweite des Sicherheitsbestandes [Stunden]
$VE_P$	Täglicher Verbrauch des Produktes [Stück]
$m_B$	Mittlerer Lagerbestand [Stück]
$m_S$	Sicherheitsbestand [Stück]
$m_{P,N}$	Nachschubmenge [Stück]

Hiermit können auch die resultierenden Bestandskosten  $K_{Bs}$  berechnet werden:

$$K_{Bs} = \frac{t}{365} \cdot m_B \cdot W_P \cdot z \quad (5.19)$$

Die Betriebsmittelkosten des Lagers ergeben sich als die anfallenden Lagerhaltungskosten im Betrachtungszeitraum. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass während des Ein- und Auslagerns anfallende Betriebsmittelkosten in den Lagerkostensatz als Gemeinkosten eingehen. Sie werden daher nicht separat erfasst:

$$K_{Bm} = \left[ \frac{m_B}{m_{P,N}} \right] \cdot L_{Le} \cdot B_{Le} \cdot t \cdot \frac{k_{Bm,m^2,Tag}}{1000000} \quad (5.20)$$

Falls es sich um einen Lagerplatz ohne Betriebsmittelkosten handelt, fallen die folgenden Flächen- und Raumkosten an:

$$K_{Fl} = \left[ \frac{m_B}{m_{P,N}} \right] \cdot L_{Le} \cdot B_{Le} \cdot t \cdot \frac{k_{Fl,m^2,Tag}}{1000000} \quad (5.21)$$

$K_{Bm}$	Betriebsmittelkosten des Lagersystems [€]
$K_{Fl}$	Flächen - und Raumkosten des Lagersystems [€]
$m_{P,N}$	Produkte pro Lagereinheit (Nachschubmenge) [Stück]
$L_{Le}$	Länge der gelagerten Ladeinheit [mm]
$B_{Le}$	Breite der gelagerten Ladeinheit [mm]
$t$	Betrachtungszeitraum [d]
$k_{Bm,m^2,Tag}$	Lagerkostensatz [€/m <sup>2</sup> * d]
$k_{Fl,m^2,Tag}$	Flächen - und Raumkostensatz [€/m <sup>2</sup> * d]

Zusätzlich entstehen durch Ein- und Auslagervorgänge die folgenden Personalkosten

$$K_{Per} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,N}} \right] \cdot \frac{2 \cdot t_{Ein/Aus}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (5.22)$$

$K_{Per}$	Personalkosten des Lagersystems [€]
$k_{Per,h}$	Personalkostenstundensatz [€/Std]
$t_{Ein/Aus}$	Dauer des Ein - oder Auslagerns [min]

Abschließend können nun die Kosten des Lagersystems wiederum durch Summation der Teilkosten wie folgt berechnet werden:

$$K_{Lager} = K_{Bm} + K_{Fl} + K_{Per} + K_{Bs} \quad (5.23)$$

mit

$K_{Lager}$	Kosten des Lagersystems [€]
-------------	-----------------------------

## Umschlagsystem

In diesem Teilsystem sind anfallende Betriebsmittelkosten für mögliche Hilfsmittel sowie Personalkosten zu erfassen. Aufgrund der Annahme der kurzen Verweilzeit in diesem System werden die Bestandskosten hier vernachlässigt. Die Menge an umzuschlagenden Teilen  $m_{P,U}$  entspricht dabei der transportierten Teileanzahl. Ebenso kommt es zu keinen weiteren Veränderungen, da keine Umpackvorgänge anfallen.

Wird nur ein Ladungsträger transportiert und ist somit nur ein einzelner Ladungsträger umzuschlagen, so ergibt sich die Umschlagmenge als:

$$m_{P,U} = m_{PLT} \quad (5.24)$$

Handelt es sich um eine Palette, so gilt:

$$m_{P,U} = m_{PLT} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} \quad (5.25)$$

$$K_{Bm} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,U}} \right] \cdot \frac{t_{Um}}{60} \cdot k_{Bm,h} \quad (5.26)$$

$$K_{Per} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,U}} \right] \cdot \frac{t_{Um}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (5.27)$$

$K_{Bm}$	Betriebsmittelkosten des Umschlagsystems [€]
$K_{Per}$	Personalkosten des Umschlagsystems [€]
$k_{Per,h}$	Personalkostensatz [€/Std]
$k_{Bm,h}$	Betriebsmittelsatz [€/Std]
$t_{Um}$	Dauer des Umschlagvorgangs [min]
$m_{P,U}$	Umzuschlagende Menge [Stück]

Es ergibt sich somit für das Umschlagsystem:

$$K_{Umschlag} = K_{Bm} + K_{Per} \quad (5.28)$$

mit

$K_{Umschlag}$	Kosten des Umschlagsystems [€]
----------------	--------------------------------

## Kommissioniersystem

Ein Kommissioniersystem kann hinsichtlich der Kostenfunktion analog zu einem Lagersystem betrachtet werden. Es besteht lediglich der Unterschied, dass es beim Ein- oder Auslagern zu einer Änderung der Zusammensetzung der Ladeinheit kommt. Somit sind die Zeiten für Ein- und Auslagervorgänge nicht mehr identisch. Die Dauer des Kommissioniervorgangs wird im Modell auf einen einzelnen Ladungsträger bezogen.

$$K_{Per} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,N}} \right] \cdot \frac{t_{Ein/Aus} + t_{Kom}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (5.29)$$

$$K_{Bm} = \left[ \frac{m_B}{m_{P,N}} \right] \cdot L_{Le} \cdot B_{Le} \cdot t \cdot \frac{k_{Bm,m^2,Tag}}{1000000} + t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{P,N}} \right] \cdot m_{Lg,Pl} \cdot m_{Lt,Pl} \cdot \frac{t_{Kom}}{60} \cdot \frac{k_{Bm,Kom,h}}{1000000} \quad (5.30)$$

$$K_{Fl} = \left[ \frac{m_B}{m_{P,N}} \right] \cdot L_{Le} \cdot B_{Le} \cdot t \cdot \frac{k_{Fl,m^2,Tag}}{1000000} \quad (5.31)$$

$$K_{Bs} = \frac{t}{365} \cdot m_B \cdot W_P \cdot z \quad (5.32)$$

$K_{Per}$	Personalkosten [€]
$K_{Bm}$	Betriebsmittelkosten [€]
$K_{Fl}$	Flächen - und Raumkosten [€]
$K_{Bs}$	Bestandskosten [€]
$k_{Bm,m^2,Tag}$	Lagerkostensatz [€/m <sup>2</sup> *d]
$k_{Fl,m^2,Tag}$	Flächen - und Raumkostensatz [€/m <sup>2</sup> *d]
$k_{Bm,Kom,h}$	Betriebsmittelsatz (Kommissionierhilfsm.) [€/Stunde]
$t_{Kom}$	Dauer des Kommissioniervorgangs (KV) [min]
$t_{Ein/Aus}$	Dauer des Ein-/Auslagerns ohne KV [min]
$m_{P,N}$	Nachschubmenge [Stück]
$m_{Lg,Pl}$	Anzahl Lagen pro Palette [Stück]
$m_{Lt,Lg}$	Anzahl Ladungsträger pro Lage [Stück]

Auch hier können die Gesamtkosten wiederum durch Summation berechnet werden:

$$K_{Komm} = K_{Bm} + K_{Fl} + K_{Per} + K_{Bs} \quad (5.33)$$

mit

$K_{Komm}$  Kosten des Kommissioniersystems [€]

### Rückführsystem

Ein Rückführsystem enthält ausschließlich Fremdleistungskosten für einen Dienstleister, die auf einzelnen Ladungsträgern als Kostentreiber basieren<sup>11</sup>:

$$K_{Fr} = t \cdot \left[ \frac{VE_P}{m_{PLT}} \right] \cdot k_{Fr,Lt} \quad (5.34)$$

$K_{Fr}$  Gesamte Fremdleistungskosten des Rückführsystems [€]

$k_{Fr,Lt}$  Fremdleistungskostensatz pro Ladungsträger [€]

$m_{PLT}$  Anzahl Teile pro Ladungsträger [Menge]

### 5.3.3 Berechnung der Gesamtkosten - Aggregation der Prozesskosten

Wie Ihnen als Leser sicherlich aufgefallen sein wird, haben die einzelnen Kostenbestandteile der Subsysteme die gleichen Abkürzungen. Dies ist darin begründet, da sich hierdurch unmittelbar zwei einfache Möglichkeiten zur Ermittlung der Gesamtkosten ergeben, und zwar durch Aufsummierung der errechneten Kosten der einzelnen Subsysteme.

---

<sup>11</sup>Sollte dieser Prozess nicht - wie in allen in dieser Arbeit betrachteten Beispielen - ausgelagert sein, so kann diese Logik einfach angepasst werden, indem man statt des Fremdleistungskostensatzes pro Ladungsträger den eigenen verwendet oder diesen Prozess erneut über die anderen Teilsysteme abbildet.

**Variante eins** Zur Berechnung der Gesamtkosten werden zuerst die Kostenarten aller Subsysteme addiert. Das Rückführsystem braucht dabei nicht aggregiert werden, da es nur einmalig auftritt. Es ergeben sich somit die folgenden Bestandteile der Gesamtkosten:

$$K_{Per} = \sum_{i=1}^n K_{Per,i} \quad (5.35)$$

$K_{Per}$  Gesamte Personalkosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Per,i}$  Personalkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Bm} = \sum_{i=1}^n K_{Bm,i} \quad (5.36)$$

$K_{Bm}$  Gesamte Betriebsmittelkosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Bm,i}$  Betriebsmittelkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Tr} = \sum_{i=1}^n K_{Tr,i} \quad (5.37)$$

$K_{Tr}$  Gesamte Transportkosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Tr,i}$  Transportkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Fl} = \sum_{i=1}^n K_{Fl,i} \quad (5.38)$$

$K_{Fl}$  Gesamte Flächen- und Raumkosten der Kette [€]  
 $K_{Fl,i}$  Flächen- und Raumkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Bs} = \sum_{i=1}^n K_{Bs,i} \quad (5.39)$$

$K_{Bs}$  Gesamte Bestandskosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Bs,i}$  Bestandskosten des i-ten Subsystems [€]

Die gesamten Kosten der Logistikkette ergeben sich nun aus der Addition der verschiedenen Kostenarten.

$$K_{Ges} = K_{Lt} + K_{Per} + K_{Bm} + K_{Tr} + K_{Fl} + K_{Bs} + K_{Fr} \quad (5.40)$$

$K_{Ges}$  Gesamte Prozesskosten der Logistikkette [€]

**Variante zwei** Die zweite nun mögliche Variante besteht in der einfachen Aufsummierung aller Kosten der Subsysteme. Es ergibt sich:

$$K_{Trans} = \sum_{i=1}^n K_{Trans,i} \quad (5.41)$$

$K_{Trans}$  Gesamte Transportkosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Trans,i}$  Transportkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Lager} = \sum_{i=1}^n K_{Lager,i} \quad (5.42)$$

$K_{Lager}$  Gesamte Lagerkosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Lager,i}$  Lagerkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Umschlag} = \sum_{i=1}^n K_{Umschlag,i} \quad (5.43)$$

$K_{Umschlag}$  Gesamte Umschlagkosten der betrachteten Kette [€]  
 $K_{Umschlag,i}$  Umschlagkosten des i-ten Subsystems [€]

$$K_{Komm} = \sum_{i=1}^n K_{Komm,i} \quad (5.44)$$

$K_{Komm}$  Gesamte Kommissionierungskosten der Kette [€]  
 $K_{Komm,i}$  Kommissionierkosten des i-ten Subsystems [€]

Die gesamten Kosten der Logistikkette ergeben sich nun aus der Addition der verschiedenen Kostenarten.

$$K_{Ges} = K_{Lt} + K_{Trans} + K_{Lager} + K_{Umschlag} + K_{Komm} + K_{Fr} \quad (5.45)$$

$K_{Ges}$  Gesamte Prozesskosten der Logistikkette [€]

Damit nun die unterschiedlichen Ladungsträgeralternativen verglichen werden können, ist es erforderlich, diese Berechnungen für alle möglichen Varianten der Stapelbarkeit der einzelnen Ladungsträger durchzuführen. Wie aus Tabelle 5.2 ersichtlich wird, ergeben sich somit für die in dieser Arbeit betrachteten Ladungsträger 26 zu untersuchende Möglichkeiten<sup>12</sup>. Mittels dieser vollständigen Erfassung aller möglichen Gesamtkosten, die unmittelbar durch den gewählten Ladungsträger in der Logistikkette anfallen, können nun für jede Ladungsträgeralternative die geringsten Gesamtkosten, die jeweiligen TCO-Werte des Ladungsträgers, ermittelt werden. Es gilt:

$$TCO_j = \min \{K_{Ges,j}\} \quad \forall j \in \{\text{betrachtete Ladungstraeger}\} \quad (5.46)$$

Hierbei bedeutet:

$TCO_j$  Minimale Gesamtkosten des j-ten Ladungsträgers [€]

---

<sup>12</sup>Im Rahmen dieser Arbeit sind die Ladungsträgeralternativen zwar auf standardisierte VDA-LT beschränkt. Die Systematik kann jedoch so für alle möglichen Ladungsträger angewendet werden. Hierdurch erhöht sich lediglich die Anzahl an zu betrachtenden Varianten, das eigentliche Vorgehen und Grundprinzip bleiben jedoch gleich.

Nachdem nun für alle zu betrachtenden Ladungsträger der jeweilige TCO-Wert berechnet wurde, kann der kostenminimale Ladungsträger ausgewählt werden. Sollte der Nutzen, der mit den jeweiligen Ladungsträgern zusammenhängt, für die jeweilige Entscheidung irrelevant sein, so kann die Untersuchung an dieser Stelle beendet werden. Durch die Berechnung nach der hier gezeigten Systematik wird zumindest garantiert, dass der kostenminimale Behälter ausgewählt wurde. Allerdings greift diese Betrachtungsweise oftmals doch zu kurz. Denn wie auch die Expertenbefragung gezeigt hat, dürfen die qualitativen Aspekte nicht vernachlässigt werden bzw. sind sogar von größerer Bedeutung. Daher wird im folgenden Unterkapitel nun die Vorgehensweise zur Nutzenbestimmung und -einbeziehung hergeleitet.

## **5.4 Ein neues Modell zur Nutzenberechnung unterschiedlicher Ladungsträger**

Die Expertenbefragung führte dazu, dass die qualitativen Aspekte ermittelt und darüber hinaus bezüglich Bedeutung geordnet werden können. Hierbei zeigte sich, dass bis auf den Nutzenaspekt des „Recyclings des Ladungsträgers“ alle zumindest als wichtig eingestuft werden. Diese Tatsache zeigt, dass es erforderlich ist, auch den Nutzen in einem umfassenden Modell mit zu betrachten. Daher wird in diesem Abschnitt auf die Betrachtung des Nutzens der Entscheidung für oder gegen einen Behälter eingegangen. Da der Aspekt der Entsorgung der Ladungsträger nicht nur als Einziger als „nicht wichtig“ eingestuft wurde, sondern auch bereits bei der Kostenberechnung mit betrachtet wurde und darüber hinaus alle in dieser Arbeit betrachteten Ladungsträger recycelt werden können, kann er bei der Betrachtung des Nutzens vernachlässigt werden. Die Befragung der Experten ergab darüber hinaus, dass zusätzlich zu den vorgegebenen Faktoren noch zwei weitere hinzugefügt werden müssen.

Somit ergeben sich für das neue, umfassende Modell zur Behälterauswahl die folgenden sieben Nutzenaspekte:

1. Qualität (Vermeidung von Beschädigung)
2. Ergonomie
3. Flexibilität (Umstellung der Produktion)
4. Flexibilität (verschiedene Teile/Produkte)
5. Lebensdauer der LT
6. Vermeidung von nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten am Verbauort
7. Identifikation (der LT)

Mit diesen Faktoren kann nun, in Analogie zum oben berechneten TCO-Wert, der neue „Overall Profit of Ownership“-Wert (OPO-Wert) für jeden Behälter berechnet werden. Wie bereits begründet, wird hierfür der „Analytic Hierarchy Process“ verwendet. Um diesen durchführen zu können, müssen nun zuerst das Ziel, die Kriterien sowie die Alternativen ermittelt werden. Das Ziel dieser Betrachtung ist es, den nutzenoptimalen Ladungsträger zu identifizieren. Bei den Kriterien handelt es sich um die oben genannten sieben Nutzenaspekte<sup>13</sup>. Im Anschluss daran werden nun die Kriterien gegenübergestellt. Die genaue Bewertung kann hier aus Gründen der Objektivität nicht dargestellt werden, sie bleibt dem jeweiligen Nutzer überlassen. Danach müssen noch die einzelnen Alternativen für jedes Kriterium wiederum anhand der neunstufigen AHP-Skala bewertet werden. Auch dies kann hier nicht allgemeingültig dargestellt werden. Nachdem alle Schritte des AHP durchgeführt wurden, liegen nun als Ergebnis die (durch den AHP auf das Intervall  $[0,1]$  normierte) OPO-Werte jeder Ladungsträgeralternative vor, wobei deren Summe notwendiger Weise 1 ergibt.

Nach diesen Berechnungen sind nun für alle Ladungsträger sowohl die minimalen Gesamtkosten (also die kostenoptimale Prozesskette) sowie der erreichbare Nutzen bekannt. Diese wurden allerdings separat voneinander berechnet und müssen nun, als finaler Schritt, in einem umfassenden Modell zusammengeführt werden.

---

<sup>13</sup>Auch hier kann diese Vorgehensweise leicht verallgemeinert werden, in dem einfach die Alternativenmenge um weitere Ladungsträger erweitert wird. Sollten es Bestimmungen im Unternehmen vorschreiben, kann darüber hinaus auch die Menge der Kriterien erweitert werden.

## 5.5 Ein Kosten und Nutzen umfassender Ansatz - Das finale Modell

Wie aus den obigen Abschnitten deutlich wurde, besteht das Modell aus zwei Bestandteilen. Zum einen ist dies die Betrachtung der Gesamtkosten, die über die Logistikkette hinweg anfallen, in Form einer TCO-Analyse, erweitert um einen Prozesskostenansatz. Der zweite Bestandteil ist die Betrachtung der qualitativen Aspekte über die Bestimmung des Nutzens. Nun stellt sich die Frage, wie diese beiden losgelösten Betrachtungen zu einem Gesamtergebnis aggregiert werden können. Dies kann sinnvoll über eine Quotientenbildung erreicht werden (vgl. Beschreibung der Nutzwert-Kostenanalyse im Anhang). Mittels dieses Quotienten wird also das Nutzen-Kosten-Verhältnis, quasi eine Art „Grenznutzen“, berechnet bzw. betrachtet, wie viel Nutzen mit den eingesetzten Mitteln erzielt werden kann. Diese Methodik wird daher auch für das finale, umfassende Modell zur Wahl des optimalen Ladungsträgers verwendet. Hierfür stehen nun zwei Optionen zur Verfügung. Zum einen kann der TCO-Wert direkt übernommen werden. Wie bereits geschrieben wurde, wurde der Nutzen durch den AHP auf das Intervall  $[0,1]$  normiert. Somit können bei der Quotientenbildung Rundungsfehler oder Ungenauigkeiten auftreten, da sehr viele Nachkommastellen betrachtet werden müssen, wenn die TCO-Werte sehr hoch sind. Die zweite Möglichkeit besteht darin, auch die Kosten auf das Intervall  $[0,1]$  zu normieren. Dies gelingt dadurch, dass die jeweiligen Kosten durch die Summe der Kostenminima jeder Ladungsträgeralternative dividiert werden. Da dieser Faktor für alle Alternativen gleich ist, wird dadurch das Ergebnis nicht verfälscht oder beeinflusst, es wird schlicht affin-linear transformiert<sup>14</sup>. So werden auch die Ergebnisse besser greifbar. Daher wird diese Normierung empfohlen. Es ergibt sich die folgende Berechnungsvorschrift:

$$NKQ_j = \frac{OPO_j}{TCO_j} * \sum_{j=1}^n TCO_j * G(N, K) \quad \forall j \in \{\text{betrachtete LT}\} \quad (5.47)$$

<sup>14</sup>Affin-lineare Transformationen sind solche, für denen die Variable  $x$  wie folgt transformiert wird:  $x \mapsto a * x + b$ .

Hierbei bedeuten:

$NKQ_j$	Nutzen-Kosten-Quotient des j-ten Behälters
$OPO_j$	Nutzen des j-ten Behälters
$TCO_j$	TCO-Wert des j-ten Behälters
$G(N, K)$	Möglicher Gewichtungsfaktor von Nutzen und Kosten

Der Faktor  $G(N,K)$  wurde dabei eingeführt, damit auch entsprechende Präferenzen oder Vorgaben im entsprechenden Unternehmen berücksichtigt werden können. Er soll ausdrücken, wie wichtig die Nutzenaspekte im Vergleich zu den Kostenaspekten sind. Es muss allerdings klar sein, dass er wiederum die Subjektivität der Entscheidung erhöht. Daher sollte er mittels einer geeigneten, standardisierten Skala bestimmt werden. Hierfür bieten sich bspw. die Skala des AHP oder eine fünfstufige Likert-Skala<sup>15</sup> an.

Allerdings empfiehlt es sich, diesen Faktor bei 1 zu belassen. Hierdurch wird das Ergebnis weniger angreifbar. Dies bedeutet dann auch, dass bei einem NKQ-Wert, der größer als 1 ist, der relative Nutzen eines Ladungsträgers höher ist als die entsprechenden Kosten (Meixner 2002, S. 54). Somit wird er greifbarer und kann direkt in eine verbale Einschätzung „übersetzt“ werden.

Dieser Wert wird für alle Behälter, die zur Auswahl stehen, berechnet. Ausgewählt wird schließlich derjenige Behälter, der den höchsten NKQ-Wert aufweist.

Wie die Formel und die Beschreibung bereits zeigen, ist die Herleitung dieses Modells zwar auf einige Ladungsträger beschränkt. Dennoch kann diese Methodik auf alle möglichen Ladungsträger angewendet werden. Hierzu ist einfach die Menge der möglichen Ladungsträger entsprechend zu erweitern.

Das finale, umfassende Modell besteht also aus den folgenden drei Schritten, die für jeden Ladungsträger durchzuführen sind:

- Berechnung des TCO-Wertes für alle Ladungsträger (wie in Kapitel 5.3 geschildert)

---

<sup>15</sup>Eine Likert-Skala ist dadurch gekennzeichnet, dass sie die gesamte Bandbreite einer Ausprägung von einer sehr positiven bis hin zu einer sehr negativen Ausprägung erfasst (Greving 2007, S. 73). Hierdurch wird auch der Entscheider nicht überfordert.

- Berechnung des OPO-Wertes für alle Ladungsträger (wie in Kapitel 5.4 geschildert)
- Berechnung des NKQ-Wertes für alle Ladungsträger (wie in Kapitel 5.5 geschildert)

Anschließend wird derjenige Ladungsträger ausgewählt, der den größten NKQ-Wert aufweist.

Um das Modell praxistauglich einsetzen zu können, wurde die Berechnung des TCO-Wertes in einem separaten Java-Programm implementiert. Für die Berechnung des OPO-Wertes bietet sich Standardsoftware an, die auch als Testversion erhältlich ist. Zur Validierung und Verifizierung wird es im folgenden Kapitel 6 in einer realen Praxisumgebung eingesetzt.

# 6 Praxiseinsatz und Überarbeitung des Modells

Nach der Erstellung des Modells stellt sich die Frage nach der Praxistauglichkeit desselben. Genauso ist zu klären, ob es verwertbare Ergebnisse liefert und Verbesserungspotentiale erkennbar werden. Dieses Kapitel dient diesen Zwecken: Es soll die These dieser Arbeit, dass ein umfassendes Modell so noch nicht existiert, weiter untermauern. Ebenso soll es das Modell hin zur Praxistauglichkeit entwickeln und zeigt die Möglichkeiten auf, die eine umfassende Herangehensweise zur Auswahl des idealen Behälters bietet.

## 6.1 Überprüfung der Rahmenbedingungen des Modells

Der Einsatz des entwickelten Modells fand bei einem großen deutschen Industrieunternehmen statt. In vielen Gesprächen zeigte sich bereits zu Beginn der Untersuchungen, dass eine Systematik und ein umfassender Betrachtungsansatz, wie in dieser Arbeit entwickelt, im Unternehmen bisher nicht existieren oder zumindest unbekannt sind. Dies führte zu großem Interesse auch seitens des Praxispartners zur gemeinsamen Nutzung und Verbesserung des Modells. Dabei zeigte sich, dass die bisher genannten Rahmenbedingungen zutreffend und auch für Unternehmen so anwendbar sind. Allerdings mussten weitere Anpassungen des Modells erfolgen:

1. Betrachteter Behälterpool: Die Behälter der VDA-Norm kamen bei diesem Unternehmen so gut wie nicht zum Einsatz. Daher wurde der betrachtete Behälterpool erweitert. Es wurden insgesamt 22 Behältertypen betrachtet, davon 5 KLT. Hierbei handelt es sich um konzernweite Universalladungsträger. Es wurde weiterhin beschlos-

sen, Spezialladungsträger aus der Betrachtung auszuschließen, da diese bereits heute spezifische Untersuchungen erfahren.

2. Ladehilfsmittel: Es zeigte sich, dass Ladehilfsmittel häufig zum Einsatz kommen. Daher mussten auch diese, zusätzlich zu den eigentlichen Behältern, im Modell erfasst werden.
3. Betrachtete Prozesskette: Es zeigte sich, dass die Auswahl der Prozesskette - beginnend beim Warenausgang des Lieferanten bis hin zur Rückführung des Leerguts - richtig getroffen wurde. Um dem Ziel der Kosten und Nutzen umfassenden Betrachtung noch näher zu kommen, könnte natürlich auch der Lieferant in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Allerdings ist dies bei realen Gegebenheiten nicht möglich, da hier die Prozesse bzw. Kosten nicht bekannt sind (bzw. sein dürfen).
4. Gestaltung der Prozesskette: Die Prozesse, die KLT bzw. GLT durchlaufen, können durchaus unterschiedlich sein. Somit musste die Möglichkeit geschaffen werden, in der IT-Umsetzung des Modells für KLT und GLT getrennte Prozessketten modellieren und eingeben zu können.
5. Nutzenbetrachtung: Wie bereits erwähnt, kann eine Nutzenbetrachtung nie frei von Subjektivität sein. Auch wenn mit der Wahl des AHP versucht wurde, diese so gering sowie so konsistent wie möglich zu halten, wurde beschlossen, auf eine Nutzenbetrachtung zu verzichten. Somit können hier leider keine Praxisergebnisse präsentiert werden.
6. Prozesskette: Es zeigte sich, dass die gewählten Subsysteme geeignet sind, die vorliegenden und betrachteten Transportketten abzubilden. Somit mussten hier keine Anpassungen erfolgen.
7. Gegebenheiten vor Ort: Eine große Herausforderung bestand darin, die kostenmäßige Bewertung der Behälter an der Montagelinie korrekt vorzunehmen. Zeitlich gesehen ist dieser Prozess zwar eher kurz in Relation zur gesamten Umlaufdauer, allerdings ist die Fläche hier oft - und so auch im Praxisfall - sehr begrenzt. Das heißt, dass große Ladungsträger hier einen entscheidenden Nachteil mit sich bringen, kleine wesentlich besser geeignet sind. Eine große Herausforderung besteht also in der korrekten Ermittlung des Flächenkostensatzes:

Hier ist ein kalkulatorischer Wert erforderlich, da aufgrund des vorherrschenden Platzmangels der tatsächliche „Wert“ der Fläche die bilanziellen Abschreibungskosten z.B. durch zusätzliche Wege der Mitarbeiter am Band deutlich übersteigt. Diese Bestimmung ist zu einem gewissen Grad eine subjektive Entscheidung und daher ungenau. Es wurde bewusst auf eine Festlegung verzichtet, da ansonsten die übrigen, exakt berechneten Ergebnisse verfälscht werden. Die wurde Systematik so umgearbeitet, dass je ein Ergebnis für den kostenoptimalen KLT sowie den entsprechenden GLT ausgegeben wird. Diese Zahlen sind somit nicht (oder zumindest weniger) angreifbar und können als Entscheidungsgrundlage dienen, für welche Art von Ladungsträgern sich entschieden wird - KLT (immer dann zu wählen, wenn sie den insgesamt kostenoptimalen LT beinhalten) oder GLT (nur dann zu wählen, wenn dieser auch an der Linie Platz hat).

Nach diesen Festlegungen wurden die ersten Teile betrachtet und die Ergebnisse ausgewertet. Hierbei, ebenso wie in allen weiteren Beispielen, gelten folgende Prämissen:

1. Der Betrachtungszeitraum beträgt 365 Kalendertage, also ein ganzes Jahr. Dies bedeutet, dass bspw. die Bestands- oder Mietkosten, die nicht nur an Arbeitstagen anfallen, korrekt betrachtet werden können. Durch das Beziehen der Jahresmenge auf die Anzahl an Kalendertagen werden diese Kosten korrekt berechnet. Nur bei Berechnung des Sicherheitsbestandes im Lagersystem (dieser ist in Stunden angegeben) muss somit eine Erhöhung der Menge erfolgen. Durch diese Logik werden alle Kosten richtig erfasst.
2. Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort wurde ein Mindestbestand an Teilen pro Ladungsträger eingeführt, der nicht unterschritten werden darf. Zur Vergleichbarmachung der Ergebnisse wurde dieser als für alle Typen gleich festgesetzt.

3. Da die Annahme eines quaderförmigen Teils sehr vereinfachend ist, wurde der Volumenanpassungsgrad modifiziert. Daher wurde dieser entsprechend zur aktuellen Referenzverpackung angepasst und kann nun separat eingegeben werden<sup>1</sup>.
4. Die Umlaufdauer der Ladungsträger entspricht dem tatsächlichen Mittelwert derselben.
5. Der Kapitalbindungssatz wurde auf 8% festgesetzt.

Somit ist es nun möglich, das Modell vor Ort anzuwenden. Allerdings erfordern sie hierfür noch eine teilweise Überarbeitung der bisherigen Berechnungsformeln, welche im nächsten Abschnitt erfolgt.

## 6.2 Überarbeitung und Anpassung der Berechnungsformeln

Die ergänzten bzw. abgeänderten Rahmenbedingungen erfordern, beispielsweise durch die erforderliche Berücksichtigung von Ladehilfsmitteln oder des geforderten Mindestbestands pro Ladungsträger, eine Anpassung des vorgestellten Formelwerks. Aus Gründen der Einfachheit und Lesbarkeit werden hier (nur) die geänderten Formeln dargestellt. Die restlichen, hier nicht mehr erwähnten Formeln aus Kapitel 5 sind unverändert gültig und finden entsprechend ihre Anwendung<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Die genaue Berechnung, wie viele Teile in einen Ladungsträger passen, stellt mathematisch gesehen ein sogenanntes „Bin Packing-“ oder „Rucksackproblem“ dar. Diese können - bei geeigneter Modellierung - auch in vertretbarer Zeit gelöst werden. Allerdings führt eine genauere Berechnung zu keinem weiteren (wissenschaftlichen) Zugewinn und verändert auch nicht die Grundlogik des Modells. Sie liefert ausschließlich noch genauere Ergebnisse. Da es auch bereits Programme zur Lösung dieses Problems gibt bzw. eine solche Berechnung der Nutzung des in dieser Arbeit entwickelten Modells separat vorausgehen kann, wird auf eine Implementierung bzw. Berücksichtigung verzichtet. Dies stellt keinerlei Einschränkung für die Richtigkeit dieses Modells dar, insbesondere, da alle Berechnungen den gleichen Randbedingungen unterliegen. Daher kann auf diesen Genauigkeitsgewinn verzichtet werden. Eine solche Verfeinerung des Modells kann in auf dieser Dissertation aufbauenden Arbeiten erfolgen.

<sup>2</sup>Die meisten Variablenbezeichnungen wurden analog übernommen und sind daher hier nicht mehr erwähnt. Sie können im Glossar nachgelesen werden. Nur bei neuen Bestandteilen werden die Variablen erklärt.

### 6.2.1 Ladungsträgerkosten

Da nur ganze Teile bzw. Ladungsträger transportiert werden können, muss diese Ganzzahligkeit bei den Formeln 5.2 und 5.3 berücksichtigt werden. Sie können somit zu folgender Gleichung zusammengefasst werden:

$$m_{PLt} = \min \left\{ \left[ \frac{V_{LT} \cdot VA \cdot \frac{1}{100\%}}{V_P} \right]; \left[ \frac{G_{Lt,max} - G_{Lt}}{G_P} \right] \right\} \quad (6.1)$$

Wie bereits erwähnt, stellt die alleinige Betrachtung des Teilevolumens unter Annahme der Quaderförmigkeit eine Vereinfachung dar. Da die schlichte Tatsache, dass ein Teil volumenmäßig in einen bestimmten Ladungsträger passen würde, nichts darüber aussagt, ob es dies aufgrund der Kantenlängen auch tatsächlich tut, müssen weitere Bedingungen eingeführt werden. Diese stellen sicher, dass die Seitenlängen nicht länger als die entsprechenden Seiten des Ladungsträgers sind sowie, dass Teile nicht diagonal in diese gelegt werden<sup>3</sup>:

$$S_{1,P} < S_{1,LT} \quad (6.2)$$

$$S_{2,P} < S_{2,LT} \quad (6.3)$$

$$S_{3,P} < S_{3,LT} \quad (6.4)$$

Wobei gilt:

$S_{1,P}$	größte Kantenlänge des Produkts [mm]
$S_{2,P}$	zweitgrößte Kantenlänge des Produkts [mm]
$S_{3,P}$	kleinste Kantenlänge des Produkts [mm]
$S_{1,LT}$	größtes Innenmaß des Ladungsträgers [mm]
$S_{2,LT}$	zweitgrößtes Innenmaß des Ladungsträgers [mm]
$S_{3,LT}$	kleinstes Innenmaß des Ladungsträgers [mm]

---

<sup>3</sup>Diese Annahme kann, wie sich in Gesprächen mit Experten zeigte, als praxistauglich angesehen werden.

Zusätzlich muss noch die Forderung nach der Mindestmenge an Teilen pro Ladungsträger berücksichtigt werden. Dies kann anhand folgender einfacher Gleichung geschehen<sup>4</sup>:

$$m_{PLT} \geq m_{PLT,Min} \quad (6.5)$$

Darüber hinaus zeigte es sich, dass aufgrund von Schwund oder Beschädigung ein Sicherheitsbestand an Ladungsträgern erforderlich ist und dieser ins Modell integriert werden muss. Dieser Sicherheitsbestand sollte aufgrund der unterschiedlichen Ladungsträgereigenschaften bzw. Verwendungen für jeden Ladungsträger separat erfasst werden können. Es ergibt sich daher die zusätzliche Gleichung, die anschließend die Berechnung der Ladungsträgerkosten ermöglicht:

$$m_{Lt} = \max \left\{ \frac{VE_P \cdot t_{U,Lt}}{m_{PLt}}; 1 \right\} \cdot \left( 1 + m_{Sich} \cdot \frac{1}{100\%} \right) \quad (6.6)$$

$$K_{Lt} = \left[ m_{Lt} \cdot \frac{1}{1 - Q_{Sch} \cdot \frac{1}{100\%}} \right] \cdot AW_{Lt} \quad (6.7)$$

Abschließend müssen noch die Kosten der Ladehilfsmittel (LHM) berücksichtigt werden. Dies gelingt über die folgende Formel:

$$K_{LHM} = \left[ \frac{m_{Lt}}{m_{Lg,Pl} \cdot m_{Lt,Lg}} \cdot \frac{1}{1 - Q_{Sch} \cdot \frac{1}{100\%}} \right] \cdot AW_{LHM} \quad (6.8)$$

Es ergibt sich als Formel zur Berechnung der gesamten Ladungsträgerkosten:

$$K_{Ges,LT} = (K_{Lt} + K_{LHM}) \cdot t \cdot \left( \frac{1}{t_{Ab} \cdot 365} + \frac{z \cdot \frac{1}{100\%}}{365} \right) \quad (6.9)$$

---

<sup>4</sup>Ein Anhaltspunkt für eine genauere Berechnung der Mindestmenge pro Ladungsträger findet sich in ((Schedlbauer 2008), S. 122).

$K_{Lt}$	Ladungsträgerkosten im Betrachtungszeitraum [€]
$m_{Lt}$	Anzahl an Ladungsträgern [Stück]
$Q_{Sch}$	Schwundquote [%]
$AW_{Lt}$	Stückpreis des Ladungsträgers [€/Stück]
$K_{LHM}$	Kosten der Ladehilfsmittel im Betrachtungszeitraum [€/Stück]
$m_{Lt,Lg}$	Ladungsträger pro Lage [Stück]
$m_{Lg,Pl}$	Lagen pro Palette [Stück]
$AW_{LHM}$	Stückpreis des Ladehilfsmittels (Palette, Ladeabschlussplatte) [€]
$K_{Lt}$	Gesamtkosten der Ladungsträger im Betrachtungszeitraum [€]
$t$	Betrachtungszeitraum [d]
$t_{Ab}$	Abschreibungszeitraum [a]
$z$	Kapitalbindungssatz [%]

## 6.2.2 Transportsystem

Im Bereich des Transportsystems ergibt sich die erste Änderung dahingehend, dass auch hier gefordert wird, dass mindestens ein Transport pro Jahr stattfindet. Diese Änderung ist zwar sehr klein, passt das Modell aber mehr an die realen Gegebenheiten an. Hiervon betroffen sind vorrangig Teile, die einen geringen Verbrauch haben, allerdings in GLT gelagert und transportiert werden. Es ergibt sich die folgende Formel:

$$m_{Le,Tm} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,Tm}}; 1 \right\} \quad (6.10)$$

Eine weiterreichende Anpassung ist bei der Ermittlung der Frachtkosten im **außerbetrieblichen Transport** notwendig. Hier zeigte der Praxisfall, dass eine reine Gewichtsbeachtung nicht ausreichend ist. Diese Betrachtungsweise erfasst insbesondere dann nicht das komplette Spektrum, wenn es sich um volumenreiche, aber leichte Teile handelt (bspw. Teile aus Schaumstoff). Solche Teile verbrauchen relativ gesehen ein großes Volumen des „Transportfahrzeugs“, ohne aber entsprechend die Zuladung zu erhöhen. Aus diesem Grund wird eine Einbeziehung des Volumens erforderlich, sodass die Frachtkosten sich nun entweder nach dem Gewicht oder dem Volumen des Teils richten.

Es ergibt sich die folgende Gleichung, mit der das sogenannte „Frachtpflichtige Gewicht pro Ladeinheit ( $FPG_{Le}$ )“ berechnet werden kann<sup>5</sup>:

$$FPG_{Le,Tm} = \max \{ G_{Le,Tm}; 250 \cdot V_{Le,Tm} \} \quad (6.11)$$

Hierbei wird, im Gegensatz zu der bisher vorgestellten Formel, das Gewicht aus dem Gewicht der Ladeinheit und zusätzlich dem Gewicht des Ladehilfsmittels errechnet. Es ergibt sich die folgende Formel für das zu transportierende Volumen pro Ladeinheit  $V_{Le}$ , wobei  $G_{LHM}$  für das Gewicht des Ladehilfsmittels steht:

$$G_{Le,Tm} = \frac{m_{P,Tm} \cdot G_P + G_{Lt} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} + G_{LHM}}{1.000} \quad (6.12)$$

Das Volumen wird analog aus dem Volumen der Ladeinheit sowie dem des LHM berechnet (Grundlage ist auch hier die Tatsache, dass ein (gewöhnlicher) Sattelaufleger bei einem Ladevolumen von  $100\text{m}^3$  25 Tonnen transportieren kann):

$$V_{Le,Tm} = \frac{L_{Lt} \cdot B_{Lt} \cdot H_{Lt} \cdot m_{Lt,Lg} \cdot m_{Lg,Pl} + V_{LHM}}{1.000.000.000} \quad (6.13)$$

Somit ergeben sich die **außerbetrieblichen Transportkosten** als:

$$K_{Tr} = m_{Le,Tm} \cdot (d_{Tr} \cdot FPG_{Le,Tm} \cdot k_{Tm,km,kg} + k_{Tr}) \quad (6.14)$$

$K_{Tr}$	Transportkosten des außerbetriebl. Transports [€]
$m_{Le,Tm}$	Anzahl der Ladeeinheiten [Stück]
$d_{Tr}$	Transportweg [km]
$FPG_{Le,Tm}$	frachtpflichtiges Gewicht pro Ladeinheit [kg]
$k_{Tm,km,kg}$	Transportmittelkostensatz [€/ (km*kg)]
$k_{Tr}$	Fixe Kosten pro Transport einer Ladeinheit [€]

<sup>5</sup>Bei einem Sattelaufleger mit einem Ladegewicht von 25 Tonnen sowie einem Ladevolumen von  $100\text{ m}^3$  ergibt sich:  $1\text{ m}^3$  Volumen entspricht 250 kg Gewicht.

Auch im Bereich des **innerbetrieblichen Transports** sind Änderungen erforderlich: Auch hier greift die Forderung, dass mindestens ein kompletter LT pro Jahr transportiert wird. Somit müssen die Formeln zur Berechnung der Personal- sowie der Betriebsmittelkosten beim Transport einer Palette sowie eines einzelnen Ladungsträgers entsprechend angepasst werden. Es ergeben sich die folgenden Formeln:

$$K_{Bm} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,Bm}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_{Tr}}{60} \cdot k_{Bm,h} \quad (6.15)$$

$$K_{Per} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,Bm}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_{Tr}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (6.16)$$

Für den Fall, dass nur die Transportfläche gegeben ist, ergeben sich keine Veränderungen. Hier würde diese Forderung dazu führen, dass aufgrund der Maximumfunktion auf die gesamte zur Verfügung stehende Transportfläche aufgerundet würde, was zu einer unrealistischen Änderung führen würde.

Für die resultierenden Bestandskosten wirkt sich die Forderung nach mindestens einem Transport pro Jahr wie folgt aus<sup>6</sup>:

$$K_{Bs} = \max \{ t \cdot VE_P; m_{P,Bm} \} \cdot \frac{t_{Tr}}{60 \cdot 24 \cdot 365} \cdot W_P \cdot z \cdot \frac{1}{100\%} \quad (6.17)$$

Hiermit können dann die Gesamtkosten des Transportsystems nach der bereits bekannten Gleichung berechnet werden:

$$K_{Trans} = K_{Tr} + K_{Bm} + K_{Per} + K_{Bs} \quad (6.18)$$

---

<sup>6</sup>Dies gilt allerdings wiederum nur für die Fälle des Transports einer Palette sowie eines einzelnen Ladungsträgers, da sich sonst keine weiteren Änderungen ergeben haben.

### 6.2.3 Lagersystem

Im Bereich des Lagersystems ergibt sich die erste Änderung bereits bei der Berechnung des Sicherheitsbestandes, da hier nun auf eine ganze Zahl aufgerundet werden muss:

$$m_S = \left\lceil \frac{R_S}{24} \cdot VE_P \right\rceil \quad (6.19)$$

Darüber hinaus können die Flächen- und die Betriebsmittelkosten in einer einzigen Formel zusammengefasst werden, wobei auch hier wichtig ist, aufzurunden, da nur ganze Ladungsträger gelagert und transportiert werden können. Es ergibt sich:

$$K_{Bm,Fl} = \left\lceil \frac{m_B}{m_{P,N}} \right\rceil \cdot L_{Le} \cdot B_{Le} \cdot t \cdot \frac{k_{Bm,m^2,d}}{1.000.000} \quad (6.20)$$

Eine wichtige Veränderung hat sich dadurch ergeben, dass die Zeiten für das Ein- und Auslagern nicht identisch sind (bzw. sein müssen). Somit ist die Annahme, einfach einen Wert anzugeben und diesen dann mit zwei zu multiplizieren, nicht korrekt. Daher wird nun ein einziger Wert durch den Benutzer eingegeben, der die Zeit für das Ein- **und** Auslagern umfasst. Es ergibt sich die neue Formel:

$$K_{Per} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,N}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_{Ein/Aus}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (6.21)$$

Die weiteren Formeln für das Lagersystem bleiben unverändert.

### 6.2.4 Umschlagsystem

Eine erste Anpassung im Umschlagsystem ergibt sich bei den Betriebsmittelkosten und Personalkosten wiederum aus der Forderung, mindestens eine Palette bzw. Ladungsträger umzuschlagen. Auch hier muss eventuell aufgerundet werden. Es ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$K_{Bm} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,U}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_U}{60} \cdot k_{Bm,h} \quad (6.22)$$

$$K_{Per} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,U}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_U}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (6.23)$$

Da es in der Praxis durchaus üblich ist, in diesem Bereich Aufträge fremdzuvergeben, welche dann mittels eines fixen Kostensatzes verrechnet werden, ergibt sich für solche Fälle als neue Formel:

$$K_{U,fix} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,U}}; 1 \right\} \cdot k_{U,fix} \quad (6.24)$$

Da keine weiteren Änderungen oder Anpassungen erforderlich sind, bleiben die restlichen Gleichungen unverändert.

## 6.2.5 Kommissioniersystem

Es zeigte sich, dass die Personalkosten zu ungenau erfasst wurden. Für einen einzelnen Ladungsträger (KLT) sind sie, bis auf eine hinzuzufügende Maximumsfunktion (mindestens ein LT pro Jahr bewegen), unverändert:

$$K_{Per} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,N}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_{Ein} + t_{Kom}}{60} \cdot k_{Per,h} \quad (6.25)$$

Für alle anderen Fälle (mehrere KLT auf einem GLT oder LHM) müssen die Kosten jedoch differenzierter betrachtet werden:

$$K_{Per} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,N}}; 1 \right\} \cdot \left( \frac{t_{Ein}}{60} + m_{Lg,Pl} \cdot m_{Lt,Pl} \cdot \frac{t_{Kom}}{60} \right) \cdot k_{Per,h} \quad (6.26)$$

Die Flächen-, Raum- und Betriebsmittelkosten können wiederum wie folgt zu einer einzigen Gleichung zusammengefasst werden:

$$K_{Fl} = \left[ \frac{m_B}{m_{P,N}} \right] \cdot L_{Le} \cdot B_{Le} \cdot t \cdot \frac{k_{Bm, Lag, m^2, d}}{1.000.000} \quad (6.27)$$

In dieser Gleichung fehlen allerdings die Kosten für das Kommissionierhilfsmittel. Dies ist der Tatsache geschuldet, da hier eine genauere Betrachtung erforderlich ist: Aufgrund des unterschiedlich hohen Aufwandes und damit verbundener unterschiedlicher Personalkosten müssen die beiden Fälle „Kommissionierung eines einzelnen KLTs“ bzw. „Kommissionierung (von) einer Palette“ unterschieden werden. Dies gelingt mit den folgenden beiden Formeln:

$$K_{Bm} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,N}}; 1 \right\} \cdot \frac{t_{Kom}}{60} \cdot k_{Bm, Kom, h} \quad (6.28)$$

$$K_{Bm} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{P,N}}; 1 \right\} \cdot m_{Lg, Pl} \cdot m_{Lt, Pl} \cdot \frac{t_{Kom}}{60} \cdot k_{Bm, Kom, h} \quad (6.29)$$

Da nun das Kommissioniersystem genau genug für die Anwendung im Praxisfall beschrieben ist, sind keine Anpassungen mehr erforderlich. Die restlichen Berechnungsformeln können unverändert übernommen werden.

## 6.2.6 Rückführsystem

Im Rückführsystem ergibt sich nur eine kleine Veränderung, die erneut der Tatsache, dass mindestens ein LT pro Jahr gehandhabt werden muss, geschuldet ist. Allerdings muss bei Eingabe der Parameterwerte darauf geachtet werden, dass für den Falle des Rückführens von Gebinden aus KLT die Ladehilfsmittel mit berücksichtigt werden. Es ergibt sich:

$$K_{Fr} = \max \left\{ t \cdot \frac{VE_P}{m_{PLt}}; 1 \right\} \cdot k_{Fr, Lt} \quad (6.30)$$

Weitere Anpassungen sind nicht erforderlich.

## 6.2.7 Gesamtkosten

An der Berechnung der Gesamtkosten ändert sich im Grundsatz nichts. Die Systematik, alle Teilkosten aufzuaggrieren, bleibt bestehen. Wie aus obigen Ausführungen aber deutlich wurde, ist es sinnvoll, die Kosten für KLT und GLT separat zu erfassen. Somit werden nun also die minimalen Gesamtkosten in Form des TCO-Wertes für KLT sowie für GLT separat berechnet - und nicht mehr nur ein einziger Wert als Minimum ermittelt und ausgegeben. Daher ergeben sich zwei TCO-Werte entsprechend der folgenden Gleichungen:

$$TCO_{Ges,KLT} = \min \{TCO_j\} , \forall j \in \{\text{betrachtete KLT}\} \quad (6.31)$$

$$TCO_{Ges,GLT} = \min \{TCO_k\} , \forall k \in \{\text{betrachtete GLT}\} \quad (6.32)$$

Mit diesen Formeln, wie sie hier angepasst bzw. im vorangegangenen Kapitel ermittelt wurden, sind nun die Grundlagen geschaffen, Prozessketten umfassend und detailliert abbilden zu können. Dem Aspekt der Ganzheitlichkeit wird hierdurch Rechnung getragen. Ein umfassendes, vielfach anwendbares Kostenmodell steht hiermit zur Verfügung.

## 6.2.8 Berechnung des Nutzenwertes

Im Praxisfall zeigte sich, dass zur Berechnung des Nutzenwertes die richtigen Kriterien gewählt wurden. Eine einzige Erweiterung wurde als eventuell sinnvoll angemerkt, nämlich die Integration des Themas „Green Supply Chain“ ((Sundarakani, de Souza, Goh, von Over, Manikandan and Koh 2010), S. 191f). Unter diesem Oberbegriff wird die Strategie verstanden, so viel wie möglich  $CO_2$  in der Produktionskette einzusparen. Elemente hierfür könnten beispielsweise das Material des Ladungsträgers oder die Art der eingesetzten Transportfahrzeuge sein.

Allerdings wurde auch darauf hingewiesen, dass jegliche Nutzenbetrachtung nicht auf „harten Fakten“, sprich quantitativ erfassbaren, allgemein anerkannten Zahlen, beruht, sondern eine gewisse Subjektivität nicht vermeiden kann. Daher wurde auf eine konkrete Anwendung des Nutzenmodells verzichtet und somit können keine Ergebnisse aufgezeigt werden. Allerdings wurde die grundsätzliche Nutzbarkeit des ermittelten Modells gezeigt.

Mit diesen überarbeiteten Formeln, der Implementierung derselben in ein Javatool und die Ermittlung einer Systematik zur Nutzenbewertung samt relevanter Faktoren steht nun ein praxistaugliches Werkzeug zur Verfügung. Es ist vielseitig einsetzbar, auch in frühen Planungsphasen, und liefert wichtige Erkenntnisse. Beispielhafte Ergebnisse zeigt der folgende Abschnitt.

## 6.3 Ergebnisse des Praxiseinsatzes

Dieses Kapitel widmet sich der Beschreibung der im Praxiseinsatz erzielten Ergebnisse des Modells (vgl. hierzu (Berbig, Furmans and Schrimpf na)). Zur Berechnung wurde, wie bereits erwähnt, ein JAVA-Modell erstellt. Dieses erlaubt es, in einer Eingabemaske die genaue Prozesskette zu definieren (mittels Drag and Drop) und dann anschließend die Parameter zu setzen. Die folgende Abbildung 6.1 zeigt die Eingabemaske des Tools, hier am Beispiel des Kommissioniersystems:

Die genauen Ergebnisse sind selbstverständlich vertraulich und können daher nur in abstrakter Form wiedergegeben werden. Dies gilt auch für die betrachtete Prozesskette.

Folgende Prozessketten wurden dabei betrachtet (s. Abbildung 6.2 zur Prozesskette der KLT sowie Abbildung 6.3 für die eingesetzten GLT<sup>7</sup>):

Für diese beiden Prozessketten wurden verschiedene Untersuchungen (ca. 20 unterschiedliche Produkte) durchgeführt, von denen exemplarisch drei repräsentative Ergebnisse hier beschrieben werden. Bei sämtlichen Untersuchungen wurden zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse die oben genannten Prämissen zugrunde gelegt.

---

<sup>7</sup>ALA = Außenlager

**Unbenannter Prozessschritt**

Transportsystem hinzufügen

Lagersystem hinzufügen

Umschlagsystem hinzufügen

Kommissioniersystem hinzufügen

Rückführsystem hinzufügen

Berechnung der Ladungsträgerkosten:

Umlaufzeit eines KLT [Tage]

Umlaufzeit eines GLT [Tage]

Abschreibungsdauer [Jahre]

Schwundquote der Ladungsträger [%]

Parameter der Ladungsträger:  
Anschaffungswert [€] und Sicherheitsbestand [%]

Typ	Anschaff.-Wert.	Sicherh.-Best.
KLT 003147	0	0
KLT 004147	0	0
KLT 004280	0	0
KLT 006147	0	0
KLT 006280	0	0
GLT 111820	0	0
GLT 111902	0	0

Berechnen der Kosten der Logistikkette

### Kommissioniersystem

Allgemeine Eingaben:

Titel

Täglicher Verbrauch [Menge]

Personalkosten [€/h]

Produktbreite [mm]

Produktgewicht [g]

Mindestmenge pro KLT

Betrachtungszeitraum [Tage]

Kapitalbindungszzins [%]

Produktlänge [mm]

Produkthöhe [mm]

Produktwert [€]

Spezifische Eingaben des Kommissioniersystems:

Ein Kommissioniersystem beinhaltet eine Lagerung vor der Kommissionierung. Bitte wählen Sie aus, ob in dem Lagersystem einzelne Ladungsträger oder Ladeinheiten in Palettengröße gelagert werden sollen. Bei der Kommissionierung werden die Ladungsträger entweder einzeln oder auf einer Palette modularisiert.

Ladungsträger       Palette

Reichweite des Sicherheitsbestandes [h]

Dauer des Einlagerns eines KLT [min]

Dauer des Einlagerns eines GLT [min]

Dauer des Auslagerns mit Kommissionierung eines KLT [min/Ladungsträger]

Dauer des Auslagerns mit Kommissionierung eines GLT [min/Ladungsträger]

Lagerkostensatz (inkl. Betriebsmittelkosten des Lagers) eines KLT [€/m<sup>2</sup>/Tag]

Lagerkostensatz (inkl. Betriebsmittelkosten des Lagers) eines GLT [€/m<sup>2</sup>/Tag]

Betriebsmittelkostensatz des Kommissionier-Hilfsmittels für einen KLT [€/Std]

Betriebsmittelkostensatz des Kommissionier-Hilfsmittels für einen GLT [€/Std]

Anordnung der Produkte im Ladungsträger / Volumen Anpassungsgrad:

Stapelung       Schüttung      Volumen Anpassungsgrad [%]:

Abbildung 6.1: Screenshot des erstellten Javatools zur Berechnung

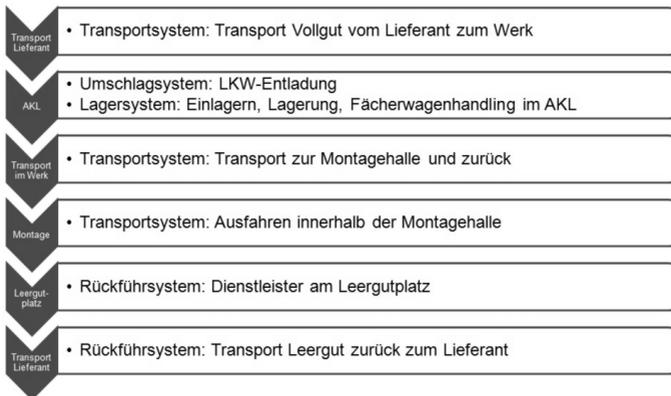


Abbildung 6.2: Betrachtete Prozesskette für KLTs



**Abbildung 6.3:** Betrachtete Prozesskette für GLTs

## Ergebnis 1: Clip

Bei dem im ersten Fall untersuchten Produkt handelt es sich um ein eher leichtes (Gewicht  $\ll 10$  g), dafür jedoch in Relation zum Gewicht gesehen volumenreiches Teil ( $\gg 20.000 \text{ mm}^3$ ), das nahezu würfelförmig ist. Somit handelt es sich um ein Volumenteil. Die wesentlichen Produktdaten sind in der folgenden Tabelle 6.1 ersichtlich:

Produktdatum	Einheit	Wert
Betrachtungszeitraum	[d]	365
Bedarf	[Stck./d]	126
Entfernung zum Lieferanten	[km]	$> 1.000$
Produktgewicht	[g]	$\ll 10$
Produktvolumen	[ $\text{mm}^3$ ]	$\gg 20.000$ (Würfel)

**Tabelle 6.1:** Wesentliche Produktdaten Produkt 1

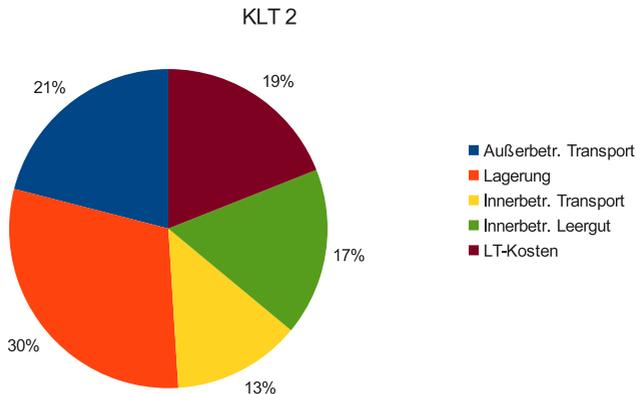
Der Clip ist bisher in KLT 2 verpackt bei einer Füllmenge von 400 Stück pro Ladungsträger. Dies ergibt einen Volumenanpassungsgrad von 102%, der, wie oben bereits angeführt, für alle weiteren Ladungsträger übernommen wird. Es ergeben sich die folgenden Ergebnisse, dargestellt in Tabelle 6.2<sup>8</sup>:

Ladungsträger	Gesamtkosten [% / a]	Teile im Ladungsträger
KLT 1	158%	>150
<b>KLT 2</b>	<b>100%</b>	<b>ca. 400</b>
KLT 3	69%	ca. 800
KLT 4	75%	ca. 870
<b>KLT 5</b>	<b>59%</b>	<b>ca. 1.750</b>
GLT 1	108%	ca. 4.300
GLT 2	103%	ca. 5.300
GLT 3	96%	ca. 8.700
GLT 4	87%	ca. 9.100
GLT 5	81%	ca. 19.100
GLT 6	78%	ca. 20.000
GLT 7	72%	ca. 20.700
GLT 8	63%	ca. 23.300
<b>GLT 9</b>	<b>60%</b>	<b>ca. 26.500</b>
GLT 10	81%	ca. 29.200
GLT 11	115%	ca. 29.700
GLT 12	61%	ca. 29.800
GLT 13	63%	ca. 32.300
GLT 14	109%	ca. 34.900
GLT 15	111%	ca. 48.200
GLT 16	114%	ca. 53.300
GLT 17	113%	ca. 83.600

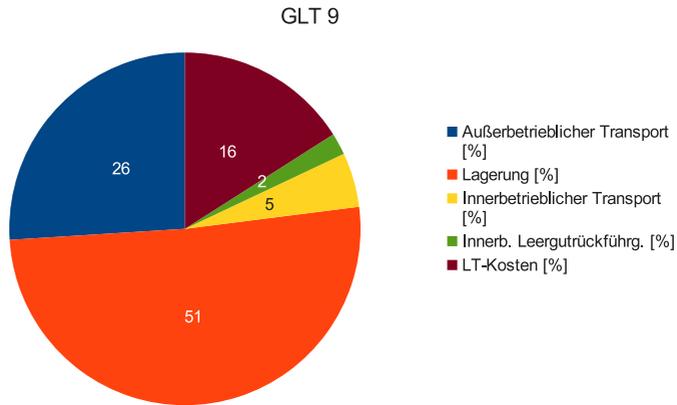
**Tabelle 6.2:** Ergebnis 1: Gesamtkosten des Clips pro Jahr (ohne Bestandskosten)

<sup>8</sup>Aus Gründen der Vertraulichkeit wurden die Ergebnisse jeweils nach der folgenden Logik verfremdet: Der aktuelle Ladungsträger (Referenz) entspricht stets 100% der Kosten. Darüber hinaus wurden die Behälter (nach KLT und GLT getrennt) nach der Größe aufsteigend sortiert und von 1 beginnend durchnummeriert, da auch unternehmensspezifische Behälter verwendet werden - und nicht nur VDA-KLT.

Bei diesen Ergebnissen muss allerdings berücksichtigt werden, dass sie ohne Bestandskosten errechnet wurden, da dies im hiesigen Fall bisher gängige Praxis ist. In diesem Fall zeigt sich, dass der größte KLT (5) der günstigste der KLT wäre, der günstigste GLT ist GLT Nummer 12. Dies ist allerdings nicht der größte GLT. Auch zeigt es sich, dass nicht der größte Behälter überhaupt der kostengünstigste sein muss, denn hier ist der insgesamt günstigste Behälter ein KLT. Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass signifikante Kostensparpotenziale nicht nur bei Verwendung des absolut größten Behälters erzielt werden können, sondern auch bereits bei Verwendung eines nur leicht größeren Behälters (KLT 3) merkliche Kostensenkungen erzielt werden könnten. Diese Ergebnisse sind, wie bereits erwähnt, nicht nur in der Gesamtsicht berechnet worden, sondern für alle Subsysteme vorliegend (diese dürfen jedoch nicht komplett gezeigt werden). Die folgenden Diagramme 6.4 sowie 6.5 zeigen exemplarisch Ergebnisse für 2 Ladungsträger (KLT und GLT):



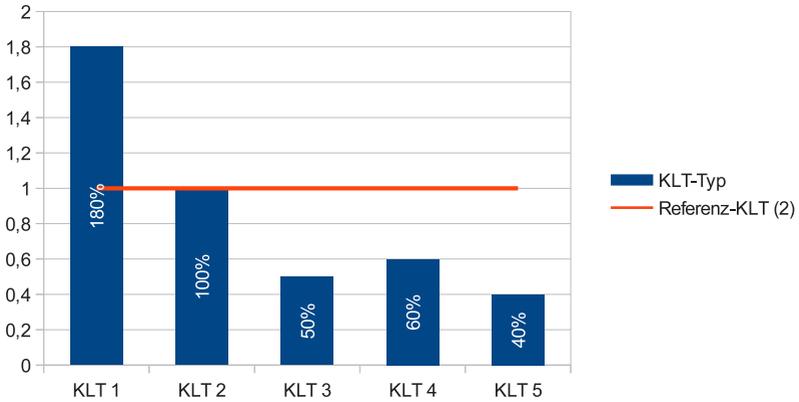
**Abbildung 6.4:** Kosten der Teilprozesse für den Referenz-KLT (2)



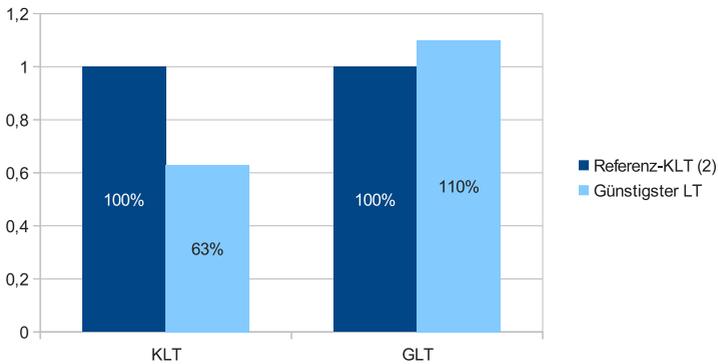
**Abbildung 6.5:** Kosten der Teilprozesse für den günstigsten GLT (9)

Es zeigt sich, dass der größte Anteil der Gesamtkosten bei beiden Ladungsträgern durch die Lagerkosten verursacht wird, beim GLT sind dies bereits über 50% der gesamt anfallenden Kosten. Eine weitere Betrachtung der Lagerkosten zeigte, dass die Lagerkosten wesentlich von der Anzahl der benötigten Ladungsträger multipliziert mit der jeweiligen Grundfläche abhängen. Hier zeigte sich, dass somit ein Ladungsträger, der bei gleicher Grundfläche mehr Teile aufnehmen kann, Vorteile gegenüber Behältern mit gleicher Fläche, aber geringerem Inhalt, aufweist (sofern die erforderliche Fläche am Band verfügbar ist). Dies ist ein wesentlicher Grund, warum KLT 5 im Vergleich zur Referenz KLT 2 deutlich besser abschneidet (er hat im Vergleich zu KLT 2 nur 40% der anfallenden Lagerkosten), was die folgende Grafik 6.6 verdeutlicht.

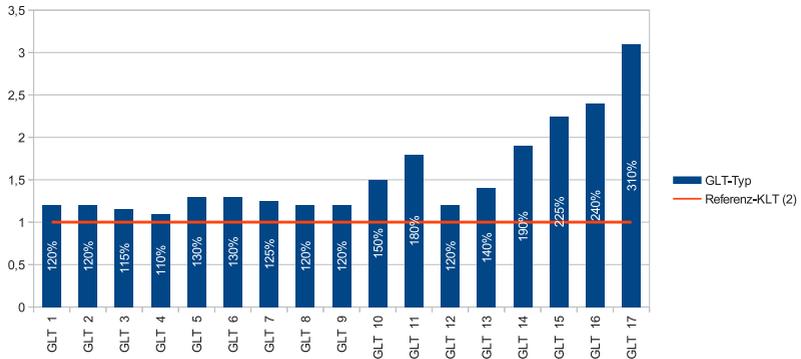
Die gefundenen Ergebnisse werden noch aussagekräftiger, wenn Bestandskosten doch mit einbezogen werden (auch wenn dies im Praxisfall zur Zeit noch nicht der Fall ist). Hierdurch gibt es eine deutliche Veränderung bei den Ergebnissen, da GLT nun deutlich schlechter abschneiden. Beispielsweise ist der bisher günstigste GLT 12 nun nicht mehr knapp 40% günstiger als der Referenz-LT, sondern 10% teurer. Der günstigste Behälter bleibt zwar weiterhin KLT 5, allerdings ist er nur noch knapp 35%, und nicht mehr 40%, günstiger. Dies zeigen die folgenden beiden



**Abbildung 6.6:** Detaillierte Betrachtung der Lagerkosten für KLT



**Abbildung 6.7:** Einsparungspotentiale bei Verwendung des kostenoptimalen LT verglichen zur Referenz mit Bestandskosten



**Abbildung 6.8:** Jährliche Gesamtkosten für GLT unter Berücksichtigung von Bestandskosten

Abbildungen 6.7 sowie 6.8. Sie verdeutlichen, dass Bestandskosten (also Kapitalbindungskosten) unbedingt mit einbezogen werden müssen:

### Ergebnis 2: Klammer

Im Gegensatz zum oben behandelten Clip handelt es sich hier um ein Gewichtsteil (bei einem Volumen von ca.  $1.400 \text{ mm}^3$  weist sie ein Gewicht von 2 g auf). Hier stellt das Gewicht, nicht das Volumen, den limitierenden Faktor bei der Ermittlung der Anzahl Teilen pro Beälter dar. Die wesentlichen Daten zeigt Tabelle 6.3.

Produktdatum	Einheit	Wert
Betrachtungszeitraum	[d]	365
Bedarf	[Stck./d]	1.400
Entfernung zum Lieferanten	[km]	ca. 350
Produktgewicht	[g]	2
Produktvolumen	[ $\text{mm}^3$ ]	ca. 1.400 (Quader)

**Tabelle 6.3:** Wesentliche Produktdaten Produkt 2

Ladungsträger	Gesamtkosten [% / a]	Teile im Ladungsträger
<b>KLT 1</b>	<b>100%</b>	<b>ca. 3.200</b>
<b>KLT 2</b>	<b>79%</b>	<b>ca. 6.900</b>
KLT 3	86%	ca. 6.600
KLT 4	97%	ca. 6.500
KLT 5	108%	ca. 6.100

**Tabelle 6.4:** Ergebnis 2: KLT-Gesamtkosten der Klammer pro Jahr (inkl. Bestandskosten)

Bei der Beschreibung der Ergebnisse erfolgt eine Beschränkung auf die KLT, da sowohl der aktuelle Referenzbehälter (KLT 1) als auch der insgesamt kostengünstigste Behälter (KLT 2) dieser Gruppe angehören (daher werden die Ergebnisse für GLT nicht aufgelistet). Diese Ergebnisse wurden, wie oben bereits als wichtig gezeigt wurde, mit Bestandskosten berechnet. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle 6.4.

Es fällt auf, dass der kostengünstigste Behälter zwar auch in diesem Fall wiederum nicht der kleinste KLT ist, dafür aber auch nicht der größte, sondern der zweitkleinste. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass es sich bei diesem Produkt um ein Gewichtsteil handelt. Größere Behälter weisen bereits ein relativ gesehen größeres Eigengewicht auf und können daher, trotz eines prinzipiell größeren Fassungsvermögens, nicht so viele Teile aufnehmen. Daher kann Behälter 2 die meisten Teile aufnehmen und wird somit zum kostengünstigsten (zum einen werden am wenigsten Behälter benötigt (Anschaffungskosten), als auch die Lagerkosten verringert). Genauere Aufschlüsse, warum dies so ist bzw. wie die Kosten auf die Teilprozesse verteilt sind, zeigt die folgende Zusammenstellung 6.5, die pro KLT die jeweiligen (normierten) Kosten der Teilprozesse aufzeigt - sie ermöglichte darüber hinaus eine erneute Validierung und Verifizierung des Modells, ob die Kosten richtig berechnet wurden (was der Vergleich mit gegenwärtigen Analysen zeigt):

Eine solche Aufschlüsselung, die eine bisher nicht gekannte Transparenz bietet (Quelle: persönliche Gespräche mit Logistikmitarbeitern vor Ort, bspw. am 28.09.2011), ermöglicht eine detaillierte Untersuchung, wodurch Kosten entstehen und wo sie am effizientesten verringert werden können.

Ladungsträger	Anlieferung	Lagerung	Innerbetr. Transport	Innerbetr. Rückführung	Ausserbetr. Rückführung	Kosten LT
<b>KLT 1</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>KLT 2</b>	<b>93%</b>	<b>82%</b>	<b>93%</b>	<b>46%</b>	<b>84%</b>	<b>96%</b>
KLT 3	103%	82%	97%	48%	184%	105%
KLT 4	103%	82%	97%	48%	184%	105%
KLT 5	127%	89%	211%	52%	398%	107%

**Tabelle 6.5:** Ergebnis 2: Gesamtkosten der Teilprozesse pro Jahr und KLT der Klammer

Diese Aufschlüsselung zeigt bspw., dass große Behälter, die nicht klappbar sind, wesentlich kostenintensiver beim Rücktransport sind, als kleinere oder faltbare (ungenütztes Volumen = Transport von Luft)<sup>9</sup>. Genauso zeigen sie, dass auch beim Transport von befüllten Ladungsträgern eine bessere Volumennutzung zu besseren Ergebnissen führt. Dies zeigt sich darin, dass die großen KLT, die nicht vollends befüllt sind, größere Kosten verursachen als kleinere, voll befüllte: Von ihnen müssen mehr transportiert werden, um die gleiche Anzahl an Teilen zu transportieren. Auch hier wird wiederum unnötig viel Luft transportiert (was darüber hinaus unnötige CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht). Dies gilt für den außer- wie auch für den innerbetrieblichen Transport.

Diese Ergebnisse zeigen einen weiteren wesentlichen Vorteil. Eine Neuerung, die dieses Modell bietet, ist eine bisher nicht gekannte und erreichbare (Kosten-)Transparenz über die gesamte Prozesskette, die die richtigen

<sup>9</sup>Bei faltbaren Behältern ist aber der größere Verschleiß durch das Zusammenfallen und Aufklappen im Rahmen der Nutzenbetrachtung mit zu betrachten (Lebensdauer).

Stellhebel für Prozessverbesserungen aufzeigt. Dies ist somit ein wesentlicher Fortschritt durch das in dieser Arbeit neu entwickelte Modell.

### Ergebnis 3: Konsole

Bei diesem Teil handelt es sich um ein sehr großes Teil, das daher nur in einen GLT passt. Dies wird auch durch das Modell erkannt. Sie weist die folgenden charakteristischen Daten auf:

Produktdatum	Einheit	Wert
Betrachtungszeitraum	[d]	365
Bedarf	[Stck./d]	189
Entfernung zum Lieferanten	[km]	ca. 320
Produktgewicht	[g]	> 1.500
Produktvolumen	[ $mm^3$ ]	»9.000.000

**Tabelle 6.6:** Wesentliche Produktdaten Produkt 2

Aufgrund der Größe dieses Teils können nicht einmal alle zur Verfügung stehenden GLT eingesetzt werden, nur die GLT 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17 können verwendet werden. Hier ergab sich, dass der bezüglich des Innenvolumens größte Ladungsträger auch der kostenoptimale ist. Leider konnten hier die Ergebnisse nicht mit genauen Bestandskosten ermittelt werden, daher wurde auf diese Betrachtung verzichtet<sup>10</sup>.

### Allgemeine Erkenntnisse aus den Analysen

Die gezeigten, beispielhaften und die darüber hinaus durchgeführten Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zum entwickelten Modell zu:

<sup>10</sup>Abschätzungen seitens des Industriepartners legten aber nahe, dass eine Betrachtung dieser Kosten wiederum eine Veränderung zugunsten kleinerer GLT mit sich gebracht hätte.

1. Eine Einsparung zur aktuellen Situation kann bei allen betrachteten Beispielen festgestellt werden. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit dieses Modells.
2. In den meisten Fällen stellen die Lagerung sowie der außerbetriebliche Transport die teuersten Prozessschritte dar.
3. Maximal können bei Verwendung des kostengünstigsten KLTs 76% sowie bei Verwendung des günstigsten GLTs 85% eingespart werden (verglichen zur aktuellen Situation).
4. GLTs bieten insbesondere beim Prozessschritt der Lagerung sowie beim Transport Einsparpotenziale gegenüber KLTs<sup>11</sup>.
5. In 31% der Fälle ist ein KLT der kostenoptimale Behälter, in 69% ein GLT.
6. Insbesondere in Fällen, in denen die Transportkosten einen großen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen, sind faltbare GLTs unter den kostengünstigsten drei Ladungsträgern anzufinden. Das heißt also, dass die Faltbarkeit von Vorteil ist.

Insbesondere unter Berücksichtigung des Lean Logistik-Ansatzes sowie den Anforderungen durch das sogenannte Werkerdreieck (Laufwege) ist es interessant, kleine Behälter auszuwählen. Die Betrachtungen lassen weitere Aussagen zu, wann ein KLT der kostenoptimale Behälter ist. Dies ist dann zu erwarten, wenn:

- Es sich um ein hochpreisiges Teil handelt. In diesen Fällen spielen die Bestandskosten eine wesentliche Rolle.
- Geringe tägliche Bedarfe zu erwarten sind, da dadurch die Transportfrequenz sinkt (Erinnerung: Transportkosten stellen in der Regel einen der/den teuersten Prozessschritt dar.)
- Der Transportweg gering ist (gleicher Grund wie beim obigen Punkt, da hier die Transportkosten nicht so sehr ins Gewicht fallen).
- Das Teil ein geringes Volumen aufweist, da dann eine große Anzahl an Teilen bereits in einen KLT passt.

---

<sup>11</sup>Anmerkung: Sie erfordern dafür aber mehr Platz am Band und sind daher nicht immer einsetzbar.

Eine abschließende Sensitivitätsanalyse ergab darüber hinaus die folgenden Schlüsse:

1. Der Volumenanpassungsgrad spielt eine entscheidende Rolle. Somit sind die Ergebnisse umso genauer, je genauer er ermittelt werden kann. Eine leichte Veränderung desselben kann gravierende Auswirkungen auf das Gesamtergebnis haben. Eine Integration einer genaueren Berechnungslogik desselben (bspw. durch Nutzung von Bin-Packing-Algorithmen) führt zu genaueren Ergebnissen, wenn auch nicht zu einer gravierenden Änderung des Modells bzw. einem wesentlichen Zugewinn in Bezug auf die Antwort der Forschungsfrage bzw. der gestellten Thesen. Dies kann ein Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen, die über diese Arbeit hinausgehen, sein.
2. Die Umlaufdauer hat primär auf die Anzahl an benötigten Ladungsträgern eine Auswirkung. Eine Änderung des Eingabewertes hat daher nur bedingte Auswirkungen. Allerdings muss festgehalten werden, dass sie eigentlich keine allgemeine Eingabe darstellen kann, sondern aus der Größe des Ladungsträgers resultiert. Eine Integration der Berechnung der Umlaufdauer in das Modell (bspw. mit Hilfe der Bedientheorie) kann also zu genaueren Ergebnissen, wenn auch nicht zu einem entscheidenden Zugewinn aus wissenschaftlicher Sicht, beitragen. Dies stellt einen Ansatzpunkt für weitere, sich an diese Arbeit anschließende Untersuchungen dar.
3. Eine Erhöhung bzw. Absenkung der geforderten Mindestmenge pro Behälter und damit diese Forderung an sich scheint keine Relevanz zu haben. Es wäre allenfalls vorstellbar, dass sie für schwere, teure Teile mit einem sehr geringen Verbrauch pro Tag zum Tragen kommt. Genau kann dieser Sachverhalt erst nach Durchführung von noch weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Darüber hinaus lässt das Modell auch die Beantwortung neuer Fragestellungen zu, bspw.: Ist es optimal, einen großen Ladungsträger für den Transport zu verwenden und dann im Werk in einen kleineren Behälter umzupacken?

Auch können mehrere Teile gleichzeitig optimiert werden, indem einfach die gefundenen Teilergebnisse aufsummiert werden und dann der/die kostengünstigste(n) Behälter ausgewählt werden. Die bisherigen Ergebnisse

Ladungsträger	Ladungsträger	Ladungsträger
KLT 1	KLT 3	KLT 5
GLT 2	GLT 3	GLT 4
GLT 5	GLT 6	GLT 7
GLT 10	GLT 11	GLT 13
GLT 14	GLT 15	GLT 16

**Tabelle 6.7:** Zusammenstellung aller nicht kostenoptimalen Behälter

lassen den Schluss zu, dass folgende LT nicht optimal sind, da sie nie die günstigsten waren bzw. annähernd günstigsten und somit in weiteren Betrachtungen bzw. Prozessketten ausgeschlossen werden können (s. Tabelle 6.7).

Das Modell kann somit wesentliche Fragen beantworten und zu einer Optimierung von Prozessen und Prozessketten beitragen. Es liefert einen wichtigen Beitrag zur Schaffung von Transparenz in Prozessketten und zur fundierten Entscheidung, welche Ladungsträger ausgewählt werden sollten. Die gestellte Forschungsfrage ist richtig und wichtig, insbesondere für die Praxis. Das gefundene Modell beantwortet sie und liefert wesentliche Erkenntniszugewinne. Die gestellten Thesen und Forschungsfragen wurden somit umfassend beantwortet, das Modell ist für den Praxiseinsatz geeignet und tauglich.



# 7 Gleichzeitige Optimierung mehrerer Teile

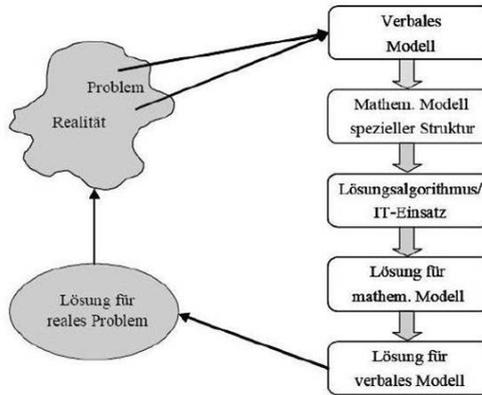
In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Betrachtung sukzessive, also Teil für Teil und Behälter für Behälter durchgeführt. Hiermit ist es zwar möglich, eine Beschränkung auf bestimmte Behältertypen durchzuführen, allerdings erst im Nachhinein und nicht unter direkter Berücksichtigung aller Interdependenzen. Somit bietet sich eine Erweiterung des Modells zu einer simultanen Optimierung an. Hierzu eignen sich Verfahren des Operations Research (kurz „OR“). Dieses Kapitel zeigt nun diese Möglichkeiten sowie eine entsprechende Erweiterung hin zu einem „simultanen“ Optimierungsmodell auf.

## 7.1 Mögliche Verfahren des „Operations Research“

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an möglichen Definitionen für das Gebiet des „Operations Research“. Neumann und Morlock charakterisieren OR wie folgt: „Operations Research bedeutet die Suche nach einer bestmöglichen (optimalen) Entscheidung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen.“ (Neumann and Morlock 2004, S. 5)

### 7.1.1 Grundlagen des OR

Entsprechend der obigen Definition dient Operations Research der Entscheidungsunterstützung bzw. zur Findung einer Problemlösung. Diesen Prozess der Problemlösung stellt die folgende Abbildung 7.1 schematisch dar.



**Abbildung 7.1:** Der Problemlösungsprozess des OR (Werners 2008, S.2).

In einem ersten Schritt wird für das tatsächlich existierende Problem ein verbales Modell erstellt. Dieses wird anschließend in ein mathematisches umgesetzt. Mittels eines Lösungsalgorithmus wird schließlich für dieses eine Lösung bestimmt, die gleichzeitig eine Lösung des verbalen Modells darstellt und damit der Realität. Das heißt also, dass sich OR mit Modellen und Methoden sowie mit Algorithmen für die Modelllösung befasst. Diese Elemente werden im folgenden Teil erläutert.

**Modelle** Da das Modell die Realität abbilden und seinerseits auch in die Realität rückübertragbare Lösungen liefern soll, ist die Modellbildung ein essentieller Bestandteil des Operations Research. „Ein Modell ist ein zweckorientiertes, ggf. vereinfachtes Abbild eines Ausschnitts der Realität, welches hinsichtlich der interessierenden Zusammenhänge strukturähnlich oder strukturgleich ist“ (Werners 2008, S. 2) (einfache Seitenangaben beziehen sich auf dieselbe Quelle). Hierbei können Beschreibungs-, Erklärungs- oder Prognose-, Optimierungs- und Entscheidungsmodelle unterschieden werden (S. 3). Das OR beschäftigt sich dabei hauptsächlich mit Optimierungs- bzw. Entscheidungsmodellen.

**Methoden** Der Begriff „Methode“ umfasst die Modellierung einschließlich des Findens einer Problemlösung (S. 8). Die (optimale) Lösung kann dabei mittels eines Algorithmus, einer Heuristik oder ähnlicher Verfahren ermittelt werden. Es gilt zu beachten, dass eine Heuristik nicht zwangsläufig die optimale Lösung eines Problems bestimmt, sondern „nur“ zu einer möglichst guten führt (S. 9). Sie werden insbesondere dann verwendet, wenn die exakte Ermittlung der optimalen Lösung einen nicht vertretbaren Aufwand erfordert oder eventuell gar nicht möglich ist (bspw. wenn ein sogenanntes „NP-schweres Problem“ vorliegt).

**Algorithmus** „Unter einem Algorithmus kann ganz allgemein eine Verarbeitungsvorschrift zur Lösung eines Problems verstanden werden“ (S. 9). Im Unterschied zu einer Heuristik führt ein Algorithmus zu einer optimalen Lösung.

## 7.1.2 Lineare Optimierung

Die „lineare Optimierung“ (auch als „lineare Programmierung“ bezeichnet) beschäftigt sich mit dem Aufstellen und Lösen eines linearen Optimierungsmodells (S. 44).

**Das Grundmodell der linearen Optimierung** Im Wesentlichen besteht das Grundmodell der linearen Optimierung aus der linearen Zielfunktion, die es zu optimieren (also zu minimieren bzw. maximieren) gilt, sowie den ebenfalls linearen Nebenbedingungen (bspw. Kapazitäten, Mindestbestände, ...) (S. 45). Die verwendeten Variablen müssen dabei positiv sein. In den Nebenbedingungen (NB) dürfen ausschließlich  $\leq$ -Restriktionen vorhanden sein. Ebenso müssen die Werte  $b$  der rechten Seiten alle größer oder gleich null sein (S. 45):

$$\begin{aligned} \max z &= c^t x \\ \text{s. t. } Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \\ c, x &\in \mathbb{R}^n, b \in \mathbb{R}^M, b \geq 0, A \in \mathbb{R}^{m \times n} \end{aligned}$$

Hierbei gelten die folgenden Konventionen (S. 45):

- $z = c^t x$  Zielfunktion
- $c, c^t$  Vektor der Zielfunktionskoeffizienten bzw. dessen Transponierte
- $A$  Koeffizientenmatrix
- $b$  Kapazitätenvektor
- $x$  Strukturvariable
- $Ax \leq b$  Restriktionen, Nebenbedingungen
- $x \geq 0$  Nichtnegativitätsbedingung.

Entsprechend dieser Schreibweise kann somit das lineare Modell wie folgt dargestellt werden (S. 45):

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i \quad i = 1, \dots, m \\ x_j &\geq 0 \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Auch hier ist die Nichtnegativitätsbedingung für alle Variablen einzuhalten. „Ausgeschrieben“ ergibt sich die detaillierte Darstellung eines linearen Modells somit als:

$$\begin{aligned} \max z &= c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \\ \text{s. t. } a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n &\leq b_1 \\ &\vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n &\leq b_m \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0 \end{aligned}$$

**Berechnung der optimalen Lösung** Das Standardverfahren zur Bestimmung der optimalen Lösung eines linearen Modells ist das sogenannte „Simplexverfahren“. Zur Durchführung dieses Algorithmus ist es allerdings erforderlich, dass alle Nebenbedingungen des linearen Modells von einer Ungleichung in eine äquivalente Gleichung umgeformt werden. Hierzu werden sogenannte Schlupfvariablen ( $s_1, \dots, s_m \geq 0$ ) verwendet (S. 47). Somit ergibt sich das folgende äquivalente Modell (S. 47):

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^m 0 * s_i \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + s_i &= b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ x_j, s_i &\geq 0 \quad j = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

Das bedeutet, dass das ursprüngliche lineare Modell lediglich umformuliert, jedoch nicht verändert wurde. Es wurde einfach in die sogenannte „kanonische Form“ überführt. Ist diese Überführung möglich und erfolgt, so kann mittels des Simplexalgorithmus die optimale Lösung ermittelt werden <sup>1</sup>.

**Mögliche Erweiterungen des Grundmodells** Nicht jedes reale Problem kann mittels dieser kanonischen Form abgebildet werden. Es kann vorkommen, dass nicht alle Variablen positiv sind bzw. in den Nebenbedingungen auch  $\geq$ -Bedingungen zu genauen Beschreibungen erforderlich sind. Daher wird im Folgenden auf diese Herausforderungen, die bei der Modellformulierung auftreten können, sowie die entsprechenden Möglichkeiten zur Erweiterung des Grundmodells eingegangen.

**Zielfunktion** Handelt es sich bei dem betrachteten Optimierungsproblem statt um ein Maximierungs- um ein Minimierungsproblem, so muss dieses in ein Maximierungsproblem überführt werden. Dies wird für jede beliebige Zielfunktion durch folgende Umformung erreicht (S. 90):

---

<sup>1</sup>In dieser Arbeit wird auf die genaue Beschreibung der Abläufe des Verfahrens verzichtet, da es insbesondere auch in entsprechenden Softwarelösungen implementiert ist. Weitere und konkrete Details zum Simplexverfahren finden sich bspw. in Neumann, Morlock ((2002/2004)) oder bei Werners (2008, S. 33-76).

$$\min_{x \in X} f(x) = - \max_{x \in X} -f(x) \quad (7.1)$$

Somit wird das bisherige Minimierungsmodell

$$\begin{aligned} \min z &= c^t x \\ \text{s. t. } Ax &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

in das folgende Maximierungsproblem überführt (S, 91):

$$\begin{aligned} \max -z &= -c^t x \\ \text{s. t. } Ax &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

**„Rechte Seiten“** Ist der Wert  $b_i < 0$  einer rechten Seite einer NB-Ungleichung, so erfolgt eine Multiplikation dieser gesamten Nebenbedingung mit -1. Durch diese Umformung kann allerdings eine neue Restriktion entstehen, welche ihrerseits wiederum nicht der kanonischen Form entspricht.

**Nebenbedingungen** Liegt unter den Nebenbedingungen mindestens eine „=-“ oder „≥“-Restriktion vor, so kann dieses Problem nicht durch einen einfachen Umformungsschritt behoben werden. Daher existieren für solche Fälle Methoden (bspw. die „Groß-M-“ und die „2-Phasen-Methode“ (vgl. S. 77-89)), mit denen eine zulässige Ausgangslösung ermittelt werden kann.

**Variablen** Sind die Wertebereiche der verwendeten Variablen unbeschränkt statt ausschließlich auf den positiven Bereich begrenzt oder sind negative Werte möglich, so können die folgenden Umwandlungen erfolgen: Für den Fall, dass der Definitionsbereich einer Variable mit  $x_i \leq 0$  definiert ist, erfolgt eine Substitution wie folgt (S. 96):

$$x_i = -x_i^-, \quad x_i^- \geq 0 \quad (7.2)$$

Für unbeschränkte Variablen wird derart vorgegangen, dass die Variable jedoch in einen positiven und negativen Teil zerlegt wird. Formal geschrieben ergibt sich somit (S. 93):

$$\begin{aligned} x_i &= x_i^+ - x_i^- \\ \text{mit } x_i^+ &= \max\{x_i, 0\} \geq 0 \\ x_i^- &= \max\{-x_i, 0\} \geq 0 \end{aligned}$$

Durch die geschilderten Vorgehensweisen wird es somit möglich, jedes lineare Optimierungsproblem (exakt) zu lösen.

### 7.1.3 Ganzzahlige lineare, dynamische sowie nichtlineare Optimierung

Nicht jedes reale Problem kann unter Zuhilfenahme eines linearen Programms dargestellt werden. Daher werden in den nun folgenden Abschnitten Möglichkeiten zur Optimierung (und Lösung) ganzzahlig linearer-, dynamischer-, oder nichtlinearer Probleme aufgezeigt.

**Ganzzahlige lineare Optimierung** Bei der ganzzahligen linearen Optimierung liegen zwar weiterhin ausschließlich lineare Zielfunktionen und Nebenbedingungen vor, jedoch werden hier auch binäre sowie ganzzahlige Variablen zugelassen. Verglichen mit der oben erläuterten Darstellung eines linearen Modells ändert sich folglich nur der Definitionsbereich der Variablen. Ein solches Optimierungsproblem könnte daher bspw. wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} \max z &= 8x_1 + x_2 \\ \text{s. t. } &5x_1 + x_2 \leq 10 \\ &x_1 \in \{0, 1\}; x_2 \geq 0 \text{ und ganzzahlig} \end{aligned}$$

Zur Gruppe dieser Probleme gehören bekannte Vertreter wie das „Traveling Salesman Problem“ oder das Rucksackproblem (Domschke and Drexl 2007, S. 122f) (einfache Seitenangaben beziehen sich auf dieselbe Quelle).

Hierunter gibt es eine Vielzahl an Problemen, für die speziell angepasste Lösungsverfahren entwickelt wurden. Bedingt durch die Verwendung ganzzahliger Variablen ist diese Art von Problemen aus Komplexitätstheoretischer Sicht NP-schwer, d. h. nicht in polynomieller Zeit lösbar. Somit erfordert ihre Lösung sogenannte „exakte Verfahren“ oder „Heuristiken“ (S. 127f). Lösungsverfahren, welche sicher in endlich vielen Schritten konvergieren, also eine optimale Lösung finden, sind sogenannte „exakte Verfahren“ (S. 127). Da allerdings für viele Fälle keine exakten Verfahren bekannt sind oder der Aufwand für deren Durchführung unverhältnismäßig hoch wäre, wird auf die exakte Lösung der Probleme verzichtet und mittels der sogenannten Heuristiken näherungsweise optimale Lösungen bestimmt.

**Exakte Verfahren** Exakte Lösungsverfahren können in drei Gruppen eingeteilt werden (S. 127f):

1. Entscheidungsbaumverfahren
2. Schnittebenenverfahren
3. Kombinationen aus a und b

Vertreter der Gruppe der Entscheidungsbaumverfahren sind bspw. die „vollständige Enumeration“, die „unvollständige Enumeration“ sowie „Verfahren der dynamischen Optimierung“. Wird das Verfahren der **vollständigen Enumeration** angewendet, so wird für jede mögliche Lösung der Zielfunktionswert errechnet, wobei der maximale Zielfunktionswert die optimale Lösung angibt. Sie sind daher aus laufzeittechnischer Sicht sehr langwierig. Bezogen auf das Laufzeitverhalten der vollständigen Enumeration kann die **unvollständige Enumeration** Abhilfe schaffen, deren populärster Vertreter das sogenannte **Branch-and-Bound-Verfahren** ist. Dieses Verfahren besteht aus den zwei Teilen „Branching“ und „Bounding“. Beim ersten Schritt, dem Branching, erfolgt eine Aufteilung des Ausgangsproblems in mehrere Teilprobleme. Hierbei ist unbedingt darauf zu achten, dass die Vereinigung der Lösungsmengen dieser Teilprobleme diejenige der Ausgangslösung ergibt (S. 133). Im anschließenden Schritt

des „Boundings“ erfolgt die Berechnung von Schranken für die Zielfunktionswerte, mit Hilfe derer der begrenzt und Entscheidungen über Verzweigungen getroffen werden können (S. 133). Mögliche Verfahren der dynamischen Optimierung werden im entsprechenden Abschnitt erläutert.

Eine andere Lösungsmöglichkeit besteht in der Anwendung des sogenannten **Schnittebenenverfahrens** (Cutting Plane Verfahren). Ziel hierbei ist es, durch Relaxation der Ganzzahligkeitsbedingung zwar eine optimale, jedoch meist nicht ganzzahlige Lösung des (entsprechenden, relaxierten) Problems zu ermitteln. Diese Lösung entspricht einer oberen Schranke des ganzzahligen Problems und kann in das Modell mittels einer zusätzlichen Nebenbedingung integriert werden. Dieses so entstandene, „neue“ Modell wird anschließend erneut und unter Weglassung der Ganzzahligkeitsbedingung gelöst. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis eine ganzzahlige Lösung gefunden wurde oder keine weitere Lösung mehr identifiziert werden kann. Das Schnittebenenverfahren kann dabei auch mit dem Entscheidungsbaumverfahren kombiniert werden. Ein Beispiel hierfür ist das Branch-and-Cut-Verfahren.

**Heuristiken** Die Heuristiken zur Lösung ganzzahlig linearer Optimierungsprobleme können in die folgenden Gruppen untergliedert werden (S. 128):

1. Eröffnungsverfahren
2. Lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren
3. Unvollständige exakte Verfahren
4. Kombinationen aus a - c

„**Eröffnungsverfahren** dienen der Bestimmung einer (ersten) zulässigen Lösung des betrachteten Problems“ (S. 129). Hierbei kann es sich um sogenannte „Greedy-Verfahren“ (sie versuchen, in jedem Verfahrensschritt eine größtmögliche Verbesserung zu erzielen), „vorausschauende Verfahren“ (diese berücksichtigen auch die nachfolgenden Schritte) oder „uninformierte Verfahren“ (mittels derer eine beliebige zulässige Lösung ermittelt wird) handeln (S. 129). **Lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren** gehen dabei so vor, dass ausgehend von einer Startlösung Lösungen aus der Nachbarschaft derselben betrachtet werden (S. 129). Mittels Trans-

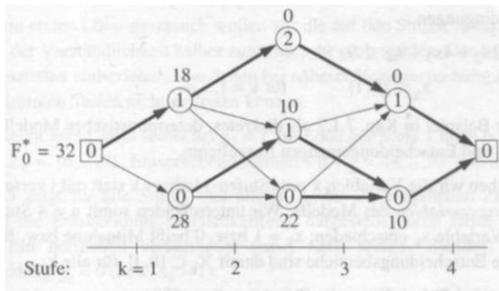
formationsvorschriften, bspw. das Vertauschen von Elementen einer Reihe, werden geringfügig unterschiedliche Lösungen und Zielfunktionswerte identifiziert (S. 129ff). **Unvollständige exakte Verfahren** schließlich sind solche, deren Anwendung vorzeitig beendet wird (S. 128).

**Dynamische Optimierung** Sind mehrere, voneinander abhängige Entscheidungen zur optimalen Lösung einer gegebenen Problemstellung erforderlich, so kommt die dynamische Optimierung zum Einsatz (S.159). Hierbei wird in mehreren Stufen sukzessive von den jeweiligen Entscheidungsalternativen eine Lösung ausgewählt (S. 159). Formal kann das dynamische Optimierungsproblems wie folgt dargestellt werden (S. 160):

$$\begin{aligned} \min F(x_1, \dots, x_n) &= \sum_{k=1}^n f_k(z_{k-1}, x_k) \\ \text{s. t. } z_k &= t_k(z_{k-1}, x_k), \quad k = 1, \dots, n \\ z_0 &= \alpha, \\ z_k &\in Z_k, \quad k = 1, \dots, n \\ x_k &\in X_k(z_{k-1}), \quad k = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Am Ende jeder der  $n$  Stufen wird jeweils der Zustand  $z_k$  aus der in dieser Stufe gültigen Zustandsmenge  $Z_k$  erreicht (S. 160). Das heißt, dass  $z_0$  dem Anfangszustand und  $Z_n$  der Menge der möglichen Endzustände entspricht (S. 160). Dabei gilt, dass die erreichten Zustände von der gewählten Entscheidungsvariable  $x_k$  aus der in dieser Stufe geltenden Entscheidungsmenge  $X_k(z_{k-1})$  abhängen (S. 160). Abschließend wird mittels der Transformationsfunktion  $t_k(z_{k-1}, x_k)$  festgelegt, in welchen Zustand in der Stufe  $k$  übergegangen wird. Die stufenbezogene Zielfunktion  $f_k(z_{k-1}, x_k)$  berechnet dabei den jeweiligen entsprechenden Zielfunktionswert (S. 160). Diese Zielfunktion verdeutlicht die wesentliche Eigenschaft dynamischer Probleme, dass die stufenbezogenen Zielfunktionen stets nur von der vorigen Stufe abhängig sind - und nicht von den anderen Stufen davor oder danach (S. 160). Zur Lösung des dynamischen Optimierungsproblems kann die sogenannte „Rückwärtsrekursion“ als Lösungsverfahren verwendet werden, falls das Modell diskret sowie deterministisch ist<sup>2</sup> (S. 162ff). Die der Rückwärtsrekursion zugrundeliegende Idee ist, angefangen

<sup>2</sup>Das bedeutet, dass die Zustandsänderungen (ausschließlich) zu diskreten Zeitpunkten stattfinden und die Störgrößen in jeder Stufe einen exakten Wert annehmen.



**Abbildung 7.2:** Beispiel einer Rückwärtsrekursion (Domschke und Drexel 2007, S. 167)

von den Endzuständen genau die Entscheidungen der Vorstufe, die in den bestmöglichen Folgezustand führen, zu markieren. Dies wird von Stufe zu Stufe rückwärtsgehend wiederholt, bis schließlich der Anfangszustand erreicht ist. Von diesem können somit die auf jeder Stufe zu treffenden optimalen Entscheidungen abgelesen werden, die zu dem bestmöglichen Endzustand führen. Dieses Verfahren ist in der folgenden Abbildung 7.2 schematisch dargestellt. Weitergehende Literatur zur exakten Ausführung der Rückwärtsrekursion findet sich bspw. in (Domschke und Drexel 2007, S.164ff).

**Nichtlineare Optimierung** Charakteristisch für nichtlineare Optimierungsprobleme ist, dass eine nichtlineare Zielfunktion und/oder mindestens eine nichtlineare Nebenbedingung vorliegt (S. 177). Dabei wird im Allgemeinen von positiven, reellwertigen Variablen ausgegangen. Somit kann das nichtlineare Optimierungsproblem wie folgt formal notiert werden (S. 177):

$$\begin{aligned} & \max F(x) \\ & \text{s. t. } g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & \quad x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

---

Eine solche Störgröße kann bspw. die Nachfrage in den verschiedenen Stufen eines Bestellmengenmodells sein.

Im Gegensatz zur linearen Optimierung existiert hier kein universelles Lösungsverfahren wie bspw. der Simplex-Algorithmus. Dies hat zur Folge, dass für die unterschiedlichen Problemtypen (bspw. ausschließlich nicht-lineare Zielfunktion ohne Nebenbedingungen oder eine quadratische Zielfunktion bei linearen NB, ... (S. 176)), spezielle Verfahren Verwendung finden (S. 176)<sup>3</sup>.

## 7.2 Entscheidungstheorie

Wie der Titel dieser Arbeit bereits besagt, beschäftigt sie sich mit der Entscheidung über den zu verwendenden Behälter. Da es in der Wissenschaft eine eigene Disziplin gibt, die sich mit solchen Ereignissen beschäftigt, wird diese hier näher beleuchtet: die **Entscheidungstheorie**.

### 7.2.1 Definition

Auf dem Gebiet der Entscheidungstheorie gibt es zwei Felder: die deskriptive sowie die präskriptive (bzw. normative) Entscheidungstheorie (Laux 2007, S. 1f) (einfache Seitenangaben im Folgenden beziehen sich auf dieselbe Quelle):

- „Die deskriptive Entscheidungstheorie will beschreiben, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden, und erklären, warum sie gerade so und nicht anders zustande kommen“ (S. 2).
- „Die präskriptive Entscheidungstheorie will Ratschläge für die Lösung von Entscheidungsproblemen erteilen, also Antwort geben auf die Frage, was ein Entscheider in unterschiedlichen Entscheidungssituationen tun soll“ (S. 2).

---

<sup>3</sup>Da spezielle Fälle spezielle Verfahren erfordern, wird auf die ausführliche Beschreibung der Lösungsverfahren verzichtet. Details hierzu finden sich bspw. in (Domshke und Drexel 2007, S. 176 - 211).

Aus diesen Definitionen wird ersichtlich, dass für die Auswahl des optimalen Behälters lediglich die präskriptive bzw. normative Entscheidungstheorie von Bedeutung ist. Folglich wird nur diese im Folgenden genauer erläutert.

## 7.2.2 Grundlagen der Entscheidungstheorie

In den nun folgenden Unterabschnitten werden die Grundlagen der Entscheidungstheorie in drei Schritten dargestellt, angefangen mit dem Grundmodell der Entscheidungstheorie, mit dem die Grundstruktur jeder Entscheidungssituation erklärt wird. Danach werden Erweiterungen des Grundmodells auf mehrere Zielgrößen und deren Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung dargestellt sowie abschließend die unterschiedlichen Ausprägungen der Zielfunktion betrachtet.

**Das Grundmodell der Entscheidungstheorie** Basis und einheitlicher Bezugsrahmen aller Entscheidungssituationen ist das Grundmodell der Entscheidungstheorie (S. 42). Im Wesentlichen besteht die Modellgrundstruktur aus der Ergebnismatrix sowie der Zielfunktion (S. 34f).

**Ergebnismatrix** In der Vorspalte stellt die Ergebnismatrix (s. Abbildung 7.3) sämtliche Entscheidungsalternativen ( $A_1, A_2, \dots, A_A$ ) sowie in der Kopfzeile die entscheidenden Umweltzustände ( $S_1, S_2, \dots, S_S$ ), welche Einfluss auf das Ergebnis haben und eintreten können (S. 35), dar.

Bei den Elementen  $E_{as}$  ( $a = 1, 2, \dots, A; s = 1, 2, \dots, S$ ) handelt es sich dabei um die Ergebnisse, die bei der gewählten Alternative  $A_a$  und dem eintretenden Umweltzustand  $S_s$  eintreten (S. 35). Sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Umweltzustände bekannt, so werden diese zusätzlich in der Kopfzeile über den jeweiligen Umweltzuständen  $S_s$  angegeben (S. 35). Die obige Abbildung zeigt diese in Form der  $w(S_1), w(S_2), \dots, w(S_S)$ . Trivialerweise muss gelten, dass  $w(S_1) + w(S_2) + \dots + w(S_S) = 1$  ist, wenn sämtliche Umweltzustände aufgelistet werden.

	$w(S_1)$ $S_1$	$w(S_2)$ $S_2$	...	$w(S_s)$ $S_s$	...	$w(S_S)$ $S_S$
$A_1$	$E_{11}$	$E_{12}$	...	$E_{1s}$	...	$E_{1S}$
$A_2$	$E_{21}$	$E_{22}$	...	$E_{2s}$	...	$E_{2S}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_a$	$E_{a1}$	$E_{a2}$	...	$E_{as}$	...	$E_{aS}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_A$	$E_{A1}$	$E_{A2}$	...	$E_{As}$	...	$E_{AS}$

**Abbildung 7.3:** Ergebnismatrix bei Risiko (Laux 2007, S. 65).

**Zielfunktion** Das Grundmodell der Entscheidungstheorie wird durch die Zielfunktion vervollständigt, da diese die Entscheidungsfindung zwischen den möglichen Handlungsalternativen erst ermöglicht (S. 41). Dabei muss der Entscheider in vielen Fällen diese nicht explizit angeben. Es ist in diesen Fällen ausreichend, die Alternative, die das beste Ergebnis liefert, auszuwählen (S. 41). Allerdings ist das Modell erst mit eben dieser Zielfunktion vollständig (S. 41). Auf die formale Darstellung dieser Zielfunktion wird in Abschnitt „**Zielfunktion**“ näher eingegangen.

**Zielgrößen** Entscheidungsmodelle können durchaus mehrere zu berücksichtigende Zielgrößen beinhalten. Diese Erweiterung ist sehr sinnvoll, da reale Entscheidungen meist auch nicht nur von einer Variablen abhängig sind. Darüber hinaus wird in den folgenden Abschnitten zunächst davon ausgegangen, dass der Entscheider mit Sicherheit die erwarteten Umweltzustände voraussagen kann ( $\Rightarrow$  Entscheidung bei Sicherheit). Diese Annahme, dass die Umweltzustände mit Sicherheit vorhersagbar sind, ist zwar nicht realistisch, „dennoch haben Entscheidungsmodelle bei Sicherheit große theoretische und praktische Bedeutung“ (S. 63). Üblicherweise wird eine solche Entscheidungssituation mittels einer sogenannten „Zielgrößenmatrix“ dargestellt (S. 64).  $Z_{az}$  ( $a = 1, 2, \dots, A$ ;  $z = 1, 2, \dots, Z$ ) bezeichnet die Ergebnisse bezüglich der verschiedenen Zielgrößen  $Z_z$  ( $z = 1, 2, \dots, Z$ ) bei Wahl der Alternative  $A_a$  ( $a = 1, 2, \dots, A$ ) (S. 65). Die folgende Abbildung 7.4 stellt eine Darstellung der Zielgrößenmatrix bei sicheren Erwartungen dar.

	$Z_1$	$Z_2$	...	$Z_z$	...	$Z_Z$
$A_1$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	...	$Z_{1z}$	...	$Z_{1Z}$
$A_2$	$Z_{21}$	$Z_{22}$	...	$Z_{2z}$	...	$Z_{2Z}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_n$	$Z_{n1}$	$Z_{n2}$	...	$Z_{nz}$	...	$Z_{nZ}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_A$	$Z_{A1}$	$Z_{A2}$	...	$Z_{Az}$	...	$Z_{AZ}$

**Abbildung 7.4:** Zielgrößenmatrix bei sicheren Erwartungen (Laux 2007, S. 65)

Der Einfluss der einzelnen Zielgrößen auf die Entscheidungsfindung wird dabei von den Beziehungen (Neutralität, Komplementarität oder Konkurrenz) zwischen den einzelnen Zielgrößen bestimmt (S. 67):

1. **Neutralität** liegt genau dann vor, wenn Maßnahmen eine einzelne Zielgröße verbessern, aber die anderen unberührt lassen.
2. Von **Komplementarität** wird gesprochen, wenn Maßnahmen eine Zielgröße verbessern und gleichzeitig auch zu Verbesserungen der anderen führen.
3. **Konkurrenz** hingegen liegt dann vor, wenn Maßnahmen zwar eine einzelne Zielgröße verbessern, gleichzeitig jedoch zu Verschlechterungen bei den anderen führen.

Herrscht unter allen zu betrachtenden Zielgrößen Neutralität (das entspricht vollständiger Zielneutralität), so kann jede Zielgröße einzeln für sich optimiert werden (S. 67). Liegt vollständige Zielkomplementarität vor, so ist die Optimierung einer einzelnen Zielgröße ausreichend, da somit auch die restlichen Zielgrößen optimiert werden (S. 68). Konkurrenz unter allen Zielgrößen führt schließlich dazu, dass die Optimierung einer Zielgröße eine Verschlechterung der anderen Zielgrößen (S. 68) zur Folge hat. In der Realität ist allerdings eine Mischung der drei Abhängigkeiten zu erwarten, wobei meistens Konkurrenz zwischen den Zielgrößen festgestellt werden kann.

**Zielfunktion** Zur Findung einer optimalen Lösung, bei gleichzeitigem Vorliegen mehrerer Zielgrößen, ist die Formulierung mathematischer Entscheidungsmodelle erforderlich. Hierbei spiegelt die Zielfunktion die Zielvorstellungen des Entscheiders wider. Diese wird, sofern ein Entscheidungsproblem bei Sicherheit vorliegt, über eine Nutzenfunktion für die jeweiligen Ergebnisse abgebildet (S. 89). Sofern jeder möglichen Kombination an Zielgrößen  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_Z)$  ein Nutzenwert  $U(Z_1, Z_2, \dots, Z_Z)$  zugeordnet ist, kann eine Nutzenfunktion jedoch nur numerisch dargestellt werden (S. 92). Daneben müssen zwischen zwei verschiedenen Ergebnissen  $E^* = (Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_Z^*)$  und  $E^{**} = (Z_1^{**}, Z_2^{**}, \dots, Z_Z^{**})$  die folgenden drei Bedingungen erfüllt sein (S. 92):

$$\begin{aligned} [E^* \succ E^{**}] &\Leftrightarrow [U(E^*) > U(E^{**})] \\ [E^* \approx E^{**}] &\Leftrightarrow [U(E^*) = U(E^{**})] \\ [E^* \prec E^{**}] &\Leftrightarrow [U(E^*) < U(E^{**})] \end{aligned}$$

Sind diese Bedingungen erfüllt, entspricht die Maximierung des Nutzens damit der Bestimmung der optimalen Entscheidung und somit der Zielfunktion (S. 92):

$$\max U(Z_1, Z_2, \dots, Z_Z) \quad (7.3)$$

Häufig treten jedoch bei der Bestimmung der korrekten Nutzenfunktion bzw. bei der Findung einer optimalen Lösung Probleme auf oder es ist hierfür ein hoher Aufwand erforderlich. Daher wurden Ersatzkriterien zur Entscheidungsunterstützung definiert (S. 95). Werden diese Ersatzkriterien eingesetzt, so wird damit das Aufstellen der Zielfunktion erleichtert. Exemplarisch werden hiervon die Ersatzkriterien „Zielunterdrückung“, „Lexikographische Ordnung“, „Effizienzkriterium“, „Maximierung einer Zielgröße bei gegebenen Anspruchsniveaus für die anderen“ sowie „Zielgewichtung“ vorgestellt.

**Zielunterdrückung** Zielunterdrückung bedeutet, dass die Maximierung auf eine Zielgröße  $Z^*$  begrenzt wird, die restlichen Zielgrößen jedoch ignoriert werden (S. 95). Ist bspw. eine der Zielgrößen besonders wichtig und weisen die anderen bei allen Ergebnissen etwa dasselbe Niveau auf, bietet

sich dieses Vorgehen an. Es ergibt sich somit die vereinfachte Zielfunktion (S. 95):

$$\max Z_{z^*} \quad (7.4)$$

**Lexikographische Ordnung:** Findet das Ersatzkriterium „Lexikographische Ordnung“ Anwendung, so folgt daraus, dass in einem ersten Schritt nur die wichtigste Zielgröße maximiert wird. Sind danach mehrere Alternativen gleich gut, so wird anschließend die zweitwichtigste Zielgröße maximiert usw., bis eine eindeutige Lösung gefunden wurde (S. 96). Hierbei ist zu beachten, dass der optimale Wert der wichtigsten Zielgröße nicht unterschritten werden darf (S. 96).

**Effizienzkriterium:** Bei diesem Ersatzkriterium handelt es sich um ein zweistufiges Auswahlverfahren: Im ersten Schritt werden sämtliche effiziente Lösungen bestimmt (S. 97). Dabei ist eine Lösung genau dann effizient, wenn es keine andere Lösung gibt, die bezüglich aller Zielgrößen mindestens ebenso gut, allerdings bezüglich mindestens einer besser ist. Im zweiten Schritt erfolgt anschließend die Auswahl einer Lösung aus der Menge der ermittelten effizienten Lösungen (S. 97).

**Maximierung einer Zielgröße bei gegebenen Anspruchsniveaus für die anderen:** Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung des Ersatzkriteriums Zielunterdrückung, da auch hier die Maximierung auf eine Zielgröße reduziert wird (S. 99), wobei allerdings auch die restlichen Zielgrößen in die Optimierung mit einfließen. Hierzu wird für jede Zielgröße ein Anspruchsniveau bestimmt, welches nicht unterschritten werden darf (S. 99). Dies stellt auch die zentrale Herausforderung bei Anwendung dieses Ersatzkriteriums dar, da durch diese Festlegung indirekt die Gewichtung der Zielgrößen beeinflusst bzw. gesteuert wird. In diesem Falle lautet die Zielfunktion somit wie folgt (S. 99):

$$\max Z_{z^*} \\ Z_z \geq \bar{Z}_z \quad \forall z \in \{1, 2, \dots, Z\} ; z \neq z^*$$

**Zielgewichtung:** Die Methode Zielgewichtung stellt einen simplen Ansatz dar, bei dem ausschließlich die gewichtete Summe der Zielgrößen maximiert wird (S. 101), wobei auch hier die Herausforderung bei der Festlegung der Gewichtungen liegt. Es ergibt sich die folgende Zielfunktion (S. 101):

$$\max \sum_{z=1}^Z a_z * Z_z \quad , \quad a_z > 0 \quad \forall z \in \{1, 2, \dots, Z\} \quad (7.5)$$

### 7.2.3 Entscheidungskriterien

Bezüglich der Entscheidungsfindung bei nicht sicherem Eintreten der Ereignisse werden in der Entscheidungstheorie zwei Fälle unterschieden: Entscheidungen bei Unsicherheit sowie Entscheidungen bei Risiko. Bei diesen Fällen werden Entscheidungskriterien zur Entscheidungsunterstützung herangezogen. Der Abschnitt „**Entscheidung bei Unsicherheit**“ behandelt eben diese Entscheidungskriterien bei Unsicherheit, der Abschnitt „**Entscheidung im Risikofall**“ stellt die Entscheidungskriterien im Risikofall vor.

**Entscheidungsfindung bei Unsicherheit** Im Gegensatz zu den oben geschilderten Situationen bei vollständiger Sicherheit kann über das Eintreten der Ereignisse in der Realität kein zukünftiger Umweltzustand mit Sicherheit vorausgesagt werden. Aus diesem Grund werden nun die Möglichkeiten zur Entscheidungsfindung bei Unsicherheit vorgestellt. Hierbei gilt, dass über die zukünftigen Umweltzustände keinerlei Informationen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit bekannt sind (im Gegensatz zu der weiter unten vorgestellten Entscheidungsfindung bei Risiko). Daher ist es erforderlich, die Entscheidungskriterien bei Unsicherheit zu identifizieren. Bevor dies geschieht, wird jedoch in einem ersten Schritt das sogenannte **Dominanzprinzip** verwendet: Liefert eine Alternative unabhängig vom eintretenden Umweltzustand stets ein besseres Ergebnis, so ist sie dominant (S. 105). Existiert eine solche Alternative, so wird diese direkt ausgewählt. Existiert jedoch keine solche Alternative, so die beste Alternative durch den Einsatz eines Entscheidungskriteriums ermittelt, von denen einige wesentliche im Folgenden exemplarisch vorgestellt werden.

**Maximin-Regel** Mittels der Maximin-Regel wird die Alternative gewählt, welche den höchsten Mindesterfolg gewährt (S. 107). Diese Herangehensweise ist somit eine pessimistische, da mit dem schlechtesten Umweltzustand (und somit quasi Ausgang) gerechnet wird. Diese Regel kann formal wie folgt geschrieben werden (S. 107):

$$\max_a \min_s Z_{as} \quad (7.6)$$

**Maximax-Regel** Im Gegensatz zur Maximin-Regel stellt die Maximax-Regel eine optimistische Vorgehensweise dar, da diejenige Alternative ausgewählt wird, die den größten Maximalerfolg ermöglicht (S. 109). Somit ergibt sich hier die folgende Zielfunktion (S. 109):

$$\max_a \max_s Z_{as} \quad (7.7)$$

**Hurwicz-Prinzip** Da für eine Entscheidungsfindung nicht unbedingt die Extreme sinnvoll sind, stellt das Hurwicz-Prinzip<sup>4</sup> eine Kombination der Maximin- sowie der Maximax-Regel dar. Hier wird für jede Alternative ein gewogener Durchschnitt aus dem Mindest- und dem Maximalerfolg berechnet. Dabei ist diejenige Alternative auszuwählen, die den höchsten gewogenen Durchschnitt aufweist (S. 110). Die Zielfunktion des Hurwicz-Prinzip ist somit (S. 110):

$$\max_a \alpha * \max_s Z_{as} + (1 - \alpha) * \min_s Z_{as} \text{ mit } \alpha \in [0, 1] \quad (7.8)$$

---

<sup>4</sup>Es wird als Prinzip bezeichnet, da der Gewichtungsfaktor variabel ist. Somit bleibt die exakte Form der Präferenzfunktion offen (S. 110).

**Niehans-Savage-Regel** Die Niehans-Savage-Regel hat zum Ziel, das „größte Bedauern“ („max. regret“) zu minimieren. Hierzu wird für alle Alternativen  $A_{a^*}$  für jeden Umweltzustand  $S_s$  die Differenz zwischen dem maximal bei diesem Umweltzustand erreichbaren Wert und dem, der mit der betrachteten Alternative erreicht wird, berechnet (S. 112):

$$B_{a^*} = \max_a Z_{as} - Z_{a^*s} \quad (7.9)$$

Nachdem alle möglichen Differenzen berechnet wurden, wird für jede Alternative die maximale Differenz, sprich das mit dieser Alternative verbundene „größte Bedauern“, bestimmt. Ausgewählt wird anschließend diejenige Alternative mit dem niedrigsten Bedauernswert (S. 112):

$$\min_a \max_s B_{as} \quad (7.10)$$

**Laplace-Regel** Bei Anwendung der Laplace-Regel wird für jede Alternative die Summe der erreichbaren Ergebnisse gebildet und diese Summe durch die Anzahl der möglichen Umweltzustände dividiert (S. 115). Die Zielfunktion lautet daher (S. 115):

$$\max \frac{1}{S} * \sum_{s=1}^S Z_{as} \quad (7.11)$$

Diejenige Alternative, welche den höchsten Wert besitzt, wird ausgewählt (S. 115). Diese Entscheidungsregel impliziert, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes Umweltzustands genau gleich groß ist.

**Entscheidungsfindung im Risikofall** Auf Grundlage der oben erläuterten Entscheidungskriterien bei Unsicherheit werden in diesem Abschnitt Entscheidungskriterien im Risikofall aufgezeigt. Diese Betrachtung wird den Situationen in der Realität durch Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Umweltzustände am gerechtesten. Zuerst wird auch hier das Dominanzkriterium überprüft. Es ist allerdings anzumerken, dass in den wenigsten Fällen eine Alternative dominant ist.

Im Folgenden werden mögliche Entscheidungskriterien erläutert. Die prominentesten hierunter sind die  $\mu$ -Regel, das  $(\mu, \sigma)$ -Prinzip sowie das Bernoulli-Prinzip.

**Die  $\mu$ -Regel** Hierbei handelt es sich wohl um die bekannteste Entscheidungsregel. Für jede Alternative wird der Erwartungswert bestimmt und anschließend diejenige mit dem höchsten Wert ausgewählt (S. 146). Somit lautet die Zielfunktion (S. 146):

$$\max_a \sum_{s=1}^S w(S_s) * Z_{as} \quad (7.12)$$

Diese Regel liefert allerdings nicht unbedingt das beste Ergebnis, da der Erwartungswert das einzige Auswahlkriterium ist, eine Risikobetrachtung der einzelnen Alternativen aber ausbleibt (S.147ff). Dieses Risiko kann erst vernachlässigt werden, wenn die Entscheidung hinreichend oft wiederholt wird (vgl. „Gesetz der großen Zahlen“) (S. 147ff).

**Das  $(\mu, \sigma)$ -Prinzip** Das  $(\mu, \sigma)$ -Prinzip behebt diese Schwäche der  $\mu$ -Regel dadurch, dass in den Prozess der Entscheidungsfindung eine Risikobetrachtung mit einbezogen wird, dass also zusätzlich zur Bewertung des Erwartungswertes auch die Standardabweichung betrachtet wird (S. 155f). Auch hierbei handelt es sich um ein Prinzip, da keine exakte Ausformulierung der Zielfunktion existiert. Die Entscheidung ist vom Verhältnis des Entscheiders zum Risiko abhängig (S. 156). Das heißt, dass bei Risikoaversion eine andere  $(\mu, \sigma)$ -Regel vorgefunden wird, als bei Risikofreude (S. 156). Formal kann das  $(\mu, \sigma)$ -Prinzip mittels einer Präferenzfunktion abgebildet werden (S. 155):

$$\Phi(\tilde{Z}) = \Phi(\mu, \sigma) \quad (7.13)$$

	$w(S_1)$ $S_1$	$w(S_2)$ $S_2$	...	$w(S_S)$ $S_S$	Nutzererwartungswerte
$A_1$	$U(E_{11})$	$U(E_{12})$	...	$U(E_{1S})$	$\sum_{s=1}^S w(S_s) \cdot U(E_{1s})$
$A_2$	$U(E_{21})$	$U(E_{22})$	...	$U(E_{2S})$	$\sum_{s=1}^S w(S_s) \cdot U(E_{2s})$
$A_A$	$U(E_{A1})$	$U(E_{A2})$	...	$U(E_{AS})$	$\sum_{s=1}^S w(S_s) \cdot U(E_{As})$

**Abbildung 7.5:** Entscheidungsmatrix der Bernoulli-Regel (Laux 2007, S. 166)

Hervorzuemerken ist, dass auch unterschiedliche Verteilungen zu einer identischen  $(\mu, \sigma)$ -Kombination zugeordnet werden können. Darüber hinaus konnte gezeigt werden (auf den genauen Beweis wird hier jedoch verzichtet), dass in wenigen Situationen „die Befolgung des  $(\mu, \sigma)$ -Prinzips zu einem Verstoß gegen das Dominanzprinzip führt“ (S.163).

**Bernoulli-Regel** Bei diesem Prinzip handelt es sich um ein zweistufiges Entscheidungskriterium. Im ersten Schritt wird mittels einer Nutzenfunktion jedem Ergebnis  $E_{as}$  der Ergebnismatrix ein Nutzenwert  $U(E_{as})$  zugeordnet (s. Abbildung 7.5) (S. 164). Im folgenden Schritt wird der „Nutzererwartungswert“ jeder Alternative bestimmt. Anschließend wird die Alternative mit dem höchsten Wert ausgewählt (S. 164f). Somit lautet die Zielfunktion (S. 165):

$$\max_a \sum_{s=1}^S w(S_s) * U(E_{as}) \quad (7.14)$$

Die resultierende Entscheidungsmatrix ist in der folgenden Abbildung 7.5 dargestellt.

Da die Nutzenfunktion subjektiv ist, kann die Zielfunktion verschiedene Darstellungen annehmen. Am Bernoulli-Prinzip ist zu kritisieren, dass das „reale“ Verhalten durchaus dem Bernoulli-Prinzip widersprechen kann (S. 197). Dies wurde in einem Wahlexperiment gezeigt (S. 197f).

Zusammenfassend kann somit für alle Entscheidungsfindungen, ob nun bei Unsicherheit oder bei Risiko, gesagt werden, dass die Betrachtungen auf mehrere Zielgrößen ausgedehnt werden können.

## 7.2.4 Mögliche Vereinfachungen der Entscheidungsfindung

Aus den obigen Ausführungen wird deutlich, dass ein vollständiges Entscheidungsmodell lediglich ein theoretisches Konstrukt ist. Daher stellt sich in der Entscheidungstheorie „nicht das Problem, ob vereinfacht werden soll, sondern wie die Modellvereinfachung vorgenommen werden soll“ (S. 376). Möglich sind Vereinfachungen bspw. bezüglich der Erfassung von Alternativen und Zuständen, der Wahrscheinlichkeiten sowie der Nutzenfunktion. Meistens handelt es sich hierbei um das Vernachlässigen von Teilmengen von Zuständen, die Bildung von Mittelwerten für dieselben oder es erfolgen grobe Ergebnis- oder Nutzenfunktionsschätzungen (S. 379ff)<sup>5</sup>.

## 7.3 Erweiterung des Modells zu einem Optimierungsmodell

Wie in den obigen Abschnitten gezeigt, bietet das Gebiet des Operations Research eine Fülle an Möglichkeiten zur Modellierung und zur Lösung dieser Modelle. Da das in dieser Arbeit entwickelte Kostenmodell linearer Natur ist und sich im Praxiseinsatz als anwendbar gezeigt hat, bietet sich eine Formulierung als lineares Optimierungsproblem an. Das Ziel ist es, die Gesamtkosten zu minimieren (diese sind über die TCO-Betrachtung bekannt), dabei jedoch die gegebenen Nebenbedingungen am Band einzuhalten. Zur Auswahl stehen hier die unterschiedlichen Behältertypen, die betrachtet werden sollen. Somit ergibt sich das folgende Optimierungsmodell, das bei Bedarf um weitere Nebenbedingungen erweitert werden kann, und das garantiert, dass alle Bedingungen erfüllt sind:

$$\begin{aligned}
 \min z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n TCO_{i,j} x_{i,j} \\
 \text{s. t. } &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} A_j \leq A \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \\
 &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} l_j \leq L \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \\
 &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} h_j \leq H \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n
 \end{aligned}$$

<sup>5</sup>Weitergehende Details finden sich in den genannten Werken. Sie werden hier jedoch nicht näher erläutert.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} d_j \leq D \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\}$$

$i$  = Menge der zu betrachtenden  $m$  Teile

$j$  = Menge der zu betrachtenden  $n$  Behälter

$A_j$  = Grundfläche des Behälters

$l_j$  = Länge des Behälters

$h_j$  = Höhe des Behälters

$d_j$  = Tiefe des Behälters

Hierbei besagt die...

1. Zielfunktion, dass die Gesamtkosten durch die Behälterauswahl minimiert werden,
2. Nebenbedingung 1, dass der verfügbare Platz  $A$  (=Fläche) am Band nicht überschritten wird,
3. Nebenbedingung 2, dass die verfügbare Länge am Band nicht überschritten wird,
4. Nebenbedingung 3, dass die verfügbare Höhe am Band nicht überschritten wird,
5. Nebenbedingung 4, dass die verfügbare Tiefe am Band nicht überschritten wird,
6. Nebenbedingung 5, dass für jedes zu betrachtende Teil genau ein Behältertyp verwendet wird,
7. Nebenbedingung 6, dass Behälter  $j$  für das Teil  $i$  verwendet wird (1), oder nicht (0).

Anhand dieses Modells ist es möglich, ein gesamtes Behälterspektrum auf ein mal zu betrachten und eine gültige, kostenoptimale Lösung zu finden. Dieses Modell kann leicht durch Hinzufügen oder Weglassen von Nebenbedingungen angepasst werden.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

Keine Produktion ohne Material, kein Material ohne Transporte. Effiziente Materialflüsse in den richtigen Behältern, die richtigen Bestände an den richtigen Stellen sowie funktionierende, robuste und effiziente Supply Chains sind für das Wohlergehen eines Unternehmens von entscheidender Bedeutung, gerade in Zeiten steigender Energie- und Rohstoffpreise. Insbesondere der „Lean-Gedanke“ zielt auf die Vermeidung von Verschwendung. Auch wenn ein einzelner Behälter nicht der ausschlaggebende Kostentreiber eines Unternehmens ist, so ist ihr Wert in Summe und über das ganze Unternehmen betrachtet doch nicht zu vernachlässigen. Darüber hinaus spielen Behälter sowie Ladungsträger im Allgemeinen zur Bereitstellung in der Montage eine wichtige Rolle. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Festlegung auf einen Behälter häufig ohne Berücksichtigung der durch die Behältergröße beeinflussbaren Faktoren erfolgt. So werden selbstverständlich die Abmessungen des Teils selbst und möglicherweise auch Verbrauchsdaten zur Bestimmung herangezogen. Eine Betrachtung aller beeinflussbaren Faktoren und Kosten bleibt aber aus.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die bei der Bestimmung des (kosten-)optimalen Behälters verwendeten Verfahren unzureichend sind. Ein Blick in aktuelle Forschungstätigkeiten und Literatur zeigte, dass diesem Aspekt zwar mehr und mehr Betrachtung gewidmet wird. Über die eigentliche Auswahl oder die hierfür relevanten Faktoren gibt es jedoch keine konkreten Aussagen. Es wird zwar aufgezählt, was alles zu beachten ist, allerdings nicht konkretisiert. Insbesondere im Bereich der Verpackungsl Logistik gibt es vielversprechende Ansätze, jedoch können diese nicht direkt übertragen werden, da sie einen anderen Fokus haben. Doch nicht nur in der Forschung, auch in der Praxis existiert eine wichtige Lücke, die es zu schließen gilt, wie Untersuchungen bei Unternehmen zeigten.

Darüber hinaus zeigte sich, dass insbesondere in Montage-, aber auch in Fertigungswerken, standardisierte Behälter nach VDA-Empfehlung eingesetzt werden. Mittels dieser wird ein großer Anteil der benötigten Artikel angeliefert. Daher dienen sie für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit als die zu betrachtende Alternativenmenge. Denn auch hier erfolgt die Auswahl nur anhand zu weniger Kriterien. Diese Tatsachen zeigen eindeutig den Bedarf nach einer Kosten und Nutzen umfassenden Methodik zur Auswahl des bestgeeignetsten Behälters.

In einem ersten Schritt wurden daher die relevanten Faktoren, die bei der Ladungsträgerauswahl von entscheidender Bedeutung sind, ermittelt. Dies gelang zum einen durch eine Literaturrecherche sowie durch einfache Überlegungen. Zum anderen wurde auch eine Expertenbefragung durchgeführt. Auch wenn diese auf eine geringe Grundgesamtheit beschränkt ist, wird sie dennoch als weitere Grundlage verwendet, da die Befragten alle in den Prozess Ladungsträgerplanung und -auswahl eingebunden sind oder dies zumindest waren. Diese Befragung führte zu wesentlichen Erkenntnissen: Es konnte gezeigt werden, dass bei der Auswahl des richtigen Ladungsträgers nicht nur die Kosten und quantifizierbare Faktoren, sondern insbesondere auch qualitative Nutzenfaktoren berücksichtigt werden müssen. Diese werden von den Experten sogar wichtiger eingestuft als die Kostenaspekte. Die Befragung konnte ebenso zeigen, dass die Nutzenfaktoren zumindest als (nicht ausreichende) Rahmenbedingungen bereits heute berücksichtigt werden, jedoch überraschenderweise dies nicht für die ermittelten Kostenfaktoren gilt. Somit belegt auch diese Befragung, dass eine umfassende Methodik bei der Behälterauswahl essentiell, jedoch den Befragten heute noch unbekannt ist. Gleichzeitig konnten so die relevanten Faktoren ermittelt werden. Diese in einem Modell abzubildenden Kostenfaktoren sind:

- Ladungsträgerkosten
- Personalkosten
- Betriebsmittelkosten
- Transportkosten
- Raum- und Flächenkosten
- Bestandskosten

- Fremdleistungskosten

Bei den zu betrachtenden Nutzenaspekten handelt es sich dabei um die folgenden:

- Qualität (Vermeidung von Beschädigung)
- Ergonomie
- Flexibilität (Umstellung der Produktion)
- Flexibilität (verschiedene Teile/Produkte)
- Lebensdauer der LT
- Vermeidung von nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten am Verbaort
- Identifikation (der LT)

Nachdem mit diesen Untersuchungen gezeigt werden konnte, dass die Notwendigkeit eines neuen Modells besteht sowie gleichzeitig die zu modellierenden Parameter identifiziert wurden, wurde anhand einer umfassenden Recherche (s. zum Teil im Anhang) die geeignete Modellierungsmöglichkeit ausgewählt. Hierzu wurden der Analytic Hierarchy Process, die TCO-Methode sowie Methoden und Verfahren des Operations Research und der (allgemeinen) Entscheidungstheorie vorgestellt und erklärt. Weitere Methoden finden sich im Anhang. Diese zeigten die Schwächen der einzelnen Methoden, insbesondere der Subjektivität bei den Verfahren mit „qualitativem“ Hintergrund, auf. Entsprechend der Ergebnisse der Expertenbefragung müssen jedoch auch diese abgebildet werden. Aus diesem Grund wurde bei der Erstellung des neuen, umfassenden Modells zur Behälterauswahl darauf geachtet, die Subjektivität so gering wie möglich zu halten.

Mit diesen Grundlagen gelang es anschließend, das Modell zu „synthetisieren“. Hier wurde eine zweigeteilte Vorgehensweise gewählt, die Nutzen und Kosten separat und unverfälscht betrachtet. Diese ermöglicht auch, sollte dies erwünscht sein, die Ladungsträgerauswahl nur auf eine reine Kosten- oder Nutzenbetrachtung zu beschränken. Außerdem werden so die jeweiligen Einflüsse besser ersichtlicher.

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und des umfassenden Grundgedankens wurde für die **Kostenbetrachtung** die Vorgehensweise anhand des **TCO-Verfahrens**, erweitert um einen Prozesskostenansatz, gewählt. Hiermit ist es möglich, die Kosten verursachungsgerecht zuzuordnen, direkt zu erfassen (nicht über Gemeinkostenzuschläge o. ä.), sämtliche relevanten Kostenfaktoren zu berücksichtigen sowie durch den Prozessansatz und die erfolgte Aufteilung der Logistikkette in Teilsysteme die jeweilige Logistikkette genau im Modell abzubilden. Somit ist das Modell auch für unterschiedliche Unternehmen und Anwendungsfälle anwendbar. Dieses Modell liefert somit als Ergebnis die geringsten Gesamtkosten für jeden der zu betrachtenden Ladungsträger und ermittelt somit auch den insgesamt kostengünstigsten Ladungsträger. Dies zeigt auch die einfache Verallgemeinerung und Erweiterungsmöglichkeit der vorgestellten Methode auf: Sollten weitere Ladungsträger benötigt werden, so können diese einfach in die Menge der zu berücksichtigenden Alternativen aufgenommen werden. Die restliche Vorgehensweise kann analog und ohne Veränderungen beibehalten werden.

Eine erste, vereinfachte Anwendung dieses Ansatzes konnte bereits das Potential dieser detaillierten Kostenanalyse sowie auch ganz konkret die Erfordernis eines umfassenden Modells zur Behälterauswahl aufzeigen. Es gelang bereits hiermit, zu beweisen, dass die heutige Auswahlmethode zu kurz greift.

Zur Bestimmung des mit der Ladungsträgerauswahl verbundenen **Nutzens** wurde anschließend die Methodik des **AHP** ausgewählt. Sie ermöglicht es insbesondere, die Konsistenz der jeweiligen Nutzeneinschätzung zu prüfen und kann so direkt aufzeigen, ob die Einschätzung sinnvoll und logisch ist. Darüber hinaus können mit ihr alle Nutzenaspekte erfasst sowie ein Vergleich aller Kriterien und Alternativen erfolgen. Dies führt zu einer konkreten, detaillierten Betrachtung. Er ermöglicht eine strukturierte Entscheidungsfindung. Ebenso können durch die Betrachtung der Eigenvektoren Prioritäten gut abgeleitet werden (vgl. Saaty (1990)). Als Ergebnis dieses Schrittes ist somit auch der (günstiger Weise auch direkt auf das Intervall  $[0,1]$  normierte) Nutzen jeder Alternative bekannt.

Als letzten Schritt mussten im nun entwickelten Modell die Kosten und der Nutzen miteinander in Beziehung gebracht werden. Hierfür wurden sie zueinander ins Verhältnis gesetzt. Dazu wurde eine Normierung der

Kosten vorgeschlagen sowie ein Gewichtungsfaktor vorgesehen, mit dem der Einfluss von Kosten und Nutzen bei der Ergebnisfindung individuell angepasst werden kann. Mittels dieser Betrachtung kann nun fundiert, umfassend und detailliert der ideale Behälter ausgewählt werden, der das beste Verhältnis von Kosten und Nutzen bietet.

Das finale, umfassende Modell besteht also aus den folgenden drei Schritten, die für jeden Ladungsträger durchzuführen sind:

- Berechnung des TCO-Wertes für alle Ladungsträger
- Berechnung des OPO-Wertes für alle Ladungsträger
- Berechnung des NKQ-Wertes für alle Ladungsträger

Anschließend wird derjenige Ladungsträger ausgewählt, der den größten NKQ-Wert aufweist. Anhand dieses systematischen, generellen Aufbaus zeigt sich auch direkt die Erweiterbarkeit des Modells über die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Beschränkung auf VDA- bzw. unternehmensspezifische Ladungsträger hinaus. Dieses Modell ist einfach anwendbar, auf die jeweilige Logistikkette anpassbar sowie ohne große Aufwände, einfach durch Vergrößerung der zu betrachtenden Alternativenmenge erweiterbar. Somit ist es für sehr viele Anwendungsfälle unmittelbar einsetzbar.

Im vorletzten Kapitel dieser Arbeit wurde das entwickelte Modell nach einer Implementierung in Java schließlich einem **Praxiseinsatz** unterzogen. Hiermit wurde es gleichzeitig verifiziert. Es ergab sich, dass ein solches Modell, wie postuliert, in den betrachteten Fällen bisher nicht bekannt oder gar eingesetzt wird. Somit wurde die Richtigkeit der Forschungsfrage und deren Relevanz für die Praxis bewiesen. In der Anwendung zeigte sich, dass das Modell eine bisher nicht gekannte Transparenz bietet, da es die genauen Kosten für alle anfallenden Schritte detailliert errechnet und aufzeigt. Somit kann genau erkannt werden, welcher Teil der Prozesskette welche Kosten verursacht und wo die größten Potentiale liegen. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, dass nicht zwingend der größte Behälter - oder zumindest ein größerer Behälter - günstiger als der aktuell verwendete oder gar der insgesamt günstigste ist. Insbesondere dann nicht, wenn auch Bestandskosten mit in die Berechnung einbezogen werden (was leider im Praxisfall aufgrund des Nicht-Bekanntseins dieser Kosten nur sehr eingeschränkt möglich war). Mit diesem Modell ist es nun möglich, fundiert und

schnell zu überprüfen, ob der richtige Ladungsträger im Einsatz ist, oder ob er ersetzt werden sollte und, falls ja, wie lange die Amortisationszeit sein würde.

Insbesondere zeigte sich, dass dieses Modell in frühen Planungsphasen hilfreich ist, da es schnell Ergebnisse liefert, auf deren Grundlage Fehlinvestitionen in den nicht optimalen Ladungsträger verhindert werden. Darüber hinaus ermöglicht es auch dadurch, dass für alle Ladungsträger alle Kosten berechnet und ausgegeben werden, dass nicht nur der ideale Behälter für ein einzelnes Teil, sondern der ideale Behälterpool für eine Gruppe von Materialien oder ganze Fertigungen bestimmt werden kann. Der Praxiseinsatz zeigte also deutlich, wie wichtig ein solches und insbesondere das in dieser Arbeit entwickelte Modell ist. Er zeigte die Richtigkeit der gestellten Thesen und die Relevanz der gefundenen Forschungsleitfrage.

Im letzten Kapitel wurde schließlich eine Erweiterung hin zur gleichzeitigen Betrachtung mehrerer Teile bei einem zur Verfügung stehenden Behälterpool durch Formulierung der Entscheidungsfrage als lineares Optimierungsmodell hin getan. Die Grundlage für dieses Modell liefern die jeweiligen TCO-Werte, die wie in den vorangegangenen Kapiteln ermittelt werden. Hiermit ist es möglich, direkt die Ressourcenkonkurrenz aufzuzeigen und weitere, wichtige Randbedingungen wie verfügbare Flächen oder Transportwege zu berücksichtigen. Auch dieses Modell kann durch zusätzliche Randbedingungen individuell erweitert werden.

Natürlich ist das Modell noch nicht bis ins letzte Detail ausgearbeitet. Weitere Verbesserungspotenziale bieten sich beispielsweise durch die Integration eines genaueren Verfahrens zur Berechnung der transportierbaren Teile pro Ladungsträger (bspw. durch Methoden des Bin Packings oder anderer Berechnungssoftware), der integrierten Berechnung des idealen Behälterpools oder der genaueren Betrachtung von Transportfrequenzen. Diese Punkte können als Ausgangspunkt für weitere Arbeiten dienen. Sie erhöhen allerdings nur die Genauigkeit der Ergebnisse des Modells und beeinflussen nicht die Forschungsfrage an sich, die Praxistauglichkeit des Modells oder die Qualität der Beantwortung der Forschungsleitfrage. Bereits das hier entwickelte Modell kann diese Frage beantworten, die Relevanz derselben aufzeigen, Planungsprozesse vereinfachen und verbessern und auch neue Erkenntnisse und Ergebnisse liefern. Die Leitfrage ist somit

umfassend beantwortet, die aufgestellten Thesen konnten bewiesen werden. Das vorliegende Modell gab es in dieser Form so bisher nicht und es ist geeignet, die gestellten Anforderungen zu erfüllen und die identifizierte Forschungslücke somit zu schließen.

„So eine Arbeit ist eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären, wenn man nach Zeit und Umständen das Mögliche getan hat.“ (Johann Wolfgang von Goethe)



# Abkürzungsverzeichnis

$AW_{Lt}$	Stückpreis (Anschaffungswert) des Ladungsträgers [€]
$B_{Le}$	Breite der gelagerten Ladeinheit [mm]
$B_{Lt}$	Breite des Ladungsträgers [mm]
$B_P$	Breite des Teils [mm]
$C_{Bm}$	Verfügbare Transportfläche des Betriebsmittels [ $m^2$ ]
$d_{Tr}$	Transportweg [km]
$FPG_{Le}$	Frachtpflichtiges Gewicht pro Ladeinheit [kg]
$G_{LHM}$	Gewicht des Ladehilfsmittels [g]
$G_{Lt,max}$	Zulässiges Gesamtgewicht des LT [g]
$G(N, K)$	Möglicher Gewichtungsfaktor von Nutzen und Kosten
$G_P$	Gewicht des Teils [g]
$H_P$	Höhe des Teils [mm]
$K_{Bm}$	Betriebsmittelkosten [€]
$k_{Bm,h}$	Betriebsmittelkostensatz [€/Std]
$K_{Bm,i}$	Betriebsmittelkosten des i-ten Subsystems [€]
$k_{Bm,Kom,h}$	Betriebsmittelsatz (Kommissionierhilfsm.) [€/Stunde]
$k_{Bm,m^2,Tag}$	Lagerkostensatz [€/m <sup>2</sup> * d]
$K_{Bs}$	Bestandskosten [€]
$K_{Bs,i}$	Bestandskosten des i-ten Subsystems [€]
$K_{Fl}$	Flächen - und Raumkosten [€]
$K_{Fl,i}$	Flächen- und Raumkosten des i-ten Subsystems [€]
$k_{Fl,m^2,Tag}$	Flächen - und Raumkostensatz [€/m <sup>2</sup> * d]
$K_{Fr}$	Gesamte Fremdleistungskosten Rückführsystem [€]
$k_{Fr,Lt}$	Fremdleistungskostensatz pro Ladungsträger [€]
$K_{Ges}$	Gesamte Prozesskosten der Logistikkette [€]
$K_{Ges,KLT}$	Gesamte Prozesskosten der Logistikkette (KLT) [€]
$K_{Ges,GLT}$	Gesamte Prozesskosten der Logistikkette (GLT) [€]
$k_{Ges,Lt}$	Gesamtkosten der Ladungsträger [€]
$K_{Komm}$	Kosten des Kommissioniersystems [€]
$K_{Komm,i}$	Kommissionierkosten des i-ten Subsystems [€]

$K_{Lager}$	Kosten des Lagersystems [€]
$K_{Bm}$	Betriebsmittelkosten des Umschlagsystems [€]
$K_{Lager,i}$	Lagerkosten des i-ten Subsystems [€]
$K_{Lt}$	Ladungsträgerkosten im Betrachtungszeitraum [€]
$K_{Per}$	Personalkosten [€]
$k_{Per,h}$	Personalkostensatz [€/Std]
$K_{Per,i}$	Personalkosten des i-ten Subsystems [€]
$k_{Tm,km,kg}$	Transportmittelkostensatz [€/km*kg]
$k_{Tr}$	Fixe Kosten pro Transport [€/Transportvorgang]
$K_{Tr}$	Transportkosten [€]
$K_{Tr,i}$	Transportkosten des i-ten Subsystems [€]
$K_{Trans}$	Kosten des Transportsystems [€]
$K_{Trans,i}$	Transportkosten des i-ten Subsystems [€]
$K_{Umschlag}$	Kosten des Umschlagsystems [€]
$K_{Umschlag,i}$	Umschlagkosten des i-ten Subsystems [€]
$L_{Le}$	Länge der gelagerten Ladeinheit [mm]
$L_{Lt}$	Länge des Ladungsträgers [mm]
$L_P$	Länge des Teils [mm]
$m_B$	Mittlerer Lagerbestand [Stück]
$m_{Le,Tm}$	Anzahl der Ladeeinheiten [Stück]
$m_{Lg,Pl}$	Lagen pro Palette [Stück]
$m_{Lt}$	Anzahl an Ladungsträgern [Stück]
$m_{Lt,Lg}$	Kleinladungsträger pro Lage [Stück]
$m_{P,Bm}$	Teile pro Betriebsmittel [Stück]
$m_{P,N}$	Nachschubmenge [Stück]
$m_{P,Tm}$	Teile pro Transportmittel [Stück]
$m_{P,U}$	Umzuschlagende Menge [Stück]
$m_{PLT}$	Teileanzahl pro Ladungsträger [Stück]
$m_S$	Sicherheitsbestand [Stück]
$m_{Sich}$	Sicherheitsbestand (an Ladungsträgern)
$OPO_j$	Nutzen des j-ten Behälters
$NKQ_j$	Nutzen-Kosten-Quotient des j-ten Behälters
$Q_{Sch}$	Durchschnittliche Schwundquote (aller Ladungsträger)
$R_S$	Reichweite des Sicherheitsbestandes [Stunden]
$t$	Dauer der Betrachtung [d]
$t_{Ab}$	Abschreibungszeitraum [a]
$t_{Ein/Aus}$	Dauer Ein-/Auslagern (ohne Kommissionierung) [min]
$t_{Kom}$	Dauer des Kommissioniervorgangs (KV) [min]

$t_{Tr}$	Dauer des Transportvorgangs [min]
$t_U$	Umlaufzeit pro Ladungsträger [d]
$t_{Um}$	Dauer des Umschlagvorgangs [min]
$TCO_j$	TCO-Wert des j-ten Ladungsträgers [€]
$V_{Lt}$	Ladungsträgerinnenvolumen [ $mm^3$ ]
$V_P$	Volumen des Produktes [ $mm^3$ ]
$VA$	Volumenanpassungsgrad [%]
$VE_P$	Täglicher Verbrauch [Stück]
$W_P$	Produktwert [€]
$z$	Kapitalbindungssatz [%]



# Literatur

- Akao, Y. (1992). *QFD - Quality Function Deployment*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.
- Arnold, D. E., H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier and K. Furmans (2008). *Handbuch Logistik* (3. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Backman, K. (2008). VASA ergonomic requirements - Corporate Standard STD. Website. <https://document.chalmers.se/workspaces/chalmers/teknikens-ekonomi-och/fulltextavhandlingar/assembly-processes>, Zugriff am 10. Januar 2011.
- Berbig, D., K. Furmans, M. Köker, P. Gehrke and M. Altefroehne (2012). A new comprehensive approach for choosing proper charge carriers in order to guarantee efficient material supply of production areas.
- Berbig, D., K. Furmans and C. Schimpf (n/a). A new comprehensive approach for choosing proper charge carriers - Results and Benefits.
- Bischoff, E. and W. B. Dowsland (1982). An application of the micro to product design and distribution. *Journal of the Operation Research Society* 33(3), S. 271–280.
- Boardman, A. E., D. H. Greenberg, A. R. Vining and D. L. Weimer (2006). *Cost Benefit Analysis: Concepts and Practice*. New Jersey: Pearson Education.
- Bokranz, R. and K. Landau (2006). *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Bowersox, D. J. (1978). *Logistical Management*. New York: Macmillan Publishing Co.
- Bramel, J. and D. Simchi-Levi (1997). *The Logic of Logistics*. New York: Springer Verlag.
- Cochran, J. K. and B. Ramanujam (2006). Carrier-mode logistics optimization of inbound supply chains for electronics manufacturing. *International Journal of Production Economics* 103, S. 826–840.

- Cooper, R. and R. Kaplan (1987). How cost accounting systematically distorts product costs. In: W. J. Bruns and R. S. Kaplan (Hrsg.), *Accounting and Management*, S. 204–225. Harvard Business Press.
- Corporation, S. (2008). Workstation ergonomics leverage zones. Website. <http://www.saif.com/files/SafetyHealthGuides/S-900.pdf>, Zugriff am 17. Januar 2011.
- Dempsey, J., E. Dvorak, R.E. adn Holen, D. Mark and W. Meehan (1998). A hard and soft look at IT investments. *The McKinsey Quarterly* (1), S. 126–137.
- der Automobilindustrie, V. (2011). VDA-Empfehlung 4500. (9).
- Domschke, W. and A. Drexl (2007). *Einführung in Operations Research* (7 Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Ellram, L. M. (1995). Total Cost of Ownership - An analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution Logistics Management* 25(8), S. 4–23.
- Ellram, L. M. (2002). Total Cost of Ownership. In: *Handbuch industrielles Beschaffungsmanagement*, S. 661–671. Hahn, D. H.
- Engelhardt-Nowitzki, C. and E. Lackner (2006). *Chargenverfolgung: Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete* (1 Aufl.). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Finsgard, C. (2009). Assembly processes and materials supply systems design. Website. <https://document.chalmers.se/workspaces/chalmers/technikens-ekonomi-och/fulltext-avhandlingar/assembly-processes>, Zugriff am 01. Dezember 2010.
- Finsgard, C., C. Wänström and L. Medbo (2008). Impact of Material exposure on assembly workstation performance. Website. <https://document.chalmers.se/workspaces-chalmers/technikens-ekonomioch/fulltext-avhandlingar/assembly-processes>, Zugriff am 01. Dezember 2010.
- Finsgard, C., C. Wänström and L. Medbo (2009). Requirements in the value stream : In materials supply and assembly processes. Website. <https://document.chalmers.se/workspaces/chalmers/technikens-ekonomioch/fulltext-avhandlingar/assembly-processes>, Zugriff am 10. Januar 2011.
- Fonger, M. (1993). *Gesamtwirtschaftlicher Effizienzvergleich alternativer Transportketten*. Göttingen: Vandenhoeck Ruprecht.

- Gerstner, R. (1999). *Ein Beitrag zur Bewertung der Nutzungspotentiale standardisierter Kleinladungsträger*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Greving, B. (2007). Messen und Skalieren von Sachverhalten. In: *Methodik der empirischen Forschung*, S. 65–78. Albers, S. and Klapper, D. and Konradt, U. and Walter, A. and Wolf, J.
- Gudehus, T. (2007). *Logistik 2 - Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Gudehus, T. (2011). *Logistik : Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Häder, M. (2009). *Delphi-Befragungen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Hanusch, H. (1994). *Nutzen-Kosten-Analyse*. München: Verlag Franz Vahlen.
- Hellström, D. and M. Saghir (2006). Packaging and Logistics Interaction in Retail Supply Chains. *Packaging Technology and Science* 20(3), S. 197–216.
- Hoffmeister, W. (2000). *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse*. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.
- Hofmann, E. and H. Bachmann (2006). *Behälter-Management in der Praxis: State of the Art und Entwicklungstendenzen bei der Steuerung von Ladungsträgerkreisläufen (die St. Galler Behälter-Management-Studie)* (1 Aufl.). Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.
- Hurkens, K.  
and F. Wynstra (na). The concept of 'Total Value of Ownership': A case study approach. Website. <http://www.iimm.org/knowledgebank/IFPSM/Krisje20Hurkens.pdf>, Zugriff am 28. Juni 2010.
- IML (2010). Ergebnisse des Forschungsprojekts repac. Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Website. <http://www.repac.iml.fraunhofer.de/index.php?page=downloads>, Zugriff am 18. Oktober 2010.
- IML (2010b). UNIT-PackComplex - Optimierungssoftware für optimales Befüllen von Behältern mit komplizierter Geometrie.
- Isermann, H. (1998). *Logistik - Gestalten von Logistiksystemen*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.

- ISO (2004). Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004); Deutsche Fassung EN ISO 6385:2004.
- Klein, B. (1999). *QFD - Quality Function Deployment*. Renningen-Malmsheim: Expert Verlag.
- Klug, F. (2010). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kuhn, E., V. Lange and P. Zimmermann (2005). *Paletten-Management : Leitfaden für die Praxis*. Vogel Heinrich.
- Kuster, J., E. Huber, R. Lippmann, A. Schmid, E. Schneider, U. Witschi and R. Wüst (2006). *Handbuch Projektmanagement*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Lai, J., A. Harjati, L. McGinnis, C. Zhou and T. Guldberg (2008). An economic and environmental framework for analyzing globally sourced auto parts packaging system. *Journal of the Operation Research Society* 16(15), S. 1632–1646.
- Lange, V. u. a. (2010). Ladungsträgermanagement-Studie 2010. S. 160.
- Laux, H. (2007). *Entscheidungstheorie* (7 Aufl.). Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Layard, R. and S. Glaister (1994). *Cost-Benefit Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Luftman, J. and H. Muller (2005). The Value of Ownership. *Optimize Magazine* 4, S. 1–4.
- Lützebauer, M. (1994). *Beitrag zur systematischen Auswahl von Kleinladungsträgern*. Dissertation, Universität Dortmund.
- Magee, J. F., W. C. Copacino and D. B. Rosenfield (1985). *Modern Logistics Management*. New York: John Wiley Sons.
- Meixner, H. u. a. (2002). Der Analytische Hierarchieprozess.
- Mishan, E. J. (1975). *Elemente der Kosten- Nutzen- Analyse*. Frankfurt/Main: Campus Verlag GmbH.
- Morabito, R. and S. Morales (1998). A simple and effective procedure for the manufacturer's pallet loading problem. *Journal of the Operation Research Society* 49(8), S. 819–828.
- Mühlenkamp, H. (1994). *Kosten-Nutzen-Analyse*. München: R. Oldenbourg Verlag.
- Neumann, K. and M. Morlock (2002/2004). *Operations Research* (2 Aufl.). München Wien: Carl Hanser Verlag.

- Pearce, D., G. Atkinson and S. Mourato (2006). *Cost-Benefit Analysis and the Environment - Recent Developments*. OECD Publishing.
- Peters, M. L. and S. Zelewski (2007). Effizienz-Analyse mit EATWOS - Eine Anwendung auf Wärmebehandlungsöfen. *Controlling* 19(2), S. 75–81.
- Pfohl, H.-C. (2010). *Logistiksysteme : Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Porter, M. E. (1985). Competitive Advantage.
- Rebitzer, G. (2002). Integrating Life Cycle Costing and Life Cycle Assessment for Managing Costs and Environmental Impacts in Supply Chains. In: M. Seuring, S. Goldbach (Hrsg.), *Cost Management in Supply Chains*, S. 127–146. Physica-Verlag.
- Rinza, P. and H. Schmitz (1992). *Nutzwert-Kosten-Analyse - Eine Entscheidungshilfe*. Düsseldorf Dordrecht London: VDI Verlag GmbH.
- Saaty, T. (1990). The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 48, S. 9–26.
- Saaty, T. L. and L. G. Vargas (2001). *Models, Methods, Concepts Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- Schedlbauer, M. J. (2008). *Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts*. Ph.D. thesis, Technische Universität München.
- Schmölzer, T. and J. Schöler (2005). Bedarfsorientiertes Behältermanagement zur Kostenreduzierung in der Automobilindustrie. *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft* 4, S. 1–16.
- Shih, H.-S., H.-J. Shyr and E. S. Lee (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling* 45(7), S. 801–813.
- Siepermann, C. (2005). Fallstudie zur Logistikkostenrechnung: Darstellung und vergleichende Analyse verschiedener Verfahren.
- Simchi-Levi, D., P. Kaminsky and E. Simchi-Levi (1999). *Designing and Managing the supply chain*. Irwin: McGraw-Hill Verlag.
- Stölzle, W. (1993). Umweltschutz und Entsorgungslogistik. In: *Unternehmensführung and Logistik Bd. 6*. Pfohl, Hans-Christian.

- Strigl, T. (2001). *Bewertung der Logistikeffizienz von Produktionsunternehmen durch datenbankgestütztes Benchmarking*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Sundarakani, B., R. de Souza, M. Goh, D. von Over, S. Manikandan and S. L. Koh (2010). A Sustainable Green Supply Chain for Globally Integrated Networks. In: *Enterprise Networks and Logistics for Agile Manufacturing*, Lihui Wang und S.C. Lenny Koh, S. S. 191–206.
- Tempelmeier, H. (2005). *Bestandsmanagement in Supply Chains*. Norderstedt: Books on Demand GmbH.
- VDI (2003b). Prozessorientierte Kostenanalyse in der innerbetrieblichen Logistik.
- Wannenwetsch, H. (2007). *Integrierte Logistik, Beschaffung, Materialwirtschaft und Produktion*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Wardecki, M. (2007). Behältermanagement - Dem Bermuda-Dreieck entkommen. In: *Logistik in der Automobilindustrie*, S. 70–85. Gehr, Frank.
- Weber, J. (2002). *Logistik- und Supply Chain Controlling*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Weinreich, U. and E. von Lindern (2008). *Praxisbuch Kundenbefragungen*. München: Mi-Fachverlag.
- Werners, B. (2008). *Grundlagen des Operations Research* (2 Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Wildemann, H. (1995). *Behältersysteme: Optimierung des Behälterkreislaufs zwischen Lieferanten und Industrieunternehmen*. München: Transfer-Centrum-Verlag.
- Wildemann, H. (1998). *Total Cost of Ownership*. München: TCW-Verlag.
- Womack, J. P., D. T. Jones and D. Roos (1990). The machine that changed the world.
- Yoon, K. and C.-L. Hwang (1981). *Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Vielfältigkeit des Behälterspektrums (Quelle: SSI Schäfer)	8
2.2	Branchenverteilung (Hoffmann, Bachmann 2006)	14
2.3	Stückwert der eingesetzten Behälter (Quelle: Hoffmann, Bachmann 2006)	16
2.4	Interaktionsmatrix zwischen Verpackungssystemen und logistischen Aktivitäten (Hellström, Saghir 2006, S. 210)	18
2.5	Beeinflussung der Greifzeit durch unterschiedliche Faktoren (Finnsgard 2009, S. 49)	20
2.6	Betrachteter Ausschnitt der Supply Chain (Quelle Cochran und Ramanujam (2006))	29
2.7	Funktionsweise und Ablauf des Modells (Quelle Cochran und Ramanujam (2006))	32
3.1	„Zoneneinteilung“ der Ergonomie entsprechend des VASA-Modells (Quelle: SAIF Corporation)	37
3.2	Relative Bedeutung der Einflussfaktoren	42
4.1	Die drei Hierarchieebenen des AHP (Quelle: Saaty, Vargas (2001), S. 3)	52
4.2	Bewertungsskala des AHP (Quelle: Saaty, Vargas (2001), S. 6)	53
4.3	Beispiele für Transaktionskosten (Quelle: (Wynstra, Hurkens 2010, S. 465))	64
4.4	Beispiel (Ellram 1995, S. 12)	66
4.5	Beispiel einer Bewertungsskala der Liefertreue (Ellram 1995, S. 13)	67
5.1	Ergebnisse der Analyse am realen Fallbeispiel	77
5.2	Ergebnisse einer ersten TCO-Analyse (Quelle: Berbig et al 2012)	80

6.1	Screenshot des erstellten Javatools zur Berechnung . . . . .	125
6.2	Betrachtete Prozesskette für KLTs . . . . .	125
6.3	Betrachtete Prozesskette für GLTs . . . . .	126
6.4	Kosten der Teilprozesse für den Referenz-KLT (2) . . . . .	128
6.5	Kosten der Teilprozesse für den günstigsten GLT (9) . . . . .	129
6.6	Detaillierte Betrachtung der Lagerkosten für KLT . . . . .	130
6.7	Einsparungspotentiale bei Verwendung des kostenoptimalen LT verglichen zur Referenz mit Bestandskosten . . . . .	130
6.8	Jährliche Gesamtkosten für GLT unter Berücksichtigung von Bestandskosten . . . . .	131
7.1	Der Problemlösungsprozess des OR (Werners 2008, S.2). . . . .	140
7.2	Beispiel einer Rückwärtsrekursion (Domschke und Drexl 2007, S. 167) . . . . .	149
7.3	Ergebnismatrix bei Risiko (Laux 2007, S. 65). . . . .	152
7.4	Zielgrößenmatrix bei sicheren Erwartungen (Laux 2007, S. 65) . . . . .	153
7.5	Entscheidungsmatrix der Bernoulli-Regel (Laux 2007, S. 166)	160
A.1	Darstellung der Nutzwerte der Alternativen . . . . .	193
A.2	Darstellung der Ergebnisse der NWA . . . . .	195
A.3	Beispielhafte Darstellung von Kosten und Nutzen ((Rinza, Schmitz 1992, S. 151) . . . . .	199
A.4	Das „House Of Quality“ (Klein (1999), S. 87) . . . . .	208

# Tabellenverzeichnis

3.1	Ergebnisse der Expertenbefragung - Kosten . . . . .	44
3.2	Ergebnisse der Expertenbefragung - Nutzen . . . . .	46
4.1	Beispielhafte Matrix mit Bestimmung der Spaltensummen (nach Saaty, Vargas (2001), S. 17) . . . . .	56
4.2	Beispielhafte Matrix nach Division (nach Saaty, Vargas (2001), S. 19) . . . . .	57
4.3	Ermittelte Prioritäten (nach Saaty, Vargas (2001), S. 20) .	57
4.4	Punktwerte (nach Saaty, Vargas (2001), S. 22) . . . . .	58
4.5	Gewichtungsfaktoren zu Beispiel 2 (nach Saaty, Vargas (2001), S. 14) . . . . .	60
4.6	Ein Ergebnis zu Beispiel 2 (nach Saaty, Vargas (2001), S. 15)	61
5.1	Betrachtete Ladungsträger, Quelle: entsprechende VDA- Normen (insbesondere 4500) . . . . .	84
5.2	Stapelbarkeit der Ladungsträger, Quelle: entsprechende VDA-Normen . . . . .	85
5.3	Unterschiedliche Kategorien der Kostenarten (Quellen: Wildemann 1995 (S. 51), Kuhn 2005 (S. 104), VDI4405 (S. 10f), Gudehus 2011 (S. 146f)) . . . . .	88
6.1	Wesentliche Produktdaten Produkt 1 . . . . .	126
6.2	Ergebnis 1: Gesamtkosten des Clips pro Jahr (ohne Bestandskosten) . . . . .	127
6.3	Wesentliche Produktdaten Produkt 2 . . . . .	131
6.4	Ergebnis 2: KLT-Gesamtkosten der Klammer pro Jahr (inkl. Bestandskosten) . . . . .	132
6.5	Ergebnis 2: Gesamtkosten der Teilprozesse pro Jahr und KLT der Klammer . . . . .	133
6.6	Wesentliche Produktdaten Produkt 2 . . . . .	134

---

6.7	Zusammenstellung aller nicht kostenoptimalen Behälter . . .	137
A.1	Ergebnisse des dritten Schritts (nach Rinza, Schmitz 1992, S. 39ff) . . . . .	192
A.2	Ergebnisse des vierten Schritts (nach Rinza, Schmitz 1992, S. 39ff) . . . . .	193
A.3	Ergebnisse des fünften Schritts (nach Rinza, Schmitz 1992, S. 39ff) . . . . .	194
A.4	Ergebnisse KWA (nach Hanusch 1994, S. 177) . . . . .	197
A.5	Ausgangsdaten (nach Shih, Shyur, Lee 2007, S. 809ff) . . .	201
A.6	Beispiel einer gewichteten Entscheidungsmatrix (nach Shih, Shyur, Lee 2007, S. 809ff)) . . . . .	202
A.7	Beispiel einer gewichteten Entscheidungsmatrix (nach Shih, Shyur, Lee 2007, S. 809ff)) . . . . .	203
A.8	Beispielhafter Qualitätsplan des QFD (Klein (1999), S. 72)	207
A.9	Input- und Outputfaktoren für EATWOS am Beispiel des WärmebehandlungsOfens (Peters, Zelewski 2007, S. 77) . .	211
A.10	Beispielsergebnisse (Boardman et al. 2006, S. 8) . . . . .	223

# **A Gesamtüberblick über die betrachteten Modellierungsmöglichkeiten**

## **A.1 Qualitative Modellierungsmethoden**

Im folgenden Abschnitt werden „qualitative“ Modellierungsmöglichkeiten dargestellt. Unter „qualitativ“ wird hierbei verstanden, dass es sich um Methoden handelt, deren zentraler Punkt die Bewertung qualitativer Faktoren (bspw. Nutzen oder Ergonomie) ist. Kosten- oder vergleichbare (objektiv) quantifizierbare Aspekte sind hier nicht das Hauptaugenmerk. Methoden, die sich mit solchen Aspekten beschäftigen, werden im Kapitel A.2 beschrieben.

### **A.1.1 Die Nutzwert-Kosten-Analyse**

Die (grundlegende) Nutzwert-Kosten-Analyse (NWKA) stellt die Basis für sämtliche, folgend dargestellte Verfahren, wie bspw. die Kosten-Wirksamkeits-Analyse, dar. Aus diesem Grund werden die elementaren Bestandteile der Analyse von Kosten und Nutzen detailliert erläutert. Die NWKA erfolgt prinzipiell immer in fünf Stufen (Rinza and Schmitz 1992, S. 25). In der ersten Stufe wird die Aufgabenstellung klar definiert und von anderen Aufgabenstellungen abgegrenzt, sie wird daher nicht weiter betrachtet. In den folgenden Stufen zwei und drei werden eine Nutzwert- sowie eine Kosten-Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser beiden Analysen werden in der darauf folgenden Stufe gegenübergestellt, die günstigste wird Alternative ausgewählt. Abschließend werden die Ergebnisse dargelegt.

## Die Nutzwertanalyse

Die Nutzwert-Analyse (NWA) hilft „innerhalb des Entscheidungsprozesses der systematischen Entscheidungsvorbereitung bei der Auswahl komplexer Handlungsalternativen“. (Hoffmeister 2000, S. 278). Sie wird folglich immer dann eingesetzt, wenn (Hoffmeister 2000, S. 279):

1. „Eine monetäre Bewertung der Alternativen nicht möglich ist oder alleine zur Entscheidungsfindung nicht ausreicht,
2. mehrere Alternativen vergleichbar sind,
3. eine Vielzahl von entscheidungsrelevanten Größen zu beachten ist.“

Ihre zentrale Eigenschaft besteht somit darin, dass sie sowohl monetäre als auch nicht-monetäre Kriterien für die Entscheidungsvorbereitung heranzieht. Zusätzlich zu dieser Unterscheidung können zur weiteren Differenzierung bei den nicht-monetären Kriterien noch qualitative (in Worten beschreibbare) und quantitative (in Zahlen beschreibbare) Kriterien unterschieden werden (Hoffmeister 2000, S. 276). Die Einbeziehung insbesondere der qualitativen Kriterien wirft unmittelbar die Frage auf, wie objektiv die Ergebnisse einer NWA überhaupt sein können, da sie versucht, qualitative Kriterien zu quantifizieren. Bedingt durch diesen subjektiven Charakter der NWA muss bei ihrer Durchführung auf jeden Fall garantiert werden, dass diese in Teamarbeit und nicht durch Einzelpersonen erfolgt (Kuster u. a. Kuster, Huber, Lippmann, Schmid, Schneider, Witschi and Wüst 2006, S. 360; Rinza, Schmitz 1992, S. 84). Im Folgenden wird zunächst der theoretische Ablauf einer NWA detailliert beschrieben und anschließend durch ein Beispiel verdeutlicht.

**Prinzipieller Ablauf der NWA** Obwohl die Literatur den eigentlichen Ablauf der NWA recht eindeutig und übereinstimmend darstellt, ist die Aufteilung in die einzelnen Teilschritte sehr unterschiedlich. Kuster et al (2006, S. 358) stellen eine NWA vor, die auf fünf Teilschritten basiert. Hoffmeister (2000, S. 278ff) unterteilt die NWA in sechs Schritte, (Hanusch 1994, S. 39) sowie Rinza und Schmitz (1992, S. 181ff) führen sieben Schritte durch. Da sie den Ablauf der NWA sehr präzise darstellen, erfolgt die Erläuterung des Ablaufs der NWA entsprechend den Ausführungen

von Rinza und Schmitz (1992, S. 39ff; einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf dieselbe Quelle).

**Erster Schritt** Der erste Schritt der NWA beinhaltet die Erstellung eines Zielsystems, mit welchem das grundlegende Entscheidungsproblem beschrieben wird (S. 40). Hierfür existieren zwei Möglichkeiten (S. 41): Die erste Möglichkeit besteht darin, zunächst sämtliche Ziele zu ermitteln und diese anschließend in eine Art Strukturplan zu übertragen. Oder es werden, von einem Oberziel ausgehend, mehrere Teilziele abgeleitet. In beiden Fällen ergibt sich ein mehrebeniges Zielsystem, in welchem sich die Ziele einer übergeordneten Ebene aus den jeweiligen Teilzielen der direkt darunter liegenden Ebene zusammensetzen. Damit ein für das weitere Vorgehen sinnvolles und aussagekräftiges Zielsystem entstehen kann, sind vier zentrale Anforderungen an den Prozess der Erstellung des Zielsystems zu erfüllen (S. 40f):

1. **Vollständigkeit:** Alle relevanten Ziele müssen erfasst und sinnvoll angeordnet werden, sodass sie garantiert ist.
2. **Angemessenheit:** Der sich ergebende Umfang des Zielsystem muss dem betrachteten Entscheidungsumfang angemessen sein.
3. **Systematik:** Kostenkriterien sind kein Bestandteil des Zielsystems.
4. **Unabhängigkeit:** Es dürfen weder Doppelbewertungen noch Überschneidungen auftreten. Alle Ziele müssen diesbezüglich überprüft werden.

**Zweiter Schritt** Anschließend an die Erstellung des Zielsystems erfolgt eine Gewichtung der einzelnen Ziele oder Zielkriterien entsprechend ihrer relativen Bedeutung (S. 49ff). Hierbei wird eine fünfstufige Bewertungsskala verwendet, wobei ein unwichtiges Kriterium eine Bewertung von eins erhält. Wichtige Kriterien erhalten eine Bewertung von 3, während äußerst wichtige fünf „Punkte“ bekommen. Die Wertungen sämtlicher Oberziele werden auf der obersten Ebene des Zielsystems anschließend addiert und für alle Oberziele das relative Gewicht berechnet. Dieses ergibt sich als Quotient aus der jeweiligen Wertung sowie der Summe aller Wertungen der obersten Zielebene. Für die direkt darunter

liegende Ebene gilt die folgende Vorgehensweise: Die jeweilige Wertung eines Unterziels wird analog zu den Oberzielen innerhalb der Ebene in ein relatives Gewicht umgewandelt. Anschließend wird dieses relative Gewicht der Ebene mit dem relativen Gewicht des jeweiligen Oberziels multipliziert. So kann das relative Gewicht bzw. die relative Bedeutung sämtlicher Unterziele bestimmt werden. Somit ergibt die Summe der relativen Gewichte in der obersten Ebene immer einen Wert von eins.

**Dritter Schritt** Der folgende dritte Schritt der NWA besteht in der Definition von Wertefunktionen und Wertetabellen (S. 65). Diese Wertefunktion bzw. Wertetabelle dient im weiteren Verlauf der NWA dazu, den Erfüllungsgrad der einzelnen Zielkriterien zu bestimmen. Um diesen messen und auch berechnen zu können, ist es erforderlich, dass die vielen unterschiedlichen Bewertungseigenschaften oder Zielkriterien, welche jeweils in unterschiedlichen Dimensionen vorliegen, in eine standardisierte Dimension, den sogenannten Ziffernwert, übertragen werden. Um dies zu ermöglichen, werden die erwähnten Wertefunktionen oder Wertetabellen angewendet. Können Zielkriterien physikalisch gemessen bzw. quantifiziert werden, werden Wertefunktionen verwendet. Entsprechend werden Wertetabellen bei ausschließlich qualitativ erfassbaren Zielkriterien eingesetzt (S. 69). Bei Wertefunktionen ist es möglich, jede beliebige Eigenschaftsausprägung (bspw. eine Temperatur zwischen 15 und 35° C) kontinuierlich in einen Ziffernwert (zum Beispiel zwischen eins und sechs) zu übertragen. Abweichend hiervon werden die qualitativen Eigenschaften in den Wertetabellen in diskrete Klassen sowie diskrete Ziffernwerte, bspw. wiederum zwischen eins und sechs, übertragen. Ein solches qualitatives Zielkriterium kann bspw. die Bremseigenschaft sein (S. 70): Sofern kein Bremsfading vorliegt, werden ein Erfüllungsgrad und ein Ziffernwert von sechs erreicht. Sollte jedoch in extremen Situationen ein geringfügiges Bremsfading festgestellt werden, wird nur noch ein Ziffernwert von fünf erreicht. Weitere Abstufungen zwischen diesen beiden Klassen und Ziffernwerten sind im Gegensatz zu Wertefunktionen nicht möglich.

Damit unterschiedliche Eigenschaftsausprägungen skaliert und in Erfüllungsgrade sowie Ziffernwerte übertragen werden können, finden Nominal-, Ordinal-, Kardinal oder Verhältnisskalen Anwendung (S. 71 bzw. S. 193ff; genaue Details zu diesen Skalen finden sich in entsprechender

Statistik-Fachliteratur), wovon für eine NWA die Kardinalskala am geeignetsten ist. Diese wird zuweilen auch als Intervallskala bezeichnet. Hiermit werden dem Grad der Zielerfüllung ein vorher festgelegter Ziffern- oder Skalenwert zugeordnet (S. 195). Hierdurch können selbst geringe Nutzenunterschiede zwischen verschiedenen Alternativen in unterschiedliche Skalen- oder Ziffernwerte übersetzt werden. Die Kardinalskala zeichnet sich somit, im Gegensatz zu den anderen Skalierungsmöglichkeiten, durch eine sehr hohe Abbildungsgenauigkeit sowie Präzision aus. Zusätzlich zur grundsätzlichen Art der Skalierung müssen die beiden Aspekte der Skalenlänge und Skalenrichtung bei der Durchführung einer NWA berücksichtigt werden. Die Skalenlänge sollte entweder sechs (hierbei bedeutet eine eins (1) „ungenügend“, eine sechs (6) steht für „sehr gut“) oder sieben Stufen (von null == „nicht erfüllt“ bis sechs == „sehr gut“) betragen. Die Stufen müssen logischerweise während des gesamten Verlaufs der NWA einheitlich sein. Zusätzlich ist zu beachten, dass die einzelnen Abstufungen dabei jeweils dem System der Schulnoten entsprechen (S. 78). Bei der Festlegung der Skalenrichtung wiederum muss darauf geachtet werden, dass eine steigende Zielerfüllung einem steigenden Ziffernwert entspricht. Für die konkrete Festlegung von Ziffernwerten zwischen eins und sechs ist dabei zu berücksichtigen, dass sowohl Ober- als auch Untergrenzen entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Entscheiders festgelegt werden, allerdings nicht entsprechend der Minimal- oder Maximalausprägungen der betrachteten Alternativen.

**Vierter Schritt** Der vierte Schritt einer NWA umfasst die Bestimmung und Bewertung der einzelnen Alternativen (S. 84). Zunächst erfolgt eine Erfassung aller in Betracht kommende Alternativen. Hierzu gehören gegebenenfalls auch die zu ersetzende Alternative. Vor der eigentlichen Betrachtung dieser Alternativen mittels der NWA erfolgt jedoch zuerst noch eine Überprüfung „unabdingbarer Forderungen“ (S. 91). Hiermit wird die Anzahl an Alternativen verringert, der erforderliche Arbeitsaufwand sinkt. Im Anschluss daran werden die Erfüllungsgrade der verbleibenden Alternativen bezüglich der einzelnen Zielkriterien erfasst. Dies erfolgt auf Basis der in Schritt drei definierten Skalen. Schritt vier der NWA liefert als Ergebnis somit für alle Alternativen konkrete Ziffernwerte der einzelnen Zielkriterien.

Diese Ziffernwerte bilden die Basis für die Berechnung der Nutzwerte und der damit verbundenen Ermittlung der Rangfolge im folgenden Schritt fünf (S. 94):

**Fünfter Schritt** Für alle Alternativen werden zunächst „Nutzwertbeiträge“  $N_i$  für jedes Zielkriterium berechnet. Hierzu wird der in Schritt vier errechnete Erfüllungsgrad oder Ziffernwert des Zielkriteriums  $E_i$  mit dem in Schritt zwei ermittelten relativen Gewicht  $w_i$ , multipliziert. Anschließend werden sämtliche Nutzwertbeiträge zum Gesamtnutzwert  $N_{ges}$  addiert. Auf Basis dieses, für jede Alternative berechneten Gesamtnutzwerts  $N_{ges}$  kann die Rangfolge zwischen den einzelnen Alternativen gebildet werden, wobei ein höherer  $N_{ges}$  einen besseren Rang bedeutet.

**Sechster Schritt** In diesem Schritt erfolgt die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse (S. 102). Diese Empfindlichkeitsanalyse dient dazu, die Empfindlichkeit der Ergebnisse der NWA in Hinblick auf eine Veränderung der Eingabewerte zu erfassen. Dies ist wichtig, da die Einschätzung der jeweiligen Nutzen einer gewissen Subjektivität unterliegt. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse werden die unterschiedlichen Eingabewerte (Anzahl an Kriterien, Gewichte der einzelnen Zielkriterien, Wertetabellen und Wertefunktionen sowie die Beurteilung der Eigenschaften) verändert (S. 104). Sollten bei der Durchführung der NWA bspw. Uneinigkeit innerhalb des Teams hinsichtlich eines der genannten Eingabewerte vorherrschen oder die Ergebnisse der NWA zweier Alternativen sehr dicht nebeneinanderliegen, ist es mit der Empfindlichkeitsanalyse möglich, eine Aussage hinsichtlich der Stabilität der erzielten Ergebnisse zu treffen. Darüber hinaus erlaubt sie es, Eigenschaftsbereiche für einzelne Alternativen zu definieren (S. 111): Sollten bspw. für eine gewisse Eigenschaft keine exakten Angaben existieren, so kann für diese Eigenschaft ein vollständiger „Ausprägungsbereich“ von optimistischen bis hin zu pessimistischen Eigenschaftsausprägungen untersucht und der jeweilige Einfluss auf das Ergebnis der NWA festgestellt werden.

**Siebter Schritt** Im siebten und letzten Schritt werden die Ergebnisse der NWA in der Regel in vier Teilschritten zusammenfassend dargestellt (S. 115): Zuerst werden die einzelnen Alternativen entsprechend der Rangfolgen aufgelistet. Anschließend erfolgt eine Ergebnisbeurteilung anhand von einzelnen Teilnutzen. Diese Teilnutzenbetrachtung erfolgt ausschließlich auf der obersten Ebene des Zielsystems. Mit dieser Ergebnisbeurteilung werden die wichtigsten Unterschiede zwischen den zentralen Kriterien des Zielsystems analysiert. Hiermit kann festgestellt werden, ob eine einzelne Alternative hinsichtlich des Erfüllungsgrads der Zielkriterien eher ausgewogen ist, oder ob sie starken Schwankungen unterliegt. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse in geeigneter Weise, insbesondere mittels Balkendiagrammen dargestellt. Dieses ermöglicht die Darstellung der Erfüllungsgrade sowie der relativen Gewichte für alle Alternativen. Ebenso können hiermit die Ergebnisse der untersuchten Alternativen vergleichend abgebildet werden.

**Ein Beispiel** Das folgende Beispiel orientiert sich an einer von Rinza und Schmitz (1992, S. 39ff) beispielhaft geschilderten Entscheidungssituation eines Autokaufs. Im ersten Schritt der NWA wird das Zielsystem erstellt. Als zentrale Zielkriterien dienen hierbei „Fahrzeugeigenschaften Karosserie“, „Antrieb“, „Sicherheit“, „Komfort“ sowie „Wartung“. Das Zielkriterium Komfort wird in die Unterziele „Sitze“, „Bedienbarkeit“ und „Geräusch des Autos“ unterteilt. Diese Zielkriterien werden in Schritt zwei entsprechend ihrer Bedeutung mit einer fünfstufigen Bewertungsskala (1 == „unwichtig“, 5 == „äußerst wichtig“) gewichtet. Es ergeben sich somit die in der folgenden Tabelle A.1 dargestellten Werte.

Die Tabelle A.1 verdeutlicht, dass sich die relativen Gewichte der zweiten Ebene (Teilziele wie Sitze, Bedienbarkeit und Geräusch) zum relativen Gewicht des Oberziels (Komfort) aufsummieren. Im dritten Schritt erfolgt die Erstellung der Wertetabellen und Wertefunktionen für die einzelnen Zielkriterien, im folgenden anhand des Zielkriteriums Wartung erläutert: Zentrales Merkmal zur Erfassung der Wartungseigenschaften eines Autos ist sein Inspektionsbedarf. Muss ein Auto nur einmal im Jahr zur Inspektion, wird es mit einem Erfüllungsgrad von 6 Punkten bewertet. Falls alle 20.000 Kilometer eine Inspektion erforderlich sein sollte, werden fünf, bei 15.000 Kilometern vier, bei 10.000 Kilometern drei, bei 7.500

Zielkriterium	Wertung	rel. Gewicht[%]
1 Karosserie	4.0	22.0
2 Antrieb	4.0	22.0
3 Sicherheit	5.0	28.0
4 Komfort	3.0	17.0
4.1 Sitze	(3.0)	(5.1)
4.2 Bedienbarkeit	(2.0)	(3.4)
4.3 Geräusch	(5.0)	(8.5)
5. Wartung	2.0	11.0
<b>Summe</b>	<b>18.0</b>	<b>100.0</b>

**Tabelle A.1:** Ergebnisse des dritten Schritts (nach Rinza, Schmitz 1992, S. 39ff)

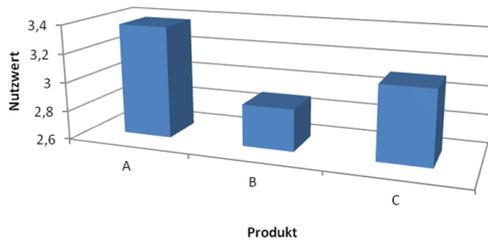
Kilometern zwei Punkte für den Erfüllungsgrad vergeben. Bei noch kürzeren Inspektionsintervallen werden für dieses Zielkriterium überhaupt keine Punkte mehr vergeben. Somit existieren für alle Zielkriterien geeignete Wertetabellen oder Wertefunktionen. Im folgenden Schritt vier werden zunächst die zu untersuchenden Alternativen identifiziert und danach bewertet, hier sind dies die Modelle A, B und C. Für diese Alternativen werden die Erfüllungsgrade der einzelnen Zielkriterien mit den festgelegten Wertefunktionen und Wertetabellen erfasst. Die ermittelten Ziffern- oder Punktwerte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Diese Ergebnisse werden in Schritt fünf in Nutzwerte übertragen, um anschließend eine Rangfolge zwischen den verschiedenen Alternativen bestimmen zu können. Um die jeweiligen Nutzwerte zu berechnen, werden zunächst die einzelnen Nutzwertbeiträge  $N_i$  und anschließend der Gesamtnutzwert  $N_{ges}$  berechnet. Diese Berechnung sowie deren Ergebnisse sind für das Beispiel in Tabelle A.3 dargestellt.

Mit diesen Ergebnissen kann eine klare Rangfolge zwischen den einzelnen Modellen erstellt werden:  $ModellA \succ ModellC \succ ModellB$ . Die anschließende Durchführung der Empfindlichkeitsanalyse könnte in diesem Beispiel darin bestehen, die Erfüllungsgrade hinsichtlich des

Zielkriterium	Modell A	Modell B	Modell C
1 Karosserie	3	5	3
2 Antrieb	5	2	3
3 Sicherheit	2	2	4
4 Komfort	3	4	2
4.1 Sitze	(5)	(2)	(2)
4.2 Bedienbarkeit	(2)	(5)	(2)
4.3 Geräusch	(2)	(3)	(2)
5. Wartung	5	1	3

**Tabelle A.2:** Ergebnisse des vierten Schritts (nach Rinza, Schmitz 1992, S. 39ff)



**Abbildung A.1:** Darstellung der Nutzwerte der Alternativen

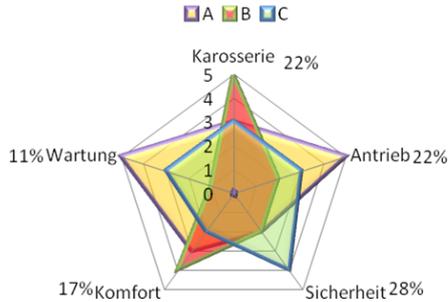
Zielkriteriums Sicherheit zu variieren. Da dieses Zielkriterium wichtiger ist als die anderen, wirkt sich eine Veränderung dieses Ziffernwertes besonders stark auf das Ergebnis der Nutzwertanalyse aus. Da zusätzlich die Nutzwerte der beiden Alternativen A und C recht eng zusammenliegen, bietet sich ein Vergleich dieser beiden Alternativen bei leicht modifizierten Ziffernwerten für das Zielkriterium Sicherheit an. Als letzten Schritt der NWA werden die Ergebnisse der NWA mittels eines Balkendiagramms dargestellt und beurteilt, wie in Abbildung A.1 dargestellt.

Darüber hinaus bietet sich für die weitere Bewertung der Ergebnisse die separate Darstellung der konkreten Erfüllungsgrade der einzelnen Zielkriterien aller Alternativen an. Somit wird eine Bewertung der

Zielkriterium	rel. Gewicht	Modell A	$N_A$	Modell B	$N_B$	Modell C	$N_C$
1 Karosserie	0.22	3	0.66	5	1.10	3	0.66
2 Antrieb	0.22	5	1.10	2	0.44	3	0.66
3 Sicherheit	0.28	2	0.56	2	0.56	4	1.12
4 Komfort	0.17	3	0.51	4	0.68	2	0.34
5. Wartung	0.11	5	0.55	1	0.11	3	0.33
<b>Nutzwert</b>			<b>3.38</b>		<b>2.89</b>		<b>3.11</b>

**Tabelle A.3:** Ergebnisse des fünften Schritts (nach Rinza, Schmitz 1992, S. 39ff)

einzelnen Zielkriterien möglich. Eine derartige explizite Darstellung der Erfüllungsgrade ist in der folgenden Abbildung A.2 zu finden.



**Abbildung A.2:** Darstellung der Ergebnisse der NWA

## Die Kostenanalyse

Die Kostenanalyse hat zum Ziel, monetär bewertbare Aufwände zu erfassen und zu analysieren. Zusätzlich zur Kostenanalyse existiert in der Literatur noch die „Aufwandwertanalyse“, mit der versucht wird, nichtmonetär bewertbare Aufwände zu erfassen (Rinza, Schmitz 1992, S. 124ff; Einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf dieselbe Quelle). Da allerdings nichtmonetär bewertbare Aufwände in der Realität nur schwer zu erfassen und zusätzlich nicht oder nur bedingt zu monetarisieren oder zu quantifizieren sind, wird im Folgenden der Prozess der Kostenanalyse als komplementäres Gegenstück zur bereits ausgeführten Nutzwertanalyse dargestellt. Sie erfolgt in sechs Schritten (S. 127).

**Erster Schritt** Im ersten Schritt ist, ähnlich zur Nutzwertanalyse, eine geeignete Form der Kostengliederung zu wählen und festzusetzen. Hierzu werden Kosten beispielsweise in Beschaffungs- oder Betriebskosten unterteilt. Eine andere Möglichkeit für die Auswahl einer

Kostengliederung besteht in der Unterteilung der Kosten entsprechend der Prozesse, in denen sie entstehen, oder entsprechend der Herkunft der Finanzmittel (S. 126). Für das oben geschilderte Beispiel des Autokaufs bietet sich die Aufteilung der Kosten in Beschaffungs- und Betriebskosten an.

**Zweiter Schritt** Diese Gliederung in Beschaffungs- und Betriebskosten wird nun mittels einer konkreten Kostenstruktur präzisiert: Die Beschaffungskosten umfassen beispielsweise den Grundpreis des Autos, etwaige Zubehörcosten sowie die Kosten für Überführung und Überlassung des Autos (S. 131). Die Betriebskosten können analog in feste und variable Betriebskosten aufgeteilt werden. Zu den variablen Betriebskosten gehören bspw. Kraftstoffkosten oder Wertverluste. Die festen Betriebskosten bestehen in diesem Beispiel unter anderem aus KFZ-Steuern und Versicherungsbeiträgen. Es gilt hierbei grundsätzlich zu vermeiden, dass einzelne Kosten doppelt oder gar mehrfach erfasst werden.

**Dritter Schritt** In diesem Schritt werden die Kosten entsprechend der Kostenstruktur erfasst (S. 130). Um dies zu erreichen, werden zunächst die erforderlichen Mengen erfasst und diese anschließend monetär bewertet, was im vorliegenden Beispielfall relativ einfach gelingt, da der Anschaffungspreis oder die Zubehörcosten direkt aus den entsprechenden Preislisten ersichtlich sind.

**Vierter Schritt** Im nun folgenden Schritt werden die verschiedenen Kosten zunächst auf ein einheitliches Niveau gebracht und entsprechend dem Zeitpunkt des Anfallens auf- oder abgezinst (S. 134). Durch das anschließende Aufsummieren der einzelnen Kostenbestandteile werden für alle untersuchten Alternativen die Gesamtkosten berechnet.

**Fünfter Schritt** Nun erfolgt, ähnlich wie bei der NWA, eine Sensitivitätsanalyse (S. 136). Diese ist insbesondere dann sinnvoll, wenn einzelne Kostenbestandteile nicht exakt bekannt sind oder mit Ungenauigkeiten behaftet sind. Analog zur NWA können auch hier

unterschiedliche Szenarien unter Annahme besonders optimistischer und pessimistischer Kosteneinschätzungen erstellt werden. In unserem „einfachen“ Beispiel des Autokaufs ist eine Empfindlichkeitsanalyse nicht erforderlich, da die notwendigen Daten in der Regel recht einfach zu beschaffen sind.

**Sechster Schritt** Abschließend werden die ermittelten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt (S. 140). Auch hier ist es wie bei der NWA sinnvoll, sowohl die Gesamtkosten der einzelnen Alternativen als auch die entsprechenden Kostenstrukturen aufzuführen.

### Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA) fasst die Ergebnisse der Kostenanalyse sowie der NWA in einer Kennzahl zusammen. Diese Kennzahl wird als „Kosten-Effektivitäts-Verhältnis“ (Pearce, Atkinson and Mourato 2006, S. 274) oder auch als „Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis“ (Hanusch 1994, S. 177) bezeichnet. Dieses Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis entspricht dem Quotienten aus der Wirksamkeit einer Alternative sowie deren Kosten (Hanusch 1994, S. 177). Das Maß für die Wirksamkeit der zu untersuchenden Alternativen ist hierbei das Ergebnis der NWA (Rinza, Schmitz 1992, S. 146). Tabelle A.4 stellt die möglichen Ergebnisse einer KWA zusammen.

**Tabelle A.4:** Ergebnisse KWA (nach Hanusch 1994, S. 177)

Projekt	Kosten [TDM]	Wirksamkeit	W/K	Rang
A	100	200	2,0	5
B	50	110	2,2	4
C	50	130	2,6	3
D	25	100	4,0	1
E	25	75	3,0	2

Je größer der Wirksamkeits-Kosten-Quotient, desto „bedeutender“ bzw. „besser“ wird folglich das jeweilige Projekt eingeschätzt (Hanusch 1994,

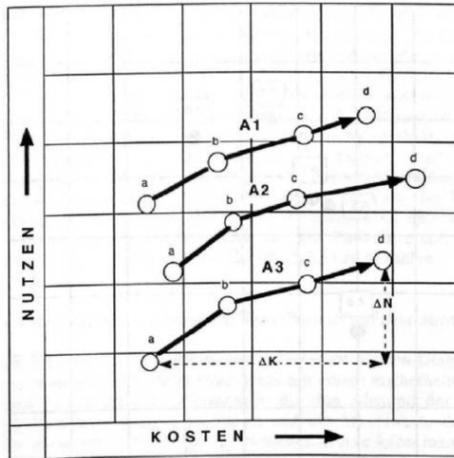
S. 177). Im oben dargestellten Beispiel würde das Projekt D mit dem höchsten Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis von 4,0 auf Basis der KWA als zu realisierende Alternative ausgewählt. Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, muss eine Beschränkung auf die Darstellung der Ergebnisse der KWA nicht immer ausreichend sein. Um bei etwaigen identischen Wirksamkeits- Kosten-Verhältnissen zwischen den jeweiligen Alternativen sinnvoll unterscheiden zu können, sollten immer auch die Ergebnisse der Kosten-Analyse oder der NWA zusammen mit den Ergebnissen der KWA dargestellt werden (Rinza, Schmitz 1992, S. 147).

### **Grafische Darstellung von Kosten und Nutzen**

Eine grafische Darstellung der Ergebnisse einer Kosten- sowie der NW-Analyse führt entgegen der KWA nicht zu einem aggregierten Ergebnis bezüglich des Verhältnisses der beiden Analyseergebnisse. Dies wird durch zwei zentrale Überlegungen deutlich: Einerseits sollten sämtliche verfügbare Informationen zur endgültigen Entscheidung über die Auswahl der untersuchten Alternativen berücksichtigt werden (Rinza, Schmitz 1992, S. 153). Eine Beschränkung auf bspw. den Wirksamkeits-Kosten-Quotienten sollte daher unterbleiben, insbesondere, da durch diese Form der Darstellung eine unabhängige Entscheidung durch den Anwender der Kosten-Nutzwert-Analyse eingeschränkt wird. Andererseits macht eine KWA keinerlei Aussagen darüber, welche Nutzwertsteigerungen durch eine bestimmte (gezielte) Kostenerhöhung möglich sind (Rinza, Schmitz 1992, S. 148). Diese Aspekte verdeutlichen somit die Erfordernis einer grafischen Darstellung der Ergebnisse der Kosten- und der Nutzwert-Analyse. Eine mögliche Form einer solchen Darstellung zeigt die folgende Abbildung A.3.

### **Die „modifizierte“ Nutzwert-Analyse**

Mit der „modifizierten“ NWA wird eine Integration der Ergebnisse der Kosten- und der Nutzwertanalyse derart erreicht, dass die beiden Ergebnisse rechnerisch zu einem Gesamtnutzen zusammengefasst werden (Hoffmeister 2000, S. 298). Dies gelingt in einem ersten



**Abbildung A.3:** Beispielhafte Darstellung von Kosten und Nutzen ((Rinza, Schmitz 1992, S. 151)

Schritt durch die separate Erfassung der beiden Aspekte Kosten und Nutzen. Anschließend werden die Kosten in einen Nutzwert transformiert (Rinza, Schmitz 1992, S. 156). Die Kostenanalyse wird somit zum Bestandteil der Nutzenbetrachtung - und steht nicht mehr komplementär dazu. Die Integration der Kostenanalyse in eine NWA gelingt dabei wie folgt: Zunächst werden die Kosten und die Nutzwerte einzeln ermittelt. Anschließend erfolgt eine Gewichtung der beiden Größen. Dem Kostenbestandteil wird dabei ein Gewichtungsfaktor  $fg_w$  aus dem Intervall  $[0,1]$  zugewiesen. Der Gewichtungsfaktor des „Nutzenbestandteils“ ergibt sich als Komplement dazu, nämlich als  $(1 - fg_w)$ . Um das Ergebnis der Kostenanalyse in einer NWA abbilden zu können, muss es jedoch zuerst in einen Punktwert  $fz_w$  übertragen werden. Dies erfolgt, wie im Abschnitt zur NWA dargestellt, mittels Wertefunktionen oder -tabellen. Die abschließende Berechnung des Gesamtnutzwertes erfolgt durch die folgende Formel (Hoffmeister 2000, S. 298):

$$NW_{ges} = fg_w * fz_w + N_w * (1 - fg_w) \quad (A.1)$$

wobei:

$fz_w$  = Punktwert für den Kostenbestandteil

$N_w$  = Punktwert für das Ergebnis der NWA

$NW_{ges}$  = Ergebnis der modifizierten NWA

Als Ergebnis liefert die „modifizierte“, sprich eine um die Kostenbetrachtung erweiterte NWA, einen Punktwert für sämtliche untersuchten Alternativen. Mit diesem Punktwert wird die Auswahl der zu realisierenden Alternative möglich.

### **A.1.2 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution**

Bei „Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution“ (TOPSIS) handelt es sich um ein Verfahren, das mittels einer Bestimmung eines Distanzmaßes für sämtliche zu untersuchenden Alternativen ein Alternativenranking sowie eine -auswahl ermöglicht (Shih, Shyur and Lee 2007, S. 801). Hinter diesem Verfahren steht die Idee, dass die beste aller untersuchten Alternativen die kürzeste Distanz zur idealen Lösung und gleichzeitig die größte Distanz zur „negativ idealen“ aufweist (Yoon and Hwang 1981, S. 128). Somit sind zur Anwendung von TOPSIS sowohl eine Matrix, die eine Bewertung der einzelnen Alternativen bezüglich der relevanten Kriterien enthält, sowie ein Gewichtungsfaktor für jedes Kriterium aus dem Intervall  $[0,1]$  erforderlich. Die konkrete Anwendung erfolgt in sechs Schritten (Hwang, Yoon 1981, S. 130ff). Diese werden folgend anhand eines konkreten Beispiels erläutert. Hierbei handelt es sich um eine beispielhafte Entscheidungssituation zur Bewerberauswahl für einen Arbeitsplatz. Es ist ferner an das Beispiel von Shih, Shyur und Lee (2007, S. 809 ff) angelehnt. Die zur Entscheidungsfindung erforderliche Eingangsmatrix ist in der folgenden Tabelle A.5 dargestellt.

**Tabelle A.5:** Ausgangsdaten (nach Shih, Shyur, Lee 2007, S. 809ff)

	<b>Sprachtest</b>	<b>Berufstest</b>	<b>Computert.</b>	<b>Interview</b>
Wang	80,00	70,00	65,00	72,00
Lee	94,00	72,00	60,00	54,00
Wu	77,00	70,00	67,00	55,00
Pai	75,00	75,00	70,00	66,00
Gewicht	0,25	0,35	0,35	0,15

**TOPSIS: erster Schritt**

In diesem Schritt wird aus der Eingangsmatrix (diese beinhaltet die Bewertungen der Alternativen hinsichtlich der einzelnen Kriterien) eine normalisierte Entscheidungsmatrix erstellt (Hwang, Yoon 1981, S. 130; Einfache Seitenangaben im Text beziehen sich auf dieselbe Quelle). Hierfür werden die Zelle der Eingangsmatrix quadriert und anschließend die Spaltensummen berechnet. Anschließend werden aus diesen Spaltensummen zunächst die Quadratwurzel gezogen und abschließend jede Zelle der Eingangsmatrix durch das so berechnete Ergebnis dividiert. Als Formel für die Berechnung der normalisierten Entscheidungsmatrix ergibt sich folglich:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (\text{A.2})$$

Hierbei bedeuten:

$r_j$  = Normalisierte Entscheidungsmatrix

$x_{ij}$  = Wert der Zelle ij der Eingangsmatrix

$i, j$  = Zeilen (i) und Spalten (j) der Eingangsmatrix

### TOPSIS: zweiter Schritt

Im zweiten Schritt werden die Zellen der normalisierten Entscheidungsmatrix mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert. Es entsteht eine gewichtete Entscheidungsmatrix (S. 131). Für das vorliegende Beispiel ergibt sich somit die unten dargestellte Tabelle A.6.

**Tabelle A.6:** Beispiel einer gewichteten Entscheidungsmatrix (nach Shih, Shyur, Lee 2007, S. 809ff)

	Sprachtest	Berufstest	Computertest	Interview
Wang	0,12	0,17	0,17	0,09
Lee	0,15	0,18	0,16	0,07
Wu	0,12	0,17	0,18	0,07
Pai	0,11	0,18	0,19	0,08

### TOPSIS: dritter Schritt

In Schritt drei werden aus der eben erstellten, gewichteten Entscheidungsmatrix von jeder Spalte die Maxima sowie Minima bestimmt (S. 131). Der maximale Wert wird im Anschluss daran als „ideale Lösung“ bezeichnet, der minimale Wert als „negativ ideale Lösung“. In unserem Beispiel wäre somit der Spalte „Sprachtest“ der Wert 0,15 als ideale Lösung bzw. 0,11 als negativ ideale Lösung zugeordnet.

### TOPSIS: vierter Schritt

Für jede Alternative wird hier die Distanz zur idealen sowie zur negativ idealen Lösung berechnet. Um dies zu erreichen, wird für jedes Kriterium die Differenz zur idealen sowie zur negativ idealen Lösung bestimmt. Die einzelnen Differenzen werden anschließend quadriert und schließlich aufsummiert (S. 132). Es ergibt sich:

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^{ideal})^2} \quad (\text{A.3})$$

mit:

$v_j^{ideal}$  = ideale (negative ideale) Lösung

$v_{ij}$  = Zelle ij der gewichteten Entscheidungsmatrix

$S_i$  = Distanzmaß der Alternative i zur (negativen) idealen Lösung

Für den Bewerber Wang ergibt sich das Distanzmaß zur idealen Lösung aus:

$$\sqrt{(0,12 - 0,15)^2 + (0,17 - 0,18)^2 + (0,17 - 0,19)^2 + (0,09 - 0,09)^2}$$

$$S_i = 0,04$$

Für das Beispiel der Bewerberauswahl ergeben sich als Distanzmaße zur idealen bzw. zur negativ idealen Lösung die in der folgenden Tabelle dargestellten Werte.

**Tabelle A.7:** Beispiel einer gewichteten Entscheidungsmatrix (nach Shih, Shyr, Lee 2007, S. 809ff)

	$S_{ideal}$	$S_{negideal}$
Wang	0,04	0,02
Lee	0,04	0,04
Wu	0,04	0,02
Pai	0,04	0,03

### TOPSIS: fünfter Schritt

Im fünften Schritt wird nun die „relative Nähe“ zur idealen Lösung berechnet (S. 134). Hierzu wird für jede untersuchte Alternative A der Quotient der Distanz zur negativen idealen Lösung ( $S_{negideal}$ ) und der Summe der Distanzen zur idealen ( $S_{ideal}$ ) sowie negativ idealen Lösung ( $S_{negideal}$ ) berechnet. Als Formel für die relative Nähe ergibt sich folglich:

$$C_A = \frac{S_{negideal}}{S_{negideal} + S_{ideal}} \quad (\text{A.4})$$

Hierbei gibt  $C_A$  die Nähe der Alternative A zur idealen Lösung an. Es ergeben sich für die einzelnen Alternativen die folgenden Werte:

$$C_{Wang} = 0,33$$

$$C_{Wu} = 0,33$$

$$C_{Lee} = 0,5$$

$$C_{Pai} = 0,43$$

### TOPSIS: sechster Schritt

Die im vorherigen Schritt berechneten Distanzmaße können nun dazu genutzt werden, eine Rangfolge der einzelnen Alternativen zu erstellen (S. 134). Im Beispiel weist Kandidat Lee mit einem Wert von 0,5 die größte Nähe zur idealen Lösung auf. Es ergibt sich somit die folgende Rangfolge:

$$Lee \succ Pai \succ Wang = Wu$$

### A.1.3 Die Methode des „Quality Function Deployment“

Yoji Akao entwickelte diese Vorgehensweise des „Quality Function Deployment“ (QFD) im Japan der 1960er-Jahre (Akao 1992, S. 15). Ganz allgemein wird unter dieser Methodik „...die Planung und Entwicklung der Qualitätsfunktionen eines Produktes entsprechend den von den Kunden geforderten Qualitätseigenschaften...“ verstanden (Akao 1992, S. 15). Als Folge hieraus ergeben sich zwei wesentliche Bestandteile des QFD: die Umsetzung von Kundenwünschen in Produkteigenschaften sowie ein Vergleich des eigenen Produktes mit Konkurrenzprodukten. Zur Umsetzung des QFD-Ansatzes, also zur Erstellung des sog. „House of Quality (HoQ; genaue Details folgen in den nächsten Abschnitte)“ bietet sich eine aus sieben Schritten bestehende Vorgehensweise an (Klein 1999, S. 67ff). Auch hier werden diese Schritte sowohl „theoretisch“ als auch mittels „praktischer“ Beispiele erklärt.

## Prozessschritte eins und zwei

Zur Anwendung des QFD erfolgt auch hier eine Erfassung aller Kundenanforderungen (KAF) (Klein 1999, S. 67; einfache Seitenangaben im Text beziehen sich auf dieselbe Quelle), welche mittels Kundeninterviews ermittelt werden können. Darüber hinaus werden in diesen Interviews zur weiteren Untersuchung ebenfalls die jeweiligen Gewichtungen erfasst. Diese Bewertung erfolgt dabei mittels einer Skala, welche die Stufen „eins“ („sehr unwichtig“  $\equiv$  „kein Einfluss“) bis „fünf“ („sehr wichtig“  $\equiv$  „sehr starker Einfluss“) umfasst (Akao 1992, S. 45). Im darauffolgenden zweiten Schritt erfolgt, ebenfalls aus Kundensicht, eine Wettbewerbsanalyse (S. 67): Basierend auf derselben fünfstufigen Skala bewerten die Kunden das Eigenprodukt der Firma sowie im Vergleich dazu konkurrierende Produkte.

## Dritter Prozessschritt

In diesem Schritt erfolgen nun die Definition der zu betrachtenden Qualitätsmerkmale sowie die Erstellung eines „Qualitätsplanes“ (S. 68). Die Auswahl der Qualitätsmerkmale erfolgt dabei derart, dass sie alle denkbaren Qualitätsmerkmale bzw. technische Spezifikationen umfassen, die dazu geeignet sind, die identifizierten Kundenanforderungen zu erfüllen. Eine solche Kundenanforderung könnte beispielsweise für die Automobilindustrie im Falle einer Neuentwicklung (betrachtetes Beispiel für die folgenden Abschnitte) lauten, ein neues Fahrzeug „soll leise sein“ (S. 83). Qualitätsmerkmale, die diese Anforderung erfüllen und erfassen können, sind bspw. das „Fahr-“, „Motor-“ oder „Innenraumgeräusch“. Zusätzlich zu der Definition der zu betrachtenden Qualitätsmerkmale wird zur Erstellung des Qualitätsplans für jede Kundenanforderung ein Zielwert bestimmt (S. 72). Diese Bestimmung basiert auf der erstellten Wettbewerbsanalyse. Hierauf aufbauend wird für jede Anforderung eine mögliche „Verbesserungsrate“ errechnet. Sie ergibt sich als Quotient aus dem Zielwert sowie der aktuellen Bewertung des eigenen Produktes. Parallel hierzu wird für jede Kundenanforderung eine Gewichtung festgelegt. Diese entspricht dabei der Relevanz der jeweiligen Kundenanforderung als Verkaufsargument und liegt, je nach Bedeutung, zwischen 1 und 1,5. Im Anschluss an diese Berechnungen werden als

finales Ergebnis des Qualitätsplans die relativen Bedeutungen aller Anforderungen bestimmt: Durch Multiplikation der Kundengewichtung, der Gewichtung als Verkaufsargument und der Verbesserungsrate ergibt sich ein (sogenannter) „absoluter Gewichtungsfaktor“. Dieser absolute Gewichtungsfaktor wird anschließend durch die Summe aller Gewichtungsfaktoren dividiert, sodass als abschließendes Ergebnis dieses Schrittes die relative Bedeutung der einzelnen Kundenanforderung bekannt ist. Zusammenfassend stellt die folgende Tabelle A.8 diese ersten Schritte beispielhaft dar.

### **Der vierte Prozessschritt**

Da (Qualitäts-)Merkmale oftmals nicht isoliert betrachtet werden können, sondern sich durchaus gegenseitig verstärken oder abschwächen können, also Wechselwirkungen untereinander bestehen, werden in diesem vierten Schritt des QFD diese Wechselwirkungen zwischen den definierten Qualitätsmerkmalen ermittelt und anschließend in einer Korrelationsmatrix dargestellt. Hierbei können vier Stufen des Einflusses einer Wechselwirkung abgebildet werden: „sehr positiv“, „positiv“, „negativ“ sowie „sehr negativ“ (S. 68). Die Korrelationsmatrix stellt aufgrund ihrer Form das charakteristische „Dach“ des HoQ dar.

### **Prozessschritt fünf**

In diesem fünften Schritt des QFD wird eine Beziehungsmatrix erstellt. Diese bildet den Erfassungsgrad der Kundenanforderungen durch die in Schritt

eins identifizierten Qualitätsmerkmale ab (S. 68). Der Erfassungsgrad wird in Form der Beziehung zwischen den Kundenanforderungen und den Qualitätsmerkmalen erfasst und quantifiziert: Liegt eine starke Beziehung zwischen einer Kundenanforderung sowie einem Qualitätsmerkmal vor, werden neun Punkte in die entsprechende Zelle des HoQ eingetragen, bei einer mäßigen Beziehung drei. Ein Punkt wird bei Vorliegen einer möglichen Beziehung vergeben bzw. kein Punkt, falls keine Beziehung existiert. Zusätzlich wird das Produkt aus der Kundengewichtung sowie

KAF	Wettbewerbsanalyse				Planwerte			Gewichtungsfaktoren	
	Kundengewichtung	Firma X	Firma Y	eigene Firma	Zielwert	Verbesserungsrate	Verkaufsargument	absolut	relat. Bedeutung KAF [%]
soll wenig Energie brauchen	3,0	3,0	2,0	4,0	4,0	1,0	1,0	3,00	3,00
soll gut aussehen	4,0	4,0	5,0	3,0	5,0	1,6	1,5	10,00	10,00
soll bedienungsfreundlich sein	3,0	5,0	4,0	3,0	5,0	1,6	1,2	6,26	7,70
soll zuverlässig sein	5,0	4,0	5,0	4,0	5,0	1,2	1,0	6,25	6,40
...									

**Tabelle A.8:** Beispielhafter Qualitätsplan des QFD (Klein (1999), S. 72)

den Punkten für die Stärke der Beziehung berechnet und in dieselbe Zelle eingetragen. Damit enthält jede Zelle des HoQ zwei Punktwerte: einen (absoluten) für die Stärke der Beziehung sowie einen gewichteten. Durch Aufsummierung der gewichteten Punktwerte jeder Spalte kann eine Aussage bezüglich der Bedeutung der einzelnen Qualitätsanforderungen getroffen werden. Anschließend können diese Summen in die relative Bedeutung der einzelnen Qualitätsanforderungen übertragen werden. Die folgende Abbildung stellt ein so ermitteltes „House of Quality“ dar.

Prozessmerkmale		Standardabweichung Anforderung Verfahrens- anweisungen		techn. Gewichtung		-		+		-		+		-		+	
		VA1: Sprühwasser	VA2: Zusätze	VA3: Wkz.-Füllung	VA3: Kurzfasern	AA1: Wkz.-Konstr.	Abstim.-Technikum	VA4: Wischbad	Durchlaufacknung	AA2: Funktionstest	nahlos gezogen	○	↑	↑	↑	↑	○
Abschreckung	5	9	45														
Ionisierung	3	9	27														
stehendes Kammerwerkzeug	3			9	27												
Glasfaseranteil	4					3	12	3	12	1	3						
Wkz.-Radien	3							3	9								
Wkz.-Trennebene	3			1	3					9	27						
Maschinenparameter	5			1	5	1	5					9	45				
Entfettung	4											9	36	1	4		
2-Schicht-Lackierung	5													9	45		
Wkz.-Einleger	3					1	3	9	27	1	3						
Montagegruppe	2															9	18
Rohrmantel	2															1	2
technische Zielgrößen		18°C / 10 sec	1% Cr / 1,5% Mn	evakuiert	max. 6 mm	—	—	SPC	Seifenemulsion	5 min einbrennen	1 Stück je 1000	—	—	—	—	—	—
Schwierigkeitsgrad		3	2	1	1	2	2	1	2	3	1						
Bedeutung	Pkt.	45	27	35	20	84	55	36	49	20	6	377					
	%	12	7,2	9,3	5,3	22,3	14,6	9,5	13	5,3	1,6	100					

Abbildung A.4: Das „House Of Quality“ (Klein (1999), S. 87)

## Die beiden letzten Prozessschritte des QFD

Die technische Umsetzung dieser Neuproduktplanung mittels der Methode des QFD erfolgt anschließend im sechsten Schritt (S. 68). Hierzu werden die Herausforderungen bei der Umsetzung der einzelnen Qualitätsanforderungen abgeschätzt und in das HoQ eingetragen. Anschließend wird die konkrete Produktneuentwicklung gestartet. Im abschließenden siebten Schritt wird das erstellte, vollständige HoQ zur Messung und Bewertung des Erfüllungsgrads des neuen Produktes herangezogen. Die Bestimmung dieses Erfüllungsgrads erfolgt einerseits durch die tatsächlichen Eigenschaften des neuen Produktes, andererseits durch die im HoQ festgelegten Ziele. Ein HoQ kann somit quasi als Controlling-Instrument aufgefasst werden, mittels dem frühzeitige Fehlentwicklungen verhindert werden können (S. 69).

### A.1.4 „Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing“

Die „Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing“ (EATWOS) stellt eine Analysetechnik dar, mittels derer Input und Output verschiedener Alternativen zueinander in ein Verhältnis gesetzt werden. Mittels EATWOS wird ein Effizienzwert als Ergebnis für jede zu untersuchende Alternative berechnet und somit die Auswahl einer zu realisierenden Alternative ermöglicht. Die Besonderheit dieser Vorgehensweise der Effizienzanalyse ist, dass ein gewisser „Zufriedenheits- oder Sättigungsgrad“ (engl. „satisficing level“) des Entscheiders berücksichtigt werden kann (Peters and Zelewski 2007, S. 75) (einfache Seitenangaben im Text beziehen sich auf diese Quelle <sup>1</sup>). Das bedeutet, dass, sollte ein Kriterium eine Ausprägung oberhalb dieses Sättigungsgrades besitzen, dies nicht zu einem höheren

---

<sup>1</sup>Die einzelnen Inhalte der jeweiligen Prozessschritte sind (aus Sicht des Verfassers) zur besseren Verständlichkeit und logischeren Abfolge jedoch im Vergleich zur angegebenen Quelle leicht verändert und getauscht dargestellt. Ebenso wird der hier geschilderte letzte Bestandteil von EATWOS, die Identifikation von Potenzialen zur Effizienzsteigerung der zu wählenden Alternative, nicht geschildert. Grund hierfür ist, dass in dieser Arbeit nur die Auswahl des bestmöglichen Ladungsträgers erfolgen soll. Prozessverbesserungen bleiben dem Anwender im jeweiligen Fall überlassen.

Effizienzwert führt (d. h., der „Kunde“ ist auch so schon rundum zufrieden). Vor allem bei praxisrelevanten Entscheidungsproblemen kann die Existenz eines solchen Sättigungsgrads oftmals beobachtet werden. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn bekannt ist, dass zu transportierende Waren nicht mehr als 200 kg wiegen (und dies auch in Zukunft nicht werden). Transporthilfsmittel, welche eine höhere Nutzlast aufweisen, bringen somit keinen weiteren Vorteil (bezogen auf dieses Kriterium). Diese Tatsache verdeutlicht somit die Notwendigkeit der Erweiterung einer einfachen „Effizienz Betrachtung“ (wähle den größten Quotienten aus Output und Input), wie sie bspw. bei der Kosten-Wirksamkeitsanalyse erfolgt. In den nachfolgenden Abschnitten wird nun die Vorgehensweise der Effizienzanalyse mittels EATWOS dargelegt, welche grundsätzlich in vier Schritten erfolgt. Zum besseren Verständnis wird diese Vorgehensweise anhand eines Praxisbeispiels (Effizienzanalyse eines Wärmebehandlungs-ofens) (S. 75ff) parallel zur eigentlichen Erklärung illustriert.

### **EATWOS: Erster Teilprozess**

Bevor überhaupt Analysen erfolgen können, ist es erforderlich, im ersten Teilprozess sämtliche, für die Anwendung benötigte Parameter zu bestimmen. Diese umfassen sowohl Angaben zum In- und Output der einzelnen (zu betrachtenden) Alternativen als auch die Angabe eines konkreten Sättigungsgrades bezüglich dieses Outputs (S. 76). Darüber hinaus ist in diesem Schritt eine Gewichtung der einzelnen In- und Outputfaktoren zusätzlich zur Bestimmung konkreter In- und Outputwerte der einzelnen Alternativen unerlässlich. Für das konkrete Beispiel des Wärmebehandlungs-ofens zeigt die folgende Tabelle die einzelnen In- und Outputfaktoren sowie deren Gewichtungen, der Sättigungsgrad bezüglich des maximalen Chargengewichts sei bei 350 kg erreicht (S. 78).

Zur Auswahl stehende Öfen	Input		Output	
	Kosten pro Stunde [€]	Arbeitsaufwand für Be- und Entladen [Prioritäten]	maximales Chargen- gewicht [kg]	maximales Chargen- volumen [ $cm^3$ ]
O1	3,74	0,750	300,00	382,76
O2	3,32	0,125	350,00	360,00
O3	4,07	0,125	650,00	429,00
<b>Gewichtungs- faktoren</b>	<b>0,60</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>

**Tabelle A.9:** Input- und Outputfaktoren für EATWOS am Beispiel des WärmebehandlungsOfens (Peters, Zelewski 2007, S. 77)

### EATWOS: Zweiter Teilprozess

Nachdem die Inputfaktoren nun bekannt sind, werden im zweiten Schritt die „Inputabstandsmaße“ berechnet (S. 77). Hierfür ist es erforderlich, zunächst die normalisierten Inputquantitäten zu bestimmen. Dies wird dadurch erreicht, dass für jede Zelle  $z_{ij}$  der ermittelten Tabelle ( Alternativen  $i$ , Inputs  $j$ ) die entsprechende normalisierte Inputquantität  $r_{ij}$  wie folgt berechnet wird:

$$r_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sqrt{z_{1j}^2 + z_{2j}^2 + z_{3j}^2}} \quad (\text{A.5})$$

Für das hier betrachtete Beispiel der Wärmebehandlungsöfen kann somit bspw. für den Inputfaktor Kosten pro Stunde und die Alternative A1 die normalisierte Inputquantität  $r_{11}$  bestimmt werden:

$$r_{11} = \frac{3,74}{\sqrt{3,74^2 + 3,32^2 + 4,07^2}}$$

Analog werden nun sämtliche normalisierte Inputquantitäten berechnet. Als Ergebnis dieses Teilschritts erhält man die folgende Matrix:

$$r_{ij} = \begin{vmatrix} 0,58 & 0,97 \\ 0,51 & 0,16 \\ 0,63 & 0,16 \end{vmatrix}$$

Im Anschluss an diese Normalisierung wird im nächsten Teilschritt die Matrix der Inputabstandsmaße ermittelt. Hierzu erfolgt als erstes die Bestimmung jedes Spaltenminimums  $r_{ih}$  der obigen Matrix. Im Beispiel ist dieser Minimalwert der ersten Spalte ( $min_{i1}$ ) 0,51, das Minimum der zweiten Spalte beträgt 0,16 ( $min_{i2}$ ). Hiermit kann das Inputabstandsmaß  $ipm_{ij}$  jeder Zelle der  $j$ -ten Spalte der Matrix  $r_{ij}$  wie folgt berechnet werden:

$$ipm_{ij} = 1 + r_{ij} - min_{ij} \quad (\text{A.6})$$

Im betrachteten Beispiel berechnet sich bspw. das Inputabstandsmaß  $ipm_{12}$  der Zelle  $r_{12}$  folgendermaßen:

$$ipm_{12} = 1 + 0,97 - 0,16 = 1,81$$

Der zweite Schritt von EATWOS liefert somit als Ergebnis die unten dargestellte Matrix der Inputabstandsmaße:

$$ipm_{ij} = \begin{vmatrix} 1,07 & 1,81 \\ 1,00 & 1,00 \\ 1,12 & 1,00 \end{vmatrix}$$

### EATWOS: Dritter Teilprozess

Dieser Teilprozess besteht darin, ähnlich der Vorgehensweise für die Inputfaktoren, nun auch die Outputfaktoren in Outputabstandsmaße zu übertragen (S. 78). Hierbei wird jedoch (im Gegensatz zu den Inputfaktoren bzw. anderen „Effizienzanalysemethoden“) die Sättigungsgrenze berücksichtigt. Diese Berücksichtigung der Sättigungsgrenze (SG) geschieht mittels mehrerer Restriktionen. Sie lauten (S. 78):

1.  $\frac{SG}{SG} \frac{y_{ij}}{SG} + z_1 \leq 1$
2.  $\frac{SG - y_{ij}}{SG} * z_2 \geq 0$
3.  $z_1, z_2 \in \{0, 1\}$
4.  $z_1 + z_2 = 1$
5.  $a_{ij} = * \frac{y_{ij}}{SG} * z_2 + z_1$

mit:

$a_{ij} = \text{Outputfaktoren}$

$SG = \text{Saettigungsgrenze}$

$y_{ij} = \text{Outputquantitaeten}$

Diese Restriktionen kommen dann zum Tragen, wenn für einen bestimmten Outputfaktor eine Sättigungsgrenze existiert. Sollte keine SG bekannt sein, so werden die Outputquantitäten analog zu den Inputquantitäten berechnet. Im exemplarisch betrachteten Fall der Wärmebehandlungsöfen liegt eine solche Grenze bezüglich des Outputfaktors „maximales Chargengewicht“ in Höhe von 350 kg vor und muss entsprechend berücksichtigt werden. In diesem Fall liegt für Ofen O3 der Wert dieses Faktors bei 650 kg und liegt somit über dem SG. Folglich werden die Restriktionen wie folgt angewendet:

1.  $\frac{350-650}{350} + z_1 \leq 1$
2.  $\frac{350-650}{350} * z_2 \geq 0 \Rightarrow z_2 = 0, z_1 = 1$

$$a_{31} = \frac{650}{350} * 0 + 1 = 1$$

Es ergeben sich für die einzelnen Alternativen die unten dargestellten Outputquantitäten.

$$a_{ij} = \begin{vmatrix} 0,86 & 0,56 \\ 1,00 & 0,53 \\ 1,00 & 0,63 \end{vmatrix}$$

Anschließend werden auch für die Outputs die jeweiligen Outputabstandsmaße bestimmt. Zu dieser Bestimmung wird zunächst das Spaltenmaximum  $max_{ij}$  jeder Spalte bestimmt (S. 79). Es liegt bei Spalte eins bei 1 bzw. bei Spalte zwei bei 0,63. Hiermit wird für jedes Element  $a_{ij}$  das entsprechende Outputabstandsmaß folgendermaßen berechnet (S. 79):

$$op_{ij} = 1 - max_{ij} + a_{ij} \tag{A.7}$$

Im Beispiel der Wärmebehandlungsöfen ergibt sich:

$$op_{ij} = \begin{vmatrix} 0,56 & 0,93 \\ 0,62 & 0,90 \\ 1,00 & 1,00 \end{vmatrix}$$

### EATWOS: Vierter Teilprozess

Als letzter Schritt erfolgt die Berechnung der Effizienzwerte auf Basis der Input- und Outputabstandsmaße (S. 79). Hierfür erfolgt eine Gewichtung dieser Maße entsprechend der festgelegten Gewichtungsfaktoren. Danach werden die so gewichteten Input- und Outputabstandsmaße aufsummiert und danach der Quotient aus beiden Summen entsprechend der folgenden Vorschrift bestimmt (S. 79):

$$E_i = \frac{w_1 * op_{i1} + w_2 * op_{i2}}{w_1 * ip_{i1} + w_2 * ip_{i2}} \quad (\text{A.8})$$

Es ergeben sich im Beispiel schlussendlich die folgenden Effizienzwerte:

$$E_1 = \frac{0,86 * 0,5 + 0,93 * 0,5}{1,07 * 0,6 + 1,81 * 0,4} = 0,66$$

$$E_2 = \frac{1 * 0,5 + 0,9 * 0,5}{1 * 0,6 + 1 * 0,4} = 0,95$$

$$E_3 = \frac{1 * 0,5 + 1 * 0,5}{1,12 * 0,6 + 1 * 0,4} = 0,93$$

Aus diesen Ergebnissen wird ersichtlich, dass Ofen 2 die höchste Effizienz aufweist und somit ausgewählt werden sollte.

### A.1.5 Kosten-Nutzen-Analyse

Der nun folgende Abschnitt stellt als weitere mögliche Methode zur ganzheitlichen Auswahl von Behältern und gleichzeitig als letzte „qualitative“ Modellierungsmöglichkeit die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) vor. Da auch hier Kosten bereits mit erfasst werden, dient sie als Überleitung zu den in den folgenden Abschnitten beschriebenen „quantitativen“

Modellierungsmöglichkeiten. Nach (Boardman, Greenberg, Vining and Weimer 2006, S. 26) ist die KNA eine Möglichkeit, die Effizienz unterschiedlicher, zur Auswahl stehender Alternativen zu messen. Sie ermöglicht dabei die Identifikation derjenigen Alternative, mit derer ein gegebenes Ziel mit minimalem Ressourceneinsatz erreicht werden kann. Hauptsächlich wird sie bisher als Entscheidungsgrundlage für öffentliche Investitionsprojekte eingesetzt (Hanusch 1994, S. 2f), vereinzelt allerdings auch zur Bestimmung des Produktionsniveaus oder eines Produktionsprogramms in der Privatwirtschaft (Mishan 1975, S. 9). Das wesentliche Kennzeichen der KNA ist die umfassende Berücksichtigung sowohl von Kosten als auch Nutzen aller von einer bestimmten Entscheidung betroffenen Personen (Layard and Glaister 1994, S. 4). Sie wird nun anhand von vier grundlegenden Schritten beschrieben.

## **Grundlagen und Ziele**

Die KNA baut auf den folgenden zwei grundlegenden Fragen auf (Hanusch 1994, S. 1):

1. Ist es aus ökonomischer Sicht sinnvoll, öffentliche Projekte durchzuführen und diese durch finanzielle Mittel aus dem privaten Sektor zu finanzieren?
2. Welches staatliche Vorhaben oder Projekt soll aus einer Reihe von Alternativen ausgewählt und realisiert werden?

Zur Beantwortung dieser Grundfragen werden die Kosten einer Alternative dem jeweiligen Nutzen im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse gegenübergestellt. Diese Aspekte werden dabei ganzheitlich sowie unter sozialen Gesichtspunkten betrachtet. Bezüglich der Kosten werden dabei einerseits die direkten, also die einer Alternative verbundenen Auszahlungen, andererseits jedoch auch die indirekten Kosten („Opportunitätskosten“), beispielsweise auf Grund der Ausgaben resultierender Konsumverzicht, betrachtet. Der „Nutzen“ einer Alternative gibt im Rahmen der KNA den Beitrag einer Alternative zur individuellen Bedürfnisbefriedigung an (Hanusch 1994, S. 2).

Zur Beantwortung der Frage, ob ein öffentliches Projekt realisiert werden soll oder nicht, spricht bei der Durchführung einer KNA, werden zwei Ansätze verfolgt: Der erste dieser Ansätze basiert dabei auf dem „Pareto-Kriterium“ bzw. dem Begriff der „Pareto-Effizienz“: „Eine Allokation von Gütern ist dann pareto-effizient, wenn keine alternative Allokation mindestens eine Person wohlhabender machen kann, ohne eine andere weniger wohlhabend zu machen“. (Boardman u. a. 2006, S. 26). Somit sollte ein mögliches Projekt nur dann umgesetzt werden, wenn es durch das Projekt zu keinem Wohlstandsverlust einer Person kommt, allerdings mindestens eine Person durch das Projekt ihren Wohlstand steigern kann. Somit handelt es sich beim Pareto-Kriterium um ein sehr restriktives. Da es zusätzlich in der Realität kaum fundiert kontrollier- oder nachvollziehbar ist, wird bei der praktischen Anwendung oftmals das weniger strikte „Hicks-Kaldor-Kriterium“ verwendet. Somit kann eine Alternative auch dann realisiert werden, wenn sie nicht pareto-effizient ist bzw. gegen das Pareto-Kriterium verstößt. Bei Berücksichtigung dieses Kriteriums ist es zur Realisierung einer möglichen Alternative „nur“ erforderlich, dass diejenigen Personen, die durch die Realisierung Vorteile erfahren, den Verlust derjenigen ausgleichen können, die durch die Realisierung des Projekts negativ beeinträchtigt werden (Layard, Glaister 1994, S. 6 und Hanusch 1994, S. 19). Im Zusammenhang mit dem genannten Hicks-Kaldor Kriterium wird auch der Begriff der „Kompensationsvariation“ (Mishan 1975, S. 12f und Hanusch 1994, S. 19) genannt. Hiermit ist die Menge an Geld gemeint, die erforderlich ist, um ein Individuum nach Durchführung der „Änderung“ (wenn es also genau diese Menge an Geld erhalten oder auch bezahlt hat) weder besser noch schlechter als vor dieser Maßnahme zu stellen (Mishan 1975, S. 12). Wenn die Summe der Kompensationsvariationen der Personen, die durch die Realisierung eines Projektes Nachteile erlitten haben, und der Personen, denen durch die Realisierung Vorteile entstanden sind, positiv sind, können die bevorzugten Personen die benachteiligten folglich überkompensieren. Dies bedeutet, dass die Durchführung des betrachteten Projektes eine Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Zustand mit sich bringt (Mishan 1975, S. 12f). Diese Vereinfachung des Pareto-Kriteriums bringt die Einführung des Nettonutzens einer Alternative mit sich. Dieser Nettonutzen steht dabei für die Differenz zwischen dem Nutzenwert einer Alternative und den entsprechenden Kosten (Boardman u. a. 2006, S. 15). Bezogen auf die genannten grundlegenden

Fragestellungen der KNA ergeben sich die folgenden Entscheidungsregeln: Ist der Nettonutzen eines Projekts größer null, so wird es realisiert. Sollte es verschiedene Alternativen geben, für die dies zutrifft, wird diejenige ausgewählt, welche den größten Nettonutzen besitzt (Boardman u. a. 2006, S. 15). Da aus volkswirtschaftlicher Sicht der Nettonutzen auch als Wohlfahrt bezeichnet wird (Mühlenkamp 1994, S. 9), dient die KNA dem Zweck, Wohlfahrtsänderungen durch öffentliche Maßnahmen zu erfassen.

## **Anwendung und Durchführung**

Der Zeitpunkt, wann der Kosten-Nutzen-Analyse angewendet wird, kann in verschiedenen Projektphasen liegen. Dennoch finden drei Grobeinteilungen dieser Zeitpunkte statt (Boardman u. a. 2006, S. 3): „ex ante“, „in medias res“, oder „ex post“. Bei einer „ex ante“-Durchführung, also vor Realisierung eines Projektes, werden in erster Linie die zwei grundlegenden Fragen, ob ein Projekt überhaupt realisiert werden soll bzw. welches Projekt aus einer gegebenen Menge von Alternativen auszuwählen ist, beantwortet. Im Gegensatz hierzu wird bei „ex post“-Anwendung der KNA, also bereits nach der Durchführung eines Projektes, primär das Ziel verfolgt, Aussagen über die Wirksamkeit größerer Projektgruppen treffen zu können. Die „in medias res“-Anwendung stellt schließlich eine Mischform der beiden anderen Arten dar, die während der Projektdurchführung erfolgt. Sie umfasst die Bestandteile der beiden anderen Möglichkeiten und liefert eine Entscheidungsgrundlage darüber, ob ein Projekt weitergeführt werden soll, oder nicht.

Trotz dieser verschiedenen Zeitpunkte der Anwendung einer KNA, folgt ihre Durchführung immer einem festen Schema. Wie bspw. bei der Nutzwertanalyse, herrscht auch bei der KNA Uneinigkeit darüber, wie genau dieses Schema aussieht oder in wie vielen Schritten sie durchzuführen ist (Hanusch 1994, S. 6, und Boardman u. a. 2006, S. 8). Im Folgenden wird die Aufteilung von Boardman u. a. (2006, S. 8; einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf Boardman u. a. 2006) in neun Schritte näher betrachtet und erklärt, da so eine besonders hohe Praxistauglichkeit möglich scheint. Anschließend werden die Herausforderungen geschildert sowie das Vorgehen an einem Beispiel verdeutlicht.

**Schritt eins** Im ersten Schritt einer Kosten-Nutzen-Analyse erfolgt die Spezifikation einer Menge von alternativen Projekten (S. 7f). Diese können bspw. unterschiedliche Möglichkeiten der Verkehrsverbindung zwischen zwei Städten sein. Auch der jetzige Zustand, der bereits so existierende Status-quo, gehört dabei zur Menge der Alternativen. Damit ein sinnvoller Vergleich zwischen den Alternativen gesichert werden kann (sowie der erforderliche Aufwand sich noch im Rahmen hält), sollte die Alternativenmenge vier bis sieben Elemente beinhalten.

**Schritt zwei** Anschließend erfolgt nun die Entscheidung darüber, auf welcher Ebene die Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt wird (S. 9). Ziel ist es dabei, die Menge derjenigen Personen zu ermitteln, für welche die zu untersuchenden Projekte Vorteile bzw. Nachteile mit sich bringen würden. Entscheidend bei der Unterscheidung, welcher Personenkreis als vom Projekt betroffen angesehen wird oder nicht, ist dabei, um welchen Auftraggeber (bzw. um welche Größenordnung) es sich bei dieser Kosten- Nutzen-Analyse handelt: Sind die zu untersuchenden Projekte regional begrenzt, werden folglich auch nur Menschen aus der entsprechenden Region berücksichtigt. Sich im Zuge der Projektdurchführung möglicherweise ergebende nationale oder gar globale Effekte werden ausgeklammert.

**Dritter Schritt** In diesem werden sowohl die Auswirkungen erfasst, die die unterschiedlichen Projekte mit sich bringen, als auch parallel hierzu die Indikatoren zu deren Messung definiert (S. 9). Die Kosten, die die Projekte verursachen, zählen ebenso zu den Auswirkungen wie auch deren Effekte. Somit sind die Datenverfügbarkeit sowie die Erfassbarkeit der Wirkungen wesentlich zur Festlegung der Indikatoren. Diese Auswirkungen werden im anschließenden vierten Schritt über die gesamte „Projektlebensdauer“ quantitativ prognostiziert (S. 11).

**Schritt vier** Wie aus den Anführungen ersichtlich wird, ist dieser Schritt gleichermaßen für die KNA von besonders hoher Bedeutung sowie auch schwierig. Diese Problematik resultiert aus der Tatsache, dass öffentliche Projekte (direkte) Auswirkungen auf die Menschen haben sowie deren Verhalten beeinflussen können. Allerdings gestaltet sich (insbesondere aufgrund der Vielfältigkeit der menschlichen Natur und Gruppendynamik - d. Autor) die Vorhersage und Erfassung dieses Verhaltens als äußerst schwierig<sup>2</sup>.

**Fünfter Prozessschritt** Im nun folgenden fünften Schritt werden die eben prognostizierten Auswirkungen in Geldwerte übertragen, sprich monetarisiert (S. 12). Schwierig gestalten sich hierbei bspw. die Monetarisierung eines Menschenlebens oder einer Zeitersparnis durch ein potenzielles Projekt. Als Ergebnis der ersten fünf Schritte liegen somit konkrete, finanzielle Aussagen hinsichtlich der Kosten und Nutzen für alle alternativen Projekte vor.

**Sechster Schritt** Da Kosten und Nutzen nicht unmittelbar anfallen, sondern im Verlauf des Projekts, werden die in den ersten fünf Schritten getroffenen finanziellen Aussagen nun diskontiert (S. 14), also zu Barwerten abgezinst. Hierbei werden u. a. Inflationsraten oder Opportunitätskosten durch entgangene Kapitalerträge mit berücksichtigt. Eine Möglichkeit zur Berechnung dieser Barwerte *PV* liefert die folgende Formel (Boardman et al. 2006, S. 14):

$$PV = \frac{C}{(1 + Z)^T} \quad (\text{A.9})$$

*C* repräsentiert hier zukünftige Zahlungen oder Kosten, *Z* gibt den Abzinsungssatz an und *T* bezeichnet die Anzahl der Perioden, bis die Zahlungen oder Kosten anfallen.

---

<sup>2</sup>So können sie bspw. mit dazu beitragen, dass Parteien den Regierungschef stellen, die es noch nie vorher getan haben...

**Schritt sieben** Basierend auf diesen Barwerten wird nun der Nettonutzer- oder -barwert für jede Alternative ermittelt (S. 15). Er ist das Ergebnis der Differenz zwischen dem Nutzenbarwert einer Alternative und dem entsprechenden Barwert der Kosten. Dieser liefert auch die Entscheidungsgrundlage zur Auswahl des zu realisierenden Projekts.

**Achter Schritt** Auch bei Durchführung einer KNA ist es wichtig, die Einflüsse der einzelnen Faktoren zu kennen. Daher erfolgt im achten Schritt die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse (S. 17). Hierzu erfolgt die wiederholte Untersuchung ausgewählter Auswirkungen bezüglich derer Unsicherheit über die Eintrittswahrscheinlichkeit vorherrscht, sodass der Einfluss verschiedener Eintrittswahrscheinlichkeiten auf den Nettobarwert der Alternative ermittelt werden kann. Insbesondere vor dem Hintergrund der in Schritt vier erwähnten großen Unsicherheit bezüglich der Einschätzung und Vorhersage der Auswirkungen von Projekten wird die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit der Sensitivitätsanalyse deutlich (hiermit werden diese Unsicherheiten berücksichtigt und können - je nach Ausgang - relativiert werden).

**Letzter Schritt** Im abschließenden neunten Schritt können nun mit den erzielten Ergebnissen Empfehlungen gegeben werden, ob ein und wenn ja welches Projekt zu realisieren ist. Hierbei ist zu beachten, dass die eigentliche Entscheidung hierüber kein Bestandteil der Kosten-Nutzen-Analyse mehr ist.

## Ein Beispiel

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise für die Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse betrachten wir nun ein konkretes Praxisbeispiel, ein Straßenneubau in Kanada, in dem die KNA als Entscheidungsgrundlage für die Wahl der Art der Straßenverbindung dient (die folgenden Angaben stammen alle, wenn nicht anders gekennzeichnet, aus Boardman u. a. 2006, S. 2ff). Zuerst werden hierzu im Verlauf der ersten beiden Schritte vier Alternativen mit unterschiedlichem Bezugsrahmen ermittelt. Darüber hinaus wird das Entscheidungsproblem sowohl bezüglich der globalen als auch der regionalen Folgen untersucht. Im dritten Schritt werden

anschließend für diese vier Alternativen die verschiedenen Wirkungen sowie die möglichen Indikatoren zur Messung derselben identifiziert. Als entscheidende Wirkungen für den Neubau der Straßenverbindung können der Wert der Straße selbst, Zeit- und Kosteneinsparungen sowie die Sicherheit der Strecke identifiziert werden. Dabei dient bspw. die Zahl der vermiedenen Unfälle durch den Straßenneubau als Indikator für die Sicherheit. Im vierten Schritt werden nun für die soeben ermittelten Wirkungen die Entwicklung während des Betrachtungszeitraums von 20 Jahren vorhergesagt. Bspw. ergibt die Berechnung der Wirkung der Sicherheit, dass aufgrund der besser ausgebauten sowie kürzeren Strecke 6,5 Menschenleben pro Jahr gerettet werden könnten<sup>3</sup>. Im folgenden fünften Schritt werden diese Wirkungen über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren monetarisiert. So kann bspw. die aufgrund der kürzeren Strecke eingesparte Fahrtzeit mit 6,68 US-\$ pro Fahrzeugstunde bzw. ein gerettetes Menschenleben mit 500.000 US-\$ beziffert werden. Anschließend erfolgt die Diskontierung dieser Kosten- und Nutzenbestandteile auf einen Barwert (Schritt 7). Die folgende Abbildung A.10 zeigt zusammenfassend alle Projektwirkungen sowie die damit verbundenen Kosten auf.

Diese Ergebnisse zeigen bereits, dass auf die Durchführung der Sensitivitätsanalyse verzichtet werden kann, da die Alternative des Straßenneubaus ohne Straßenmaut (mit einem Nettonutzen von 148,8 Mio. US-\$) sowohl aus globaler als auch regionaler Sicht die deutlich vorteilhaftere ist. Somit kann im letzten Schritt die Empfehlung zur Realisierung der Alternative des Straßenneubaus ohne Straßenmaut an die Regionalverwaltung ausgegeben werden. Die obige

## **Herausforderungen**

Abschließend sollen nun nochmals die Herausforderungen bei der Anwendung einer Kosten-Nutzen-Analyse (und damit die der „qualitativen“ Verfahren allgemein) näher betrachtet werden. Wie bereits oben geschildert, stößt man bei der Durchführung einer KNA auf zwei

---

<sup>3</sup>Diese Berechnung basiert auf einer Statistik, die besagt, dass 0,027 Menschenleben pro Millionen Fahrzeugkilometer und Jahr aufgrund eines Unfalls sterben.

	No Tolls		With Tolls	
	A Global Perspective	B Provincial Perspective	C Global Perspective	D Provincial Perspective
<b>Project Benefits</b>				
Time and Operating Cost Savings	389.8	292.3	290.4	217.8
Horizon Value of Highway	53.3	53.3	53.3	53.3
Safety Benefits [Lives]	36.0	27.0	25.2	18.9
Alternative Routes Benefits	14.6	10.9	9.4	7.1
Toll Revenues	0.0	0.0	0.0	37.4
New Users	0.8	0.6	0.3	0.2
<b>Total Benefits</b>	<b>494,5</b>	<b>384,1</b>	<b>378,6</b>	<b>334,7</b>
<b>Project Costs</b>				
Constructions	338.1	338.1	338.1	338.1
Maintenance	7.6	7.6	7.6	7.6
Toll Collection	0.0	0.0	8.4	8.4
Toll Booth Construction	0.0	0.0	0.3	0.3
<b>Total Costs</b>	<b>345,7</b>	<b>345,7</b>	<b>354,4</b>	<b>354,4</b>
<b>Net Social Benefit</b>	<b>148.8</b>	<b>38.4</b>	<b>24.2</b>	<b>-19.7</b>

**Tabelle A.10:** Beispielergebnisse (Boardman et al. 2006, S. 8)

elementare Herausforderungen: die Vielfalt an Wirkungen von Projekten sowie die Möglichkeiten der Nutzenerfassung von Projekten.

**Auswirkungen von Projekten** Ein wesentliches Element der KNA ist die ganzheitliche Erfassung von Kosten und Nutzen der zu betrachtenden Projekte. Diese Auswirkungen werden (s. oben) in den Prozessschritten drei bis fünf erfasst, vorhergesagt sowie anschließend monetarisiert. Hierbei ist die Erfassung der Projektauswirkungen von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund bietet es sich an, mögliche Auswirkungen eines Projekts separat zu erläutern und zu klassifizieren. Hanusch unterscheidet dazu vier Typen von Projektwirkungen (1994, S. 8; einfache Seitenangaben im folgenden Text beziehen sich auf dieselbe Quelle):

1. reale (technologische) und pekuniäre Effekte
2. direkte (interne) und indirekte (externe) Effekte
3. tangible und intangible Objekte
4. intermediäre und finale Effekte.

Reale Effekte öffentlicher Projekte bezeichnen dabei diejenigen Effekte, welche „unmittelbar die Versorgung von Individuen oder Haushalten mit Gütern oder Dienstleistungen verändern“ (S. 8). Somit beeinflussen sie direkt den gesellschaftlichen Wohlstand. Im Falle der Überlegung einer neuen Autobahnstrecke könnten dies bspw. Zeiteinsparungen sein (S. 8). Pekuniäre Effekte hingegen führen ausschließlich durch die monetären Transfervorgänge zu Verteilungsveränderungen. Im Beispiel der neuen Autobahntrasse können dies bspw. zusätzliche Gewinne durch an der Autobahn angesiedelte Raststätten sein (S. 8). Direkte und indirekte Effekte werden hier auf Grundlage der Ziels (Intention) des Entscheiders unterschieden (S. 9): Sofern einzelne Effekte gezielt, also bewusst, angestrebt werden, so handelt es sich hierbei um direkte Effekte. Sind es allerdings ungeplante, also unbeabsichtigte, zufällige Auswirkungen, so sind dies indirekte Effekte. Wiederum bezogen auf die neue Autobahnverbindung ist die mögliche Zeitersparnis ein direkter Effekt, ein indirekter ist bspw. die mögliche Lärmbelastung. Bei der Differenzierung von tangiblen und intangiblen Effekten ist deren Messbarkeit das zentrale

Kriterium (S. 9): Sind die Wirkungen quantifizierbar, so handelt es sich dabei um tangibles. Können jedoch nur qualitative Aussagen zu einem bestimmten Kriterium getroffen werden, so liegt ein intangibles vor (bspw. Eingriffe in die Landschaft). Schließlich können Wirkungen zuletzt dadurch unterschieden werden, ob sie unmittelbar und somit final auf das Nutzenniveau einer Person einwirken (bspw. öffentliche Freizeiteinrichtungen), oder ob sie dies nur mittelbar tun, sprich intermediär (bspw. reduzierte Kosten in Produktionsbetrieben aufgrund einer verbesserten Straßenanbindung) (S. 10). Diese Unterscheidungen der möglichen Typen von Projektwirkungen sind insofern wichtig, dass keiner dieser Effekte bei einer Kosten-Nutzen-Analyse übersehen oder vernachlässigt werden sollte.

**Nutzenerfassung** Von außen sind weder Nutzen noch Nutzenänderungen unmittelbar erfass- oder messbar (Mühlenkamp 1994, S. 23). Eine Nutzenerfassung kann jedoch bspw. mittels Befragung der betroffenen Personen praxisnah erfolgen (Hanusch 1994, S. 76). Auch wenn im Folgenden nicht weiter auf das exakte Vorgehen dabei eingegangen wird, werden dennoch die beiden zentralen Möglichkeiten zur Nutzenerfassung und -quantifizierung vorgestellt: die ordinale sowie die kardinale Bewertung (Mühlenkamp 1994, S. 24 und Hanusch 1994, S. 15f). Erfolgt eine ordinale Bewertung, so wird der relevante Personenkreis nur bezüglich der Präferenz für eine bestimmte Situation verglichen mit einer anderen befragt. Die Stärke der Ausprägung dieser Präferenz muss hierbei nicht angegeben (also quantifiziert) werden (Mühlenkamp 1994, S. 24). Eine kardinale Bewertung verlangt hingegen die exakte Quantifizierung des Nutzenunterschieds zwischen verschiedenen Situationen durch den betroffenen Personenkreis (Mühlenkamp 1994, S. 24). Da dies hohe Anforderungen so wohl an die Messung an sich sowie an und für die befragten Individuen bedeutet, wird in der Praxis meist eine ordinale Nutzenmessung bevorzugt.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass eine Nutzenmessung in Form einer ordinalen Bewertung zwar recht einfach durchzuführen ist. Allerdings liefert sie nur qualitative und unpräzise Ergebnisse (Subjektivität). Eine kardinale Bewertung wiederum stellt hohe Ansprüche an die Befragten, da sie eine selbstständige, sehr konkrete Erfassung und Formulierung der eigenen, sprich subjektiven, Wahrnehmungen erfordert.

Diese Tatsachen verdeutlichen abschließend die Schwierigkeiten und Hindernisse bei der Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, insbesondere auch das Problem der „Subjektivität“ der Einschätzungen, welches sämtliche „qualitativen“ Verfahren innewohnt.

## **A.2 Quantitative Modellierungsmethoden**

Der

folgende Abschnitt „quantitative Modellierungsmöglichkeiten“ beschäftigt sich mit Methoden, deren zentraler Punkt die Bewertung quantitativer Merkmale wie Kostenaspekte (Rationalskala) oder vergleichbarer (objektiv) quantifizierbarer Kennzahlen darstellt.

### **A.2.1 Total Value of Ownership-Analyse**

Aus der Schwachstelle des TCO-Ansatzes heraus, ausschließlich Kosten zu betrachten, hat sich die sogenannte „Total Value of Ownership“-Analyse (TVO) entwickelt. Sie entspringt dem IT-Bereich, da besonders bei IT-Projekten eine reine Kostenbetrachtung nicht sinnvoll ist, dafür aber eine Wertbetrachtung immer wichtiger wird (Luftman and Muller 2005, S. 1). Bevor im Weiteren auf die genaue Vorgehensweise bei der TVO-Analyse sowie deren Ziele eingegangen wird, ist es wichtig, zu verstehen, wie hier der Begriff „Wert“ verstanden werden muss: Im Zusammenhang mit der TVO-Analyse definieren Hurkens und Wynstra (2010, S. 53) diesen Begriff als „den Wert in monetärer Form von ökonomischen, technischen und sozialen Nutzen, die ein Kunde im Austausch für den Preis, den er für ein Marktangebot bezahlt, erhält“. Das heißt, dass mit „Wert“ ausschließlich ein monetärer Nutzen gemeint ist und bei der TVO-Analyse somit nur diese Art des Nutzens berücksichtigt wird. Dieser Wert kann dabei auf unterschiedlichen Ebenen des Unternehmens entstehen: Nach Luftman und Muller (2005, S. 2) sind dies die Ebene des individuellen Mitarbeiters, die Ebene des Geschäftsbereichs und die Ebene des Unternehmens. Wie der TCO-Ansatz auch, strebt der TVO-Ansatz eine möglichst ganzheitliche Erfassung der Wirkzusammenhänge

und -umfänge von möglichen Investitionen an. Mittels der TVO-Analyse sollen dabei allerdings nicht nur die Wertentwicklungen abgebildet werden, die durch die Anschaffung selbst entstehen, sondern auch diejenigen, die durch die Veränderung der Geschäftsprozesse entstehen, welche von der Investition verursacht wird (Luftman, Muller 2005, S. 1). Darüber hinaus versucht der TVO-Ansatz, den Wert einer Investition für den Kunden zu erfassen. Damit ist er nicht auf ein einziges Unternehmen beschränkt (Hurkens, Wynstra, o.J., S. 53).

In der Literatur werden grundsätzlich drei verschiedene Quellen unterschieden, wie der Wert einer Anschaffung entstehen kann (Wynstra, Hurkens 2005, S. 479):

1. In Folge der Anschaffung können die Betriebskosten des Käufers direkt gesenkt werden<sup>4</sup>.
2. Die Anschaffung ermöglicht die Senkung der Betriebskosten für den Kunden des Käufers.
3. Durch die Anschaffung kann der Ertrag des Käufers aufgrund des besseren Werts des Angebots gegenüber den Vergleichsangeboten erhöht werden.

Das heißt, dass eine TVO-Analyse somit auch Wettbewerbs- und Erlöswirkungen einer Anschaffung in die Untersuchung mit einbezieht (Wildemann 1998, S. 108).

## Anwendung des TVO-Ansatzes

In der Literatur wird auf die konkrete Vorgehensweise bei Durchführung einer TVO-Analyse (leider) nur sehr spärlich eingegangen. Dempsey und andere liefern hierzu die einzige konkrete Ausführung (Dempsey, Dvorak, Mark and Meehan 1998, S. 132f), nach der die Durchführung aus vier Schritten besteht. Im **ersten Schritt** der TVO-Analyse erfolgt die Erfassung aller Kosten und Wertaspekte sowie die Analyse des Einflusses derselben auf das betrachtete Unternehmen. **Schritt zwei** umfasst die Abschätzung und Quantifizierung der (dem Anschein nach)

---

<sup>4</sup>Diese Quelle der Wertentstehung besteht folglich in einer Senkung der TCO des Käufers.

nicht quantifizierbaren Wertaspekte (bspw. realisierbare Umsätze) bspw. im Sinne der Definition von Hurkens und Wynstra (o.J., S. 53). Der **dritte Schritt** umfasst die Festlegung eines Referenzfalls (bspw. der Status-quo) sowie eines Zeitraums für die folgende Beurteilung. Dieser Referenzfall dient dazu, die zusätzliche, mit der Investition verbundene Wertschaffung zu erfassen und abgrenzen zu können. **Schritt vier** besteht schließlich darin, eine Art „Nutzen-Risiko-Abschätzung“ durchzuführen und die betrachteten Alternativen entsprechend einzuordnen. Vereinfacht gesagt, könnte eine Entscheidungsregel dabei lauten: „hoher Wert und geringes Risiko  $\Rightarrow$  Alternative realisieren“, „geringer Wert und hohes Risiko  $\Rightarrow$  Alternative verwerfen“.

### **Ein Beispiel**

Wynstra und Hurkens (2005, S. 479) illustrieren die TVO-Analyse beispielhaft an einer Entscheidungssituation eines Herstellers von Verpackungsmaschinen. Dieser Hersteller steht vor der Wahl, eine günstige oder eine teure Komponente für die hergestellten Maschinen zu kaufen. Würde die Entscheidung ausschließlich mittels einer TCO-Analyse erfolgen, würde er sich für die kostengünstigere Alternative entscheiden. Allerdings könnte dem eigenen Kunden durch Kauf der teuren Komponente ein breiteres Spektrum an Umwicklungsmöglichkeiten geboten werden. Somit hätte unser Maschinenhersteller aufgrund der so verbesserten Maschine die Möglichkeit, einen höheren Preis verlangen zu können. Darüber hinaus könnte er, bedingt durch den so erweiterten Funktionsumfang, neue Kunden akquirieren. Wenn dieser Fall zusätzlich eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit besäße, würde sich der Maschinenhersteller somit für die teure Komponente entscheiden - und nicht für die kostengünstigere.



Behälter spielen zur Materialbereitstellung in der Montage eine wichtige Rolle. In der Praxis sowie in der Literatur zeigt sich jedoch, dass die Festlegung auf einen Behälter häufig ohne Berücksichtigung der durch die Behältergröße beeinflussbaren Faktoren und Zusammenhänge erfolgt: Ein größerer Behälter kann im Vergleich zu einem kleineren mehr Teile aufnehmen und muss seltener transportiert werden. Dafür ist er dann umso schwerer und es ist mehr in Form von Bestand gebundenes Kapital am Band vorhanden. Dies sind nur einige Abhängigkeiten, die zeigen, dass die Auswahl eines Behälters vielfältige quantitative und qualitative Einflüsse hat, die es zu berücksichtigen gilt. Daher wird in dieser Arbeit ein Modell entwickelt, das es ermöglicht, den optimalen Behälter unter Beachtung von Kosten- und Nutzenaspekten zu ermitteln. Dieses Modell wird abschließend anhand eines Praxiseinsatzes getestet.