

---

# Information – Organisation – Produktion

## Herausgegeben von

H. Corsten

M. Reiß

C. Steinle

S. Zelewski

Die Schriftenreihe präsentiert Konzepte, Modelle und Methoden zu drei zentralen Domänen der Unternehmensführung. Information, Organisation und Produktion werden als Bausteine eines integriert angelegten Managementsystems verstanden. Der Erforschung dieses Bereiches dienen sowohl theoretische als auch anwendungsorientierte Beiträge.

**Herausgegeben von**

Professor Dr. Hans Corsten

Professor Dr. Michael Reiß

Professor Dr. Claus Steinle

Professor Dr. Stephan Zelewski

---

Adina Silvia Kuhlmann

# Konstruktion und Implementierung eines Optimierungsmodells für den Kombinierten Güterverkehr

mit der Fokussierung auf ein  
Umschlagterminal

Mit einem Geleitwort von  
Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski

 Springer Gabler

Adina Silvia Kuhlmann  
Essen, Deutschland

Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2013

ISBN 978-3-658-02472-7

ISBN 978-3-658-02473-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-02473-4

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-gabler.de](http://www.springer-gabler.de)

## Geleitwort

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit einer sehr aktuellen und gesellschaftlich hoch relevanten Problematik. Sie erstreckt sich im weitesten Sinne auf das „globale“ Projekt, angesichts des allgemein zu beobachtenden Klimawandels mit seinen befürchteten negativen ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen die anthropogen verursachten Emissionen klimaschädlicher Treibhausgase zu reduzieren, zumindest hinsichtlich ihres Wachstums zu begrenzen. Oftmals wird in vereinfachender, aber mittels CO<sub>2</sub>-Äquivalenzen vertretbarer Weise davon gesprochen, im Interesse einer internationalen Klimapolitik gelte es, CO<sub>2</sub>-Emissionen so weit wie möglich zu vermeiden.

Vor diesem Hintergrund setzt sich die Verfasserin mit dem Transportsektor auseinander, der in beträchtlichem Ausmaß zur Verursachung anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt. Der Transportsektor erweist sich in dieser Hinsicht als besonders interessant, weil das weltweite Güterverkehrsaufkommen stark angestiegen ist. Treiber dieser Entwicklung ist vor allem der lang anhaltende Trend zur „Globalisierung“ wirtschaftlicher Aktivitäten, der dazu führt, dass mehr Güter über größere Entfernungen sowohl im Rahmen ihrer „dezentralen“ Produktion in raumgreifenden Produktionsnetzwerken als auch im Hinblick auf „dislozierte“ Konsumstrukturen transportiert werden. Die langfristig wirksame, deutliche Reduzierung der spezifischen Transportkosten (z.B. je „Tonnenkilometer“) hat diese Globalisierungstendenz befördert und wird voraussichtlich auch fortbestehen – zumindest so lange, wie keine vollständige Internalisierung der „externen Effekte“ durch verkehrsbedingte klimaschädliche CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgt. Aufgrund der zuvor skizzierten Zusammenhänge lastet auf dem Transportsektor ein erheblicher Druck, seiner ökologischen und gesellschaftlichen „Verantwortung“ gerecht zu werden, indem sein Beitrag zu klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert oder zumindest dessen Wachstum begrenzt wird.

Die Verfasserin hat ihr Forschungsvorhaben zur Vermeidung nicht notwendiger CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transportsektor auf Gütertransporte fokussiert, die im Rahmen des Kombinierten Güterverkehrs abgewickelt werden. Diese Verkehrsform erweist sich für das Ziel, im Transportsektor zur erwünschten Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beizutragen, als besonders interessantes Untersuchungsobjekt.

Einerseits bietet sich der Kombinierte Güterverkehr als Instrument an, um Gütertransporte mit möglichst geringen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen, aber dennoch in „praktikabler“ Weise zu

realisieren. Zugrunde liegt der technisch bedingte Sachverhalt, dass Güterzüge und Schiffe relativ niedrige spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen, während die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lastkraftwagen und Flugzeugen relativ hoch ausfallen. Weil nur wenige Unternehmen – und Konsumenten so gut wie gar nicht – über eigene Gleisanschlüsse (Güterbahnhöfe) bzw. Schiffsanlegestellen (Häfen) verfügen, muss neben dem relativ CO<sub>2</sub>-emissionsarmen Hauptlauf über größere Distanzen hinweg per Güterzug oder Schiff noch ein unvermeidlicher lokaler Abhol- und Zustelldienst im Vor- bzw. Nachlauf per Lastkraftwagen mit wesentlich höheren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen hinzukommen.

Andererseits überrascht das empirische Faktum, dass der Kombinierte Güterverkehr trotz solcher „guter Gründe“ und beträchtlicher staatlicher Förderung im Transportsektor bislang nur eine marginale Rolle spielt. Daher hat sich die Verfasserin im Rahmen ihres Dissertationsprojekts mit dem genuin betriebswirtschaftlichen Problem befasst, dass der Kombinierte Güterverkehr unter einem „strukturell bedingten“ Wettbewerbsnachteil leidet. Dieser Nachteil beruht darauf, dass beim Kombinierten Güterverkehr mindestens ein Güterumschlag zwischen zwei verschiedenartigen Verkehrsmitteln erfolgen muss, der zu zusätzlichen Transportkosten und auch zu zusätzlichen Transportdauern für die unvermeidlichen Umschlagaktivitäten führt. Diese „systembedingten“ Umschlagkosten und -dauern führen zu einem erheblichen Wettbewerbsnachteil des Kombinierten Güterverkehrs. Der Wettbewerbsnachteil ist in der Logistikbranche, die überwiegend durch einen sehr intensiven Kosten- und Zeitwettbewerb geprägt ist, nur sehr schwer auszugleichen. Daher überrascht es aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht, dass ein Dilemma besteht zwischen der verkehrspolitischen Erwünschtheit des Kombinierten Güterverkehrs einerseits und seiner seltenen Realisierung aufgrund von „systembedingten“ Wettbewerbsnachteilen andererseits.

Angesichts des skizzierten Dilemmas des Kombinierten Güterverkehrs setzt sich die Verfasserin aus betriebswirtschaftlicher Perspektive mit dem Problem auseinander, wie sich durch Verbesserungen der Logistikprozesse in den „neuralgischen“, weil Wettbewerbsnachteile verursachenden Umschlagspunkten einer Logistikkette des Kombinierten Güterverkehrs Verringerungen der Umschlagkosten und -dauern erzielen lassen. Solche Kosten- und Zeitdauer-  
verringerungen können im Verbund mit den unbestreitbaren Vorteilen des Kombinierten Güterverkehrs in Bezug auf die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie daraus resultierenden Kostenvorteilen (vor allem im Fall von Emissionssteuern und Emissionszertifikaten) sowie Erlöspotenzialen (zusätzlich akquirierbare Aufträge aufgrund eines Imagegewinns durch „green logistics“) insgesamt dazu führen, dass der Kombinierte Güterverkehr für Gütertrans-

porte nicht nur verkehrspolitisch erwünscht sowie ökologisch und gesellschaftlich „verantwortungsbewusst“, sondern auch betriebswirtschaftlich vorteilhaft ist.

Zur Bearbeitung dieses Problems stützt sich die Verfasserin auf einen „modellanalytischen Erkenntnisansatz“ als Forschungsmethode. Die Verfasserin konstruiert ein hoch komplexes, sehr detailreiches Optimierungsmodell, um zu erkennen, in welchem Ausmaß sich Umschlagkosten und -dauern in einem exemplarisch betrachteten Umschlagterminal „bestmöglich“ gegenüber dem Status quo verringern lassen. Darüber hinaus legt sie großen Wert darauf, es nicht nur bei der „mathematischen“ Formulierung ihres Optimierungsmodells zu belassen, sondern auch aufzuzeigen, wie es sich mit einer „modernen“ Modellierungs- und Optimierungssoftware computergestützt implementieren lässt.

Der Verfasserin ist es insgesamt sehr gut gelungen, eine inhaltlich anspruchsvolle, formalsprachlich überaus sorgfältige sowie in vielfältiger Hinsicht bemerkenswert realitätsnahe Modellierung von typischen Entscheidungen und Prozessen in einem Umschlagterminal vorzulegen und zugleich aufzuzeigen, wie sich mittels einschlägiger Software aussagekräftige Modelllösungen computergestützt generieren lassen. Hinsichtlich der Modellierungstiefe und der Modellierungsbreite geht die Verfasserin weit über das hinaus, was von üblichen betriebswirtschaftlichen Dissertationen erwartet werden kann. Beispielsweise hinterlassen die PARETO-Kurven, die von der Verfasserin mittels parametrischer Programmierung ermittelt werden, um die Trade-off-Beziehung zwischen den Zielen der Umschlagdauer- und der Umschlagkostenminimierung einerseits sowie der Service-Level-Maximierung andererseits zu verdeutlichen, einen professionellen Eindruck.

Aus den vorgenannten Gründen ist den vielschichtigen und in vielerlei Hinsicht innovativen Ausführungen der Verfasserin eine möglichst breite Resonanz unter betriebswirtschaftlich interessierten Leserinnen und Lesern sowohl im wissenschaftlichen Bereich als auch in der betrieblichen Praxis zu wünschen. Aber auch „Zaungäste“ vor allem aus den Bereichen der Verkehrswirtschaft und des Operations Research sollten sich eingeladen fühlen, in diesem Werk bemerkenswerte Ansätze für die Anwendung von formalsprachlichen Modellen auf die Bearbeitung komplexer ökonomischer Realprobleme zu finden.

Stephan Zelewski

## Vorwort

Die Dissertation befasst sich mit der Konstruktion und Implementierung eines Optimierungsmodells für den Kombinierten Güterverkehr. Kernaufgabe war es ein Optimierungsmodell aus dem Bereich des Operations Research zu konstruieren, das die Umschlagdauer und die Umschlagkosten in einem Umschlagterminal minimiert. Die Ziele der Umschlagdauer- und Umschlagkostenminimierung sollten explizit in einer Zielfunktion dargestellt werden. Dieser Aufgabe habe ich mich in der vorliegenden Dissertation mit dem Ziel gestellt, ein solches Optimierungsmodell zu konstruieren, in LINGO 11.0 zu implementieren und dessen Modellpraktikabilität anhand von Realdaten des Duisburg Intermodal Terminals zu überprüfen.

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement an der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, entstanden.

Während des Entstehungsprozesses dieser Dissertation haben mich viele Personen unterstützt, denen ich zu großem Dank verpflichtet bin. An erster Stelle bin ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski, Direktor des Instituts für Produktion und Industrielles Informationsmanagement an der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, großen Dank schuldig. Er ermöglichte mir durch seine uneingeschränkte materielle Ausstattung eine problemlose Durchführung meiner Dissertation. Darüber hinaus stand er mir zu jeder Zeit als Diskussionspartner zur Verfügung und hat mir mit seinen Anregungen mehr als nur einen hilfreichen Denkanstoß gegeben. Seine umfangreiche fachliche und motivierende Betreuung, die er mir zu jeder Zeit zuteilwerden ließ, hat mich in vielen verzweifelten Momenten wieder „auf die Beine gestellt“.

Frau PD Dr. Christina Klüver möchte ich ganz herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie Frau Univ.-Prof. Dr. Ute Schmiel für die Mitwirkung an der mündlichen Promotionsprüfung danken.

Weiterhin möchte ich meiner Mutter, Vera Bruns, danken, die mich immer in meinem Handeln unermüdlich unterstützt hat und mir den Weg bereitet hat, der diese Dissertation überhaupt erst hat entstehen lassen. Umso mehr bedauere ich es, dass sie „mein Werk“ nicht mehr miterlebt hat.

Ein weiterer Dank gilt meiner Freundin Annika Jenssen für zahlreiche motivierende Momente und ihr äußerst akribisches Korrekturlesen meiner Dissertation.



Der größte Dank gebührt allerdings meinem Ehemann Andre Kuhlmann, der wie kein anderer unter dem Entstehungsprozess dieser Dissertation gelitten hat. Neben seiner unermüdlichen Unterstützung möchte ich ihm für das äußerst akribische Korrekturlesen und die Hilfe bei der Fertigstellung des Manuskripts danken. Er war derjenige, der nie den Glauben an mich verloren hat und mir immer die nötige Motivation gegeben hat, wenn ich sie am dringendsten brauchte. Ihm möchte ich meine Dissertation widmen.

Adina Silvia Kuhlmann

## **Gliederung**

<b>Geleitwort .....</b>	<b>V</b>
<b>Vorwort .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungs- und Akronymverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>XIX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XXVII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund zur Problemstellung .....	1
1.2 Wissenschaftliche Problemstellung.....	5
1.3 Eingesetzte wissenschaftliche Arbeitstechniken .....	16
1.4 Intendierte wissenschaftliche Ergebnisse .....	17
1.5 Argumentationsfluss.....	18
1.6 Aufbau der Dissertation .....	20
<b>2 Darstellung des Kombinierten Güterverkehrs .....</b>	<b>23</b>
2.1 Definition des Kombinierten Güterverkehrs .....	23
2.2 Formen des Kombinierten Güterverkehrs .....	25
2.2.1 Kombination Lastkraftwagen/Zug .....	25
2.2.2 Kombination Lastkraftwagen/Schiff.....	26
2.2.3 Kombination Zug/Schiff .....	27
2.3 Umschlagressourcen .....	27
2.3.1 Kräne .....	27
2.3.2 Fahrerlose Transportfahrzeuge.....	29
2.3.3 Stapler .....	30
2.4 Stärken und Schwächen des Kombinierten Güterverkehrs .....	32
2.5 Förderprogramme der Regierung für den Kombinierten Güterverkehr .....	35
<b>3 Forschungsstand zu Optimierungsmodellen für den Kombinierten Güterverkehr .....</b>	<b>38</b>
3.1 Zeitbezug .....	38

3.1.1 Modellierung und Optimierung des Umschlagterminals <i>Mega Hub</i> von ALICKE.....	38
3.1.2 Modellierung der optimalen Schiff-Ankerplatz-Zuordnung nach IMAI/NISHIMURA/ PAPADIMITRIOU und CORDEAU/LAPORTE/LEGATO et al. ....	51
3.1.3 Modellierung der optimalen Schiff-Ankerplatz-Zuordnung nach GUAN/CHEUNG.....	58
3.1.4 Planung der Umschlagressourcen eines Container-Terminals nach HARTMANN .....	62
3.1.5 Optimierungsmodell zur Planung des Einsatzes der Kaikräne eines Container-Terminals nach LIU/WAN/WANG.....	67
3.2 Kostenreduktion.....	74
3.2.1 Optimierung des Kombinierten Verkehrs anhand der Kombination Zug/Lastkraftwagen nach FENG/HUANG.....	74
3.2.2 Mathematische Modellierung der Planung der Ankerplätze in einem Containerterminalhafen nach MOON/KIM.....	79
3.2.3 Ankerplatz-Management in Container-Terminals nach MOORTHY/TEO .....	83
3.2.4 Entwicklung einer Methode zur Ablaufplanung für Ankerplätze und Kaikräne nach PARK/KIM .....	86
3.3 Umschlagressourcenplanung.....	91
3.3.1 Modellierung des Schiffs-Planungs-Problems nach ÁLVAREZ.....	91
3.3.2 Planung des Einsatzes von Kränen unter der Bedingung der Nicht-Überlappung der Kranbereiche nach ZHU/LIM.....	94
3.3.3 Dynamische Kran-Aufstellung in Container-Lagerhallen nach ZHANG/WAN/LIU et al.....	96
3.4 Lagerhaltungsplanung .....	104
3.4.1 Optimierung der Kranaktivitäten im Lager von Container-Terminals nach ZYNGIRDIS.....	104
3.4.2 Die Zuordnung von Lagerplatz für den Umschlag von Fahrzeugen nach MATTFELD/ORTH .....	117
3.4.3 Die Synchronisierung der Güterströme in Umschlagterminals nach BOYSEN .....	120
3.4.4 Modellierung des Container-Transfers und der Lagerpositionen in Hafenterminals nach KOZAN/PRESTON .....	131

3.4.5 Modell zur Lagerplatz-Zuordnung für Container in Container-Hafenterminals nach KIM, K. H./KIM, H. B. ....	134
3.4.6 Optimierungsmodell zur Größe des Lagerplatzes und der Bearbeitungs-ausrüstung für ankommende Container nach KIM, K. H./KIM, H. B. ....	138
3.4.7 Optimierungsmodell zur Stapelung der Container auf einem Schiff nach AMBROSINO/SCIOMACHEN/TANFANI.....	140
3.4.8 Optimierungsmodell zur Planung der Lagerung von Containern auf einem Containerschiff zur Reduzierung der Anzahl der Umstapelungen nach AVRIEL/PENN/SPIRER et al. ....	143
3.5 Container-Management .....	145
3.5.1 Optimierungsmodell für das Container-Management in Umschlagterminals nach LEE/CHEW/TAN et al. ....	145
3.5.2 Optimierungsmodell der Lagerhallenstrategie zur Minimierung der Verkehrsstörungen in Containerhafen-Terminals nach HAN/LEE/CHEW et al. ....	151
3.5.3 Optimierungsmodell zur optimalen Containerverteilung in Rangierbahnhöfen nach BOSTEL/DEJAX .....	153
3.5.4 Optimierung der landseitigen Operationen eines Container-Terminals nach FROYLAND/KOCH/MEGOW et al. ....	157
<b>4 Bewertung der Optimierungsmodelle .....</b>	<b>164</b>
4.1 Durchführung der ersten Bewertung .....	164
4.1.1 Bewertungstechnik.....	164
4.1.2 Vergleichende Bewertung der Optimierungsmodelle.....	165
4.1.3 Ergebnisse der ersten Bewertung .....	170
4.2 Durchführung der zweiten Bewertung .....	173
4.2.1 Eignungskriterien .....	173
4.2.2 Bewertung der verbleibenden Optimierungsmodelle.....	173
4.2.3 Ergebnisse der zweiten Bewertung .....	175
<b>5 Konstruktion des Optimierungsmodells .....</b>	<b>179</b>
5.1 Grundlagen .....	179
5.2 Modellvariante zur Minimierung der Umschlagdauer .....	188
5.2.1 Zielfunktion zur Minimierung der Umschlagdauer .....	188
5.2.2 Nebenbedingungen zur Minimierung der Umschlagdauer .....	195

---

5.3	Modellvariante zur Minimierung der Umschlagkosten.....	207
5.3.1	Grundlagen der Prozesskostenrechnung .....	207
5.3.2	Zielfunktion zur Minimierung der Umschlagkosten.....	211
5.3.3	Nebenbedingungen zur Minimierung der Umschlagkosten.....	214
<b>6</b>	<b>Implementierung des Optimierungsmodells.....</b>	<b>221</b>
6.1	Praxisbeispiel zur Implementierung des Optimierungsmodells .....	221
6.2	Grundlagen der Implementierung des Optimierungsmodells.....	229
6.3	Implementierung der Modellvariante zur Minimierung der Umschlagdauer.....	232
6.3.1	Daten zur Implementierung der Modellvariante zur Minimierung der Umschlagdauer.....	232
6.3.2	Computergestützte Implementierung der Modellvariante zur Minimierung der Umschlagdauer.....	238
6.4	Implementierung der Modellvariante zur Minimierung der Umschlagkosten .....	280
6.4.1	Daten zur Implementierung der Modellvariante zur Minimierung der Umschlagkosten .....	280
6.4.2	Computergestützte Implementierung der Modellvariante zur Minimierung der Umschlagkosten .....	283
6.5	Überprüfung der Modellpraktikabilität .....	320
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>323</b>
7.1	Fazit zur Erreichung der intendierten wissenschaftlichen Ergebnisse .....	323
7.2	Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf.....	326
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>327</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>355</b>

**Abkürzungs- und Akronymverzeichnis**

AG	Aktiengesellschaft
AGV	Automated Guided Vehicle
AHP	Analytic Hierarchy Process
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d.h.	das heißt
DB	Deutsche Bahn
DC	standard height dry cargo
DEA	Data Envelopment Analysis
DIT	Duisburg Intermodal Terminal
DM	Deutsche Mark
Dr. rer. pol.	Doctor rerum politicarum
e.V.	eingetragener Verein
ECMT	European Conference of Ministers of Transport
EG	Europäische Gemeinschaft
et al.	et alii
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
f.	folgende
ff.	fortfolgende
fifo	first-in-first-out
FKV	Forschungskonsortium Kombiniertes Verkehr
Fn.	Fußnote
ft	foot
FTF	fahrerlose Transportfahrzeuge
GB	Gigabyte
ggf.	gegebenenfalls
GHZ	GigaHertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung

---

H.	Heft
HC	high cube
HICL	Hamburg International Conference of Logistics
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
ID	Identification
IMO	International Maritime Organization
Inc.	Incorporated
IRB	Informationszentrum Raum und Bau
ISO	International Standardisation Organization (Internationale Organisation für Normung)
IT	Informationstechnik
Jg.	Jahrgang
K.o.-Kriterien	Knock-out-Kriterien („Muss“-Kriterien)
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KV	Kombinierter Verkehr
l	Liter
ltd.	limited
m	Meter
MAEKAS	Management von projektbezogenen Allianzen zwischen lokalen und überregionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
No.	Number
NP	Nichtdeterministische Polynomialzeit
Nr.	Nummer
o.a.	oben angeführt
o.g.	oben genannt
o.S.	ohne Seitenangabe
o.V.	ohne Verfasserangabe
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OR	Operations Research
RAM	Random-Access Memory

---

RF	refrigerated
RMG	Rail Mounted Gantry Crane
RTGC	Rubber Tyred Gantry Crane
S.	Seite
t	Tonne
TA	tank
TEN	Transeuropäische Netze
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
TH	Technische Hochschule
TRA	Taiwan Rail Administration
u.a.	unter anderem
UN	United Nations
Univ.-Prof.	Universitäts-Professor
URL	Uniform Resource Locator
USA	United States of America
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VHB	Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft
Vol.	Volume
www	World Wide Web
z.B.	zum Beispiel



## Symbolverzeichnis

*Vorbemerkungen:* Alle Symbole, die in der vorliegenden Dissertation verwendet werden, sind im Symbolverzeichnis gesondert aufgeführt. Die Bedeutung der Symbole erschließt sich aus dem jeweiligen Argumentationskontext. Die Symbole sind in die beiden Gruppen „Logisch-mathematische Symbole“ und „Deskriptive Symbole“ unterteilt, um eine leserfreundliche Darstellungsweise zu erhalten.

### a) Logisch-mathematische Symbole:

%	Prozent
=	Gleichungsrelation
$\approx$	„ungefähr“ Gleichungsrelation
$\geq$	Größer-oder-gleich-Relation
$\leq$	Kleiner-oder-gleich-Relation
$\sum$	Summenoperator
$\forall$	Allquantor („für alle ... gilt: ...“)
€	Euro
∈	Element von
+	Additionsoperator
-	Subtraktionsoperator
*	Multiplikationsoperator
/	Divisionsoperator
&	kaufmännisches und
@	at (in E-Mail-Adressen)
max	Maximierungsoperator
min	Minimierungsoperator

### b) Deskriptive Symbole:

$\text{AbZZiel}_{m,l}^{\text{stan}}$	Abfahrtszeitpunkt eines abgehenden Transportmittels $l$ eines Standardguts $m$ im Umschlagterminal
$\text{AbZZiel}_{n,l}^{\text{gef}}$	Abfahrtszeitpunkt eines abgehenden Transportmittels $l$ eines Gefahrguts $n$ im Umschlagterminal
$\text{AnZStart}_{m,l}^{\text{stan}}$	Ankunftszeitpunkt eines ankommenden Transportmittels $l$ eines Standardguts $m$ im Umschlagterminal

$AnZStart_{n,l}^{gef}$	Ankunftszeitpunkt eines ankommenden Transportmittels $l$ eines Gefahrguts $n$ im Umschlagterminal
$AZ_{m,l}^{stan}$	Zeitpunkt-Entscheidungsvariable des Anfangszeitpunkts der Bearbeitung der Standardgüter
$AZ_{n,l}^{gef}$	Zeitpunkt-Entscheidungsvariable des Anfangszeitpunkts der Bearbeitung der Gefahrgüter
$AZLE_{m,l}^{stan}$	Zeitpunkt-Entscheidungsvariable des Anfangszeitpunkts der Bearbeitung der Standardgüter am Lagereingang
$AZLA_{m,l}^{stan}$	Zeitpunkt-Entscheidungsvariable des Anfangszeitpunkts der Bearbeitung der Standardgüter am Lagerausgang
$FALA_{m,l}^{stan}$	frühest möglicher Anfangszeitpunkt der Bearbeitung eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ nach dem Transport zum Lagerausgang im Umschlagterminal
$FALE_{m,l}^{stan}$	frühest möglicher Anfangszeitpunkt der Bearbeitung eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ nach dem Transport zum Lagereingang im Umschlagterminal
$Kap_k^{quan}$	quantitative Kapazität der Umschlagressource $k$ eines Umschlagterminals für den Umschlag von Standard- und Gefahrgütern für jeden realisierten Umschlagprozess
$Kap_k^{zeit}$	zeitliche Kapazität der Umschlagressource $k$ eines Umschlagterminals für den Umschlag von Standard- und Gefahrgütern
$Kperso_k$	Kosten für Personal zum Bedienen der Umschlagressource $k$
$Ksprit_k$	Kosten des Kraftstoffverbrauchs für einen Meter zurückgelegter Strecke einer Umschlagressource $k$
$l$	Index eines Transportmittels mit $l = 1, \dots, L$
$LA_p$	Lagerausgang $p$ im Umschlagterminal
$LE_q$	Lagereingang $q$ im Umschlagterminal
$m$	Index eines Standardguts mit $m = 1, \dots, M$
$n$	Index eines Gefahrguts mit $n = 1, \dots, N$
$p$	Index eines Lagerausgangspunkts mit $p = 1, \dots, P$
$PK_{m,l}^{stan.ind}$	Personalkosten für einen indirekten Umschlag eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$PK_{n,l}^{gef.dir}$	Personalkosten für einen direkten Umschlag eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$q$	Index eines Lagereingangspunkts mit $q = 1, \dots, Q$
$r$	Index eines Startpunkts mit $r = 1, \dots, R$

$s$	Index eines Zielpunkts mit $s = 1, \dots, S$
SL	Service-Level
SL <sup>nor</sup>	normierter Service-Level
sl	Parameter des Service-Levels
SP <sub>r</sub>	Startpunkt $r$ im Umschlagterminal
TS	Transportstrecke
TS(SP <sub>r</sub> , ZP <sub>s</sub> )	Transportstrecke zwischen dem Startpunkt $r$ und dem Zielpunkt $s$ im Umschlagterminal
TS(SP <sub>r</sub> , LE <sub>q</sub> )	Transportstrecke zwischen dem Startpunkt $r$ und dem Lagereingang $q$ im Umschlagterminal
TS(LE <sub>q</sub> , LA <sub>p</sub> )	Transportstrecke zwischen dem Lagereingang $q$ und dem Lagerausgang $p$ im Umschlagterminal
TS(LA <sub>p</sub> , ZP <sub>s</sub> )	Transportstrecke zwischen dem Lagerausgang $p$ und dem Zielpunkt $s$ im Umschlagterminal
UD	Umschlagdauer (Intervall, innerhalb dessen Standard- und Gefahrgüter im Umschlagterminal verbleiben; setzt sich aus den Umschlag- und Wartezeiten der Standard- und Gefahrgütern zusammen)
UD <sub>m,l</sub> <sup>stan</sup>	Umschlagdauer eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
UD <sub>n,l</sub> <sup>gef</sup>	Umschlagdauer eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
UK	Umschlagkosten (setzen sich aus den Kraftstoff- und Personalkosten der Standard- und Gefahrgüter zusammen)
UK <sub>m,l</sub> <sup>stan</sup>	Umschlagkosten eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
UK <sub>n,l</sub> <sup>gef</sup>	Umschlagkosten eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
Um <sub>m,l,r,q,p,s,k</sub> <sup>stan.ind</sup>	Umschlag-Entscheidungsvariable für den indirekten Umschlag von Standardgütern
Um <sub>n,l,r,s,k</sub> <sup>gef.dir</sup>	Umschlag-Entscheidungsvariable für den direkten Umschlag von Gefahrgütern
UZ <sub>m,l</sub> <sup>stan.ind</sup>	Umschlagzeit für einen indirekten Umschlag eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal (ist die Summe der Umschlagzeiten Teil 1 bis Teil 3)
UZ <sub>m,l</sub> <sup>stan.ind1</sup>	Umschlagzeit Teil 1 für einen indirekten Umschlag eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal

$UZ_{m,l}^{\text{stan.ind}2}$	Umschlagzeit Teil 2 für einen indirekten Umschlag eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$UZ_{m,l}^{\text{stan.ind}3}$	Umschlagzeit Teil 3 für einen indirekten Umschlag eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$UZ_{n,l}^{\text{gef.dir}}$	Umschlagzeit für einen direkten Umschlag eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$Vel_k$	Geschwindigkeit der Umschlagressource $k$
$WZ_{m,l}^{\text{stan.ind}}$	Wartezeit für einen indirekten Umschlag eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$WZ_{n,l}^{\text{gef.dir}}$	Wartezeit für einen direkten Umschlag eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$X_{m,l}^{\text{stan}}$	Transport-Entscheidungsvariable für Standardgüter
$X_{n,l}^{\text{gef}}$	Transport-Entscheidungsvariable für Gefahrgüter
$xLA_p$	x-Koordinate eines Lagerausgangspunkts $p$ im Umschlagterminal
$xLE_q$	x-Koordinate eines Lagereingangspunkts $q$ im Umschlagterminal
$xSP_r$	x-Koordinate eines Startpunkts $r$ im Umschlagterminal
$xZP_s$	x-Koordinate eines Zielpunkts $s$ im Umschlagterminal
$Y_{m,l}^{\text{stan}}$	Anzahl der im Umschlagterminal umzuschlagenden Container eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$
$Y_{n,l}^{\text{gef}}$	Anzahl der im Umschlagterminal umzuschlagenden Container eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$
$yLA_p$	y-Koordinate eines Lagerausgangspunkts $p$ im Umschlagterminal
$yLE_q$	y-Koordinate eines Lagereingangspunkts $q$ im Umschlagterminal
$ySP_r$	y-Koordinate eines Startpunkts $r$ im Umschlagterminal
$yZP_s$	y-Koordinate eines Zielpunkts $s$ im Umschlagterminal
$ZFZ_{m,l}^{\text{stan}}$	zwischenzeitlicher Fertigstellungszeitpunkt eines Standardguts $m$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$ZFZ_{n,l}^{\text{gef}}$	zwischenzeitlicher Fertigstellungszeitpunkt eines Gefahrguts $n$ eines Transportmittels $l$ im Umschlagterminal
$ZP_s$	Zielpunkt $s$ im Umschlagterminal

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens der unterschiedlichen Verkehrsträger in Deutschland .....	3
Abbildung 2:	Güterverkehrsaufkommen in Deutschland im Jahr 2011 .....	4
Abbildung 3:	Schritte der Bewertungen der Optimierungsmodelle zum Kombinierten Güterverkehr .....	13
Abbildung 4:	Argumentationsfluss zum Erkenntnisproblem des Kombinierten Güterverkehrs .....	18
Abbildung 5:	Argumentationsfluss zum Modellkonstruktionsproblem .....	19
Abbildung 6:	Argumentationsfluss zum Modellpraktikabilitätsproblem .....	20
Abbildung 7:	Aufbau der Dissertation .....	22
Abbildung 8:	Darstellung des Kombinierten Güterverkehrs am Beispiel der Kombination Lastkraftwagen/Zug.....	24
Abbildung 9:	Darstellung eines Vollportalkrans .....	28
Abbildung 10:	Darstellung eines fahrerlosen Transportfahrzeugs .....	30
Abbildung 11:	Darstellung eines Portalstaplers.....	31
Abbildung 12:	Darstellung eines Reach-Stackers.....	32
Abbildung 13:	Darstellung des grundsätzlichen Aufbaus eines Umschlagterminals sowie des direkten und indirekten Umladens .....	40
Abbildung 14:	Beispielhafte Darstellung des Umschlags nach Kategorie 1 .....	42
Abbildung 15:	Beispielhafte Darstellung des Umschlags nach Kategorie 2 .....	43
Abbildung 16:	Beispielhafte Darstellung des Umschlags nach Kategorie 3 .....	44
Abbildung 17:	Darstellung des a) direkten und b) indirekten Umschlags.....	45
Abbildung 18:	Darstellung eines beispielhaften Hafenterminals .....	53
Abbildung 19:	Darstellung der unterschiedlichen Zeiten des Umschlags in Bezug zur Kailänge .....	54
Abbildung 20:	Zeit- und Flächen-Diagramm .....	59

Abbildung 21:	Beispielhafte Belegung im Zeit- und Flächen-Diagramm durch Schiff 1 ...	61
Abbildung 22:	Darstellung der Hafensituation .....	68
Abbildung 23:	Darstellung der Struktur des Kombinierten Verkehrs zwischen den städtischen Logistikunternehmen und der Taiwan Rail Administration .....	75
Abbildung 24:	Darstellung der Transportstrecke eines Guts vom Start- zum Zielpunkt ....	78
Abbildung 25:	Darstellung eines beispielhaften Ankerplatz-Plans mit einem Zeithorizont von einer Woche .....	80
Abbildung 26:	Darstellung eines beispielhaften Ankerplatz-Zeit-Diagramms.....	82
Abbildung 27:	Darstellung zweier möglicher Lösungen für das Ankerplatz-Zuordnungsproblem.....	84
Abbildung 28:	Ankerplatz- und Kran-Planungsvorgehen .....	88
Abbildung 29:	Output aus der ersten Phase .....	89
Abbildung 30:	Output aus der zweiten Phase .....	90
Abbildung 31:	Darstellung der Zuordnung der Kräne zu den Aufträgen .....	95
Abbildung 32:	Container-Bewegungen in einem Umschlagterminal .....	98
Abbildung 33:	Darstellung eines Lagerblocks.....	100
Abbildung 34:	Transfer der Kräne zwischen zwei Lagerblöcken.....	102
Abbildung 35:	Beispielhafte Darstellung eines Seehafen-Umschlagterminals .....	105
Abbildung 36:	Beispielhafte Darstellung eines Lagerblocks.....	106
Abbildung 37:	Darstellung der Bedeutung der optimalen Planung des automatischen Stapelkrans.....	108
Abbildung 38:	Darstellung der beiden automatischen Stapelkräne .....	113
Abbildung 39:	Exemplarische Darstellung eines Umschlagterminals.....	121
Abbildung 40:	Exemplarische Darstellung eines Umschlagbahnhofs .....	124
Abbildung 41:	Exemplarische Darstellung eines Cross Docks .....	125
Abbildung 42:	Exemplarische Darstellung eines Containerhafens .....	127
Abbildung 43:	Aufbau eines multimodalen Container-Terminals.....	132

---

Abbildung 44:	Aufbau eines Lagerblocks .....	136
Abbildung 45:	Exemplarische Darstellung eines Containerhafen-Terminals.....	146
Abbildung 46:	Darstellung des Aufbaus einer typischen Lagerhalle .....	148
Abbildung 47:	Darstellung einer Lagerhalle.....	152
Abbildung 48:	Darstellung eines typischen Rangierbahnhofs.....	155
Abbildung 49:	Schematischer Aufbau des Umschlagterminals in Botany.....	158
Abbildung 50:	Verhältnis der Transportmittel und Umschlagressourcen .....	181
Abbildung 51:	Darstellung der unterschiedlichen Start- und Zielpunkte im Umschlagterminal.....	188
Abbildung 52:	Trade-off-Diagramm.....	193
Abbildung 53:	Beispielhafter Zeitstrahl der indirekten Wartezeiten.....	200
Abbildung 54:	Beispielhafter Zeitstrahl der indirekten Umschlagzeiten.....	201
Abbildung 55:	Beispielhafter Zeitstrahl der direkten Wartezeiten .....	202
Abbildung 56:	Beispielhafter Zeitstrahl der direkten Umschlagzeit .....	202
Abbildung 57:	Prozesshierarchie .....	210
Abbildung 58:	Reach-Stacker des Duisburg Intermodal Terminals.....	223
Abbildung 59:	Leerstapler des Duisburg Intermodal Terminals .....	223
Abbildung 60:	Krananlage an den Bahngleisen des Duisburg Intermodal Terminals.....	224
Abbildung 61:	Terminalzugmaschine (Mafi) des Duisburg Intermodal Terminals .....	224
Abbildung 62:	Lagerfläche des Duisburg Intermodal Terminals .....	225
Abbildung 63:	Aufbau des Duisburg Intermodal Terminals .....	228
Abbildung 64:	Pareto-Kurve für den Trade-off zwischen Umschlagdauer und Service-Level.....	272
Abbildung 65:	Screenshot aus dem LINGO-Lösungsreport für den Parameterwert sl = 0,8 bei einer Minimierung der Umschlagdauer .....	274
Abbildung 66:	Softwareparameter der Sektion „Nonlinear Solver“, Teil 1 .....	275

---

Abbildung 67:	Screenshot aus dem LINGO-Lösungsreport für den Parameterwert sl = 0,7 für die Minimierung der Umschlagdauer.....	276
Abbildung 68:	Softwareparameter der Sektion „Nonlinear Solver“, Teil 2 .....	277
Abbildung 69:	Softwareparameter der Sektion „Nonlinear Solver“, Teil 3 .....	279
Abbildung 70:	Pareto-Kurve für den Trade-off zwischen Umschlagkosten und Service-Level .....	318
Abbildung 71:	Screenshot aus dem LINGO-Lösungsreport für den Parameterwert sl = 0,3 bei einer Minimierung der Umschlagkosten.....	319



**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Punkteschema zur Modellbewertung.....	164
Tabelle 2:	Darstellung der Bewertungsergebnisse.....	171
Tabelle 3:	Ergebnis der ersten Bewertung nach dem Dominanzkonzept .....	172
Tabelle 4:	Ergebnis der zweiten Bewertung (Teil 1).....	176
Tabelle 5:	Ergebnis der zweiten Bewertung (Teil 2).....	177
Tabelle 6:	Umschlagressourcen im Duisburg Intermodal Terminal.....	222
Tabelle 7:	Umschlagressourcen der Implementierung des Optimierungsmodells .....	233
Tabelle 8:	Umschlagressourcen mit ihrer jeweiligen Geschwindigkeit .....	233
Tabelle 9:	Kapazitäten der Umschlagressourcen .....	234
Tabelle 10:	Start- und Zielpunkte im Umschlagterminal .....	234
Tabelle 11:	Koordinaten der Startpunkte.....	234
Tabelle 12:	Koordinaten der Zielpunkte .....	235
Tabelle 13:	Lagereingangs- und Lagerausgangspunkte im Umschlagterminal .....	235
Tabelle 14:	Koordinaten der Lagereingangspunkte.....	235
Tabelle 15:	Koordinaten der Lagerausgangspunkte .....	236
Tabelle 16:	Standard- und Gefahrgüter im Umschlagterminal .....	236
Tabelle 17:	Transportmittel im Umschlagterminal.....	236
Tabelle 18:	Umzuschlagende Mengen des Standardguts der Transportmittel .....	237
Tabelle 19:	Umzuschlagende Mengen der Gefahrgüter der Transportmittel .....	237
Tabelle 20:	Ankunftszeitpunkte der ankommenden Transportmittel für das Standardgut .....	237
Tabelle 21:	Ankunftszeitpunkte der ankommenden Transportmittel für die Gefahrgüter.....	238
Tabelle 22:	Abfahrtszeitpunkte der abgehenden Transportmittel für das Standardgut .....	238

---

Tabelle 23:	Abfahrtszeitpunkte der abgehenden Transportmittel für die Gefahrgüter.....	238
Tabelle 24:	Umgeschlagene Güterarten für die verschiedenen Parameterwerte bei Umschlagdauerminimierung in Abhängigkeit vom Service-Level .....	269
Tabelle 25:	Umgeschlagene Gütermengen für die verschiedenen Parameterwerte der Umschlagdauerminimierung in Abhängigkeit vom Service-Level .....	270
Tabelle 26:	Optimale Zielfunktionswerte der Umschlagdauer in Abhängigkeit vom Service-Level.....	271
Tabelle 27:	Umschlagressourcen mit ihren jeweiligen Kraftstoffkosten.....	281
Tabelle 28:	Umschlagressourcen mit ihren jeweiligen Personalkosten.....	282
Tabelle 29:	Kapazitäten der Umschlagressourcen .....	282
Tabelle 30:	Umgeschlagene Güterarten für die verschiedenen Parameterwerte bei Umschlagkostenminimierung in Abhängigkeit vom Service-Level....	315
Tabelle 31:	Umgeschlagene Gütermengen für die verschiedenen Parameterwerte der Umschlagkostenminimierung in Abhängigkeit vom Service-Level ...	316
Tabelle 32:	Optimale Zielfunktionswerte der Umschlagkosten in Abhängigkeit vom Service-Level.....	317
Tabelle 33:	Erfüllung der Requirements durch die Optimierungsmodelle.....	322
Tabelle 34:	Erfüllungsgrad der intendierten wissenschaftlichen Ergebnisse .....	325