



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DISSERTATION

Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen in der automobilen Distributionslogistik

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn
Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Georg Kartnig
Technische Universität Wien, Institut für Konstruktionswissenschaften und
Technische Logistik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h.c. mult. Michael Schenk
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und
Materialflusstechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Heimo Pascher

Matrikelnummer: 0625894

Studienkennzahl: 786 740

Wien, September 2017

Dipl.-Ing. Heimo Pascher



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Dissertation nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Dissertationsthema bisher weder im Inland noch im Ausland (einer Beurteilerin/einen Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, September 2017

Heimo Pascher

Kurzfassung

Die globale Verlagerung von Produktionsstätten und die weltweite Distribution von Gütern führen zu einem erhöhten Transportaufkommen und haben somit Auswirkungen auf Kosten und Umweltemissionen. Verlader und Logistikdienstleister können bei interkontinentalen Transporten zumeist zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern wählen. Für die Unterstützung bei der Auswahl existieren wissenschaftliche Methoden, mithilfe derer eine Quantifizierung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen möglich ist.

Studien hinsichtlich der Verkehrsträgerwahl zeigen jedoch, dass die Entscheidungen in der betrieblichen Praxis zum Teil auf inkorrekten Annahmen basieren. Die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Methoden (z.B. ifeu et al. 2016, Wittenbrink 2014) zur Quantifizierung wurden zumeist für den Stückgut-, Massengut- und Containertransport entwickelt und führen bei Anwendung auf andere Transportgüter – wie das im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtete Transportgut *PKW* – zu meist falschen Aussagen. Die besonderen Gegebenheiten der automobilen Distributionslogistik, wie beispielsweise der spezifische Ladefaktor der Roll-on/Roll-off-Transportmittel, finden bei bestehenden Methoden keine Berücksichtigung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, durch die Quantifizierung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen einen Beitrag zur optimalen Verkehrsträgerwahl in der Fertigfahrzeugdistribution zu leisten. Es wird davon ausgegangen, dass es aufgrund der spezifischen Gegebenheiten in der Fertigfahrzeugdistribution (z.B. RoRo-Verfahren) zu abweichenden Ergebnissen im Vergleich zum Stückgut-, Massengut- und Containertransport kommt. In diesem Zusammenhang werden ein- und mehrgliedrige Transportketten unter Einbindung der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße untersucht. Weiters sollen Erkenntnisse darüber generiert werden, unter welchen Rahmenbedingungen der Fahrzeugtransport in Containern zu einer Effizienzsteigerung gegenüber dem Roll-on/Roll-off-Verfahren führen kann.

Zur Erreichung der definierten Zielsetzung wird als Ergebnis der vorliegenden Dissertation eine Methode entwickelt, die sich aus sieben Schritten zusammensetzt, auf bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten aufbaut und die relevanten Faktoren der automobilen Distribution berücksichtigt. Der Einsatz der Methode und die damit verbundene gesteigerte Transparenz – hinsichtlich Kosten und Umweltauswirkungen – sollen insbesondere für Verlader und Logistikdienstleister einen Mehrwert bieten. Die Anwendbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit anhand von Fallbeispielen demonstriert.

Schlagworte zur Arbeit: Automotive, Distributionslogistik, Verkehrsträgerwahl, Roll-on/Roll-off, Car-Rack, ökologische und ökonomische Quantifizierung

Abstract

Globalised production and a worldwide distribution of goods lead to a higher transport volume, having an impact on costs and environmental emissions. Shippers and logistics service providers can select between different transport modes. Methods of quantification of economic and ecological parameters exist to support the choice of transport mode.

The results of studies with shippers and logistics service providers indicate that in practice, the choice of transport mode is based on incorrect assumptions in some cases. Already existing scientific methods (e.g. ifeu et al. 2016, Wittenbrink 2014) have been developed to quantify transports of piece goods, bulk goods, or container. The use of these methods on other types of goods – this dissertation deals with the transport of passenger cars – oftentimes leads to wrong results. The specific characteristics of automobile distribution (e.g. the load factor of roll-on/roll-off transport vehicles) are not taken into account in existing methods.

In this context, the aim of this dissertation is to quantify economic and ecological parameters to support the choice of transport mode in automobile distribution. In this context, uni- and multimodal transport chains by using road, rail and inland waterway will be analysed. Furthermore, new findings regarding the efficiency of automobile distribution with containers compared to the roll-on/roll-off transport will be worked out.

To achieve the defined objectives, a new method will be developed, which is the result of this doctoral thesis. This method takes into account the existing scientific knowledge and all relevant factors of the automobile distribution. The application of the method leads to more transparency with regards to transport costs and environmental impacts. This supports shippers and logistics service providers to design more efficient transport chains. Finally, the usage of the method is demonstrated with the help of two case studies.

Key words: automobile, distribution logistics, transport mode choice, roll-on/roll-off, car-rack, economic and ecological quantification

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter bei der Fraunhofer Austria Research GmbH (FhA) und als Universitätsassistent am Institut für Managementwissenschaften (IMW) der Technischen Universität Wien.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Sihn, Geschäftsführer FhA sowie Leiter des Bereichs Betriebstechnik und Systemplanung am IMW, danke ich für die hervorragende Betreuung dieser Dissertation. Die kritische Betrachtung und die Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenfalls gilt mein Dank den beiden Gutachtern Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Kartnig für die Übernahme des Mitberichts und die wertvollen Hinweise zur Verbesserung dieser Arbeit.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des Logistikdienstleisters Hödlmayr, allen voran Herrn Johannes Hödlmayr und Herrn Wolfgang Kragl, für die Detailinformationen sowie für den Einblick in die Praxis.

Bei Frau Dr. Sandra Stein, Forschungskordinatorin bei Fraunhofer Austria, bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Themenfindung sowie für die zahlreichen fachlichen Diskussionen. Ebenso gilt mein Dank Herrn Christoph Pöllner für die hervorragende Mitarbeit am Forschungsprojekt *Inland_Car*. Zudem bedanke ich mich bei dem gesamten Team des Forschungsprojekts *IPPO* für den fachlichen Austausch. Ebenfalls danke ich Herrn Martin Riester, Gruppenleiter Logistikmanagement, sowie dem gesamten Team für die Unterstützung.

Meinen Eltern Barbara und Gerald, meinen Geschwistern und meiner Frau Julia gilt ein spezieller Dank. Ihr habt mich stets motiviert und unterstützt – euch widme ich diese Arbeit!

Wien, September 2017

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation.....	1
1.2	Allgemeine Problemstellung und Zielsetzung.....	3
1.3	Aufbau der Arbeit.....	4
2	THEORETISCHER BEZUGSRAHMEN UND EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSBEREICHS	6
2.1	Bedeutung und Trends in Logistik und Transport.....	6
2.2	Verkehrsmittel – Grundlagen und Definitionen	7
2.2.1	Einleitung und Begriffsdefinitionen	7
2.2.2	Straßengüterverkehr	10
2.2.3	Schienengüterverkehr.....	11
2.2.4	Binnenschiffgüterverkehr	12
2.3	Fahrzeugdistribution – Grundlagen und Definitionen	14
2.3.1	Distributionslogistik.....	14
2.3.2	Fahrzeugdistribution in Europa.....	15
2.3.3	RoRo-LKW.....	19
2.3.4	RoRo-Bahn	20
2.3.5	RoRo-Binnenschiff.....	21
2.3.6	Containerisierter Fahrzeugtransport.....	22
2.4	Eingrenzung des Untersuchungsbereichs.....	25
2.4.1	Eingrenzung der zu quantifizierenden Kenngrößen	26
2.4.2	Eingrenzung der Transportgüter und -mittel.....	27
2.4.3	Geographische Eingrenzung	28
2.4.4	Prozessuale Eingrenzung.....	29
2.4.5	Eingrenzung Planungshorizont.....	29
2.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	30
3	STAND DER FORSCHUNG	31
3.1	Zieldimensionen und Entscheidungskriterien.....	31
3.2	Ansätze zur Berechnung der Transportkosten	34
3.3	Ansätze zur Berechnung der Treibhausgasemissionen.....	38
3.3.1	Systemgrenzen der Bewertung	38
3.3.2	Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch	38
3.3.3	EU-Richtlinien	40

3.3.4	Norm DIN EN 16258.....	41
3.3.5	VCI-Leitfaden zu CO ₂ -Emissionen in der Logistik.....	42
3.3.6	Transport Emission Model (TREMODO).....	42
3.3.7	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA).....	43
3.4	Elektronische Berechnungstools.....	44
3.4.1	EcoTransIT.....	44
3.4.2	NTMCalc 4.0 Basic.....	45
3.4.3	MAP&GUIDE.....	45
3.4.4	Marco Polo Calculator.....	45
3.4.5	CO ₂ -TEC Transport Emission Calculator.....	45
3.4.6	Truck 2.0.....	46
3.4.7	WKO LKW-Kalkulation.....	46
3.4.8	Zusammenfassung und Vergleich der Berechnungstools.....	46
3.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	46
4	SPEZIFISCHE PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT SOWIE ABLEITUNG DER ANFORDERUNGEN.....	48
4.1	Spezifische Problemstellung.....	48
4.2	Spezifische Zielsetzung der Arbeit.....	49
4.3	Definition der Forschungsmethodik.....	50
4.4	Anforderungen an die Methode.....	52
4.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	54
5	QUANTIFIZIERUNG VON KOSTEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN IN DER AUTOMOBILEN DISTRIBUTIONSLOGISTIK.....	55
5.1	Schritt Nr. 1 Segmentierung der Transportgüter.....	58
5.2	Schritt Nr. 2 Auswahl und Spezifikation der Transportmittel.....	59
5.2.1	LKW.....	59
5.2.2	Bahn.....	59
5.2.3	Binnenschiff.....	60
5.3	Schritt Nr. 3 Definition relationsspezifischer Anforderungen u. Restriktionen.....	61
5.4	Schritt Nr. 4 Berechnung des fahrzeugspezifischen Ladefaktors.....	62
5.4.1	RoRo-LKW.....	62
5.4.2	RoRo-Bahn.....	63
5.4.3	RoRo-Binnenschiff.....	67
5.4.4	Containerisierter Fahrzeugtransport.....	73
5.4.5	Kapazitätsvergleich der Transportmittel und -verfahren.....	75
5.5	Schritt Nr. 5 Berechnung des spezifischen Gesamtgewichts.....	77

5.5.1	LKW	77
5.5.2	Bahn.....	78
5.5.3	Binnenschiff	79
5.6	Schritt Nr. 6 Berechnung der ökologischen Kenngrößen	80
5.6.1	Energiebedarf und Treibhausgasemissionen LKW	80
5.6.2	Berechnungsergebnisse LKW	82
5.6.3	Energiebedarf und Treibhausgasemissionen Bahn.....	84
5.6.4	Berechnungsergebnisse Bahn.....	85
5.6.5	Energiebedarf und Treibhausgasemissionen Binnenschiff	88
5.6.6	Berechnungsergebnisse Binnenschiff	90
5.6.7	Energiebedarf beim Transport	92
5.6.8	Energiebedarf beim Umschlag	95
5.7	Schritt Nr. 7 Berechnung von Transportkosten	97
5.7.1	Kostenrechnung LKW	98
5.7.2	Kostenrechnung Bahn	107
5.7.3	Kostenrechnung Binnenschiff	111
5.7.4	Umlegung der Kosten auf spezifische Transporte.....	115
5.8	Zusammenfassung des Kapitels.....	115
6	ANWENDUNG UND VALIDIERUNG DER METHODE	116
6.1	Rahmenbedingungen der Fallbeispiele.....	116
6.2	Anwendung der Methode.....	117
6.3	Fallbeispiel 1: Mioveni (RO) – Schwertberg (AT).....	118
6.3.1	Beschreibung der Transportketten	118
6.3.2	Ergebnisse der ökologischen Berechnungen (Fallbeispiel 1)	120
6.3.3	Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen (Fallbeispiel 1)	124
6.4	Fallbeispiel 2: Köln (DE) – Antwerpen (BE)	128
6.4.1	Beschreibung der Transportketten	128
6.4.2	Ergebnisse der ökologischen Berechnungen (Fallbeispiel 2)	130
6.4.3	Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen (Fallbeispiel 2)	133
6.5	Vergleich der ökologischen Ergebnisse	135
6.6	Vergleich der ökonomischen Ergebnisse	136
6.7	Zusammenfassung des Kapitels.....	136
7	RESÜMEE UND AUSBLICK	137
7.1	Diskussion der Forschungsfragen und -hypothese	137
7.2	Abgleich mit den Anforderungen an die Methode	140
7.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	143

LITERATURVERZEICHNIS	144
ANHANG	162
VERZEICHNIS BETREUTER STUDIENARBEITEN.....	165
CURRICULUM VITAE.....	166

Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
BiSchi	Binnenschiff
Bsp.	Beispiel
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka (circa)
CEMT	Europäische Verkehrsministerkonferenz
cm	Zentimeter
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
CO ₂ -TEC	Transport Emission Calculator
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECG	European Finished Vehicle Logistics Association
engl.	englisch
ESC	European Stationary Cycle
et al.	et alii
etc.	et cetera
ETC	European Transient Cycle
EU	Europäische Union
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FEU	Forty-foot Equivalent Unit
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
Hrsg.	Herausgeber
inkl.	inklusive
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kg	Kilogramm
LoLo	Lift-on/Lift-off
m	Meter
max.	maximal
Mio.	Millionen
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

NEWS	Next European Waterway Ship
Nr.	Nummer
NTM	Network for Transport Measures
OEM	Original Equipment Manufacturer
RoRo	Roll-on/Roll-off
t	Tonnen
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
TREMOD	Transport Emission Model
TTW	Tank-to-Wheel
u. a.	unter anderem
UIC	International Union of Railways
usw.	und so weiter
u. v. m.	und viele mehr
VCI	Verband der Chemischen Industrie e.V.
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDC	Vehicle Distribution Center
vs.	versus
VSC	Vehicle Storage Center
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel
z. B.	zum Beispiel
ZP8	Zählpunkt 8

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2: Modal-Split im Gütertransport in der EU-28 im Jahr 2013	8
Abbildung 3: Verkehrsarten im Güterverkehr	9
Abbildung 4: Distributionsstrukturen.....	15
Abbildung 5: Schematische Darstellung der kontinentalen Warenströme in Europa.....	17
Abbildung 6: Transportketten-Distributionslogistik	18
Abbildung 7: Produktionsstandorte in Europa	19
Abbildung 8: <i>Kässbohrer metago pro</i>	20
Abbildung 9: Bahnwaggon <i>Laaers 810</i>	21
Abbildung 10: Binnenschiff <i>MS Heilbronn</i>	22
Abbildung 11: <i>VUCAFRAME</i> Containerrahmen	23
Abbildung 12: Spezialequipment <i>R-RAK</i>	24
Abbildung 13: Spezialequipment <i>Cronos Car Rack 3.7</i>	25
Abbildung 14: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs	26
Abbildung 15: Ökonomische und ökologische Kenngrößen der Logistik.....	27
Abbildung 16: Geographische Eingrenzung des Untersuchungsraums	28
Abbildung 17: Prozessuale Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	29
Abbildung 18: Eingrenzung der Planungsebenen in der Distributionslogistik.....	30
Abbildung 19: Bedeutung von Logistikzielen für Industrie, Fahrzeugbau und Spediteure	33
Abbildung 20: Verkehrsträgervergleich für Containertransport	36
Abbildung 21: Modellierung trimodaler Transportketten	37
Abbildung 22: Transportmittelvergleich Energieverbrauch	39
Abbildung 23: Transportmittelvergleich Treibhausgasemissionen.....	40
Abbildung 24: Forschungsmethodisches Vorgehen.....	51
Abbildung 25: Wechselspiel von Theorie und Empirie.....	52
Abbildung 26: Methode zur Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen	57
Abbildung 27: Querschnitt Binnenschiff <i>NEWS</i> : RoRo (links) und Container (rechts)	60
Abbildung 28: Sicherheitsabstände bei der Beladung von PKWs auf Bahnwaggons	65
Abbildung 29: PKW-Flächenbedarf auf einem RoRo-Binnenschiff	67
Abbildung 30: Schematische Darstellung der verfügbaren Ladeflächen auf einem Binnenschiff.....	69
Abbildung 31: Beispiel A - Energiebedarf pro Kompaktklasse-Fahrzeug	87
Abbildung 32: Beispiel B - Energiebedarf pro Kleinwagen-Fahrzeug	87
Abbildung 33: Durchschnittlicher Energiebedarf der Transportmittel.....	92
Abbildung 34: WTW-Energiebedarf bei Parametervariation	94
Abbildung 35: Energie- und Emissionsberechnung im Car-Distribution-Tool.....	117
Abbildung 36: Transportkette Mioveni – Schwertberg	118
Abbildung 37: Ergebnisse der Energiebedarfsrechnung (Fallbeispiel 1)	122
Abbildung 38: Ergebnisse der Emissionsberechnung (Fallbeispiel 1)	123
Abbildung 39: Ergebnisse der Kostenberechnung (Fallbeispiel 1)	127
Abbildung 40: Transportkette Köln – Antwerpen.....	128
Abbildung 41: Ergebnisse der Energiebedarfsrechnung (Fallbeispiel 2)	131
Abbildung 42: Ergebnisse der Emissionsberechnung (Fallbeispiel 2)	132
Abbildung 43: Ergebnisse der Kostenberechnung (Fallbeispiel 2)	134
Abbildung 44: Beispiel-Fragebogen RoRo-LKW Teil 1	163
Abbildung 45: Beispiel-Fragebogen RoRo-LKW Teil 2	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schiffsgrößenklassifizierung für Motorschiffe	13
Tabelle 2: Vergleich bestehender Berechnungstools.....	47
Tabelle 3: Fahrzeugsegmentierung.....	58
Tabelle 4: Dimensionen von RoRo-Waggons	60
Tabelle 5: Durchschnittliche Transportkapazität je RoRo-LKW	63
Tabelle 6: Anzahl Waggons bei Ganzzugverkehr	64
Tabelle 7: Transportkapazität je RoRo-Waggon	66
Tabelle 8: Transportkapazität der Binnenschiffe	72
Tabelle 9: Ladekapazität Fahrzeuge in Containern	74
Tabelle 10: Ladekapazität Container je Transportmittel.....	74
Tabelle 11: Ladekapazität der Transportmittel	76
Tabelle 12: Leergewichte Transportkonfiguration LKW	77
Tabelle 13: Gesamtgewicht von Bahnwaggons	78
Tabelle 14: Gesamtgewicht Zuladung bei Binnenschiff Klasse V.....	79
Tabelle 15: Dieserverbrauch von Last- und Sattelzügen aus HBEFA 3.2.....	80
Tabelle 16: Energiebedarf und Emissionen beim LKW-Transport.....	83
Tabelle 17: Energiebedarf und Emissionen beim Bahntransport.....	86
Tabelle 18: Tragfähigkeit von Binnenschiffen	88
Tabelle 19: Energiebedarf und Emissionen beim Binnenschifftransport	91
Tabelle 20: Energieverbrauch und Emissionen bei dem RoRo-Fahrzeugumschlag	96
Tabelle 21: Energieverbrauch und Emissionen für den LoLo-Fahrzeugumschlag	97
Tabelle 22: Beispielhafte Referenzwerte für Nutzungsdauer und Restwert von LKWs.....	99
Tabelle 23: Beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten LKW.....	100
Tabelle 24: Beispielhafte Referenzwerte für den Einsatz von LKW und Personal	101
Tabelle 25: Beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten Güterzug.....	107
Tabelle 26: Beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten Binnenschiff	112
Tabelle 27: Beschreibung der Transportketten in Fallbeispiel 1	120
Tabelle 28: Beispielhafter Zeitplan für Transportkette TK 1.1	124
Tabelle 29: Beispielhafter Zeitplan für Transportkette TK 1.2.....	125
Tabelle 30: Beispielhafter Zeitplan für Transportkette TK 1.3.....	126
Tabelle 31: Beschreibung der Transportketten in Fallbeispiel 2	130
Tabelle 32: Vergleich bestehender Berechnungstools mit dem Car-Distribution-Tool	142
Tabelle 33: Kenndaten für Dieserverbrauch von Binnenschiffen	162
Tabelle 34: Bachelor- und Masterarbeiten am IMW im Bereich Transportlogistik	165

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der max. Anzahl Waggons eines Ganzzuges	64
Formel 2: Herleitung Ladekapazität pro Waggonebene.....	65
Formel 3: Berechnung Ladekapazität pro Waggonebene bzw. Waggon.....	66
Formel 4: Berechnung der Ladekapazität pro Ganzzug	67
Formel 5: Berechnung der Transportkapazität auf Ladefläche 1	70
Formel 6: Berechnung der Restbreite von Ladefläche 1.....	70
Formel 7: Berechnung der Transportkapazität auf Ladefläche 2 und 3.....	71
Formel 8: Berechnung der Transportkapazität pro Schiffdeck und Binnenschiff.....	71
Formel 9: Berechnung der Ladekapazität bei Container-Transporten.....	73
Formel 10: Umrechnung von Kraftstoffverbrauch in Energieverbrauch.....	81
Formel 11: Energieverbrauch in Abhängigkeit der Nutzlast.....	81
Formel 12: CO ₂ -Äquivalent Emissionen LKW	82
Formel 13: Energiebedarf Bahntransport.....	84
Formel 14: Gezogenes Gesamtgewicht der Lok.....	84
Formel 15: CO ₂ -Äquivalent Emissionen Bahntransporte	85
Formel 16: Energiebedarf Binnenschifftransport.....	88
Formel 17: Berechnung der Nutzlast Binnenschiff.....	89
Formel 18: CO ₂ -Äquivalent Emissionen Binnenschiff	90
Formel 19: Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung.....	99
Formel 20: Berechnung der kalkulatorischen Zinsen.....	101
Formel 21: Berechnung der Gesamtpersonalkosten je LKW.....	102
Formel 22: Berechnung der Kraft- und Schmierstoffkosten.....	103
Formel 23: Berechnung der fixen Kosten für eine spezifische Transportrelation	115
Formel 24: Berechnung der variablen Kosten für eine spezifische Transportrelation	115
Formel 25: Berechnung der Gesamtkosten je transportiertes Fahrzeug	115

Formelzeichen

a	<i>Faktor aus Regressionsrechnung</i>
b	<i>Faktor aus Regressionsrechnung</i>
$\overline{B}_{\text{Fahrzeug}}$	<i>Durchschnittliche Fahrzeugbreite</i>
$B_{\text{LF}_{\text{Gesamt}}}$	<i>Breite des Gesamtladeraums</i>
B_{Rampe}	<i>Breite der Rampe</i>
$B_{\text{Rest}_{\text{LF}1}}$	<i>nicht genützte Breite von Ladefläche 1 (Restbreite)</i>
$\text{CO}_2 e_{\text{TTW}-\text{BiSchi}}$	<i>CO₂ – Äquivalent Emissionen (TTW) Binnenschiff</i>
$\text{CO}_2 e_{\text{TTW}-\text{LKW}}$	<i>CO₂ – Äquivalent Emissionen (TTW) LKW</i>
$\text{CO}_2 e_{\text{WTW}-\text{BiSchi}}$	<i>CO₂ – Äquivalent Emissionen (WTW) Binnenschiff</i>
$\text{CO}_2 e_{\text{WTW}-\text{LKW}}$	<i>CO₂ – Äquivalent Emissionen (WTW) LKW</i>
$\text{CO}_2 e_{\text{WTW}-\text{Zug}}$	<i>CO₂ – Äquivalent Emissionen (WTW) Zug</i>
$D_{\text{Gesamt}_{\text{Jahr}}}$	<i>jährliche Gesamttransportdistanz des Transportmittels</i>
$D_{\text{spez.}}$	<i>Spezifische Distanz der Transportrelation</i>
E_{Rest}	<i>Restverkaufserlös nach Nutzungsdauer</i>
e_{TTW}	<i>Energiefaktor (TTW)</i>
e_{WTW}	<i>Energiefaktor (WTW)</i>
em_{TTW}	<i>Emissionsfaktor (TTW)</i>
em_{WTW}	<i>Emissionsfaktor (WTW)</i>
EV_{leer}	<i>Energiebedarf im unbeladenen Zustand</i>
EV_{Lkw}	<i>Energiebedarf LKW bei def. Nutzlast</i>
$EV_{\text{TTW}-\text{BiSchi}}$	<i>Energieverbrauch (TTW) Binnenschiff</i>
$EV_{\text{TTW}-\text{HA}}$	<i>Energieverbrauch (TTW) Binnenschiff Hauptaggregate</i>
$EV_{\text{TTW}-\text{LKW}}$	<i>Energieverbrauch (TTW) LKW</i>
$EV_{\text{TTW}-\text{Zug}}$	<i>Energieverbrauch (TTW) Zug</i>
EV_{voll}	<i>Energiebedarf im max. beladenen Zustand</i>
$EV_{\text{WTW}-\text{BiSchi}}$	<i>Energieverbrauch (WTW) Binnenschiff inkl. Zuschläge</i>
$EV_{\text{WTW}-\text{LKW}}$	<i>Energieverbrauch (WTW) LKW</i>
F_{fix}	<i>Anteil der fixen Kosten der kalkulatorischen Abschreibung</i>
$F_{\text{Gemeinkosten}}$	<i>Faktor für den Aufschlag von Gemeinkosten</i>
F_{Personal}	<i>Faktor der Fahrerbereitstellung je LKW</i>
$F_{\text{var.}}$	<i>Anteil der variablen Kosten der kalkulatorischen Abschreibung</i>
$G_{\text{Container}}$	<i>Gewicht pro Container inkl. Spezialequipment</i>
G_{Fahrzeug}	<i>Gewicht pro Fahrzeug</i>
g_{GG}	<i>gezogenes Gesamtgewicht (exkl. Lokomotive)</i>

G_{Waggon}	<i>Gewicht pro Waggon</i>
$K_{Abschreibung}$	<i>Kosten für kalkulatorische Abschreibung</i>
K_{AdBlue}	<i>Kosten für AdBlue</i>
$K_{Anschaffung}$	<i>Kosten bei Anschaffung</i>
K_{Diesel}	<i>Kosten für Dieselkraftstoff</i>
$K_{Diäten}$	<i>Diäten für Tages- und Nachtgeld</i>
$K_{Fix_spez.}$	<i>fixe Kosten umgelegt auf eine spezifische Transportrelation</i>
K_{Gesamt_PKW}	<i>Gesamtkosten pro transportiertes Fahrzeug</i>
$K_{LKW_Personal}$	<i>Kosten für Personal je LKW</i>
$K_{Sonst.}$	<i>sonstige Kosten für Personal</i>
$K_{Treibstoff}$	<i>Kosten für Kraft- und Schmierstoffe</i>
$K_{var._spez.}$	<i>variable Kosten umgelegt auf eine spezifische Transportrelation</i>
$K_{Vorhalte}$	<i>Sonstige Vorhaltekosten</i>
$K_{Wartung}$	<i>Kosten für Wartung und Instandhaltung</i>
$K_{Wiederbeschaffung}$	<i>Kosten bei Wiederbeschaffung</i>
K_{Zinsen}	<i>Kosten für kalkulatorische Zinsen</i>
KV_{LKW_AdBlue}	<i>Kraftstoffverbrauch AdBlue LKW</i>
KV_{LKW_Diesel}	<i>Kraftstoffverbrauch Diesel LKW</i>
$L_{Container}$	<i>Länge der Ladefläche im Container</i>
$L_{Fahrzeug}$	<i>durchschnittliche Fahrzeuglänge</i>
$L_{Ladeebene}$	<i>Länge der Ladeebene</i>
L_{LF_Gesamt}	<i>Länge des Gesamtladeraums</i>
L_{LKW_Fahrer}	<i>Lohn von LKW-Fahrer (Brutto)</i>
L_{Lok}	<i>Länge einer Lok (Länge über Puffer)</i>
$L_{Nebenk.}$	<i>Lohnnebenkosten</i>
L_{Rampe}	<i>Länge der Rampe</i>
$L_{Rampe\ Heck}$	<i>Abstand vom Gesamtladeraum vorne (Heck) bis zur Rampe</i>
L_{Waggon}	<i>Länge eines Waggons (Länge über Puffer)</i>
$L_{Zug\ max.}$	<i>max. Gesamtzuglänge</i>
LF_{PKW}	<i>Ladefaktor PKW</i>
$N_{Container_Bischi}$	<i>Anzahl Container je Binnenschiff</i>
$N_{Fahrzeuge_BiSchi}$	<i>Anzahl Fahrzeuge pro Binnenschiff</i>
$N_{Fahrzeuge_Breite\ LF1}$	<i>Anzahl Fahrzeuge in der Breite auf Ladefläche 1</i>
$N_{Fahrzeuge_Breite\ LF2}$	<i>Anzahl Fahrzeuge in der Breite auf Ladefläche 2 & 3</i>
$N_{Fahrzeuge_Container}$	<i>Anzahl Fahrzeuge pro Container</i>

$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}}$	Anzahl Fahrzeuge pro Waggonenebene
$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene_oben}}$	Anzahl Fahrzeuge auf der oberen Ladeebene
$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene_unten}}$	Anzahl Fahrzeuge auf der unteren Ladeebene
$N_{\text{Fahrzeuge_LF1}}$	Anzahl Fahrzeuge auf Ladefläche 1
$N_{\text{Fahrzeuge_LF2}}$	Anzahl Fahrzeuge auf Ladefläche 2
$N_{\text{Fahrzeuge_LF3}}$	Anzahl Fahrzeuge auf Ladefläche 3
$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF1}}$	Anzahl Fahrzeuge in der Länge auf Ladefläche 1
$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF2}}$	Anzahl Fahrzeuge in der Länge auf Ladefläche 2
$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF3}}$	Anzahl Fahrzeuge in der Länge auf Ladefläche 3
$N_{\text{Fahrzeuge_Schiffsdeck}}$	Anzahl Fahrzeuge pro Schiffsdeck
$N_{\text{Fahrzeuge_Waggon}}$	Anzahl Fahrzeuge pro Waggon
$N_{\text{Fahrzeuge_Zug}}$	Anzahl Fahrzeuge pro Ganzzug
$N_{\text{Waggon_Zug}}$	Anzahl Waggon pro Ganzzug
$Nl_{\text{BiSchi_Container}}$	tatsächliche Nutzlast Container - Binnenschiff
$Nl_{\text{BiSchi_RoRo}}$	tatsächliche Nutzlast RoRo - Binnenschiff
$Nl_{\text{LKW_ist}}$	tatsächliche Nutzlast LKW
$Nl_{\text{LKW_max}}$	maximale Nutzlast LKW
SA_{Co}	Sicherheitsabstand jeweils vorne, hinten und zwischen den Fahrzeugen im Container
SA_{Ft}	Sicherheitsabstand auf der Seite der Fahrertüre zur Schiffswand
SA_{hi}	Sicherheitsabstand zwischen Waggon und Stoßstange hinten
SA_{SS}	Sicherheitsabstand zwischen den eingeklappten Seitenspiegeln der Fahrzeuge
SA_{vo}	Sicherheitsabstand zwischen Waggon und Stoßstange vorne
SA_{zw}	Sicherheitsabstand zwischen den Stoßstangen der Fahrzeuge
x	Tragfähigkeit des Binnenschiffes
z_n	Zuschlagsfaktor für Nebenaggregate, Manövrieren Häfen und Schleusen
$Z_{\text{Nutz_effektiv}}$	effektive Nutzungsdauer
$Z_{\text{Schmierst.}}$	Zuschlag für Schmierstoffe
$\text{Zeit}_{\text{Gesamt_Jahr}}$	jährliche Gesamteinsatzzeit des Transportmittels
$\text{Zeit}_{\text{spez.}}$	spezifische Einsatzzeit bei definierter Transportrelation
Zins_{EK}	Zinssatz für Eigenkapital
Zins_{FK}	Zinssatz für Fremdkapital

1 Einleitung

*„Mobilität von Menschen und Gütern ist nicht Folge,
sondern Grundlage unseres Wohlstands“ (Kuenheim 1988, S. 19).*

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung der optimalen Verkehrsträgerwahl im Rahmen der Gestaltung von Transportketten in der automobilen Distributionslogistik. Zu diesem Zweck wird eine Methode für die Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße entwickelt. Im Besonderen werden dabei die spezifischen Gegebenheiten des Roll-on/Roll-off-Transports (RoRo-Transport) und innovative Logistiklösungen für den Fahrzeugtransport in Containern untersucht.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die weltweite Automobilindustrie nimmt mit 72,1 Mio. produzierten Personenkraftfahrzeugen (Stand 2016) eine Schlüsselstellung im internationalen Wirtschaftssystem ein (vgl. Statista 2017a). Durch die globale Verlagerung von Produktionsstätten und der weltweiten Distribution von Gütern entstehen ein erhöhtes Transportaufkommen und komplexere Distributionsnetzwerke. Dies führt zu einer zunehmenden Bedeutung der Transportlogistik.

Der Markt an zu transportierenden Fahrzeugen in der Europäischen Union setzt sich einerseits aus den in mehr als 100 Montagewerken produzierten und andererseits aus den importierten Fahrzeugen zusammen. Daraus resultieren jährlich 19,4 Mio. Fahrzeuge, wovon der Import mit etwa 2,9 Mio. Fahrzeugen (Stand 2016) den geringeren Anteil ausmacht (vgl. European Automobile Manufacturers Association 2017a und 2017b).

Die Fahrzeugdistribution erfolgt auf dem europäischen Festland meist über einen zweistufigen Prozess, vorwiegend per LKW und Bahn (vgl. Klug 2010, S. 434). Der Transport mittels Binnenschiff in Europa wird zwar seit 1982 durchgeführt, allerdings ist der Anteil an derart transportierten Fahrzeugen sehr gering (vgl. Bernards 2013, S. 32). Um Transporte per Binnenschiff oder Bahn durchführen zu können, ist oftmals ein multimodaler Transport unter Einbeziehung des LKWs im Vor- und Nachlauf¹ notwendig, da viele Produktionsstätten und Distributionszentren über keine Schienen- bzw. Wasserstraßenanbindung verfügen. Im Vorlauf von mehrgliedrigen

¹ Im Vorlauf werden Güter von mehreren Quellen gebündelt zu einem Sammelpunkt transportiert. Im Hauptlauf werden die Güter vom Sammelpunkt zu einem Verteilpunkt transportiert. Die Feinverteilung zu den Senken erfolgt schließlich im Nachlauf (vgl. Schuh und Stich 2013, S. 139).

Transportketten sowie im Nachlauf bei der Feinverteilung der Fahrzeuge an verschiedene Händler ist der LKW aufgrund seiner Flexibilität meist konkurrenzlos (vgl. Koether 2014, S. 166).

Allgemein gilt für den Gütertransport, dass aus ökologischen Gründen der Binnenschifftransport dem Bahntransport und dieser dem LKW-Transport vorzuziehen ist (vgl. Engelfried 2011, S. 101–102). Experten aus unterschiedlichen Fachrichtungen weisen in ihren Arbeiten auf die zunehmende Bedeutung von ökologischen Kenngrößen hin (vgl. Gudehus 2005, S. 77; Schuh und Stich 2013, S. 17). Die Wichtigkeit, Transporte von der Straße auf umweltfreundlichere Verkehrsträger zu verlagern, wird durch die *Europäische Kommission* mit der im White Paper definierten Zielsetzung untermauert. Diese besagt, dass bis zum Jahr 2030 30 % des Straßengüterverkehrs mit einer Distanz über 300 km auf Bahn und Binnenschiff verlagert werden sollen (vgl. European Commission 2011, S. 9).

Die ökologischen Bestrebungen können bei der Gestaltung von Transportketten jedoch nicht nur komplementär, sondern auch konfliktär zu ökonomischen Zielsetzungen sein und somit eine ganzheitliche Optimierung erschweren (vgl. Arnold, D. et al. 2008, S. 8–9). In einer Vielzahl von Studien werden die Kosten als einer der wichtigsten Kriterien bei der Verkehrsträgerwahl genannt, wodurch diese bei der Gestaltung von Transportketten meist entscheidungskritisch sind (vgl. Prognos 1994, S. 17; Deiters et al. 2006, S. 26–27; Stein et al. 2014, S. 46).

Neben der Fragestellung der Verkehrsträgerwahl ist bei der Gestaltung von ein- und mehrgliedrigen Transportketten auch das optimale Transportverfahren zu bestimmen. Im Bereich der Fertigfahrzeugdistribution ist vorrangig das RoRo-Verfahren im Einsatz, bei dem die Fertigfahrzeuge mit eigenem Antrieb verladen werden. Durch die spezifische Bauweise der RoRo-fähigen Transportmittel können diese jedoch nicht für den Transport von anderen Gütern eingesetzt werden.

Ein Ansatz zur Steigerung von Flexibilität und Auslastung der Transportmittel ist die sogenannte Containerisierung der Fahrzeuge und der Transport mittels Lift-off/Lift-on-Verfahren (LoLo-Verfahren). Hersteller wie beispielsweise *Trans-Rak International*, *UNIT45* oder *Cronos* haben innovative Spezialbehältnisse bzw. Ladehilfsmittel für die Distribution entwickelt, um den Ladefaktor bei dem containerisierten Fahrzeugtransport zu verbessern (vgl. Cronos Group Limited 2014; Trans-Rak International 2015; UNIT45 2015). Es wird jedoch nur ein sehr geringer Anteil der Fahrzeugtransporte mit Containern durchgeführt. Bei dem Fahrzeughersteller BMW beträgt dieser Anteil beispielsweise noch unter 1 % (vgl. Cross 2012).

1.2 Allgemeine Problemstellung und Zielsetzung

Um eine effiziente automobiler Distributionslogistik realisieren zu können, stellt sich die Frage, wie unterschiedliche Gestaltungsvarianten einer Transportkette hinsichtlich entscheidungskritischer Faktoren quantifiziert werden können. Bestehende Methoden für die Kalkulation von Kosten (z. B. LKW-Kostenkalkulation nach Wittenbrink 2014, S. 73 ff.) oder Umweltauswirkungen (z. B. ifeu et al. 2016, S. 6 ff.) wurden zumeist für Stückgut-, Massengut- oder Container entwickelt. Die besonderen Gegebenheiten der automobilen Distributionslogistik, wie beispielsweise der spezifische Ladefaktor in Abhängigkeit des RoRo-fähigen Transportmittels, haben signifikanten Einfluss auf die Höhe der ökonomischen und ökologischen Kenngrößen. Es ist daher nicht zielführend, Methoden, die für andere Transportgüter entwickelt worden sind, unverändert auf den Fahrzeugtransport anzuwenden.

Die Notwendigkeit einer Methode zur Quantifizierung ist jedoch gegeben, da die Mess- und Vergleichbarkeit von Gestaltungsvarianten von Transportketten eine wichtige Rolle bei der Optimierung spielen. Im Zuge einer Studie mit Verladern und Logistikdienstleistern wurden Entscheidungsträger hinsichtlich der Bewertung unterschiedlicher Transportalternativen befragt. Die Bewertungsergebnisse zeigen, dass die Verkehrsträgerwahl zum Teil auf irrationale Art und Weise durchgeführt wird und auf falschen Annahmen basiert. Zusammenfassend wurde von den Studienautoren daraus abgeleitet, dass alternative Verkehrsträger oftmals aufgrund eines Informationsmangels ausgeschlossen werden (vgl. Vannieuwenhuysen et al. 2003, S. 125).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, durch die Quantifizierung von ökologischen und ökonomischen Kenngrößen einen Beitrag zur optimalen Gestaltung von Transportketten in der automobilen Distributionslogistik zu leisten. Als Besonderheit soll dabei neben der Betrachtung des vorrangig zum Einsatz kommenden RoRo-Transports auch eine Gegenüberstellung mit innovativen Logistiklösungen für den Fahrzeugtransport in Containern durchgeführt werden.

Zur Erreichung der definierten Zielsetzung wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die auf bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten aus dem Bereich der ökonomischen und ökologischen Quantifizierung von Transporten aufbaut und zusätzlich spezifische Faktoren der automobilen Distribution berücksichtigt. Dadurch soll eine Entscheidungsunterstützung für die Gestaltung von ein- und mehrgliedrigen Transportketten für Verladern und Logistikdienstleister ermöglicht werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit setzt sich inklusive Einleitung und Zusammenfassung aus sieben Kapiteln zusammen. Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Ausgangssituation und die Motivation beschrieben und darauf aufbauend die allgemeine Problemstellung und Zielsetzung abgeleitet. Abschließend wurde das zu erwartende Ergebnis definiert.

Die für das Verständnis notwendigen Grundlagen werden in *Kapitel 2* erläutert. Es wird dabei auf die Verkehrsträgerwahl im Allgemeinen und auf die Besonderheiten der automobilen Distributionslogistik eingegangen. Abschließend wird der Untersuchungsbereich hinsichtlich der zu quantifizierenden Kenngrößen und Rahmenbedingungen eingegrenzt.

In *Kapitel 3* erfolgt vor dem Hintergrund der Problemstellung die Beschreibung des aktuellen Standes der Forschung bezüglich der Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen der einzelnen Verkehrsträger. Relevante wissenschaftliche Arbeiten werden diskutiert und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zielerreichung dieser Arbeit bewertet.

In *Kapitel 4* werden auf Basis der Eingrenzung des Untersuchungsbereichs und des Forschungsstandes die spezifische Problemstellung und die Zielsetzung definiert. Des Weiteren wird die Forschungsmethodik beschrieben und die Anforderungen an die Methode abgeleitet.

Der Aufbau und die einzelnen Bestandteile der entwickelten Methode werden in *Kapitel 5* im Detail erläutert.

Das *Kapitel 6* beschreibt den Aufbau der für die Anwendung der Methode entwickelten Fallbeispiele. Die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Berechnungen werden für ein- und mehrgliedrige Transportketten unter Einbeziehung der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße dargelegt.

Abschließend werden in *Kapitel 7* die Ergebnisse zusammengefasst und eine kritische Betrachtung der Arbeit sowie ein Abgleich der definierten Anforderungen an die Methode durchgeführt. Abschließend wird ein Ausblick über zukünftige Entwicklungen in dem behandelten Themengebiet gegeben.

Der Aufbau der Arbeit ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.

Grundlagen	Kapitel 1 Einleitung
	Kapitel 2 Theoretischer Bezugsrahmen und Eingrenzung des Untersuchungsbereichs
	Kapitel 3 Stand der Forschung
Entwicklung der Lösung	Kapitel 4 Spezifische Problemstellung und Zielsetzung sowie Anforderungen an die Methode
	Kapitel 5 Aufbau der Methode
Validierung und Resümee	Kapitel 6 Anwendung und Validierung der Methode
	Kapitel 7 Resümee und Ausblick

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

2 Theoretischer Bezugsrahmen und Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Das Kapitel 2 dient der Entwicklung eines theoretischen Bezugsrahmens als Basis für die vorliegende Arbeit und trägt dazu bei, die im *Kapitel 4* dargestellten Forschungsfragen in einen sinnvollen Kontext einzubetten.

In diesem Zusammenhang werden in *Kapitel 2.1* die Bedeutung und Trends in Logistik und Transport erläutert. Weiterführend werden im Detail die thematischen Grundlagen hinsichtlich der Verkehrsträgerwahl in *Kapitel 2.2* erläutert, im Speziellen wird dabei auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße näher eingegangen. Die Existenz einer Vielzahl unterschiedlicher Definitionen erfordert außerdem die nähere Spezifikation der Fachbegriffe. Im anschließenden *Kapitel 2.3* werden die Abläufe und Besonderheiten der Automobildistribution beschrieben. Abschließend wird in *Kapitel 2.4* der Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit eingegrenzt.

2.1 Bedeutung und Trends in Logistik und Transport

Die Logistik ist ein wichtiger Wachstumsmotor für globalisierte Wertschöpfungs- und Handelsprozesse und Ausgangspunkt für wirtschaftliche Entwicklung und die Erreichung von Umweltzielen (vgl. Lochmahr 2016, S. 6). Die Transportlogistik als ein Bereich der Logistik ist „[...] die ganzheitliche Betrachtungsweise aller für einen Transportvorgang notwendigen Arbeits- und Informationsweisen“ (Martin 2014, S. 97).

Weltweit gibt es viele aufstrebende Märkte wodurch die Kundenbasis im Gütertransport wächst. Die zunehmende Vereinfachung von internationalen Handelsregelungen wirkt sich zusätzlich positiv auf diese Entwicklung aus (vgl. Steadie Seifi et al. 2014, S. 1). Der Anteil der Logistikwirtschaft am Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist von Land zu Land unterschiedlich. In Deutschland beispielsweise beträgt der Anteil des Logistikmarktes am BIP 8,4 % (vgl. Fraunhofer SCS 2014, S. 1). In China sind die Logistikkosten mit einem Anteil von 18 % am BIP (Stand 2011) vergleichsweise hoch, jedoch rückläufig (vgl. Wellbrock und Kroner 2013, S. 208).

Das Themenfeld Logistik und Transport ist nicht nur aus ökonomischer, sondern auch aus ökologischer Sicht relevant. Nach Angaben des Weltklimarates, dem *Intergovernmental Panel on Climate Change*, verursacht Transport (Güter- und Personenverkehr) 14 % der weltweiten Treibhausgase (vgl. IPCC 2014, S. 9). Aufgrund der Bedeutung des Transports in Bezug auf ökologische Zielsetzungen ist das Schlagwort *Green Logistics* mittlerweile sehr gebräuchlich (vgl. Koch 2012, S. 292–293).

Green Logistics kann definiert werden als „[...] nachhaltiger und systematischer Prozess zur Erfassung und Reduzierung der Ressourcenverbräuche und Emissionen, die aus Transport- und Logistikprozessen in und zwischen Unternehmen resultieren“ (Wittenbrink 2015, S. 295). In der Literatur existieren jedoch aufgrund verschiedener Zielsetzungen unterschiedliche Begriffsdefinitionen von *Green Logistics* (vgl. Keuschen und Klumpp 2010, S. 19–20).

Die Entwicklung von Logistik und Supply Chain Management (SCM) kann anhand von Megatrends wie folgt beschrieben werden (vgl. Göpfert et al. 2013, S. 4–5):

- Klimawandel wird zur zentralen Herausforderung
- weitere Zunahme der Globalisierung
- neue Wachstumsmärkte (BRIC-Staaten)
- Gefährdung durch Industriespionage, Kriminalität, Terrorismus
- Anstieg der Nachfrage nach lokal produzierten Gütern
- zunehmende Individualisierung der Kundenwünsche
- Anstieg der zwischenbetrieblichen Datenkomplexität
- Zunahme an infrastrukturellen Engpässen
- Logistikservice gewinnt weiter an Bedeutung
- erwarteter Anstieg der Transportkosten

Die angeführten Megatrends zeigen, dass ökonomische (z. B. Anstieg Transportkosten) und ökologische (z. B. Klimawandel) Fragestellungen, welche in dieser Arbeit behandelt werden, vermutlich auch in Zukunft eine große Bedeutung in Logistik und SCM einnehmen werden. Der technologische Fortschritt mit dem rasanten Anstieg an digitalen Daten (*Big Data*) und die Weiterentwicklung des Internet hin zum *Internet der Dinge* (engl. *Internet of Things*) im Kontext der *Industrie 4.0*² können als weitere wichtige Trends genannt werden (vgl. Speranza 2016). Diese werden auch im *DHL Logistics Trend Radar*, neben zahlreichen weiteren Trends, wie der Cloud Logistik, dem 3D-Druckverfahren und dem autonomen Fahren angeführt (vgl. Deutsche Post DHL Group 2016b).

2.2 Verkehrsmittel – Grundlagen und Definitionen

2.2.1 Einleitung und Begriffsdefinitionen

Verkehrsmittel sind definiert als „Fortbewegungsmittel zur Beförderung von Personen oder Gütern innerhalb der Verkehrsträger“ (Bichler et al. 2011, S. 192). Der Modal Split

² Prof. Sihn von der Technischen Universität Wien definiert „Industrie 4.0“ mit „[...] Integration modernster Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) mit klassischen physischen Produkten und Prozessen, durch die neue Geschäftsmodelle entstehen und neue Märkte erschlossen werden“ (Erol et al. 2016, S. 267).

beschreibt die Verteilung des Verkehrs nach unterschiedlichen Verkehrsträgern. Es wird hierbei zwischen Straßen-, Schienen-, Luft-, Schiffs- und Leitungsverkehren unterschieden (vgl. Stock und Bernecker 2014, S. 9). Das für den Transport zur Verfügung stehende transeuropäische Netzwerk (engl. Trans-European Transport Network) in den 28 Mitgliedstaaten umfasst insgesamt 5 Mio. befestigte Straßenkilometer, 215.000 Schienenkilometer und 41.000 an befahrbaren Wasserstraßenkilometern (Stand 2017) (vgl. European Commission 2017). Die Aufschlüsselung des Güterverkehrsaufkommens nach Verkehrsträgern ist aufgrund fehlender Informationen immer nur näherungsweise möglich. Ein Großteil der verwendeten Daten stammt aus Stichprobenerhebungen, die mittels Algorithmen hochgerechnet werden (vgl. Gronalt et al. 2010, S. 4).

In der nachfolgenden Abbildung 2 ist die Verteilung, gemessen an den zurückgelegten Tonnenkilometern in der Europäischen Union, aufgeschlüsselt. Ausgenommen von dieser Darstellung sind Leitungsverkehre, welche für den Transport von Erdöl und Erdgas verwendet werden. Bei der Seeschifffahrt und der Luftfracht wurden nur jene Transporte berücksichtigt, die innerhalb der EU durchgeführt worden sind. Der Straßentransport hat gemessen an der Gesamtanzahl der zurückgelegten Tonnenkilometer in der Europäischen Union mit knapp über 50 % den größten Anteil (vgl. Eurostat 2015).

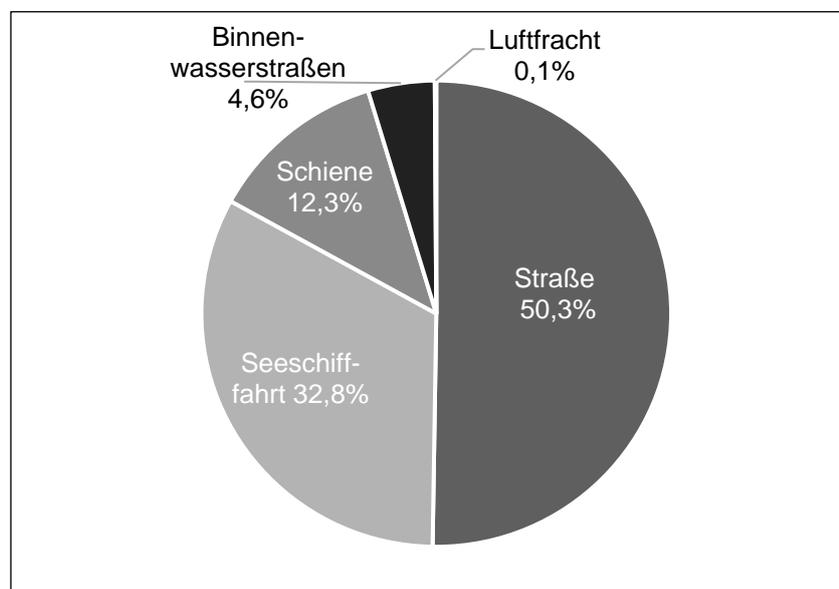


Abbildung 2: Modal-Split im Gütertransport in der EU-28 im Jahr 2013 (eigene Darstellung in Anlehnung an Eurostat 2015)

Die Vormachtstellung des Verkehrsträgers Straße steigt weiterhin an. Beispielsweise wurde der Handel zwischen Spanien und Russland, welcher größtenteils mittels Seeschifffahrt durchgeführt wurde, zunehmend auf die Straße verlagert (vgl. García-Menéndez et al. 2004, S. 448). Die Verlagerung auf die Straße führt zu negativen Effekten wie Umweltverschmutzung, Infrastrukturabnutzung und Verkehrsunfällen

(vgl. Arnold, P. et al. 2004, S. 255). Zusätzlich kommt es zu Kapazitätsengpässen im Straßenverkehr, weshalb die verstärkte Nutzung von Verkehrsträgern mit freien Kapazitäten (z. B. Wasserstraße) anzustreben ist (vgl. Arencibia et al. 2015, S. 252).

Neben der Auswahl eines Verkehrsträgers besteht auch die Möglichkeit, mehrere in einer Transportkette miteinander zu kombinieren. In diesem Zusammenhang werden Begriffe wie ein- und mehrgliedrige Verkehre oder uni- und multimodaler Transport in der Literatur zum Thema Transport und Logistik genannt. Es liegt aber keine allgemein anerkannte, widerspruchsfreie Verwendung der Begriffe und der durch sie beschriebenen Wirklichkeit vor (vgl. Ammoser und Hoppe 2006, S. 6)

In dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Begriffe analog zu der Definition von *Kummer* (vgl. 2010, S. 56–58) verwendet. Transporte, die ohne Unterbrechung durchgeführt werden, werden als eingliedrige bzw. ungebrochene Transporte bezeichnet. Handelt es sich um eine Transportkette mit einem Umschlagprozess, so wird von einem mehrgliedrigen Verkehr gesprochen. Dieser kann weiter in unimodalen Verkehr – bei Verwendung von nur einem Verkehrsträger – und in multimodalen Verkehr – bei Verwendung von mindestens zwei unterschiedlichen Verkehrsträgern – unterschieden werden (siehe Abbildung 3).

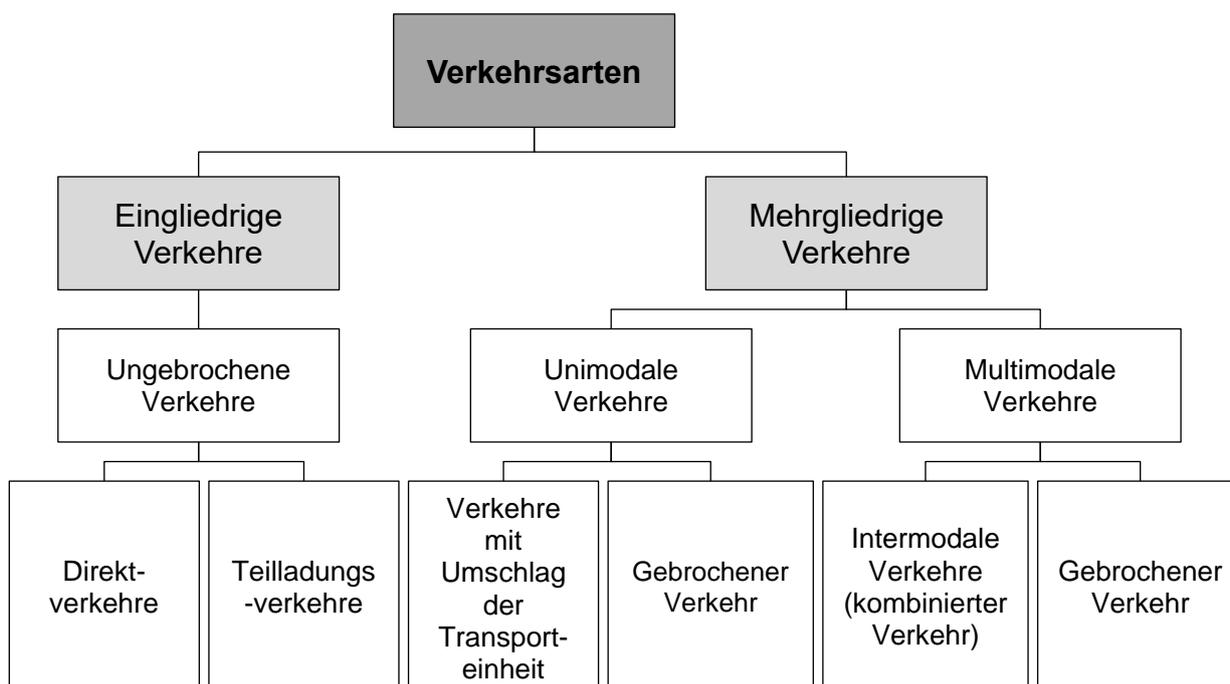


Abbildung 3: Verkehrsarten im Güterverkehr (eigene Darstellung in Anlehnung an Kummer 2010, S. 57)

Die Idee hinter multimodalen Transport ist, die Stärken der unterschiedlichen Verkehrsträger im Rahmen einer integrierten Transportkette zu nutzen. Um multimodalen Transport zu einer bevorzugten Alternative von Verladern und Spediteuren etablieren zu können, müssen die Kosten mindestens gleich bzw. niedriger als im unimodalen Transport sein (vgl. Sandberg Hanssen et al 2012, S. 189–

190). Da die Break-Even-Distanz von multimodalen Transport von zahlreichen Faktoren (z. B. Transportstrecke, Transportgut und Marktsituation) abhängig ist, kann keine allgemein gültige Break-Even-Distanz definiert werden (vgl. Kim und Wee 2011, S. 859). Der intermodale Transport stellt eine besondere Form des multimodalen Transports dar, bei dem die Güter in Ladeeinheiten (z. B. Container) transportiert werden. Falls bei einem intermodalen Verkehr der Hauptlauf mit Bahn, Binnenschiff oder Seeschiff zurückgelegt wird, so ist dies ein kombinierter Verkehr. Die eindeutige Erfassung des Anteils von kombiniertem Verkehr am Gesamtgüterverkehr ist mit Schwierigkeiten verbunden, da der Vor- und Nachlauf per LKW zu den Umschlagterminals der Kategorie Straßenverkehr zugeordnet wird (vgl. Gronalt et al. 2010, S. 6).

Die Akteure der Verkehrslogistik lassen sich mit Verloader bzw. Versender, Transportdienstleister und Empfänger in drei Gruppen einteilen. Die Verloader stellen mit ihren Produktionsstätten die Quelle der Transportlogistik dar. Für die Distribution der Waren wird entweder ein eigener Fuhrpark eingesetzt oder es werden externe Transportdienstleister beauftragt (vgl. Ebel 2013, S. 126).

Im kombinierten Verkehr ist die mögliche Anzahl eingebundener Akteure größer als beim Direktverkehr mit nur einem Transportmittel. Zwischen Versender und Empfänger kommen mit Spediteur, Operateur, Frachtführer und Terminalbetreiber bis zu vier unterschiedliche Akteure zum Einsatz. Bei den Operateuren handelt es sich um Verkaufsgesellschaften, die die Umschlagsabwicklung an den Terminals und gegebenenfalls den Hauptlauf organisieren (vgl. Kaffka 2013, S. 259–260). Der Spediteur ist durch den Speditionsvertrag verpflichtet, den Transport der Waren zu organisieren. Der eigentliche Transport wird entweder vom Spediteur selbst durchgeführt oder an einen Frachtführer übergeben. Dieser ist laut Frachtvertrag verpflichtet, die Ware am Bestimmungsort an den Empfänger zu übergeben (vgl. Arnold, D. et al. 2008, S. 734). Der Terminalbetreiber kommt als Infrastrukturbetreiber an den Knotenpunkten zum Einsatz und terminiert die Umschlagsaufträge (vgl. Schwarz 2009, S. 385).

2.2.2 Straßengüterverkehr

Der Transport von Gütern auf dem Verkehrsträger Straße ist in Europa gekennzeichnet durch eine flächendeckende Infrastruktur, wodurch zumeist direkte Verbindungen zwischen Quelle (Versender) und Senke (Empfänger) möglich sind (vgl. Dabidian und Langkau 2013, S. 137). Im Fernverkehr kann eine Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 70–75 km/h erreicht werden, wodurch im Vergleich zu dem Verkehrsträger Wasserstraße kurze Gesamttransportzeiten realisiert werden können (vgl. Wittenbrink 2014, S. 144). Die Güterbeförderung im Straßenverkehr erfolgt mit Lastkraftwagen oder Sattelzugmaschinen mit

Sattelanhängern. Die Fahrzeuge lassen sich anhand des vom Gesetzgeber festgelegten zulässigen Gesamtgewichts, den Abmessungen, den Aufbauten und danach, ob ein Anhänger oder Auflieger mitgeführt wird, klassifizieren. Die max. erlaubte Gesamtlänge beträgt bei Sattelzügen 16,5 m, bei Gliederzügen 18,75 m.

Bei einem Gliederzug werden sowohl von der Zugmaschine als auch vom Anhänger Ladung befördert. Im Vergleich dazu werden bei einem Sattelzug nur im Anhänger Waren transportiert (vgl. Arnold, D. et al. 2008, S. 728). Die max. Höhe darf aufgrund von infrastrukturellen Beschränkungen (z. B. Brücken) 4 m nicht überschreiten. Das max. zulässige Gesamtgewicht bei LKWs beträgt 40 t, was je nach Bauart eine max. Nutzlast von 27 t pro Lastzug ermöglicht. Im kombinierten Verkehr darf das zulässige Gesamtgewicht auf 44 t erhöht werden (vgl. Koether 2014, S. 166–168).

Der wesentliche Vorteil des Straßengüterverkehrs ist der sogenannte Haus-zu-Haus-Transport, der eine hohe Flexibilität hinsichtlich der zeitlichen Abwicklung aufweist. Im Vor- und Nachlauf ist der LKW oftmals sogar konkurrenzlos, da viele Verloader und Empfänger über keinen Anschluss an das Schienen- oder Wasserstraßennetzwerk verfügen (vgl. Büter 2010, S. 244).

Die Nachteile des Straßengüterverkehrs liegen vor allem in den Einschränkungen hinsichtlich der Gewichte und Abmessungen, wodurch im Vergleich zur Bahn und zum Binnenschiff eine geringe Nutzlast und ein geringer Ladefaktor resultieren. Zudem sind die rechtlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Lenk- und Ruhezeiten sowie der Fahrverbote an Sonn- und Feiertagen nachteilig zu sehen (vgl. Wannewetsch 2007, S. 339). Diese haben auf die zeitabhängigen Vorhaltekosten Einfluss und müssen dementsprechend bei einem ökonomischen Verkehrsträgervergleich berücksichtigt werden.

2.2.3 Schienengüterverkehr

Der Bahntransport eignet sich aufgrund des geringen Rollwiderstandes zwischen Schiene und Rad sowie des geringen Personalaufwands sehr gut für den energie- und kosteneffizienten Transport von Gütern (vgl. Meier et al. 2013, S. 161–162). Beim Transport wird zwischen sogenannten Einzelwaggon- und Ganzzugverkehr unterschieden. Beim Einzelwaggonverkehr werden einzelne Bahnwaggons mit Fahrzeugen an einem zentralen Punkt dem Logistikdienstleister übergeben und mit anderen Waggons beliebiger Fracht für den Hauptlauf konsolidiert. Bei Ganzzügen wird ein kompletter Zug beladen und auf direktem Weg zur Zieldestination gefahren (vgl. Schwede 2014, S. 26–27).

Die maximale Anzahl der Waggons ist durch infrastrukturelle Einschränkungen (z. B. Länge von Überhol- und Bahnhofsgleisen) auf der Transportroute beschränkt und wird mit der max. Gesamtzuglänge angegeben. Diese ist streckenspezifisch und beträgt

beispielsweise in Deutschland auf vielen Relationen 740 m (vgl. Meier et al. 2013, S. 162). In den östlichen Bundesländern Deutschlands sowie in Polen und Tschechien ist aufgrund der eingeschränkten Infrastruktur eine maximale Zuglänge von 600 m produzierbar (vgl. Plewa 2013). Güterzüge haben in der Regel eine Länge von 450 bis 650 m, um die von der *International Union of Railways* (UIC) vorgegebene Bremsdistanz von 750 m einhalten zu können (vgl. Janic 2014, S. 128). Für die Berechnung der max. Anzahl an Bahnwaggons muss von der max. zulässigen Zuglänge die Länge der Lok abgezogen werden. Diese beträgt beispielsweise bei der von Siemens gebaute Lokomotive *Vectron* 18,98 m (vgl. Siemens Mobility 2015).

Neben den Restriktionen hinsichtlich der Zuglänge sind auch die max. Ladehöhen der einzelnen Ladeebenen und die Höchstmaße des Querschnitts der Schienenfahrzeuge einzuhalten. Dieses wird über eine definierte Umgrenzungslinie beschrieben, welche als Lichtraumprofil bezeichnet wird. Das Lichtraumprofil ist so bemessen, dass die Loks bzw. deren Waggons mit Beladung sicher auf der Strecke verkehren können (vgl. Posset et al. 2014, S. 152). Bei den Lichtraumprofilen wird zwischen *G1*, welches in Südeuropa und Frankreich vorherrscht, und dem größeren Profil *G2*, welches in Mittel- und Nordeuropa zur Verfügung steht, unterschieden (vgl. Hecht 2008, S. 114).

Die Vorteile des Schienengüterverkehrs liegen im geringen Energieverbrauch und Schadstoffausstoß, sofern die Auslastung des Zuges ausreichend hoch ist. Der Personalaufwand pro Tonnenkilometer ist aufgrund des hohen Automatisierungsgrads im Vergleich zum Verkehrsträger Straße sehr gering. Des Weiteren besteht aufgrund der Spurführung und der vorgeschriebenen Sicherheitsabstände eine hohe Transportsicherheit (vgl. Meier et al. 2013, S. 162). Bei dem Transport von Massengütern hat die Bahn mit Geschwindigkeiten von 80–120 km/h deutliche Systemvorteile (vgl. Bensel 2008, S. 222). Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Ganzzugverkehr beträgt laut Experten etwa 50–55 km/h (vgl. Geiger und Schmied 2012, S. 7–8).

Die Nachteile des Verkehrsträgers Schiene sind das eingeschränkte Streckennetz, die geringe Anpassungsfähigkeit an individuelle Transportbedürfnisse und ein schwieriger Netzzugang (z. B. Trassenverfügbarkeit) (vgl. Klug 2010, S. 214). Das eingeschränkte Streckennetz führt oftmals dazu, dass kein Direkttransport realisiert werden kann. Dadurch entstehen für den etwaigen Vor- und Nachlauf sowie für den Umschlag Mehrkosten.

2.2.4 Binnenschiffgüterverkehr

Die Binnenschifffahrt ist die gewerbliche Güter- und Personenbeförderung, die mit Binnenschiffen auf Binnenwasserstraßen durchgeführt wird. Allgemein gilt, dass der Transport mit dem Binnenschiff energiesparend, sicher, kostengünstig und zudem umweltfreundlich ist. Die ausführenden Binnenschifffahrtsunternehmen werden in

Partikuliere, Reedereien und Genossenschaften unterteilt. Partikuliere betreiben als Schiffsführer und in der Regel auch als Eigentümer Binnenschiffe. Der Schwerpunkt von Reedereien liegt in der Akquisition und Durchführung von Binnenschifftransporten. Dabei können sowohl eigene Schiffe als auch beauftragte Partikuliere zum Einsatz kommen. Genossenschaften arbeiten wie Reedereien – jedoch mit dem Unterschied, dass die Mitglieder die Geschäftspolitik mitbestimmen können (vgl. Spitzer 2008, S. 78–79).

Das schiffbare Wasserstraßennetzwerk in der Europäischen Union umfasst etwa 41.000 km und ist je nach Befahrbarkeit in unterschiedliche Klassen (I bis VII) unterteilt. Die Klassen IV bis VII, ca. 12.000 km des Gesamtnetzwerkes, sind von internationaler Bedeutung und für einen wirtschaftlichen Güterverkehr nutzbar. Die Wasserstraßenklasse gibt die maximalen Schiffsabmessungen vor, welche auf die jeweiligen infrastrukturellen Gegebenheiten wie Schleusendimensionierung, Brückendurchfahrtshöhen und Abladetiefen zurückzuführen sind (vgl. Muschkiet 2013, S. 181; European Commission 2012, S. 31).

Die Klassifizierung für Motorschiffe auf Binnenwasserstraßen erfolgte auf Empfehlung der europäischen Verkehrsministerkonferenz (CEMT) und der Wirtschaftskommission für Europa der *UNO* (vgl. Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2010a). In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die auf den europäischen Wasserstraßenklassen IV bis VI gängigen Binnenschiffe sowie deren Dimensionen und Transportkapazitäten aufgelistet.

Schiffsgrößenklassifizierung für Binnenschiffe					
Wasserstraßen- klasse	Binnenschiff	max. Länge [m]	max. Breite [m]	Tiefgang [m]	Kapazität [TEU]
IV	Johann Welker	80–85	9,5	2,5	48 (2-lagig)
V	Groß- motorschiff	95–110	11,4	2,5–2,8	208 (4-lagig)
VI	Jowi	140	15,0	3,9	480 (4-lagig)

Tabelle 1: Schiffsgrößenklassifizierung für Motorschiffe (eigene Darstellung in Anlehnung an Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2010a; Schwarz 2009, S. 389)

Die Transportgeschwindigkeit ist abhängig von der gewählten Strecke (Berg-, Tal- oder Kanalfahrt), der Anzahl der Schleusen, der Abladetiefe und von den jeweiligen Witterungen wie Eisgang, Hoch- und Niedrigwasser (vgl. Hildebrand 2008, S. 38). Auf dem Rhein, welcher als Schnellfahrstrecke einzustufen ist, liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit beispielweise bei 10 km/h zu Berg und 20 km/h zu Tal (vgl. Spitzer 2008, S. 80). Somit ist das Binnenschiff im Vergleich zum LKW und zur Bahn das langsamste Transportmittel.

Beim Vergleich mit dem Straßengüterverkehr ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Binnenschiff durchgehend 24 Stunden fahren darf, während im Straßengüterverkehr strenge Arbeitszeitregelungen einzuhalten sind (vgl. Geiger und Schmied 2012, S. 7–8). Weitere positive Effekte des Güterverkehrs auf Binnenwasserstraßen sind mengenbezogene Kostenvorteile, geringe Personalkosten pro Tonnenkilometer, niedriger Energieaufwand und somit auch eine geringere Umweltbelastung im Vergleich zum Straßentransport (vgl. Günther et al. 2007, S. 331).

Die Nachteile der Binnenschifffahrt sind neben den langen Transportzeiten ein eingeschränktes Streckennetz sowie die Unsicherheiten hinsichtlich Wasserstände und Eisbildung (vgl. Klug 2010, S. 216). Die Eisbildung tritt nach einer längeren Kälteperiode von min. -10 °C Lufttemperatur auf. Dies ist jedoch in den letzten Jahren auf dem österreichischen Abschnitt der Donau immer seltener der Fall gewesen (vgl. Via Donau 2016b).

Im Winter 2017 musste jedoch der Eisbrecher „MS Eisvogel“ nach 5 Jahren ohne Einsatz auf der Donau wieder aktiv werden (vgl. Kleine Zeitung 2017). Ein weiterer Unsicherheitsfaktor der Binnenschifffahrt ist, dass der Schiffsverkehr aufgrund von Streckensperren eingestellt werden kann. Dies ist auf dem österreichischen Abschnitt der Donau im Jahr 2015, aufgrund einer Haverie bzw. Ölaustritt, an zwei Tagen der Fall gewesen (vgl. Via Donau 2016a).

2.3 Fahrzeugdistribution – Grundlagen und Definitionen

2.3.1 Distributionslogistik

Die Logistik von Unternehmen lässt sich in drei Stufen beschreiben – Beschaffung, Produktion und Distribution. Dabei wird das Ziel verfolgt die Kosten für Bestände und Transport bei Zulieferer, Produzenten und Kunden möglichst gering zu halten (vgl. Wang und Cheng 2009, S. 266). „Die Distributionslogistik umfasst alle Güter- und Informationsflüsse von der Fertigstellung der Güter bis hin zur Annahme der Güter durch die Kunden“ (Kummer et al. 2009, S. 322). Zu ihren Aufgaben zählen dabei vorrangig die Auftragsabwicklung, die Lagerhaltung und der Transport. Als weitere Elemente werden in der Literatur auch die Kommissionierung, die Verpackung und der Umschlag genannt (vgl. Arnold, D. 2008, S. 406).

Prinzipiell lassen sich Logistiksysteme in Form von Netzwerken anschaulich darstellen. Bei der Darstellung wird auf graphentheoretische Instrumente wie Knoten (z. B. Orte), Kanten (z. B. Verkehrswege) sowie den Kanten zugehörige Gewichte (z. B. Distanzen) zurückgegriffen (vgl. Vahrenkamp und Mattfeld 2007, S. 5–9). Das Konzept des Logistiknetzwerks beruht u. a. auf einer ganzheitlichen Betrachtungsweise für die Gestaltung aller Güter- und Informationsströme vom

Lieferanten bis zum Kunden. Es wird eine Optimierung des Gesamtsystems in den Bereichen Logistikkosten, Versorgungs- und Lieferservices, Flexibilität und Transparenz über die gesamte Wertschöpfungskette angestrebt (vgl. Nyhuis 2008, S. 71).

Das Distributionsnetzwerk kann in eine *horizontale* und *vertikale Distributionsstruktur* zerlegt werden. Während die *vertikale Distributionsstruktur* die Anzahl der Lagerstufen (z. B. Werkslager, Zentrallager, Auslieferungslager etc.) beschrieben wird, setzt sich die *horizontale Distributionsstruktur* aus der Lageranzahl je Stufe (z. B. mehrere Werkslager) zusammen (vgl. Kummer et al. 2009, S. 325). In der nachfolgenden Abbildung 4 ist ein beispielhafter Materialfluss dargestellt.

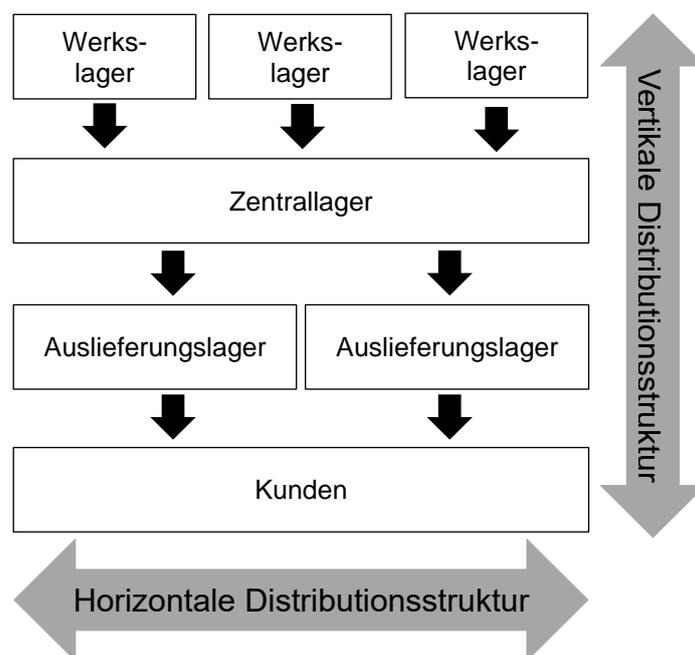


Abbildung 4: Distributionsstrukturen (eigene Darstellung in Anlehnung an Linke 2013, S. 21)

Die Fragestellung des kostenoptimalen Transports bei mehreren Angebots- und Nachfrageorten wird als klassisches Transportproblem bezeichnet. Zur Lösung stehen exakte (z. B. *Simplex Verfahren*) und heuristische Verfahren (z. B. *Nord-West-Ecken-Regel* und *Vogel'sche Approximationsmethode*) zur Verfügung (vgl. Kuhlmann et al. 2015, S. 166–170).

2.3.2 Fahrzeugdistribution in Europa

Der Begriff *Automobilindustrie* inkludiert gemäß dem *Verband der Automobilindustrie* (VDA) Hersteller von Kraftwagen und Motoren, Anhängern und Aufbauten sowie Hersteller von Kfz-Teilen und Zubehör (vgl. Verband der Automobilindustrie 2007, S. 224). Die *Automobilhersteller*, welche auch als *Original Equipment Manufacturer* (OEM) bezeichnet werden, sind Unternehmen, die selbst gefertigte oder beschaffte

Komponenten zu Fahrzeugen kombinieren und diese den Endverbrauchern am Markt anbieten (vgl. Wallentowitz et al. 2009, S. 1).

Weltweit produzieren OEMs jährlich etwa 72,1 Mio. Personenkraftfahrzeuge (Stand 2016) (vgl. Statista 2017a). Davon entfallen etwa 45 % auf die drei größten Automobilhersteller *Volkswagen*, *Toyota* und *General Motors*, die pro Jahr jeweils rund 10 Mio. Fahrzeuge verkaufen (Stand 2013) (vgl. Fuß 2014, S. 3). In der Europäischen Union werden 16,5 Mio. PKW pro Jahr produziert, was einem Anteil von knapp 23 % an der globalen Automobilproduktion entspricht (Stand 2016) (vgl. European Automobile Manufacturers Association 2017b).

Für die Gesamtanzahl der zu transportierenden Fahrzeuge in Europa sind neben den produzierten auch die 2,85 Mio. importierten Fahrzeugen zu berücksichtigen (vgl. European Automobile Manufacturers Association 2017a). Die wichtigsten Seehäfen für den Import und Export von Fahrzeugen in Europa sind Zeebrügge/Gent, Bremen, Rotterdam und Antwerpen (vgl. Quaresma Dias et al., 2010, S. 120). Im Jahr 2016 ist Deutschland mit 5,71 Mio. produzierten Fahrzeugen und 3,35 Mio. Neuzulassungen sowohl wichtigster Produktionsstandort, als auch Absatzmarkt in Europa (vgl. Statista 2017b und 2017c).

Das Ziel des Distributionsprozesses in der Automobilindustrie ist die zeitgerechte Übergabe der Fertigfahrzeuge an den Endkunden in optimaler Transportqualität. Dies soll stets unter Berücksichtigung von Kosten- und Nachhaltigkeitsaspekten gewährleistet werden (vgl. Klug 2010, S. 429). In der automobilen Distributionslogistik werden die Fahrzeuge meist mittels RoRo-Verfahren transportiert. Die Ladeeinheiten werden im Zuge des Umschlagsprozesses mittels eigenen Antrieben auf das Transportmittel gefahren (Roll-on). Nach dem durchgeführten Transport können die Ladeeinheiten anschließend mit eigenem Antrieb das Transportmittel verlassen (Roll-off) (vgl. ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 262). Nur eine sehr geringe Anzahl Fahrzeuge werden in Containern mit dem LoLo-Verfahren transportiert (vgl. Cross 2012).

In der Fahrzeugdistribution innerhalb Europas werden Transporte ausgehend von Produktionsstätten und Seehäfen (Importfahrzeuge) hin zu Distributionszentren, Seehäfen (Exportfahrzeuge) und Kunden (Händler, Mietwagengesellschaften oder Privatpersonen) durchgeführt (siehe Abbildung 5). Die Transportketten können ein- oder mehrgliedrig gestaltet sein. Im Nahverkehr eines Produktionswerkes wird der Transport eingliedrig, d. h. auf direktem Weg ohne Umschlag, durchgeführt. Der Ferntransport auf dem europäischen Festland erfolgt meist mehrgliedrig, d. h., zwischen dem Produktionsstandort und dem Handel existiert zumindest ein Umschlagspunkt (vgl. Grieneisen und Hermes 2013, S. 355).

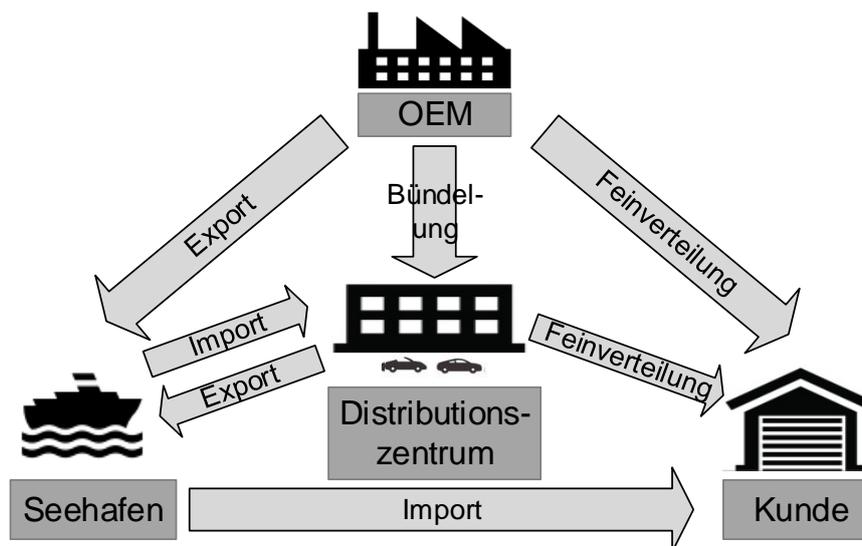


Abbildung 5: Schematische Darstellung der kontinentalen Warenströme in Europa

Mehrgliedrige Transportketten lassen sich in Vor-, Haupt- und Nachlauf unterteilen, wobei in allen drei Phasen auch ein Wechsel des Verkehrsträgers stattfinden kann. Im Vorlauf werden Güter von mehreren Quellen gebündelt und zu einem Sammelpunkt transportiert. Im Hauptlauf werden die Güter vom Sammelpunkt zu einem Verteilpunkt transportiert. Die abschließende Feinverteilung zu den Senken erfolgt schließlich im Nachlauf (vgl. Schuh und Stich 2013, S. 139).

Bei jedem Lagerungsprozess, unabhängig davon, ob dieser im Werklager, in einem Distributionszentrum oder beim Händler stattfindet, erfolgen eine Ein- und Ausgangserfassung des Fahrzeugs und eine Übernahmeprüfung. In den Distributionszentren finden Tätigkeiten wie Zwischenlagerung, Aufbereitung, Bündelung bzw. Verteilung der Fahrzeuge statt (vgl. Klug 2010, S. 429).

Die Verkehrsträgerwahl im Rahmen der taktischen³ Distributionsplanung ist abhängig von der vorhandenen Infrastruktur, der Transportkette, den Kundenanforderungen sowie von Vorgaben aus der strategischen Distributionsplanung (vgl. Schuh und Stich 2013, S. 138). Der Transport mittels Flugzeug ist aufgrund der hohen Kosten sehr selten und wird daher in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet. Für interkontinentale Transportketten werden Seeschiffe eingesetzt, die über eine Ladekapazität von bis zu 8.000 Fahrzeugen verfügen. Für den kontinentalen Fertigfahrzeugtransport, welcher im Fokus der vorliegenden Arbeit ist, werden vorrangig Bahn und LKW und zu einem geringen Anteil das Binnenschiff eingesetzt (vgl. Klug 2010, S. 430–439).

Bei dem Einsatz von Bahn oder Binnenschiff sind eingliedrige Transportketten nur dann möglich, wenn sowohl Quelle als auch Senke einen direkten Zugang zum

³ Die *taktische Planungsebene* ist durch einen mittelfristigen Zeithorizont geprägt. In dieser Planungsebene wird auch die Verkehrsträgerwahl vollzogen.

Schienen- bzw. Wasserstraßennetzwerk haben, andernfalls werden zusätzliche LKW-Transporte im Vor- bzw. Nachlauf benötigt. Eine eingliedrige Transportkette auf der Wasserstraße ist beispielsweise die Transportrelation vom *Ford*-Produktionswerk in Köln zum Seehafen Antwerpen (vgl. Voerckel 2011, S. 8).

Für die abschließende Feinverteilung an die Autohäuser besteht meist keine Verkehrsträgerwahl, da diese vorwiegend nur über eine Anbindung zum Straßennetzwerk verfügen. Darüber hinaus sind am österreichischen Markt 75% der Händler sogenannte Einzelautoempfänger (Dorian Deisenhammer, persönliche Korrespondenz, Lagermax Autotransport GmbH, Wien, 15.10.2014). In der nachfolgenden Abbildung 6 sind Gestaltungsvarianten für ein- und mehrgliedrige Transportketten unter Einsatz von LKW, Bahn und Binnenschiff abgebildet.

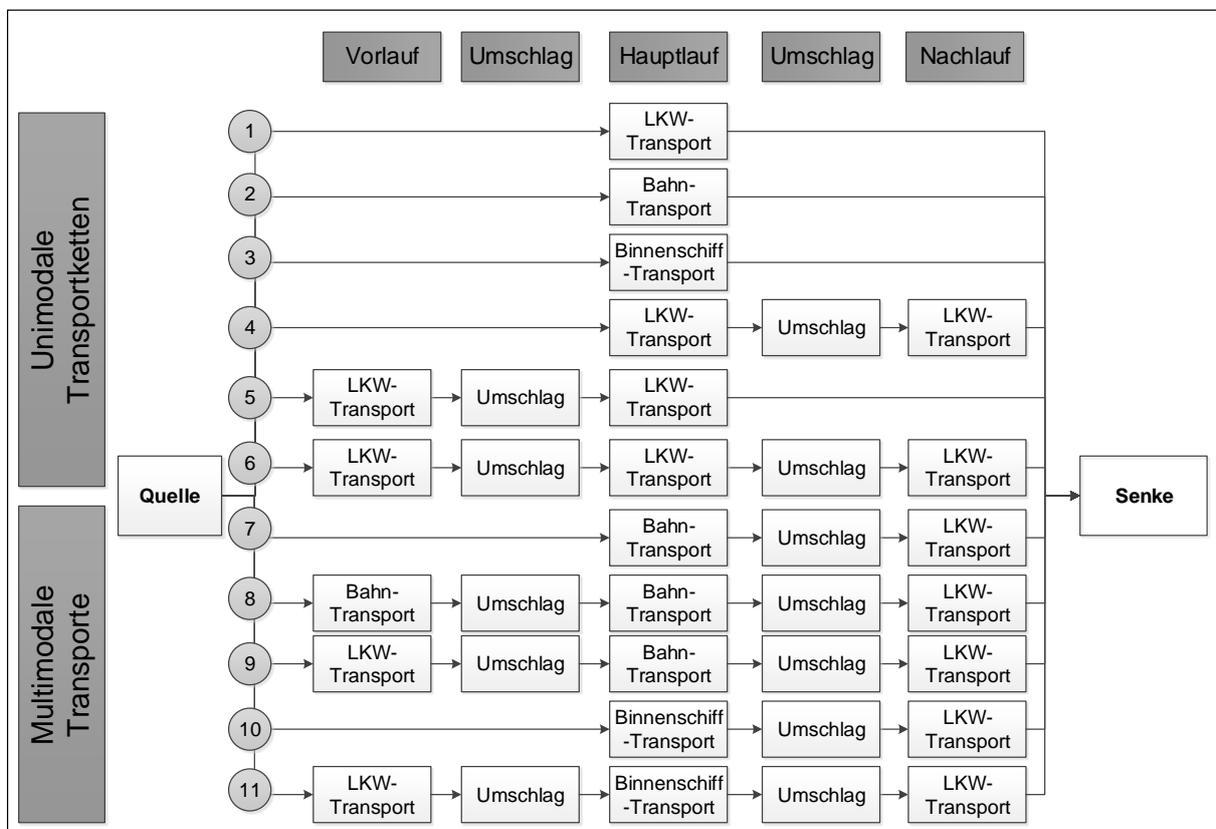


Abbildung 6: Transportketten-Distributionslogistik (eigene Darstellung in Anlehnung an Schwede 2014, S. 31)

In der nachfolgenden Abbildung 7 sind die europäischen Produktionsstandorte und das Wasserstraßennetzwerk eingezeichnet. Man kann erkennen, dass zahlreiche Produktionsstätten in unmittelbarer Nähe zur Wasserstraße liegen.



Abbildung 7: Produktionsstandorte in Europa (eigene Darstellung in Anlehnung an United Nations Economic Commission for Europe 2012b, kartographische Umsetzung Mairhofer)

2.3.3 RoRo-LKW

Für die Fahrzeugdistribution ab den Produktionswerken werden hauptsächlich die Transportmittel LKW und Bahn eingesetzt. LKWs sind aufgrund ihrer Flexibilität meist konkurrenzlos im Vorlauf bei multimodalen Transporten sowie im Nachlauf bei der Feinverteilung der Fahrzeuge an verschiedene Händler (vgl. Schwede 2014, S. 26).

Beim Fertigfahrzeugtransport auf der Straße werden doppelstöckige RoRo-LKW eingesetzt (siehe Abbildung 8), welche in Europa größtenteils von *Kässbohrer* (AT), *Rolfo* (IT) und *Lohr* (FR) gebaut werden. Die RoRo-LKWs setzen sich aus einer LKW-Zugmaschine (z. B. *Scania P380*, *Mercedes Actros 1836*), Motorwagen-Aufbau sowie Anhänger zusammen (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 15.04.2015).

Durch die variable Einstellung der Ladeebenen können Fahrzeuge unterschiedlichster Abmessungen vom Kleinwagen bis hin zum Traktor transportiert werden (vgl. Ihme 2006, S. 147). Neben der geforderten Flexibilität, Fahrzeuge mit unterschiedlichsten Abmessungen transportieren zu können, müssen auch OEM-spezifische Vorgaben,

wie Mindestabstände zwischen den Fahrzeugen bei der Ladungssicherung, berücksichtigt werden. Aus diesem Grund hat die *European Finished Vehicle Logistics Association* (ECG) gemeinsam mit zahlreichen OEMs ein operatives Qualitätshandbuch für einen einheitlichen Standard ausgearbeitet. Allerdings behalten sich die Hersteller weiterhin das Recht vor, differenzierte Forderungen stellen zu können (vgl. ECG 2013, S. 5). Neben den Vorgaben der Hersteller müssen die RoRo-LKWs auch den gesetzlichen Vorgaben der jeweiligen Transitländer, wie max. Fahrzeughöhe und -länge, entsprechen (vgl. Klug 2010, S. 435).

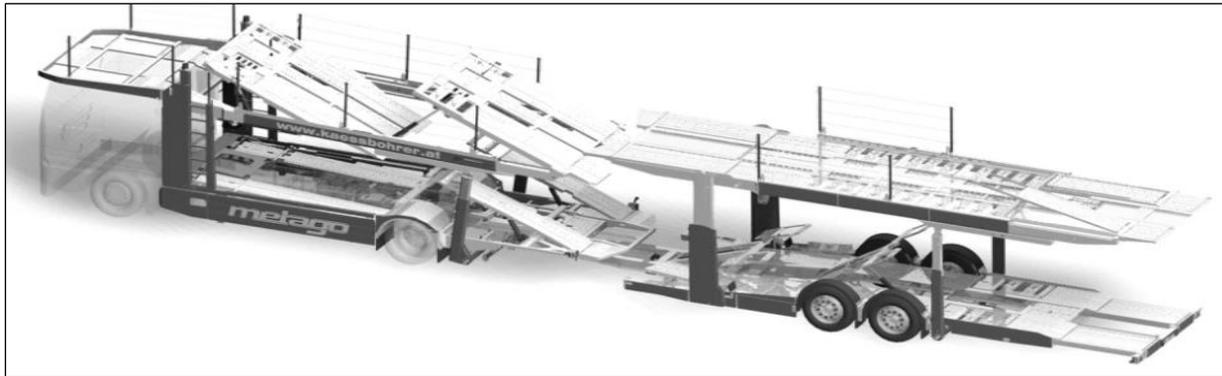


Abbildung 8: *Kässbohrer metago pro* (Kässbohrer Transport Technik 2015)

2.3.4 RoRo-Bahn

In der automobilen Distributionslogistik auf der Schiene kommen vorrangig Ganzzugverkehre zum Einsatz. Diese werden auf Relationen mit einem hohen Volumen eingesetzt, wie beispielsweise im Export vom Produktionsstandort zum Seehafen (vgl. Schwede 2014, S. 26). Im Vorfeld der Zugbeladung ist ein Ladeplan zu erstellen und die Höhe der zu verladenden Fahrzeuge zu prüfen. Die Züge werden für die Be- und Entladung an eine Laderampe herangefahren, damit die Fahrzeuge vorwärts auf die erste und gegebenenfalls auf die zweite Ladeebene auf- bzw. abfahren können. Um Schäden zu vermeiden sollte dies nach dem Qualitätshandbuch der ECG (vgl. 2013, S. 15–18) stets in Schrittgeschwindigkeit erfolgen.

Die größten Dienstleister der europäischen Distributionslogistik auf der Schiene sind *BLG AUTORAIL* mit 1.500 und *DB Schenker Rail AG* mit etwa 4.400 Bahnwaggonen (vgl. BLG AUTORAIL 2017; DB Cargo Logistics 2016). Als offene Variante kommen bei beiden Dienstleistern Waggonen vom Typ *Laaers* des Herstellers *Greenbrier* (siehe Abbildung 9) zum Einsatz (vgl. BLG AUTORAIL 2015a, DB Schenker 2015).

Die aus zwei Wagen bestehende Einheit hat eine Länge von 31 m und verfügt über verstellbare Ladeebenen. Dadurch wird sowohl der ein- als auch der zweistöckige Transport von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Höhen gewährleistet (vgl. The Greenbrier Companies 2015).

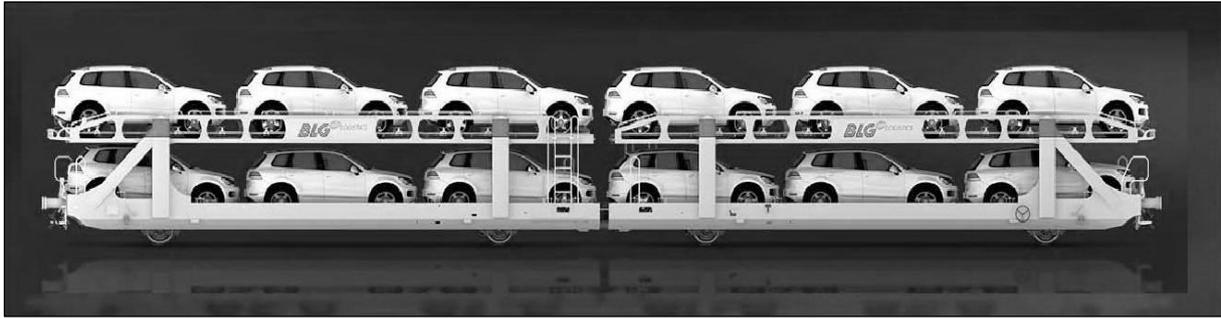


Abbildung 9: Bahnwagon *Laaers 810* (BLG AUTORAIL 2015b)

Beim geschlossenen Fahrzeugtransport kommen bei *DB Schenker Rail* Waggons vom Typ *HCCRRSS* zum Einsatz, welche ebenso von *Greenbrier* hergestellt werden (vgl. *DB Schenker* 2015). Die ebenfalls aus zwei Wagen bestehende Einheit hat eine Gesamtlänge von 54 m und eine Wagenhöhe von 4,66 m. Das Dach und die Ladeebenen können mittels eines elektrischen Antriebes angehoben bzw. abgesenkt werden. Die Wagenhöhe des *HCCRRSS* überschreitet die max. zulässige Höhe des definierten Lichtraumprofils *G2*, wodurch dieser nur in bestimmten Ländern eingesetzt werden darf (vgl. *The Greenbrier Companies* 2015).

Der Vorteil von geschlossenen Bahnwaggons liegt in der Prävention von Diebstahl und Vandalismus. Des Weiteren wird dadurch Flugrost, sogenannte Ablagerungen auf dem Lack von Fahrzeugen, welche durch Oberleitungs- und Bremsenabrieb entstehen, verhindert (vgl. *Klug* 2010, S. 436).

2.3.5 RoRo-Binnenschiff

Im Jahr 1982 wurden erstmals in Europa Fahrzeuge auf einem Binnenschiff transportiert. Das dafür benötigte Konzept entwickelten *E. H. Harms Automobile-Logistics Bremen* (später von *BLG Logistics Group* übernommen), der niederländische Reeder *Interrijn* und die *Ford Werke* in Köln. Zu diesem Zweck wurde das Containerschiff *TERRA*, welches noch im Einsatz ist (Stand 2017), zu einem RoRo-Schiff umgebaut. Mittlerweile werden für Ford mit der *INGONA*, *BARCO*, *KIRUNA*, *TITAN* und *FORENSO* fünf Binnenschiffe eingesetzt, die jeweils rund 500 Fahrzeuge transportieren können (vgl. *Bernards* 2013, S. 32–33).

Die *BLG Logistics Group* betreibt insgesamt sieben Binnenschiffe und vier Leichter mit einer Gesamtkapazität von 4.500 Fahrzeugen (vgl. *BLG AUTOMOBILE LOGISTICS* 2012). Beim Schubverband werden ein bis mehrere Leichter, welche über keinen eigenen Antrieb verfügen, von einem Schubboot geschoben (vgl. *Patt und Gonsowski* 2011, S. 365). Auf der Donau zwischen Budapest und Süddeutschland werden mit der *MS Heilbronn* und der *MS Kelheim* zwei Binnenschiffe der Wasserstraßenklasse V eingesetzt (siehe Abbildung 10). Auf drei Ebenen können 230 PKW der Kategorie Kleinwagen transportiert werden (*Susanne Feldmann*, E-Mail-Korrespondenz, *BLG*

CarShipping GmbH & Co. KG, 09.01.2014). Für die komplette Be- bzw. Entladung solcher Binnenschiffe werden beim Einsatz von acht Fahrern ungefähr 5 Stunden benötigt (Helmut Schütz, persönliche Korrespondenz, Wiener Hafen GmbH & Co KG, 09.01.2014).



Abbildung 10: Binnenschiff *MS Heilbronn* (BLG LOGISTICS GROUP 2015)

Neben der *BLG LOGISTICS GROUP* ist auch die *Horst Mosolf GmbH & Co. KG* auf dem Rhein mit zwei Binnenschiffen aktiv (vgl. Mosolf 2015). Weitere Logistikdienstleister wie *Hödlmayr* hatten in der Vergangenheit RoRo-Schiffe auf der Donau im Einsatz, aktuell werden jedoch keine Transporte durchgeführt (Johannes Hödlmayr, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 13.01.2015). Die Kapazität von Binnenschiffen ist von den Abmessungen, welche durch die Wasserstraßenklasse vorgegeben werden, sowie von der Anzahl der verfügbaren Schiffsdecks abhängig. Während Binnenschiffe auf dem Rhein mit bis zu sechs Decks fahren können, sind auf der Donau aufgrund der niedrigen Brücken nur drei Decks möglich (vgl. Spitzer 2008, S. 82–83).

Das im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts entwickelte Binnenschiff mit dem Namen *NEWS (Next European Waterway Ship)* kann mithilfe eines integrierten Ballasttanks den Tiefgang erhöhen, wodurch auch auf der Donau ein Transport mit vier Decks realisiert werden kann. Dadurch können beispielsweise in der Fahrzeugkategorie *Kleinwagen* (z. B. *Audi A1, Type 8X*) 352 Fahrzeuge transportiert werden. Im Vergleich zur *MS Kelheim* entspricht das einer Steigerung der Ladekapazität um 53 % (vgl. Anzböck 2015b, S. 36–38).

2.3.6 Containerisierter Fahrzeugtransport

Transportmittel, die speziell für den RoRo-Transport konzipiert worden sind, eignen sich nicht für den Transport von anderen Gütern. Diese Tatsache erschwert die Durchführung von paarigen Verkehren und resultiert in einem erhöhten Leerfahrtenanteil (vgl. Klug 2010, S. 437). Transportiert man Fahrzeuge in Containern können die dafür konzipierten standardisierten Transportmittel (z. B. zweiachsiger Containertragwagen) eingesetzt werden.

Da mit Containerbehältnissen auch andere Güter transportiert werden können, wird die Generierung von paarigen Transporten vereinfacht. Für einen raschen Umschlag beim Transport von Containern kommen technische Einrichtungen (z. B. Containerbrücken⁴) und Flurförderfahrzeuge (z. B. Reach-Stacker) zum Einsatz (vgl. Pfohl 2010, S. 160–161).

Die Innenmaße von *ISO*-Containern sind mit 2,4–2,7 m (je nach Bauart) deutlich höher als die Außenabmessungen von Personenkraftfahrzeugen, dadurch kommt es zu einem geringeren Höhennutzungsgrad. Um den Ladefaktor für den containerisierten Fahrzeugtransport zu steigern, haben unterschiedliche Hersteller innovative Vorrichtungen bzw. Spezialbehältnisse entwickelt. In weiterer Folge werden der Containerrahmen *VUCAFRAME* von *UNIT45*, das Schienensystem *R-RAK für* von *Trans-Rak International*, die Plattform *Car Rack 3.7* von *Cronos* und das *Car Rack* von *DHL* vorgestellt.

- ***VUCAFRAME* von *UNIT 45***

Der Containerrahmen *VUCAFRAME* von dem niederländischen Unternehmen *UNIT45* wurde speziell für den Transport von Fahrzeugen entwickelt (siehe Abbildung 11). Der Rahmen hat dieselbe Länge und Breite wie ein Standard *ISO*-Container, ist jedoch mit einer Höhe von 1,54 m deutlich niedriger. Dadurch wird einerseits der Ladefaktor signifikant erhöht und andererseits ermöglicht dies den Rückgriff auf Standard-Equipment für den Transport und Umschlag von Containern (vgl. *UNIT45* 2015).



Abbildung 11: *VUCAFRAME* Containerrahmen (vgl. *UNIT45* 2015)

Die Transportkapazität kann folglich auf einem Binnenschiff der Wasserstraßenklasse V von 72 40-Fuß-Containern auf 120 *VUCAFRAME* Containerrahmen gesteigert werden. Ein zweilagiger Transport der Containerrahmen auf der Straße ist unter der Einhaltung der Höhengrenze von 4 m prinzipiell möglich. Dies kann jedoch nur durch den Einsatz von besonders niedrigen Container-Chassis gewährleistet werden. Die offene Bauweise ermöglicht eine rasche Be- und Entladung der Fahrzeuge in die

⁴ Eine Containerbrücke ist eine schienengebundene Transportanlage, mit der *ISO*-Container zwischen LKW, Bahn, See- und Binnenschiffen umgeschlagen werden können. Pro Stunde können auf diese Weise bis zu 40 Umschlagvorgänge durchgeführt werden (vgl. Kaffka 2014, S. 17).

Containerrahmen. Nach erfolgter Beladung der Containerrahmen werden diese übereinandergestapelt und verbunden. Dadurch können jeweils zwei *VUCAFRAME* Containerrahmen mit einem Hub bewegt werden. Die Anschaffungskosten eines *VUCAFRAME* Containerrahmens betragen ungefähr 5.000 Dollar (Koen Smith, persönliche-Korrespondenz, UNIT45, Intermodal Europe Hamburg, 07.10.2013).

- **R-RAK von Trans-Rak**

Die Firma *Trans-Rak International* hat ein spezielles Schienensystem entwickelt, welches in Standard *ISO*-Containern eingebaut werden kann (siehe Abbildung 12). Durch eine Hebeteknik werden die Fahrzeuge in einer schrägen Lage hochgezogen und fixiert (vgl. *Trans-Rak International* 2015). Der Ladefaktor wird dadurch in einem 40-Fuß-Container von zwei Fahrzeugen der *Kompaktklasse* (z. B. *VW Golf*) auf vier erhöht.

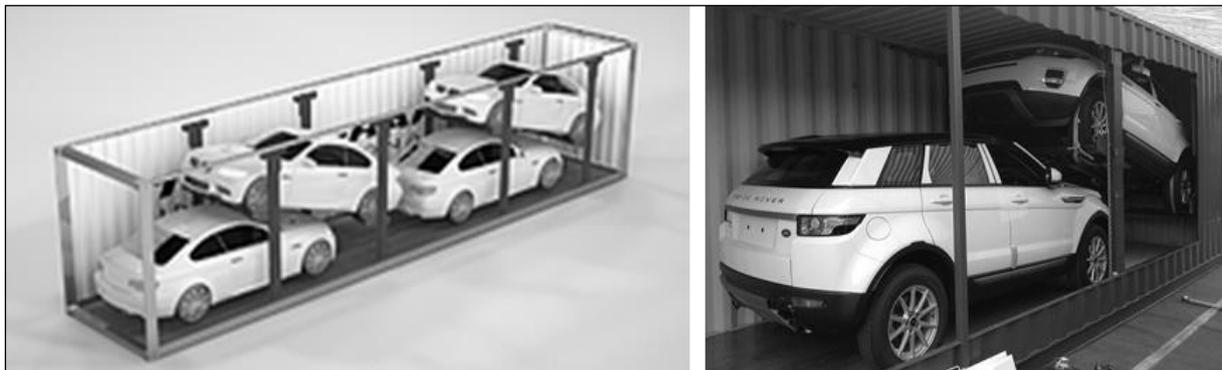


Abbildung 12: Spezialequipment R-RAK (vgl. *Trans-Rak International* 2015)

Zwei Mitarbeiter benötigen für die Anbringung des Schienensystems inkl. der Beladung von vier Fahrzeugen ungefähr 75 Minuten. Die Entladung inkl. der Demontage des Systems dauert etwa 50 Minuten und fällt somit etwas kürzer aus (Paul Donaldson, E-Mail-Korrespondenz, *Trans-Rak International*, 20.02.2015). Für den Transport von vier Fahrzeugen werden zwei Sets des *R-RAK*-Systems benötigt, wovon jedes 270 kg wiegt. In einem 40-Fuß-High-Cube-Container können bis zu 60 demontierte *R-RAK*-Systeme verstaut werden (Paul Donaldson, E-Mail-Korrespondenz, *Trans-Rak International*, 23.02.2015). Dadurch wird das *R-RAK*-Equipment bei unpaarigen Warenströmen kostengünstiger als nicht-zerlegbare Spezialbehältnisse (z. B. *VUCAFRAME*) zum nächsten Einsatzort transportiert.

- **Car Rack von Cronos**

Die *Cronos Group Limited*, 2015 übernommen von *Bohai Leasing Company*, hat den *Cronos Car Rack 3.7* entwickelt. Es handelt sich dabei um eine 2,85 t schwere Plattform aus Stahl, welche speziell für den Transport von Fahrzeugen entwickelt worden ist (siehe Abbildung 13). Mit den Abmessungen von 11,98 m x 2,23 m x 0,483 m eignet sich der Car Rack für den Transport in 40-Fuß-High-Cube-Containern. Auf

der Plattform sind drei mechanisch verstellbare Rampen angebracht, wodurch bis zu drei Fahrzeuge der Kategorie *Mittelklasse* in einem Container transportiert werden können. Mithilfe der angebrachten Rollen kann der *Cronos Car Rack* in bzw. aus dem Container geschoben bzw. gezogen werden. Nach erfolgter Auslieferung der Fahrzeuge können bis zu sieben zusammengeklappte *Cronos Car Racks* mit einem 40-Fuß-High-Cube-Container abtransportiert werden (vgl. Cronos Group Limited 2014).



Abbildung 13: Spezialequipment *Cronos Car Rack 3.7* (Cronos Group Limited 2014)

- ***DHL Car Rack***

Der Logistikdienstleister *DHL* hat mit dem *DHL Car Rack* eine eigene Logistikhölung entwickelt. Zielsetzung ist, analog zu den anderen Systemen, die Effizienz der Transportraumnutzung zu erhöhen und gleichzeitig eine Verringerung der Treibhausgasemissionen zu erzielen. Des Weiteren soll der Umschlag zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern erleichtert und ein besserer Transportschutz erzielt werden (vgl. Lochmahr 2016, S. 70). Bei diesem System wurde die Höhe hinsichtlich der Laderaumhöhe von Frachtflugzeugen optimiert. Dadurch ist es möglich, zwei Fahrzeuge so übereinander anzuordnen, dass diese gemeinsam im Maindeck einer *Boeing 747* verstaut werden können. Die max. Auslastung des Systems wird bei Fahrzeugen mit einer Länge von über 5 m erreicht. Im Falle eines leeren Rücktransports kann das System auf eine Höhe von 28 cm zusammengeklappt werden (vgl. Deutsche Post DHL Group 2016a). Da die Vorteile des *DHL Car Rack* vorrangig auf den Transport mittels Flugzeug abzielen, wird in dieser Arbeit auf dieses System nicht weiter eingegangen.

2.4 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch die Quantifizierung von Kenngrößen einen Beitrag für die optimale Verkehrsmittelwahl sowohl für Verloader als auch für Spediteure zu leisten. Da die zu entwickelnde Methode nur unter bestimmten Rahmenbedingungen Gültigkeit besitzt, bedarf es an dieser Stelle der näheren Eingrenzung (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

In den nachfolgenden Unterkapiteln sind die eingegrenzten Bereiche, für die die zu entwickelnde Methode Gültigkeiten besitzen soll, jeweils grün markiert.

2.4.1 Eingrenzung der zu quantifizierenden Kenngrößen

Die übergeordneten Ziele im Logistikmanagement lassen sich allgemein in ökonomische und ökologische Ziele unterteilen, welche teilweise signifikanten Einfluss auf die Unternehmensziele haben (vgl. Schuh und Stich 2013, S. 16–17). Die Teilbereiche haben je nach Zielsetzung des Unternehmens eine unterschiedliche Bedeutung bei der Gestaltung des Distributionsnetzwerks. Des Weiteren existieren auch soziale Ziele der Logistik, wie Gesundheits- und Arbeitsschutz (vgl. Steven 2007, S. 287). Auf diese wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher eingegangen.

In dieser Arbeit wird bei den ökonomischen Zielen der Fokus auf die Quantifizierung der Transportkosten gelegt, da diese in zahlreichen Arbeiten als das wichtigste Entscheidungskriterium angeführt werden (siehe Kapitel 3.1). Des Weiteren wird die Lieferzeit betrachtet, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten hat.

Bei den ökologischen Zielen richtet sich die Konzentration auf die Ermittlung der durch Transportdienstleistungen verursachten Schadstoffemissionen. In diesem Zusammenhang wird, wie in der *Norm DIN EN 16258* gefordert, auch der Energieverbrauch in einer vergleichbaren Energieeinheit ausgewiesen (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 18).

In der nachfolgenden Abbildung 15 sind die in dieser Arbeit näher untersuchten Kenngrößen grün markiert.

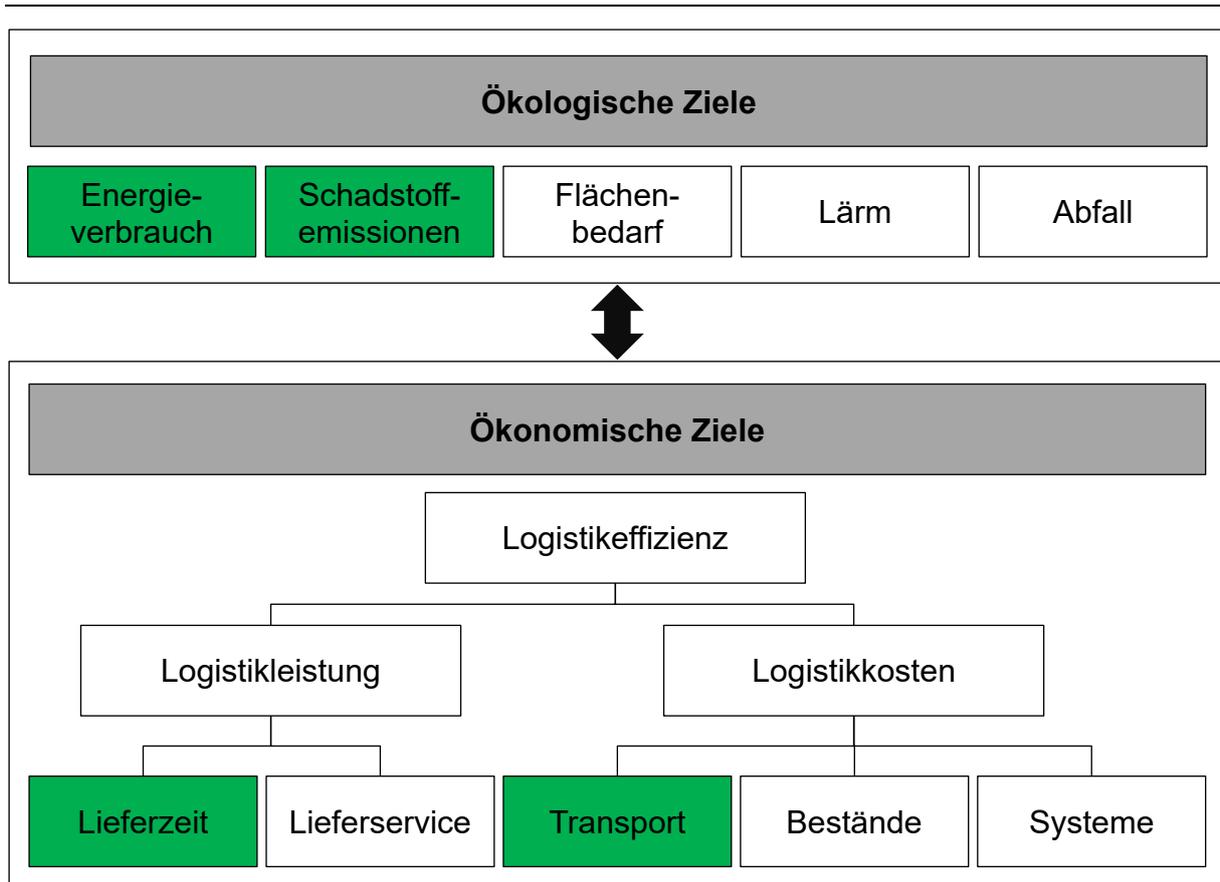


Abbildung 15: Ökonomische und ökologische Kenngrößen der Logistik (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh und Stich 2013, S. 20; Arnold, D. et al. 2008, S. 8–9)

2.4.2 Eingrenzung der Transportgüter und -mittel

Die Bestimmung der Ladekapazität der unterschiedlichen Transportmittel erfordert die Eingrenzung der zu transportierenden Güter. In der vorliegenden Arbeit werden als Transportgüter nur Automobile näher betrachtet, die der folgenden Definition entsprechen: „Motorgetriebenes Fahrzeug mit dem hauptsächlichen Zweck der Beförderung von Personen, mit über drei Rädern und bis zu acht Sitzen“ (Mauerer 2005, S. 11). Nutzfahrzeuge, die der gewerblichen Nutzung dienen, sind in der genannten Definition nicht enthalten und werden nicht näher betrachtet.

Hinsichtlich der Transportmittel, die für kontinentaleuropäische Transporte zur Auswahl stehen, erfolgt eine Eingrenzung auf LKW, Bahn und Binnenschiff. Der Transport von Neufahrzeugen mittels Flugzeug wird nicht analysiert, da dieser aufgrund der hohen Kosten nur in Sonderfällen durchgeführt wird. Inwiefern die jeweiligen Transportmittel im Rahmen eines synchronmodalen⁵ Transportsystems aufeinander abgestimmt werden können, ist ebenfalls nicht Teil dieser Untersuchung.

⁵ Transportsysteme, in denen dynamische Wechsel zwischen unterschiedlichen Transportmitteln vollzogen werden, werden als *synchronmodal* bezeichnet (vgl. Boschian und Paganelli 2016, S. 23).

2.4.3 Geographische Eingrenzung

In die Berechnung der festgelegten Kenngrößen der Transportkosten und Schadstoffemissionen fließen u. a. auch relationsspezifische Faktoren ein (z. B. Topologie, Netzverfügbarkeit, Lohnkosten u. v. m.). Aus diesem Grund wird auch eine geographische Eingrenzung des Untersuchungsgebiets vorgenommen, die in nachfolgender Abbildung 16 grün markiert ist.



Abbildung 16: Geographische Eingrenzung des Untersuchungsraums

In der vorliegenden Arbeit werden jene Mitgliedstaaten der EU im Detail betrachtet, in denen aufgrund der vorhandenen Infrastruktur eine Verkehrsträgerwahl zwischen Straße, Schiene und Wasserstraße möglich ist. Der limitierende Faktor stellt in diesem Fall der Zugang zum zusammenhängenden europäischen Wasserstraßennetzwerk dar, welcher für 13 Mitgliedstaaten gegeben ist. Aufgrund der Gegebenheiten, dass die Donau durch Serbien verläuft und der Rhein in der Schweiz entspringt, werden zusätzlich diese beiden Nicht-EU-Staaten in die Betrachtung einbezogen. Aus diesen Einschränkungen resultieren folgende 15 Länder, die das geographische Untersuchungsgebiet definieren: Belgien, Bulgarien, Deutschland, Frankreich, Kroatien, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Polen, Rumänien, Schweiz, Serbien, Slowakei, Tschechien, Ungarn. Im Untersuchungsgebiet werden Transportketten zwischen Produktionsstätten, Seehäfen, Distributionszentren und sonstigen Logistikknoten analysiert. Da für die Feinverteilung der Fahrzeuge, beispielsweise zu Autohäusern, keine Verkehrsträgerwahl besteht, wird diese nicht näher untersucht. Selbiges gilt auch für interkontinentale Transporte mittels Hochseeschiffen.

2.4.4 Prozessuale Eingrenzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Fahrzeugdistribution untersucht, welche einen Teilbereich des Auftragsabwicklungsprozesses in der Automobilindustrie darstellt. Ausgangspunkt der Analyse ist die erfolgte Freigabe der Qualitätssicherung in der Fahrzeugfertigung und die daraus resultierende Übergabe des Fahrzeugs an die Distributionslogistik. Der Übergabepunkt ist der letzte Zählpunkt mit der Nummer 8 und wird als *ZP8* bezeichnet. Zur bestmöglichen Planung des Distributionsprozesses ist eine Abstimmung mit dem Fertigungsprozess notwendig. Zu diesem Zweck übermitteln die Automobilhersteller Vorschauzahlen der zu erwartenden *ZP8*-Fahrzeuge an die Logistikdienstleister (vgl. Klug 2010, S. 431). Den Endpunkt der Untersuchung stellt die Übergabe des Fahrzeuges am Bestimmungsort dar.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen die Beladung, der Transport und die Entladung des Fahrzeuges. Tätigkeiten wie die Transportvorbereitung, Transportnachbereitung und Qualitätskontrollen sind nicht Teil der Betrachtung. In der nachfolgenden Abbildung 17 ist die prozessuale Eingrenzung im Auftragsabwicklungsprozess grün eingefärbt.

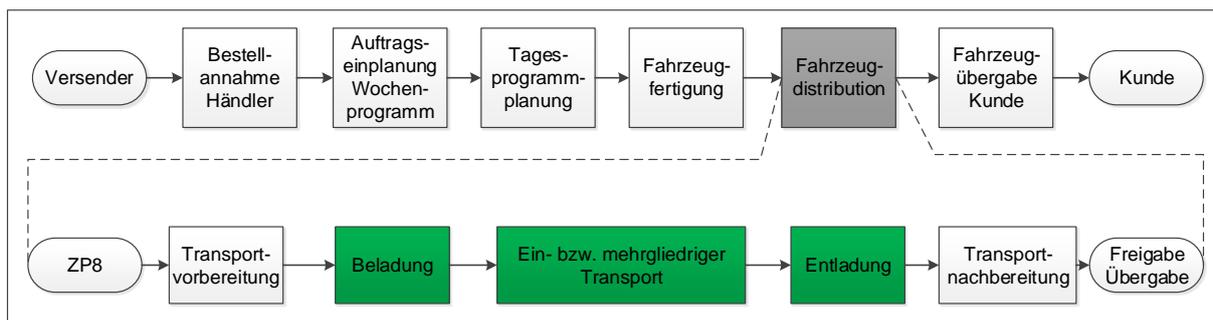


Abbildung 17: Prozessuale Abgrenzung des Untersuchungsbereichs (eigene Darstellung in Anlehnung an Grieneisen und Hermes 2013, S. 354–355)

2.4.5 Eingrenzung Planungshorizont

Die für die Realisierung von Transporten erforderliche Planung erfolgt in einem hierarchischen Ansatz in unterschiedlichen Ebenen. In Abhängigkeit des Zeithorizonts werden drei unterschiedliche Planungsebenen unterschieden (siehe Abbildung 18). Auf der *strategischen Planungsebene* werden die Strategien der einzelnen Geschäftsfelder und die Planung hinsichtlich der Rahmenbestimmung für die Organisations-, Personal-, Ressourcen- und Betriebsmittel festgelegt (vgl. Steinle 2005, S. 292). Die *taktische Planungsebene* ist durch einen mittelfristigen Zeithorizont geprägt. Da die Verkehrsträgerwahl in dieser Ebene vollzogen wird, ist diese für die vorliegende Arbeit von vorrangiger Bedeutung. Entscheidungen über die kurzfristige Gestaltung von Abläufen prägen die abschließende *operative Planungsebene* (vgl. Arnold, D. et al. 2008, S. 425–426).

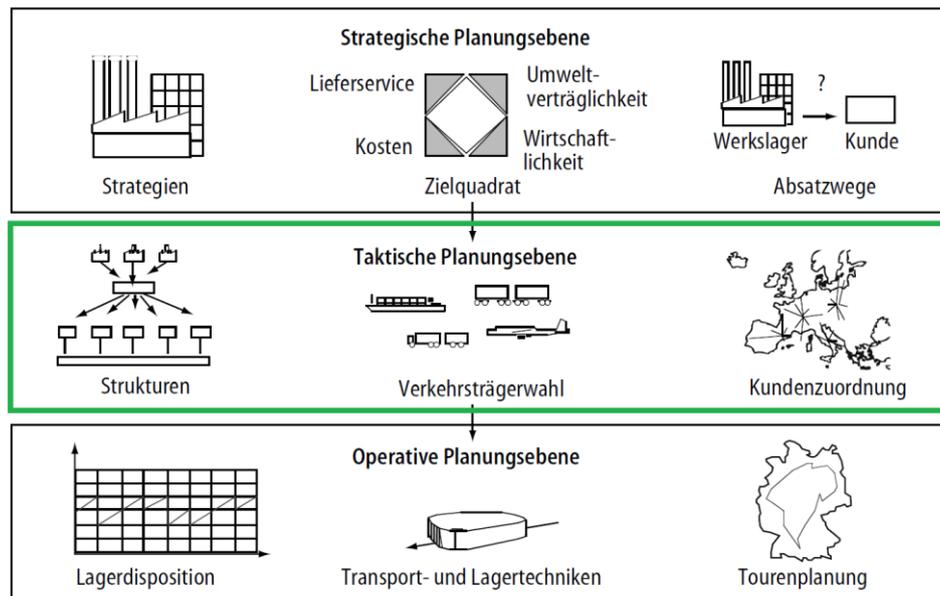


Abbildung 18: Eingrenzung der Planungsebenen in der Distributionslogistik (eigene Darstellung in Anlehnung an Arnold, D. et al. 2008, S. 426)

2.5 Zusammenfassung des Kapitels

In Kapitel 2.1–2.3 wurden die Grundlagen der Transportlogistik, der Verkehrsträgerwahl und der automobilen Distributionslogistik ausgearbeitet. Auf Basis des theoretischen Bezugsrahmens erfolgte in Kapitel 2.4 die Eingrenzung des Untersuchungsraums. Diese kann wie folgt zusammengefasst werden:

- **Ökologische Kenngrößen:** Analog zur Forderung der *Norm DIN EN 16258* werden die Schadstoffemissionen und der Energieverbrauch ausgewiesen.
- **Ökonomische Kenngrößen:** Hinsichtlich der ökonomischen Ziele wird der Fokus auf die Quantifizierung der Transportzeiten und -kosten gelegt.
- **Verkehrsträgerwahl:** Hinsichtlich der Transportmittel, die für kontinentaleuropäische Transporte zur Auswahl stehen, wird eine Eingrenzung auf LKW, Bahn und Binnenschiff vorgenommen.
- **Transportgüter:** Das zu untersuchende Transportgut ist definiert als „Motorgetriebenes Fahrzeug mit dem hauptsächlichen Zweck der Beförderung von Personen, mit über drei Rädern und bis zu acht Sitzen“.
- **Prozess:** Die zu entwickelnde Berechnungsmethodik soll einen Teilbereich der Auftragsabwicklung – von der Fahrzeugübernahme bis hin zur Übergabe an den Empfänger – abdecken.
- **Planungsebene:** Aufgrund der Tatsache, dass die Verkehrsträgerwahl in der *taktischen Planungsebene* erfolgt, ist diese Ebene für die zu behandelnden Fragestellungen von vorrangiger Bedeutung.
- **Geographische Eingrenzung:** Die Eingrenzung erfolgt hinsichtlich 15 europäischer Länder, welche Zugang zum Wasserstraßennetzwerk haben.

3 Stand der Forschung

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die Analyse des Forschungsstandes bezüglich der Quantifizierung von Kosten und Umweltemissionen für Transportketten in der automobilen Distributionslogistik. Zudem werden bestehende relevante elektronische Bewertungstools hinsichtlich der Erfüllung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit untersucht.

3.1 Zieldimensionen und Entscheidungskriterien

Die Tatsache, dass Verlader zumeist zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern wählen können, ist der Grund, warum Modelle und Ansätze für die Verkehrsträgerwahl existieren. Bei der Wahl zwischen LKW, Bahn, Binnenschiff, Seeschiff, Flugzeug und Pipeline handelt es sich um sogenannte diskrete Alternativen (vgl. Jong 2014, S. 122). Logistikdienstleister bieten ihren Kunden in der Regel unterschiedliche Alternativen an und geben in diesem Zusammenhang meist eine Transportmittelempfehlung ab. Die Entscheidung der Verkehrsmittelwahl liegt jedoch in letzter Konsequenz beim Kunden und wird von diesem auf Basis von quantitativen und qualitativen Analysen getroffen (vgl. Iskan 2009, S. 69).

Diese Entscheidung ist einerseits von der Priorisierung der Zieldimensionen und andererseits von der spezifischen Route und deren Gegebenheiten abhängig. Im Fall der kontinentaleuropäischen Fertigfahrzeugdistribution kommen mit LKW, Bahn und Binnenschiff drei Transportmittel zum Einsatz, die unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich Kosten, Zeit, Qualität und Umweltauswirkungen aufweisen. Die Zieldimensionen und Entscheidungskriterien in der Transportlogistik werden in der Literatur zum Teil kontrovers beschrieben, wodurch diese in weiterer Folge genauer erörtert werden.

Nach Arnold, D. et al. (vgl. 2008, S. 9) können ökologische und ökonomische Zielsetzungen komplementär oder konfliktär sein. Als ein Beispiel für eine Maßnahme, die beide Zielsetzungen gleichermaßen unterstützt, kann die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch effizientere Routenplanung genannt werden. Dadurch können sowohl Kosten als auch Emissionen reduziert werden. Hingegen hat der mehrgliedrige Transport mit Einsatz von Bahn oder Binnenschiff zwar meist positive Auswirkungen auf die ökologischen Ziele, jedoch aufgrund des zusätzlichen Umschlags negative Auswirkungen auf das ökonomische Ziel der Zeit.

Schuh und *Stich* (vgl. 2013, S. 17) differenzieren die übergeordneten Logistikziele in ökologische und ökonomische Bestandteile (siehe Abbildung 15). Die ökologischen Ziele beziehen sich auf die Minimierung der negativen Auswirkungen, die durch Transportlogistik entstehen. Nach Arnold, D. et al. (vgl. 2008, S. 8) können diese in

Energieverbrauch, Flächenbedarf, Schadstoffemissionen, Lärm und Abfallerzeugung zusammengefasst werden.

Die ökonomische Zielsetzung besteht in der Realisierung einer effizienten Logistik, welche durch maximale Leistung bei minimalen Kosten gekennzeichnet ist. Zur Messung dieser Ziele eignet sich die Kennzahl der Logistikeffizienz, welche sich aus dem Quotienten von Logistikkosten und Logistikleistung zusammensetzt (vgl. Hofmann und Nothardt 2009, S. 127). Die in der Logistikleistung enthaltene Zielgröße der Zeit hat erheblichen Einfluss auf andere unternehmenswichtige Größen wie u. a. Bestände, Service, Qualität und die Logistikkosten (vgl. Giese 2012, S. 16–17). Im Zusammenhang mit zeitabhängigen Kosten im Transportmanagement sind die Personalkosten und die Vorhaltekosten für die Transportmittel anzuführen (vgl. Wittenbrink 2014, S. 73).

Clausen (2013, S. 4–5) geht explizit auf die spezifischen Ziele der Transportlogistik ein und definiert diese wie folgt:

1. Effektivität: Aufgaben werden erfüllt.
2. Effizienz: Aufgaben werden mit einem günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis erfüllt.
3. Sicherheit: Gegen Bedrohungen des Transportes wird vorgesorgt.
4. Robustheit: Transportketten funktionieren auch im Fall von Störungen und Auftragsschwankungen zuverlässig.
5. Nachhaltigkeit: Ökologische und soziale Interessen werden berücksichtigt.
6. Wirtschaftlichkeit: Kosten sind angemessen und die Erträge decken für alle Beteiligten die Aufwände.

Nach *Schwede* (vgl. 2014, S. 35) setzt sich das Zielsystem der Distributionslogistik aus Sicht eines Automobilherstellers aus geringen Kosten und einer hohen Leistung zusammen. Die Leistung wird dabei über Durchlaufzeit, Transportbeschädigungsrisiko und Kundenzufriedenheit definiert. Die Kosten bestehen im Wesentlichen aus den Aufwänden für die Distribution (Transport und Umschlag) und für die Bestände (Kapitalbindung, Platzbedarf, Handhabung und Schadensrisiko). Die Zielgröße Nachhaltigkeit wird in diesem Zusammenhang nicht angeführt, jedoch sind die Unterziele der genannten Logistikleistung teilweise komplementär zu ökologischen Zielsetzungen (z. B. Routenoptimierung).

Die Zielsetzungen der unterschiedlichen Akteure entlang der Transportketten können durchaus voneinander abweichen. Im Fall der Fahrzeugdistribution sind die Verlader die Automobilhersteller und stellen die Ursprungsquelle für den Transport dar. Für den Transport werden vorrangig Transportdienstleister eingesetzt. An der Senke des Transports übernimmt der Empfänger (Kunde) das Fahrzeug (vgl. Ebel 2013, S. 126). Das Ziel der Logistikdienstleister ist die kostenoptimale Synchronisation der

logistischen Dienstleistungen mit den Prozessen der Automobilhersteller und Kunden (vgl. Gehr und Hellingrath 2007, S. 6). Die Dienstleister stellen hochflexible teure Transportkapazitäten zur Verfügung (z. B. höhenverstellbare Bahnwaggons, RoRo-LKW, RoRo-Binnenschiffe) und übernehmen zunehmend integrative und steuernde Tätigkeiten. Aufgrund steigender Kosten und stagnierender Preise, welche geringe Umsatzrenditen und Eigenkapitalquoten zur Folge haben, ist eine effiziente Abwicklung von großer Bedeutung (vgl. Wittenbrink 2014, S. 1). Um Transport-, Lager- und Logistikkapazitäten optimal auszulasten, werden frühzeitige und genaue Informationen bezüglich der kundenspezifischen Bedarfsprofile (z. B. Anzahl der zu transportierenden Fahrzeuge in einem definierten Zeitabschnitt) benötigt.

Die dominanten Einflussfaktoren auf die Kundenzufriedenheit sind neben der Lieferzeit und Liefertreue ein selbst konfigurierbares Automodell und eine optimale Händlerbetreuung inkl. Ersatzteilversorgung (vgl. Herold 2005, S. 10). Aus Sicht der Kunden spielt neben der Liefertreue die Lieferzeit eines Fahrzeuges eine ausschlaggebende Rolle, und zwar unabhängig davon, wie sich die Durchlaufzeitanteile auf die Bereiche Beschaffung, Produktion und Distribution aufteilen (vgl. Klug 2010, S. 366–367). Um die Jahrtausendwende wurde das ambitionierte Ziel formuliert, dass kundenindividuelle Fahrzeuge zukünftig innerhalb von drei Tagen (engl. *3 Day Car*) an den Käufer übergeben werden sollen (vgl. Holweg und Miemczyk 2003, S. 63).

Straube und Pfohl (vgl. 2008, S. 17) ermittelten in einer Studie die Unterschiede zwischen der Industrie Fahrzeugbau und den Spediteuren hinsichtlich der Fokussierung auf verschiedene Logistikzielgrößen. In der durchgeführten Studie sind die Transportkosten für die Verlagerer nur als dritt- und für die Speditionen als viertwichtigstes Ziel angeführt (siehe Abbildung 19).

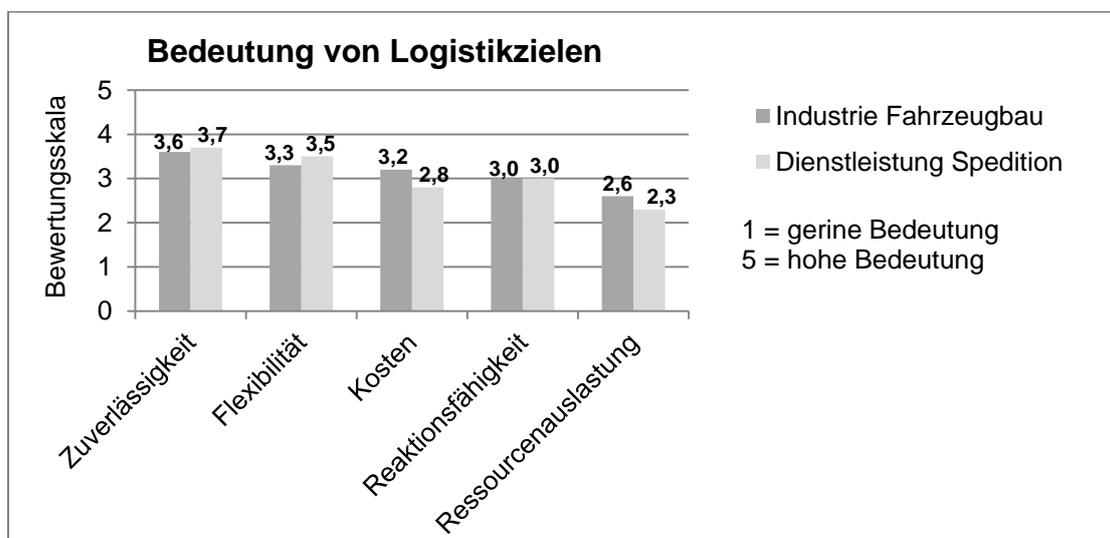


Abbildung 19: Bedeutung von Logistikzielen für Industrie, Fahrzeugbau und Spediteure (eigene Darstellung in Anlehnung an Straube und Pfohl 2008, S. 17)

Die relative Bedeutung der einzelnen Zielsetzungen ist in diversen Studien durchaus unterschiedlich. So ergab beispielsweise eine Befragung von Entscheidungsträgern bei österreichischen Verladern, dass die Verkehrsträgerwahl eine untergeordnete Rolle spielt, solange die Waren zum niedrigst möglichen Preis innerhalb eines vereinbarten Zeitfensters die Zieldestinationen erreichen (vgl. Stein et al. 2014, S. 46). Die Aussage, dass die Kosten eine zentrale Rolle spielen, wird durch andere Arbeiten, in denen die Kosten als das wichtigste Entscheidungskriterium genannt werden, bestätigt (vgl. Prognos 1994, S. 17; Deiters et al. 2006, S. 26–27).

Neben den Kosten führen Autoren wie *Gudehus* (vgl. 2005, S. 77), *Schuh* und *Stich* (vgl. 2013, S. 17) auch ökologische Ziele an und weisen auf deren wachsende Bedeutung hin. Eine Untersuchung des *Logistikclusters Raum Basel* aus dem Jahr 2014 zeigte, dass das Thema *Grüne Logistik* einen großen Stellenwert hat und in den nächsten Jahren noch weiter an Bedeutung gewinnen wird (vgl. Wittenbrink und Breisinger 2014, S. 10–12). In einer Studie zum Thema *Risikomanagement in Transport und Logistik 2015* gaben 60,9 % der Transport- und Logistikdienstleister an, dass Kundenverlust bei unzureichender Fokussierung auf Umweltthemen zu befürchten ist (vgl. Wittenbrink und Gburek 2012, S. 8).

Um eine optimale Verkehrsmittelwahl aus Sicht der Verloader bzw. Spediteure durchführen zu können, müssen Transportkonzepte mithilfe von qualitativen und quantitativen Analysen bewertet werden. Die getroffene Wahl, welche auf Basis des Preis-Leistungs-Vergleichs basiert, muss dabei auch stets kompatibel mit den Kundenbedürfnissen sein (vgl. Iskan 2009, S. 69–70).

3.2 Ansätze zur Berechnung der Transportkosten

In diesem Unterkapitel werden die Grundlagen und der Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Kostenrechnung für Logistikdienstleister beschrieben.

Allgemein lässt sich der Zweck von Kostenrechnung in drei Kategorien einteilen (vgl. Freidank 2008, S. 93; Weber 2012, S. 39–40):

- Externe Dokumentationsaufgaben: Preiskalkulation gemäß festgelegten Vorschriften (z. B. für öffentliche Aufträge)
- Planungsaufgaben: Vorbereitung von Entscheidungen und Teil der operativen Planung
- Kontrollaufgaben: Kostenrechnung liefert Ist-Daten für einen Vergleich mit Plan-Daten.

In dieser Arbeit wird die Kostenrechnung für Planungsaufgaben im Rahmen der Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung von Transportketten herangezogen. Die Kostenrechnung unterteilt sich in die Kostenarten-, Kostenstellen- und

Kostenträgerrechnung. Die Kostenartenrechnung dient der vollständigen Erfassung und Gliederung aller primären Kosten (Personal, Betriebsmittel, Material etc.) für eine Abrechnungsperiode. In der Kostenstellrechnung werden die Gemeinkosten aus der Kostenartenrechnung auf die einzelnen Kostenstellen verteilt. Mithilfe der Kostenträgerrechnung wird die Frage beantwortet, wofür Kosten angefallen sind. Diese Art der Kostenrechnung wird weiter differenziert in die Kostenträgerzeitrechnung (kurzfristige Erfolgsrechnung) und die Kostenträgerstückrechnung (vgl. Barwig und Hartmann 2015, S. 1–2). Letztere dient der Kalkulation von Preisen bzw. Aufträgen und wird somit für die zu entwickelnde Methode benötigt.

Für die Beurteilung von unterschiedlichen Varianten werden die Kosten in *variable* und *fixe Kosten* aufgeteilt. *Variable Kosten* sind die Anteile der Gesamtkosten, die sich mit dem Leistungsdurchsatz verändern und bei Nichtinanspruchnahme einer Leistung wegfallen. Dazu zählen u. a. nutzungsbedingte Abschreibungen, Wartungs- und Instandhaltungskosten von Transportmitteln, Verbrauchskosten, nutzungsabhängige Steuern und Abgaben. *Fixe Kosten* hingegen sind unabhängig vom Leistungsdurchsatz und fallen auch bei Nichtinanspruchnahme der Leistung an. Dazu zählen beispielsweise zeitabhängige Abschreibungen, feste Mieten, feste Personalkosten und kalkulatorische Zinsen für das investierte Kapital (vgl. Gudehus 2012, S. 144–145). In der Betriebsführung sind Kosten eine der wichtigsten Mess- und Erfolgsgrößen. Im Bereich der Logistik entstehen Kosten durch Bestände, Lagerung, Transport, Information- und Kommunikation sowie durch den Prozess. Der Anteil dieser Kosten, gemessen an den Gesamtkosten im Fahrzeugbau, beträgt etwa 9 % und ist deutlich höher als in anderen Branchen (vgl. Straube und Pfohl 2008, S. 47). Jener Anteil, der durch die Distribution der Fahrzeuge entsteht, wird mit durchschnittlich 26,8 % der Gesamtlogistikkosten beziffert (vgl. Koether 2014, S. 11).

Bei einer Studie im Auftrag der „Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes“ aus Deutschland im Jahr 2007 wurden die Verkehrsträger LKW, Bahn und Binnenschiff hinsichtlich betriebswirtschaftlicher Kosten miteinander verglichen (siehe Abbildung 20). Bei 13 Relationen, die sich hinsichtlich der Transportdistanz und der zu transportierenden Ware (z. B. Container oder Massengut) unterschieden, konnte auf zehn Relationen das Binnenschiff den kostengünstigsten Transport realisieren. Auf den drei verbleibenden Relationen fielen beim Bahntransport die geringsten Kosten an. Bei den Bahn- und Binnenschiffrelationen war kein Vor- und Nachlauf mittels LKW erforderlich, sodass dies den günstigsten Fall für diese Transportmittel darstellte (vgl. Planco Consulting und bfg 2007, S. 299). Werden die durchschnittlichen Transportkosten pro Kilometer für den Transport eines 20-Fuß-Containers (Twenty-foot Equivalent Unit, kurz TEU) aus den gewählten Relationen ermittelt, ist erkennbar, dass der Transport mit Binnenschiff und Bahn Kostenvorteile gegenüber dem LKW-Transport bietet.

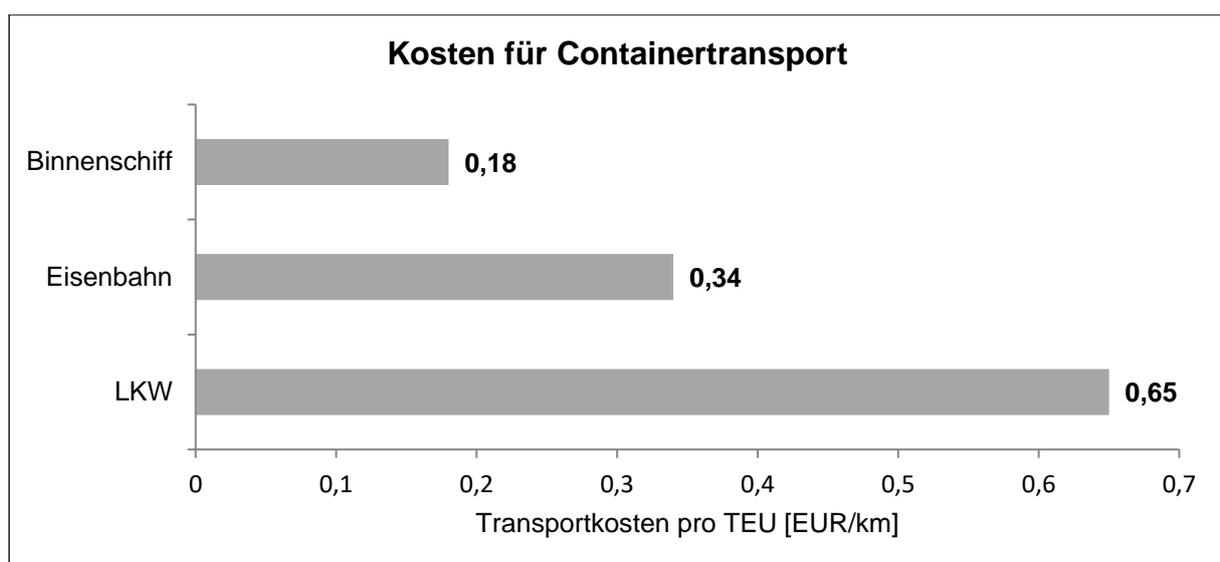


Abbildung 20: Verkehrsträgervergleich für Containertransport (vgl. Planco Consulting und bfg 2007, S. 244–270)

Die Distributionslogistikkosten gliedern sich in folgende Bestandteile auf (vgl. Herold 2005, S. 169):

- Organisation des Werklagers und Steuerung der Verladung
- Zinsen auf im Werklager gebundenes Kapital
- Kosten der Verladung
- Transportkosten
- Kapitalbindungskosten für die Fahrzeuge während Transport und Zwischenlagerung

Aufgrund der prozessualen Eingrenzung des Untersuchungsraums (Kapitel 2.4.4) geht diese Arbeit auf jene Bestandteile der Distributionslogistikkosten im Detail ein, die innerhalb des eingegrenzten Auftragsabwicklungsprozesses liegen und durch die Verkehrsträgerwahl beeinflusst werden.

Die Transportkosten der einzelnen Verkehrsträger setzen sich unterschiedlich zusammen. Für die Berechnung des LKW-Transports werden die Kosten in Beschaffungskosten, kalkulatorische Zinsen und Abschreibungen, Kraft- und Schmierstoffkosten, Reifenkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Personalkosten, Steuerung und Versicherungen sowie Straßenbenutzungsgebühren unterteilt (vgl. Wittenbrink 2014, S. 74). Eine detaillierte Auflistung der Kosten ist in Kapitel 5.7.1 aufgeführt.

Die Kosten für den Transport auf der Schiene lassen sich in Abfertigung des Zuges, Verschub, Triebfahrzeugführer, innerer Zugförderungsdienst, Wagenuntersuchung, kalkulatorische Abschreibungen, Wagen, Energie und Abgeltung der Infrastrukturnutzung gliedern (vgl. Herry 2001, S. 24).

Die Kosten für den Gütertransport auf der Wasserstraße setzen sich aus den Vorhaltungskosten und den variablen Kosten (z. B. Personal- und Treibstoffkosten) zusammen. Die Vorhaltungskosten werden aus den Kosten für kalkulatorische Abschreibungen und Zinsen, Reparaturen und Material, Versicherungen sowie Betriebsgemein- und Verwaltungskosten berechnet (vgl. Planco Consulting und bfg 2007, S. 217–222).

Bei mehrgliedrigen Transporten sind neben den Kosten für die Transportmittel auch noch die Kosten für den Umschlag zu berücksichtigen. Die Kosten für den Hub der Ware können in Kosten für die Infrastruktur (z. B. Containerbrücke, Reach-Stacker etc.) und in Kosten für den Betrieb (z. B. Personal, Energie, Instandhaltung etc.) unterteilt werden (vgl. Herry 2001, S. 25). Die Kosten je Tonnenkilometer sinken bei den Transportmitteln mit zunehmender Transportentfernung, da die Aufwände für die Be- und Entladung einmalig pro Transportvorgang anfallen. Die Kostendegressionseffekte hängen vorrangig von der Ladekapazität und der Auslastung der Transportmittel ab, die Höhe der Transportkosten von einer Vielzahl weitgehend relationsspezifischer Parameter (vgl. Planco Consulting und bfg 2007, S. 224). Die Kostenrechnung für die einzelnen Verkehrsträger und Umschlagvorgänge wird in Kapitel 5.7 näher ausgeführt. Für die Gestaltung von Transportketten sind mehrere Schritte erforderlich, wie im nachfolgenden Vorgehensmodell dargestellt wird (siehe Abbildung 21).

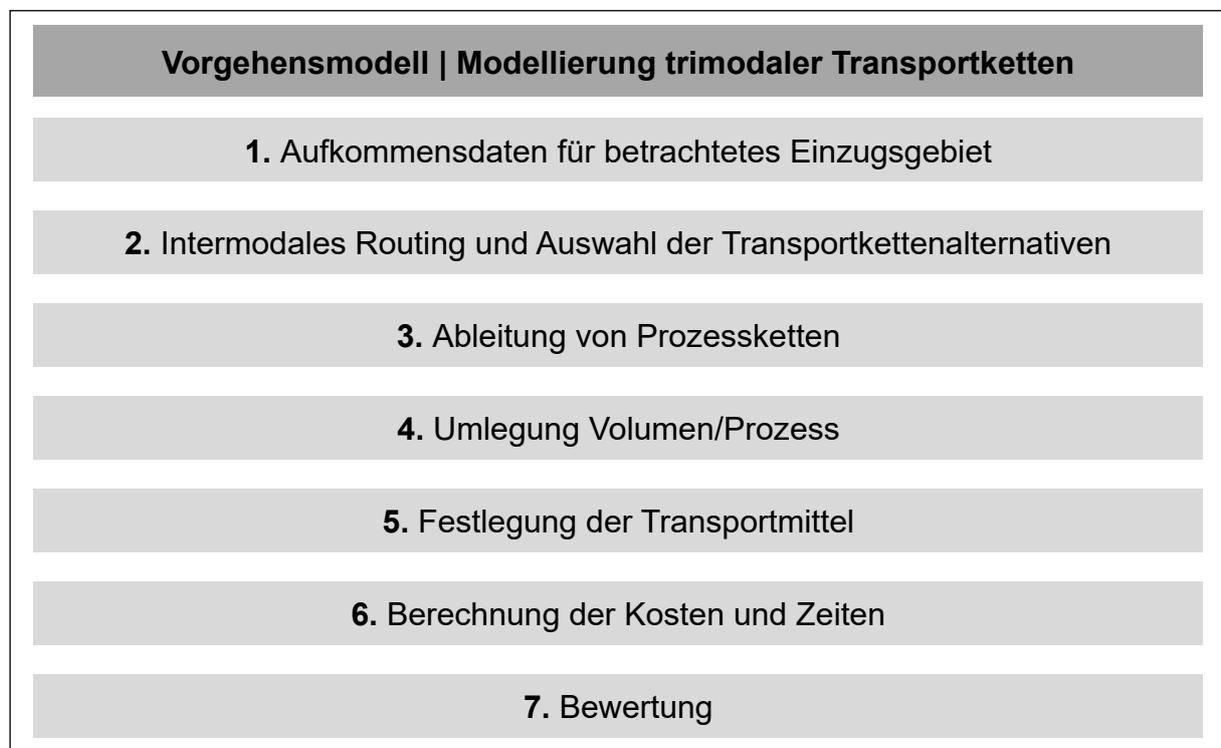


Abbildung 21: Modellierung trimodaler Transportketten (vgl. Schwarz 2009, S. 390)

Im Vorfeld der Kostenberechnung, welche als Schritt Nr. 6 angeführt wird, werden Informationen hinsichtlich Infrastruktur (z. B. max. Zuglänge), Verkehrsträger, Transportvolumen und Prozess (z. B. Be- und Entladeprozesse) zur Bestimmung der Umlaufzeit benötigt. Mithilfe dieser Informationen kann in weiterer Folge eine belastbare Planungsgrundlage geschaffen werden (vgl. Schwarz 2009, S. 389–390). Abschließend ist eine Gegenüberstellung von Transportkettenalternativen durchzuführen (Schritt Nr. 7), die beispielsweise mittels multikriterieller Bewertung (z. B. Transportkosten, Transportzeit) erfolgen kann.

3.3 Ansätze zur Berechnung der Treibhausgasemissionen

Seit den 1970er Jahren wächst die Erkenntnis, dass durch die Ausbeutung und Vergiftung der natürlichen Ressourcen die Lebensgrundlage zunehmend gefährdet wird. Überlegungen, welchen Einfluss dabei die Wirtschaft und im Speziellen die Logistik hat, sind daher nicht neu. Derzeit existiert jedoch kein international anerkannter Standard zur Ermittlung von Treibhausgasemissionen (vgl. Wittenbrink 2015, S. 5). Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden stellen die Grundlage für die Berechnung dieser im Bereich des Güterverkehrs dar.

3.3.1 Systemgrenzen der Bewertung

Die Systemgrenzen für die Berechnung der Energieverbräuche und Emissionen können wie folgt definiert werden (vgl. Norm DIN EN 16258 2013, S. 11):

- Well-to-Tank (WTT): Energieverbrauch und Emissionen für die Herstellung und den Transport des Energieträgers von der Quelle bis zum Fahrzeugtank
- Tank-to-Wheel (TTW): Energieverbrauch und Emissionen des Fahrzeugbetriebs (Endenergieverbrauch)
- Well-to-Wheel (WTW): Summe aus WTT und TTW (Primärenergieverbrauch)

Für den Vergleich von unterschiedlichen Transportketten ist zu beachten, dass nicht die direkten Emissionen (TTW), sondern immer die Gesamtemissionen (WTW) heranzuziehen sind. Andernfalls wäre beispielsweise ein Vergleich zwischen einem dieselbetriebenen LKW und einer Elektrolokomotive nicht möglich, da die TTW-Emissionen beim Stromantrieb null sind (vgl. Kranke et al. 2011, S. 119).

3.3.2 Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch

Neben der korrekten Systemabgrenzung ist für den Vergleich von Transportketten außerdem die Ermittlung aller Treibhausgasemissionen notwendig. Die einzelnen Emissionswerte können zusammengefasst als Gesamtmenge in Form von CO₂-Äquivalente (CO₂e) angegeben werden.

Abgesehen von Kohlendioxid (CO₂), welches die weitreichendsten Auswirkungen hat, sind noch Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆) von Bedeutung (vgl. Norm DIN EN 16258 2013, S. 12).

Zudem muss neben den Treibhausgasemissionen auch der Energieverbrauch errechnet und ausgewiesen werden (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 18). Der Energieverbrauch wird meist je nach eingesetzter Form in unterschiedlichen Größen angegeben, wie z. B. in Liter Treibstoff oder in Kilowattstunden (kWh). Für die bessere Vergleichbarkeit wird daher empfohlen, die physikalische Einheit Joule (J) bzw. Megajoule (1 MJ = 1 Mio. Joule) zu verwenden (vgl. Kranke et al. 2011, S. 119).

Nachfolgend sind allgemeine Werte für die Treibhausgasemissionen und den Primärenergiebedarf der Transportmittel LKW, Bahn und Binnenschiff angegeben (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Aus den Abbildungen ist zu entnehmen, dass der Transport auf der Straße mehr Primärenergie verbraucht und mehr Treibhausgasemissionen erzeugt als der Transport auf der Wasserstraße und Schiene. Diese Werte können jedoch nur als grobe Anhaltspunkte gesehen werden, da die exakte Höhe von einer Vielzahl von Faktoren abhängt (z. B. Antriebsart, Kraftstoffe, Auslastung, Verkehrssituation, Topografie).

Eine Veränderung der Einflussgrößen kann zu abweichenden Ergebnissen hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionen führen. Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen unterschiedlichen Transportketten muss daher mit spezifischen Werten gerechnet werden.

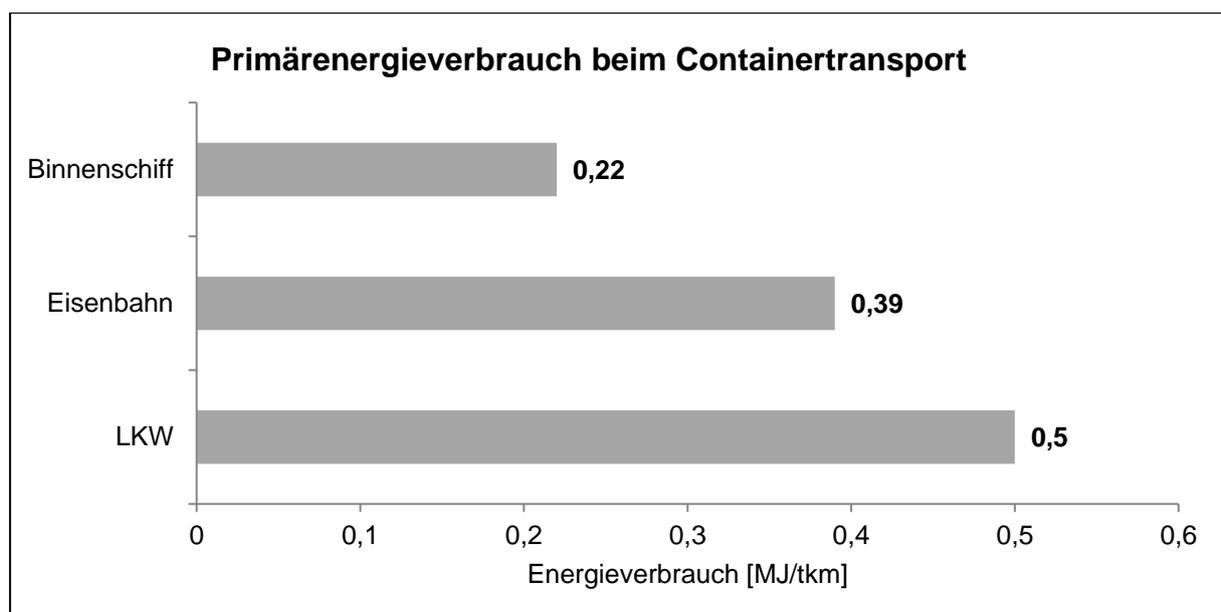


Abbildung 22: Transportmittelvergleich Energieverbrauch (eigene Darstellung in Anlehnung an Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2010b, S. 9)

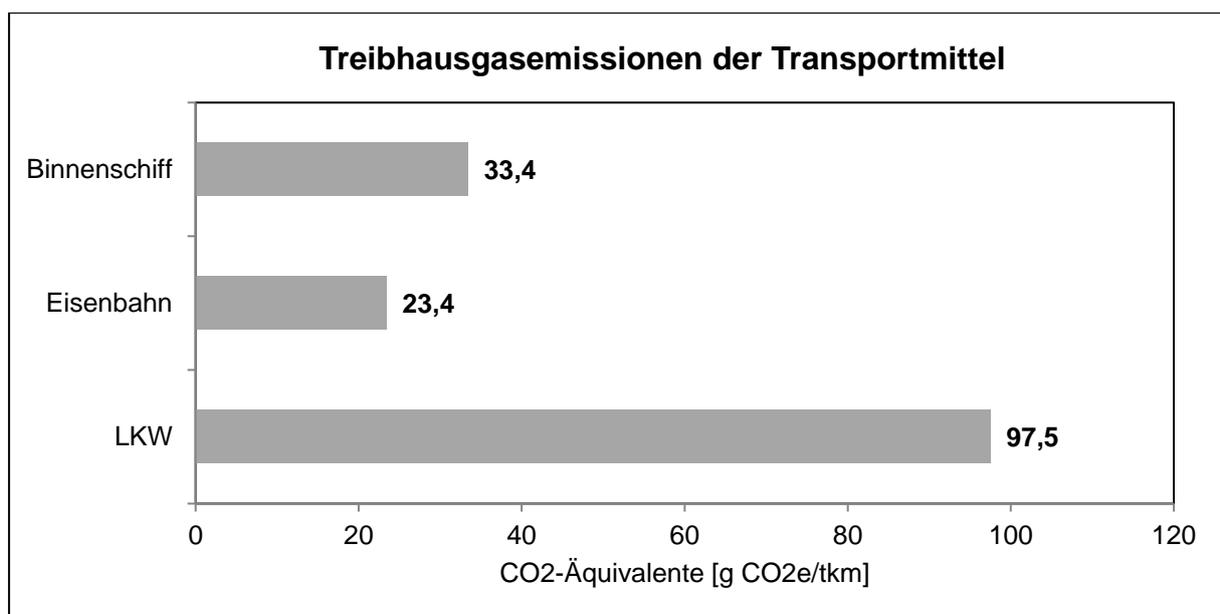


Abbildung 23: Transportmittelvergleich Treibhausgasemissionen (eigene Darstellung in Anlehnung an Umweltbundesamt 2012, S. 14)

In Kapitel 5.6 ist eine detaillierte Betrachtung der unterschiedlichen Verkehrsträger hinsichtlich des Energieverbrauchs und der erzeugten Emissionen aufgeführt. Dabei wird insbesondere auf die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflussparameter eingegangen.

3.3.3 EU-Richtlinien

Der Energieverbrauch und Emissionen von motorisierten Fahrzeugen (LKW, PKW und Motorräder) sowie mobilen Maschinen und Geräten (z. B. Baumaschinen, Bahnen und Binnenschiffen) werden durch europaweite Richtlinien und Verordnungen reguliert. Bei Flugzeugen und Seeschiffen werden weltweite Emissionsstandards angewendet, welche in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet werden.

Die EU setzt zur Entwicklung von fahrzeugbezogenen Strategien zur Reduktion von CO₂-Emissionen ein standardisiertes Testverfahren ein. Seit 1996 wird die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs sowie der Abgas- und CO₂-Emissionen für PKWs mittels des *Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)* durchgeführt. Bei diesem werden sowohl städtische Bedingungen (City-Zyklus) als auch außerstädtische Bedingungen (Überland-Zyklus) am Rollenprüfstand simuliert. Bei der Verbrauchsmessung wird eine sehr energiesparende Fahrweise bei mittleren Umgebungstemperaturen und ohne Nutzung von Zusatzaggregaten, wie z. B. einer Klimaanlage, unterstellt. Die mit dem *NEFZ* ermittelten Abgas- und Kraftstoffverbrauchswerte sind daher deutlich geringer als im realen Betrieb und stehen dementsprechend in der Kritik (vgl. Lichtblau und Pötscher, 2014, S. 13–14).

Die Ermittlung der Emissionen bei LKW-Motoren findet nicht auf Rollen-, sondern auf Motorprüfständen mit entsprechender Abgasanalysetechnik statt (vgl. Todsen 2012, S. 146). Ab der Emissionsklasse EURO 3 werden die Motoren im *European Stationary Cycle (ESC-Test)*, dem *13-Stufen-Test* und im *European Transient Cycle (ETC-Test)* gefahren. Ab EURO IV wird der *World Harmonized Stationary Cycle (WHSC)* und der *World Harmonized Transient Cycle (WHTC)* angewendet. Die einzuhaltenden Grenzwerte regelt bei EURO I bis Euro V die Richtlinie 91/542/EWG und bei EURO VI die Richtlinie *EG 582/2011* (vgl. Schmiedt 2014, S. 34).

Die EU-Richtlinien für dieselbetriebene Lokomotiven (z. B. Motorenklasse RLL für den Antrieb) und Binnenschiffe (z. B. Motorenklasse IWP für den Antrieb) sind in der Verordnung 2016/1628 aufgeführt und wurden im September 2016 im EU-Amtsblatt veröffentlicht. Darin werden die für die EU-Typgenehmigung erforderlichen Prüfungen beschrieben. Die Motoren müssen auf einem Leistungsprüfstand mit dem anzuwendenden stationären Prüfzyklus geprüft werden (vgl. European Parliament 2016, S. 1–24).

Im Unterschied zu anderen CO₂-Datenquellen für Emissionsfaktoren gelten die gemäß EU-Richtlinien ermittelten Werte ausschließlich für den Betrieb des Fahrzeugs (TTW), die für die Herstellung des Kraftstoffes erzeugten Emissionen (WTW) sind darin nicht enthalten. Dadurch ist ein ganzheitlicher Vergleich insbesondere mit elektrisch betriebenen Transportmitteln (z. B. Zug) nicht gegeben (vgl. Kranke et al. 2011, S. 295).

3.3.4 Norm DIN EN 16258

Die *Norm DIN EN 16258* (vgl. 2013) *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)* beschreibt die Vorgehensweise für die Ermittlung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen.

Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen können dabei mittels zwei unterschiedlicher Methoden ermittelt werden:

- Verbrauchsbasierte Methode: Treibhausgasemissionen werden mithilfe des gemessenen Energieverbrauchs und der energieszpezifischen Umrechnungsfaktoren berechnet.
- Entfernungsbasierte Methode: Angaben bezüglich des Gewichts der Sendung und zurückgelegte Entfernungen werden mit Verbrauchs- und Emissionsfaktoren pro Fahrzeugkilometer verknüpft.

In der Norm sind allgemeine Grundsätze, Berechnungsverfahren und Systemgrenzen definiert mit dem Ziel, eine genormte und überprüfbare Deklaration zu fördern. Die Nutzergruppe wird mit „Personen oder Organisatoren, die bei der Bekanntgabe von

Ergebnissen zum Energieverbrauch und zu Treibhausgasen in Verbindung mit der Quantifizierung einer Transportdienstleistung auf eine genormte Methode Bezug nehmen müssen“ (Norm DIN EN 16258 2013, S. 6) beschrieben.

Die Norm könnte sich zu einem international anerkannten Standard entwickeln (vgl. Wittenbrink 2015, S. 5). Die in Kapitel 5.6 beschriebene Methode zur Energiebedarfs- und Emissionsberechnung basiert auf den Vorgaben von *Norm DIN EN 162528* (siehe Abbildung 26).

3.3.5 VCI-Leitfaden zu CO₂-Emissionen in der Logistik

Der *Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)* hat einen Leitfaden zur Ermittlung der CO₂-Emissionen in der Logistik herausgegeben. Aufgrund der Tatsache, dass in der chemischen Industrie der Empfang und Versand von Gütern überwiegend nicht mit eigenen Fahrzeugen durchgeführt wird, kann der Treibstoffverbrauch nicht gemessen werden. Dementsprechend wird für die Berechnung anstelle der verbrauchsbasierten die entfernungsbasierte Berechnungsmethode empfohlen (siehe Kapitel 3.3.2). Elementarer Bestandteil der Berechnung sind Emissionsfaktoren, die auf Basis von diversen Parametern je Verkehrsträger ermittelt worden sind. Zu diesem Zweck wurden Daten von Mitgliedsunternehmen des *VCI* erhoben und einvernehmliche Mittelwerte festgelegt, welche die Durchschnittstransporte in der chemischen Industrie in Deutschland abbilden sollen (vgl. Verband der chemischen Industrie 2010, S. 3–7).

Norm DIN EN 16258 (vgl. 2013, S. 14) empfiehlt, die verbrauchsbasierte Methode zu verwenden, da mithilfe der gemessenen Vergangenheitsdaten präzisere Ergebnisse erzielt werden. In der vorliegenden Arbeit wird eine ökologische Bewertung von unterschiedlichen Verkehrsträgern und Transportverfahren in Abhängigkeit verschiedenster Parameter durchgeführt. Naturgemäß liegen daher nicht für alle möglichen Varianten (z. B. Auslastung des Transportmittels, Topografie der Transportkette etc.) gemessene Verbrauchsdaten vor, wodurch nur die entfernungsbasierte Methode für die Berechnung herangezogen werden kann.

Die dafür erforderlichen Verbrauchsfaktoren werden aus Datenbanken, wie zum Beispiel dem *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)*, (siehe Kapitel 3.3.7), entnommen (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 38).

3.3.6 Transport Emission Model (TREMODO)

Das *Transport Emission Model (TREMODO)* ist das wichtigste Berechnungsverfahren für gesamtwirtschaftliche Emissionen des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland. Das Modell ermittelt den heutigen und zukünftigen Energieverbrauch sowie die Schadstoffemissionen und wird zur Abschätzung der Notwendigkeit und

Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen als Grundlage von politischen Entscheidungen herangezogen.

Im *TREMOD* werden alle in Deutschland betriebenen Personenverkehrsträger (PKW, motorisierte Zweiräder, Busse, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) und Güterverkehrsträger (LKW und Zugmaschinen, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) erfasst und die Gesamtemissionen der einzelnen Verkehrsmittel für Deutschland berechnet. Zudem wird mithilfe eines Trendszenarios eine Fortschreibung bis zum Jahr 2030, durchgeführt. Emissionsberechnungsmodelle sind seit Anfang der 1980er Jahre im Einsatz. Die steigenden Anforderungen an Umweltinformationen veranlasste das deutsche Umweltbundesamt, die Entwicklung des *TREMOD* zu starten. Das Berechnungsmodell ist verknüpft mit der *HBEFA*-Datenbank, welche die komplexe Datenbasis der Emissionsmessungen aufbereitet (vgl. ifeu 2012, S. 8–11).

3.3.7 Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)

Zur Bestimmung der verkehrsbedingten Belastungen und zur Bewertung von möglichen Reduktionsmaßnahmen werden Angaben hinsichtlich der spezifischen Emission einzelner Fahrzeuge (PKW und LKW) im Straßenverkehr benötigt. Aus diesem Grund wird von Deutschland, Schweiz und Österreich seit den 1990er Jahren das *HBEFA* entwickelt. Es handelt sich dabei um eine EDV-gestützte Datenbank, welche die großen Datenmengen anwendergerecht zur Verfügung stellt (vgl. INFRAS 2004, S. 11).

Für die gängigsten Fahrzeugtypen werden je nach Fahrzeuggrößenklasse, Emissionsklasse (Euro 0 bis Euro 6), Straßenkategorie (innerorts, außerorts und Autobahn), Verkehrssituation sowie möglicher Abgasminderungstechnik (z. B. Dieselpartikelfilter) Emissionsfaktoren in Gramm pro Fahrzeug-Kilometer (g/km) ausgegeben. Die angegebenen Emissionsfaktoren für PKW und leichte Nutzfahrzeuge basieren auf Messungen am Rollenprüfstand. Für die Berechnung der Emissionen bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen werden hingegen nur die Motoren am Motorprüfstand untersucht. Vereinzelt werden für die Überprüfung dieser Simulationsdaten auch Tests im Echtbetrieb durchgeführt (vgl. Kranke et al. 2011, S. 287–289).

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode bezieht sich bei der Energiebedarfs- und Emissionsberechnung im Straßengüterverkehr ebenfalls auf die Emissionsmessungen aus der *HBEFA*-Datenbank (siehe Abbildung 26). Für die Straßenkategorie, Verkehrssituation und Topologie wurde der Durchschnitt gemäß dem Referenzland herangezogen (aggregierte Verkehrssituation).

3.4 Elektronische Berechnungstools

Aufgrund der Komplexität bei der Emissions- und Kostenberechnung wurden in den letzten Jahren zahlreiche elektronische Berechnungstools entwickelt, die unterschiedliche Methoden und Datenquellen nutzen. Für die ökologische Bewertung werden zumeist Emissionen (z. B. CO₂, CO₂e), die von der definierten Systemgrenze (z. B. TTW), dem Transportmittel (z. B. LKW), dem Transportgut (z. B. Massengut), dem Leerfahrtenanteil und zahlreichen weiteren Faktoren abhängig sind, ausgegeben.

Im Rahmen der Kostenrechnung werden variable und fixe Kosten für einzelne Verkehrsträger errechnet, womit in weiterer Folge Transportstrecken kalkuliert werden können. Nachfolgend werden wichtige Berechnungstools vorgestellt und anschließend nach deren Funktionen bewertet (siehe Tabelle 2).

3.4.1 EcoTransIT

Das Berechnungstool *EcoTransIT* ist kostenlos und wird regelmäßig von *ifeu*, *INFRAS*, und *IVE* (vgl. 2016, S. 6–9) an neueste wissenschaftliche Erkenntnisse und Anforderungen angepasst. Als Eingabeparameter für das zu transportierende Gut können die Menge, Einheit (Tonnen oder Container), Typ (Massengut, Durchschnittsgut, Volumengut) und das Gewicht definiert werden. Bei der Auswahl des Transportmittels sind uni- und multimodale Transporte mittels LKW, Bahn, Binnenschiff, Seeschiff und Flugzeug möglich. Je nach Auswahl stehen hierbei eine Vielzahl an Parameter für die nähere Spezifikation zur Verfügung (z. B. Fahrzeugklasse, Emissionsstandard, Beladungsgrad, Leerfahrtenanteil etc.).

Als Besonderheit kann bei der Transportmittelspezifikation von Zugtransporten die Kategorie *Fertigfahrzeuge* ausgewählt werden. Eine genauere Spezifikation der Bahnwaggons oder der zu transportierenden Fahrzeugklasse ist nicht möglich. Bei dem Transport mittels LKW und Binnenschiff ist die Spezifikation auf das max. zulässige Gesamtgewicht reduziert. Nach erfolgter Definition von Transportmittel und Transportgut erfolgt die Eingabe der Transportstrecke. Die berechneten Emissionen werden über Umrechnungsfaktoren aus dem Energiebedarf der gewählten Transportart ermittelt. Es werden gemäß *Norm DIN EN 16258* der Energieverbrauch in der Einheit Megajoule und die Emissionen in Form von CO₂-Äquivalent angegeben. Als Systemgrenze der Betrachtung kann TTW und WTW ausgewählt werden (vgl. *ifeu et al.* 2016, S. 5 ff.).

Welche Einflussparameter in die Berechnung einfließen ist zum Teil nicht transparent. Führt man beispielsweise eine Energiebedarfsberechnung für den Containertransport auf der Wasserstraße mit dem *EcoTransIT* Berechnungstool durch, wird der gleiche Energiebedarf bei vertauschten Quellen und Senken einer Transportkette ausgegeben (Stand 2016). Daraus kann geschlossen werden, dass beispielsweise auf die

Fließrichtung des Flusses, welche ein entscheidender Parameter bei der Energieberechnung darstellt, nicht eingegangen wird.

3.4.2 NTMCalc 4.0 Basic

Das nicht-gewinnorientierte *Network for Transport Measures (NTM)* wurde 1993 mit dem Ziel gegründet, umweltfreundliche Projekte im Transportsektor zu unterstützen. Im Rahmen der Tätigkeiten der Organisation wurde der *NTMCalc Basic*, ein kostenloses Berechnungstool für den Personen- und Güterverkehr, entwickelt. Das Berechnungstool erlaubt keinen direkten Verkehrsträgervergleich und beschränkt die wählbaren Transportmittel auf LKW, Bahn und Flugzeug (vgl. *Network for Transport Measures 2016*).

3.4.3 MAP&GUIDE

MAP&GUIDE ist eine kostenpflichtige Software der *PTV AG* aus Karlsruhe. Die Software bietet zahlreiche Funktionen für LKW-Speditionen wie Routenplanung, Transportkostenberechnung und Emissionsberechnung an (vgl. *PTV Planung Transport Verkehr 2016*). Diese Berechnungen können lediglich für LKW-Transporte durchgeführt werden, wodurch kein Vergleich von unterschiedlichen Verkehrsträgern möglich ist.

3.4.4 Marco Polo Calculator

Das *Marco Polo Program* der Europäischen Union verfolgte das Ziel, Gütertransporte von der Straße auf umweltfreundlichere Verkehrsträger zu verlagern. Zu diesem Zweck wurden im Zeitraum von 2003–2013 zahlreiche Forschungsprojekte gefördert, welche im Vorfeld mit dem *Marco Polo Calculator* bewertet wurden.

Es handelt sich dabei um ein Berechnungstool, welches die negativen Auswirkungen von Verkehr (Luftverschmutzung, Lärm, Klimawandel, Unfälle und Stau) berechnet und in Form von sogenannten *externen Kosten*⁶ aggregiert ausgibt (vgl. Brons und Christidis 2011, S. 1–5).

3.4.5 CO2-TEC Transport Emission Calculator

Der *Transport Emission Calculator (CO2-TEC)* wurde in Österreich im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts von der *Wirtschaftsuniversität Wien* (Institut für Transportwirtschaft und Logistik), *OeKB Business Services GmbH*, *ZTL Logistik Schulungs- und Beratungs GmbH* sowie von *ECONSULT*

⁶ Unter externen Kosten wird das Ergebnis einer ökologieorientierten Kostenrechnung verstanden, in der negative externe Effekte (z. B. Lärm) in monetarisierter Form dargestellt werden (vgl. Wehberg 1997, S. 96)

Betriebsberatungsgesellschaft m. b. H. entwickelt. Zielsetzung des Projekts war es, Transportketten hinsichtlich Schadstoffemissionen zu analysieren, alternative Lösungen zu evaluieren und Potenziale zu visualisieren. Das Tool beschränkt sich dabei auf Straßengütertransporte (vgl. Wirtschaftsuniversität Wien 2016).

3.4.6 Truck 2.0

Das Kalkulationstool *Truck 2.0* bietet für Transport- und Logistikunternehmen die Möglichkeit der Kostenkalkulation für LKW-Transporte. Eine Berechnung der Treibhausgasemissionen ist ebenfalls möglich, wobei diese keinen genauen Detaillierungsgrad zulässt. Das Tool bietet keinen Vergleich mit anderen Verkehrsträgern und geht nicht auf den Transport von Fertigfahrzeugen ein (vgl. Wittenbrink 2014, S. 105 ff.).

3.4.7 WKO LKW-Kalkulation

Der Fachverband Güterbeförderung der *Wirtschaftskammer Österreich* bietet ein einfaches Berechnungsmodell für die Kosten von LKW-Transporten an. Der Vergleich mit anderen Verkehrsträgern und die Auswertung von Treibhausgasemissionen ist mithilfe des Kalkulationstools nicht möglich (vgl. Wirtschaftskammer Österreich 2016).

3.4.8 Zusammenfassung und Vergleich der Berechnungstools

Neben den in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungstools existieren eine Vielzahl weiterer Lösungen (z. B. *Eco-Calculator*, *BearingPoint-Rechner*, *Intermodal Route Planner*, *DIS.CO2*, *Dekra*), die allesamt keinen ganzheitlichen Verkehrsträgervergleich für den Transport von Fertigfahrzeugen zulassen und daher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigen, dass bereits einige Ansätze existieren, die sich mit der Quantifizierung der Kosten und Umweltemissionen von unterschiedlichen Verkehrsträgern beschäftigen.

Zusammenfassend ist jedoch festzustellen, dass die in wissenschaftlichen Arbeiten beschriebenen Methoden und Modelle die Besonderheiten der automobilen Distributionslogistik nicht ausreichend betrachten. In der nachfolgenden Tabelle 2 ist ein Vergleich der wesentlichen Eingangs- und Ausgangsparameter dargestellt. Aus diesem wird ersichtlich, dass aktuell kein Berechnungstool existiert, welches auf die spezifischen Gegebenheiten des Transportguts PKW eingeht. Eine Gegenüberstellung mit der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode ist in Kapitel 7 (siehe Tabelle 32) dargestellt.

Überblick und qualitativer Vergleich ausgewählter Berechnungstools						
Grad der Erfüllung	Symbol	EcoTransit	NTM Calc Freight	Map & Guide	Marco Polo Calculator	CO2-Tec
Nicht erfüllt	○					
Teilweise erfüllt	◐					
Vollständig erfüllt	●					
Verkehrsträgerwahl	LKW	●	●	●	●	●
	Bahn	●	●	○	●	○
	Binnenschiff	●	○	○	●	○
Straßentransport	LKW-Typ	●	●	●	○	●
	Emissionsklasse	●	●	●	○	●
Bahntransport	Waggontyp	◐	◐	○	○	○
	Antriebsart	●	◐	○	●	○
Binnenschifftransport	Wasserstraßenklasse	●	○	○	○	○
	Antriebsart	○	○	○	●	○
Transportgut	Gewichtsabhängiges Ladegut	●	●	●	●	●
	Standard-Container	●	○	○	○	○
	PKW	○	○	○	○	○
	Spezialequipment PKW	○	○	○	○	○
Ladefaktor	Leerfahrt	●	○	●	○	●
	Lastfahrt	●	●	●	●	●
	Auslastungsbezogen	●	○	●	○	●
Transportstrecke	Länderspezifische Berechnung	●	○	●	○	●
	Multimodale Transporte	●	○	○	●	●
	Umschlag	●	○	○	○	○
Ergebnisdarstellung	Automatische Routenplanung	◐	◐	●	○	○
	Vergleich der Verkehrsträger	●	○	○	◐	○
Energiebedarf	Tank-to-Wheel	●	○	●	○	●
	Well-to-Wheel	●	●	●	○	○
Emissionsberechnung	Tank-to-Wheel	●	○	●	○	●
	Well-to-Wheel	●	●	●	○	○
Zeit und Kosten	Transportzeit	○	○	○	○	○
	Kostenbewertung	○	○	◐	○	○

Tabelle 2: Vergleich bestehender Berechnungstools

4 Spezifische Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit sowie Ableitung der Anforderungen

Die Notwendigkeit, eine Quantifizierung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen spezifisch für die automobilen Distributionslogistik durchzuführen, wurde in *Kapitel 1* begründet. Die Beschreibung des theoretischen Bezugsrahmens in *Kapitel 2* führte zu einer Eingrenzung jenes Bereichs, der in der vorliegenden Dissertation näher untersucht wird. Durch die Analyse des Forschungsstandes in *Kapitel 3* wurden die Lücken bestehender Methoden bzw. deren Anwendung in Form von Berechnungstools aufgezeigt. Auf Basis dieser Informationen werden infolge die spezifische Problemstellung und die Zielsetzung formuliert, die Forschungsmethodik definiert und die Anforderungen an die Methode abgeleitet.

4.1 Spezifische Problemstellung

Die Mess- und Vergleichbarkeit von Gestaltungsvarianten spielen eine wichtige Rolle bei der Optimierung. Die Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln zeigen, dass bereits eine Vielzahl an Methoden existiert, die sich dem Verkehrsträgervergleich widmen. Diese ermöglichen eine Quantifizierung von ökologischen und ökonomischen Kenngrößen und erlauben dabei die Variation von definierten Eingangsparametern. Die Kosten für LKW-Transporte können beispielsweise analog des Modells von *Wittenbrink* (vgl. 2014, S. 105 ff.) und die Treibhausgasemissionen gemäß *Norm DIN EN 16258* (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 18) berechnet werden.

Diese Modelle und Methoden sind zum Teil in elektronischen Berechnungstools hinterlegt, wodurch eine schnelle und unkomplizierte Ermittlung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen durchgeführt werden kann. Jedoch zeigt der in der Tabelle 2 angeführte Vergleich, dass die bestehenden Methoden für Stück- und Massengüter (Einheit Tonnen) bzw. für definierte Ladungsträger (Einheit Container) konzipiert worden sind und das Transportgut PKW nicht berücksichtigen. Die Konsequenz daraus ist, dass die unveränderte Anwendung zu falschen Berechnungsergebnissen hinsichtlich der Transportkosten und Treibhausgasemissionen führt.

Eine Ausnahme stellt lediglich die Methode von *EcoTransIT* dar, die zumindest eine ökologische Berechnung von Fahrzeugtransporten mit der Bahn zulässt. Die Berechnung bezieht sich allerdings hinsichtlich Leergewicht und Zuladungskapazität auf durchschnittliche Werte der Transportstatistik und ermöglicht keine spezifische Auswahl von Fahrzeugsegmenten und Bahnwaggons. Weiters ist keine Gegenüberstellung mit RoRo-LKWs oder RoRo-Binnenschiffen möglich (vgl. ifeu et al. 2016, S. 26).

Aufgrund der Tatsache, dass bei dem RoRo-Verfahren spezielle LKWs, Bahnwaggons und Binnenschiffe eingesetzt werden, kommt es u. a. zu abweichenden Verhältnismäßigkeiten hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der Kostenstruktur. Diese Veränderungen haben einen unmittelbaren Einfluss auf die in der vorliegenden Arbeit betrachteten ökonomischen und ökologischen Kenngrößen. Es ist daher davon auszugehen, dass die unveränderte Anwendung von bestehenden Methoden auf den RoRo-Transport nicht zielführend ist und zu falschen Aussagen führen kann.

Des Weiteren wurden – einhergehend mit der zunehmenden Containerisierung von Gütern – zunehmend innovative Lösungen für den Fahrzeugtransport in Ladungsträgern entwickelt. Der Einsatz dieser führt im Vergleich zu dem vorrangig in der automobilen Distribution zum Einsatz kommenden RoRo-Transport zu massiven Veränderungen, die ebenfalls hinsichtlich der Auswirkungen quantifiziert werden müssen.

Die Argumente der Befürworter und Widersacher des containerisierten Transports sind teilweise widersprüchlich und können oftmals nicht mit Fakten quantitativ belegt werden, wie auch im Automotive Logistics Magazin festgehalten wird: „Arguments on either side can be divisive and hard statistics do not always exist to back up either claim“ (Cross 2012). Darüber hinaus zeigen Studienergebnisse auf, dass aufgrund eines Informationsmangels die Verkehrsträgerwahl zum Teil auf Basis falscher Annahmen getroffen wird (siehe Kapitel 1.1).

Zusammenfassend kann folgende spezifische Problemstellung der Arbeit abgeleitet werden:

- Für das RoRo-Verfahren und in weiterer Folge auch für den containerisierten Fahrzeugtransport mittels LoLo-Verfahren liegt keine Methode vor, die einen ökonomischen und ökologischen Vergleich von unterschiedlichen Transportmitteln zulässt.
- Dies führt zu einem Informationsmangel bei Verladern und Transportdienstleistern, wodurch keine optimale Gestaltung von Transportketten in der automobilen Distributionslogistik gewährleistet werden kann.

4.2 Spezifische Zielsetzung der Arbeit

Der definierten spezifischen Problemstellung entsprechend ist es die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, einen Beitrag zur *Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen in der automobilen Distributionslogistik* zu leisten, der über den derzeitigen Stand der Forschung hinausgeht. Als Ergebnis der Arbeit wird eine Methode erwartet, die auf bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbaut und die spezifischen Besonderheiten der automobilen Distribution berücksichtigt.

Als Methode wird in diesem Zusammenhang ein sachgemäßes Verfahren zur Erreichung eines zuvor definierten Ziels verstanden (vgl. Keller 2006, S. 71). Aus der beschriebenen Zielsetzung und dem zu erwarteten Ergebnis werden folgende Forschungsfragen abgeleitet:

1. Welche Teilbereiche von existierenden Methoden, die für die Berechnung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen bei Stückgut-, Massengut- bzw. Containertransport entwickelt worden sind, haben für die Fertigfahrzeugdistribution Gültigkeit?
2. Welche spezifischen Gegebenheiten der automobilen Distributionslogistik haben signifikanten Einfluss auf die Höhe der Treibhausgasemissionen oder die Transportkosten und müssen dementsprechend in der zu entwickelnden Methode berücksichtigt werden?
3. Unter welchen Rahmenbedingungen führt der Einsatz von innovativen Logistiklösungen als Alternative zu dem RoRo-Transport zu einer Effizienzsteigerung in Bezug auf den Energiebedarf bzw. den Kosten des Transports?

Zur Erreichung des Ziels wird folgende Forschungshypothese aufgestellt:

Der ökologische und ökonomische Transportmittelvergleich in der automobilen Distributionslogistik führt u. a. aufgrund des spezifischen Ladefaktors zu abweichenden Ergebnissen im Vergleich zu allgemeingültigen Aussagen aus den Bereichen des Stückgut-, Massengut- und Containertransports.

4.3 Definition der Forschungsmethodik

Die Vorgehensweise zur Entwicklung der Methode soll den Anforderungen der anwendungsorientierten Wissenschaft entsprechen. Nach *Ulrich* (1994, S. 161 ff.) besteht der unmittelbare Zweck der anwendungsorientierten Wissenschaft darin, ein wissenschaftlich fundiertes Vorgehen in der Praxis zu ermöglichen. Die zu untersuchende Problemstellung im Bereich der anwendungsorientierten Wissenschaft stammt dabei immer aus der Praxis.

Im vorliegenden Fall wird eine Problemstellung aus der Praxis aufgenommen, wissenschaftlich strukturiert und unter Anwendung von theoretischem sowie selbst generiertem Wissen gelöst. Anschließend wird die Problemlösung – die entwickelte Methode – mittels Fallbeispielen validiert. Die für die vorliegende Arbeit gewählte Forschungsmethode gleicht daher grundsätzlich jener, die in der Vorgehensweise für anwendungsorientierte Forschung dargestellt wird Abbildung 24.

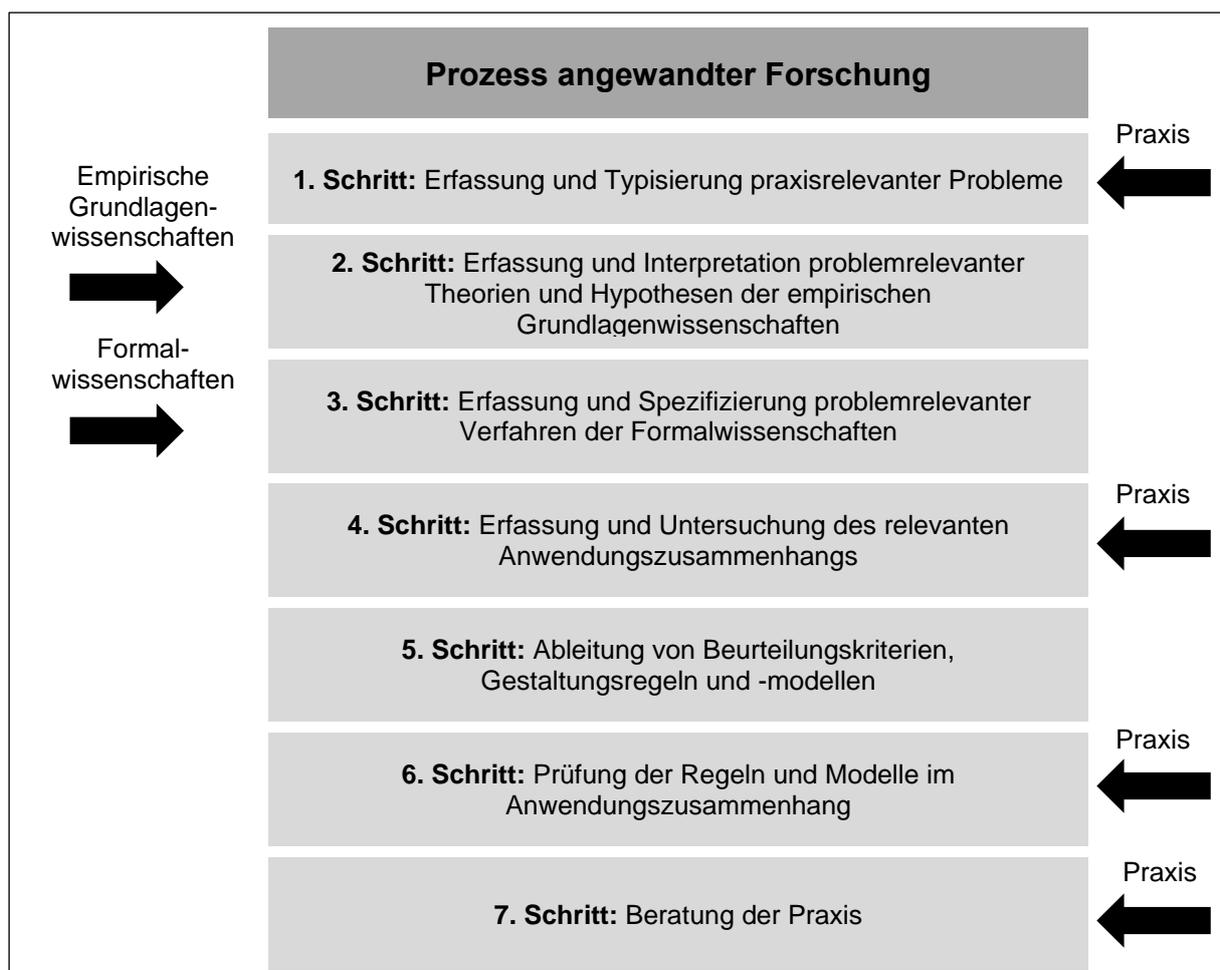


Abbildung 24: Forschungsmethodisches Vorgehen (eigene Darstellung in Anlehnung an Ulrich 1994, S. 164)

Grundsätzlich wird bei der Forschungsmethodik zwischen induktivem und deduktivem Vorgehen unterschieden. Der Erkenntnisgewinn auf Basis von in der Vergangenheit erarbeiteten und empirisch überprüften Theorien, der sogenannte Schluss vom Allgemeinen auf das Besondere, wird als deduktive Methode bezeichnet. Die induktive Methode hingegen geht in umgekehrter Richtung vor. Aus der Summe von beobachteten Einzelfällen sollen übergeordnete Regelmäßigkeiten und möglichst allgemeingültige Wirkungsmechanismen abgeleitet werden (vgl. Töpfer 2012, S. 64).

Im vorliegenden Dissertationsvorhaben scheidet aufgrund der geringen Grundgesamtheit von spezifischen Transportlösungen am Markt ein rein induktives Vorgehen aus. Ebenso ist ein rein deduktives Vorgehen aufgrund des Fehlens von spezifischen Theorien des definierten Untersuchungsgegenstandes nicht zielführend. Aus den genannten Gründen wird in dieser Untersuchung eine Kombination aus induktivem und deduktivem Vorgehen eingesetzt.

Die Strukturierung des Forschungsgegenstandes erfolgt induktiv mithilfe der definierten Problemstellung aus der Praxis. In einem deduktiven Vorgehen werden die theoretischen Grundlagen durch eine umfassende Literaturrecherche als relevante

Problemstellung identifiziert und eine Forschungshypothese konstruiert. Mittels mathematischer Methoden und empirisch ermittelter Informationen wird die Forschungshypothese anschließend falsifiziert bzw. verifiziert. Induktiv werden aus den analysierten Einzelfällen allgemeingültige Wirkungsmechanismen abgeleitet. Der wissenschaftliche Fortschritt lässt sich als Wechselspiel von Theorie und Empirie in Form eines Kreismodells darstellen (siehe Abbildung 25).

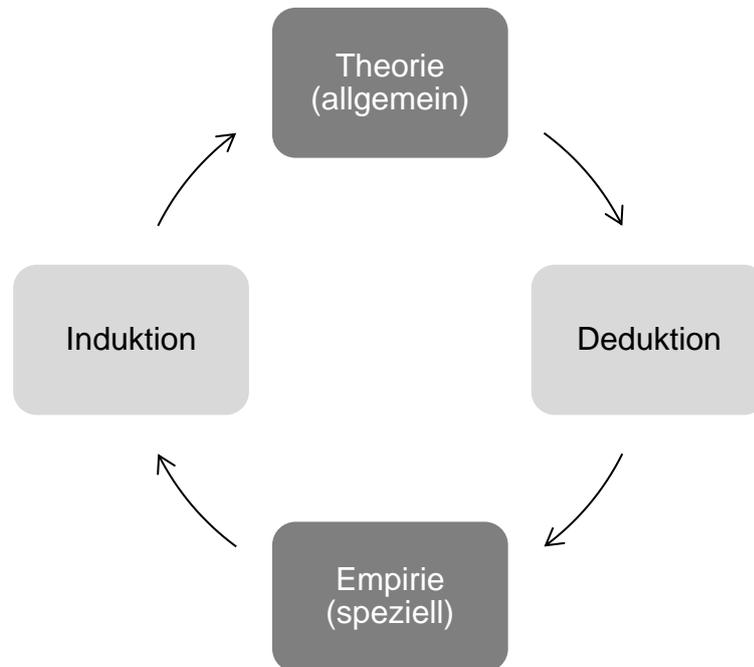


Abbildung 25: Wechselspiel von Theorie und Empirie (vgl. Rost 2003, S. 9)

4.4 Anforderungen an die Methode

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, durch die Quantifizierung von ökologischen und ökonomischen Kenngrößen die Eignung unterschiedlicher Verkehrsträger im Rahmen der Fahrzeugdistribution zu prüfen. Dabei soll das RoRo-Verfahren abgebildet und mit dem LoLo-Verfahren verglichen werden (siehe Kapitel 1.2).

Diese Zielsetzung bedingt die Entwicklung einer Methode, die auf bestehenden Normen und Richtlinien aufbaut, die die relevanten Faktoren der automobilen Distribution von Fahrzeugen berücksichtigt, die erzeugten Informationen bei der Planung von Transportketten zur Verfügung stellt und schlussendlich durch die gewonnene Transparenz eine Unterstützung bei der Verkehrsträgerwahl bietet. Des Weiteren gilt es, die Ergebnisse der Bewertung systematisch zu untersuchen und zu interpretieren.

Für die zu entwickelnde Methode wurden zehn Anforderungen (Anf.) definiert die wie folgt zusammengefasst werden können:

-
- *Anf. 1 – Definition des Transportguts:* Fertigfahrzeuge unterscheiden sich stark hinsichtlich des Eigengewichts und der Abmessungen, wodurch eine Differenzierung bei den Berechnungen erforderlich ist. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Modellen ist eine Komplexitätsreduktion in Form einer Segmentierung sinnvoll.
 - *Anf. 2 – Spezifikation der Transportmittel:* Eine nähere Spezifikation der jeweiligen Transportmittel LKW, Bahn und Binnenschiff ist erforderlich, um eine detaillierte Bewertung durchführen zu können. Die Methode muss die Auswahl der entscheidenden Einflussparameter (z. B. Emissionsklasse des LKWs, Anzahl Waggons bei der Bahn, Wasserstraßenklasse bei der Binnenschiffahrt) ermöglichen.
 - *Anf. 3 – Berücksichtigung der relationsspezifischen Gegebenheiten:* Hinsichtlich des Untersuchungsbereichs (siehe Kapitel 2.4) wurde eine geographische Eingrenzung durchgeführt. Relationsspezifische Faktoren sind aufgrund des signifikanten Einflusses auf das ökologische und ökonomische Bewertungsergebnis in der Methode zu berücksichtigen (z. B. Dimensionierung der Binnenschiffe in Abhängigkeit der infrastrukturellen Gegebenheiten).
 - *Anf. 4 – Berechnung des spezifischen Ladefaktors:* Die unter den ersten drei Punkten angeführten Anforderungen an die Methode hinsichtlich Transportgut, Transportmittel und relationsspezifischen Gegebenheiten ermöglichen die Berechnung eines spezifischen Ladefaktors. Dieser hat in der Transportlogistik zumeist bedeutenden Einfluss, wodurch eine Berechnung in Abhängigkeit der gewählten Parameter erforderlich ist.
 - *Anf. 5 – Ökologische Bewertung der Transportkette:* Für den Vergleich von Transportmitteln mit unterschiedlichen Antrieben (z. B. Diesel oder Elektro) sind neben den direkten Emissionen (TTW) auch immer die Gesamtemissionen (WTW) zu berechnen und aufzuweisen. Dabei soll neben der aggregierten Darstellung der Treibhausgasemissionen auch – wie in *Norm DIN EN 16258* gefordert (siehe Kapitel 3.3.4) – der Energieverbrauch ausgewiesen werden.
 - *Anf. 6 – Ökonomische Bewertung der Transportkette:* Aufgrund der Tatsache, dass ökonomische Kenngrößen einen wesentlichen Einfluss auf die Verkehrsträgerwahl haben, ist die Berechnung dieser in der Methode zu hinterlegen. Neben den eigentlichen Transportkosten gilt es, auch die bei mehrgliedrigen Transportketten entstehenden Kosten des Umschlags zu betrachten. Da die Eingabewerte für Kosten einer ständigen Veränderung unterliegen (z. B. Entwicklung des Erdölpreises) bzw. unternehmensspezifisch sind (z. B. Prozentanteil des Overheads) ist eine dementsprechende Anpassung dieser Werte zu ermöglichen.
 - *Anf. 7 – Berücksichtigung des containerisierten Transports:* Diese Anforderung leitet sich aus dem Umstand ab, dass zahlreiche Logistikkösungen für den Transport von Fahrzeugen in Containern existieren, jedoch aktuell keine

umfassenden diesbezüglichen wissenschaftlichen Betrachtungen vorliegen. Die jeweiligen Containerbehältnisse bzw. das benötigte Spezialequipment unterscheidet sich stark, wodurch die Methode eine spezifische Auswahl sowie Berechnung von unterschiedlichen Systemen enthalten soll. Des Weiteren soll ein Vergleich mit dem vorrangig zum Einsatz kommenden RoRo-Transport ermöglicht werden.

- *Anf. 8 – Bewertung von Umschlagvorgängen:* Da es in mehrgliedrigen Transportketten zu Umschlagvorgängen kommt, sind die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen dieser zu prüfen und gegebenenfalls in der Methode zu berücksichtigen. Dabei ist u. a. auch auf die Unterschiede zwischen dem RoRo- und LoLo-Verfahren einzugehen.
- *Anf. 9 – Transparenz der Berechnungen:* Die hinter den ausgewiesenen Ergebnissen stehenden Berechnungen sollen für den Anwender transparent und nachvollziehbar sein.
- *Anf. 10 – Praxistauglichkeit und Allgemeingültigkeit:* Die entwickelte Methode muss für Anwender aus der Industrie anwendbar und zeitlich nicht aufwendig sein sowie einen Mehrwert bieten. Damit die Methode für unterschiedliche Anwender (z. B. Verlader, Spediteure etc.) anwendbar ist, ist der Aufbau allgemeingültig zu halten. Eine unternehmensspezifische Anpassung von Eingangsparametern ist in der Methode vorzusehen. Referenzwerte – insbesondere für Kosten – werden im Rahmen dieser Dissertation angeführt und anhand der Fallbeispiele auf die Methode angewendet.

4.5 Zusammenfassung des Kapitels

In Kapitel 4 wurden die spezifische Problemstellung und die Zielsetzung vorgestellt. Weiters wurde die Forschungsmethodik für die zu entwickelnde Methode definiert, welche der Vorgehensweise nach *Ulrich* für anwendungsorientierte Forschung entspricht. Abschließend wurden auf Basis des dargestellten Stands der Forschung (siehe Kapitel 3) Anforderungen an die Methode definiert, die bei der Entwicklung zu berücksichtigen sind.

5 Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen in der automobilen Distributionslogistik

Aufbauend auf der in Kapitel 4 beschriebenen spezifischen Zielsetzung und Problemstellung sowie der abgeleiteten Anforderungen wird nun die entwickelte Methode vorgestellt, mit der ökologische und ökonomische Kenngrößen in der automobilen Distributionslogistik quantifiziert werden können. Bestehende Methoden der Kosten- und Emissionsberechnung werden um die spezifischen Gegebenheiten der Fahrzeugdistribution erweitert. Die mittels der Methode erzeugte Transparenz soll bei der Auswahl und Gestaltung von ein- und mehrgliedrigen Transportketten, insbesondere bei der Verkehrsträgerwahl eine Unterstützung für Verlagerer und Logistikdienstleister bieten.

Die entwickelte Methode setzt sich aus sieben Teilschritten (siehe Abbildung 26) zusammen, in die u. a. bestehende und im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodenbestandteile einfließen. Im Zusammenspiel mit den spezifischen Informationen der automobilen Distributionslogistik, die durch eine strukturierte Literaturrecherche und zahlreichen Experteninterviews erhoben worden sind, können die spezifischen Fragestellungen der Arbeit (siehe Kapitel 4.2) beantwortet werden.

Im *Schritt Nr. 1* der Methode werden die Transportgüter, die hinsichtlich der Abmessungen und Gewichte sehr vielfältig sein können, zur Komplexitätsreduktion in Fahrzeugsegmente eingeteilt. In *Schritt Nr. 2* werden die für den Fahrzeugtransport zur Verfügung stehenden Transportmittel beschrieben und näher spezifiziert. Entsprechend der Abgrenzung dieser Arbeit wird dabei auf LKW, Bahn und Binnenschiff eingegangen, da diese für den kontinentaleuropäischen Fahrzeugtransport von Bedeutung sind.

Im nachfolgenden *Schritt Nr. 3* werden die relationsspezifischen Restriktionen, die Einfluss auf die zu ermittelnden ökonomischen und ökologischen Kenngrößen haben, definiert. Dabei werden die Besonderheiten der jeweiligen Verkehrsträger (z. B. Topografie der Straße, max. Waggonanzahl auf der Schiene, Wasserstraßenklasse beim Binnenschiff) berücksichtigt.

Nachdem in den ersten drei Schritten Transportgüter, Transportmittel und relationsspezifische Restriktionen definiert worden sind, wird in *Schritt Nr. 4* die Berechnung des spezifischen Ladefaktors je Transportmittel vorgestellt. Insbesondere für diese Fragestellung konnten keine geeigneten wissenschaftlichen Vorarbeiten identifiziert werden, wodurch eine neue Methodik in Zusammenarbeit mit Fachexperten aus unterschiedlichen Bereichen entwickelt wurde. Im Zuge dessen wurden Interviews durchgeführt, um die für die mathematische Modellierung

erforderlichen spezifischen Informationen zu erheben. Die Befragungen wurden mittels strukturiertem Fragebogen durchgeführt (Beispiel-Fragebogen zum RoRo-LKW siehe Anhang A.2). Durch Anwendung der Berechnungslogik kann der Ladefaktor für unterschiedliche Transportmittelkonfigurationen, wie beispielsweise Binnenschiffe mit unterschiedlicher Anzahl an Ladedecks, ermittelt werden. Die Berechnung ist dabei sowohl für den RoRo-als auch für den LoLo-Transport möglich.

Nach Bestimmung des Ladefaktors wird im anschließenden *Schritt Nr. 5* das Gesamtgewicht des Transports, bestehend aus Transportmittel, Beladung und ggf. Container bzw. Spezialequipment berechnet. Dabei wird sowohl das Leergewicht als auch ein nutzlastabhängiges Gewicht angegeben. Diese Werte haben Einfluss auf den Energiebedarf und somit in weiterer Folge auf die Emissions- und Kostenberechnung. Aufgrund der Tatsache, dass beispielsweise die Energieverbräuche aus *HBEFA 3.2* sich auf ein bestimmtes Leergewicht des LKWs beziehen, wird für die Vergleichbarkeit der Transportverfahren (z. B. RoRo vs. LoLo) die Differenz zum Referenzgewicht aus *HBEFA 3.2* ermittelt.

Nachdem in den ersten fünf Schritten die Voraussetzungen geschaffen worden sind, werden in *Schritt Nr. 6* die ökologischen Berechnungen durchgeführt. Diese basieren auf der in *Norm DIN EN 16258* beschriebenen Methode zur Berechnung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen. Die für die Anwendung erforderlichen Informationen bezüglich des Energieverbrauchs der unterschiedlichen Transportmittel werden aus unterschiedlichen Quellen generiert. Für den Straßentransport werden die spezifischen Energieverbrauchswerte aus *HBEFA 3.2* entnommen. Beim Bahn- bzw. Binnenschifftransport wird der Energieverbrauch mittels der von *ifeu et al.* (vgl. 2016, S. 56) entwickelten mathematischen Funktionen berechnet.

Im abschließenden *Schritt Nr. 7* werden die Transportzeiten und -kosten berechnet. Analog zur Emissionsberechnung wird dabei auf bestehende Methoden der zurückgegriffen. Die Kostenberechnung für den Straßentransport wird analog der beschriebenen Berechnungsmethodik des elektronischen Berechnungstools *Truck 2.0* (vgl. Wittenbrink 2014, S. 105 ff.) durchgeführt, wobei auch hier mittels Experteninterviews erhobene Werte der automobilen Distributionslogistik einfließen. Die Kostenkalkulation für Bahn- und Binnenschifftransporte wird analog zu der Kostenrechnung für den Straßengüterverkehr aufgebaut und um die spezifischen Besonderheiten des jeweiligen Verkehrsträgers erweitert (z. B. Traktionswechsel bei der Bahn).

In der nachfolgenden Abbildung 26 ist der Aufbau der entwickelten Methode dargestellt.

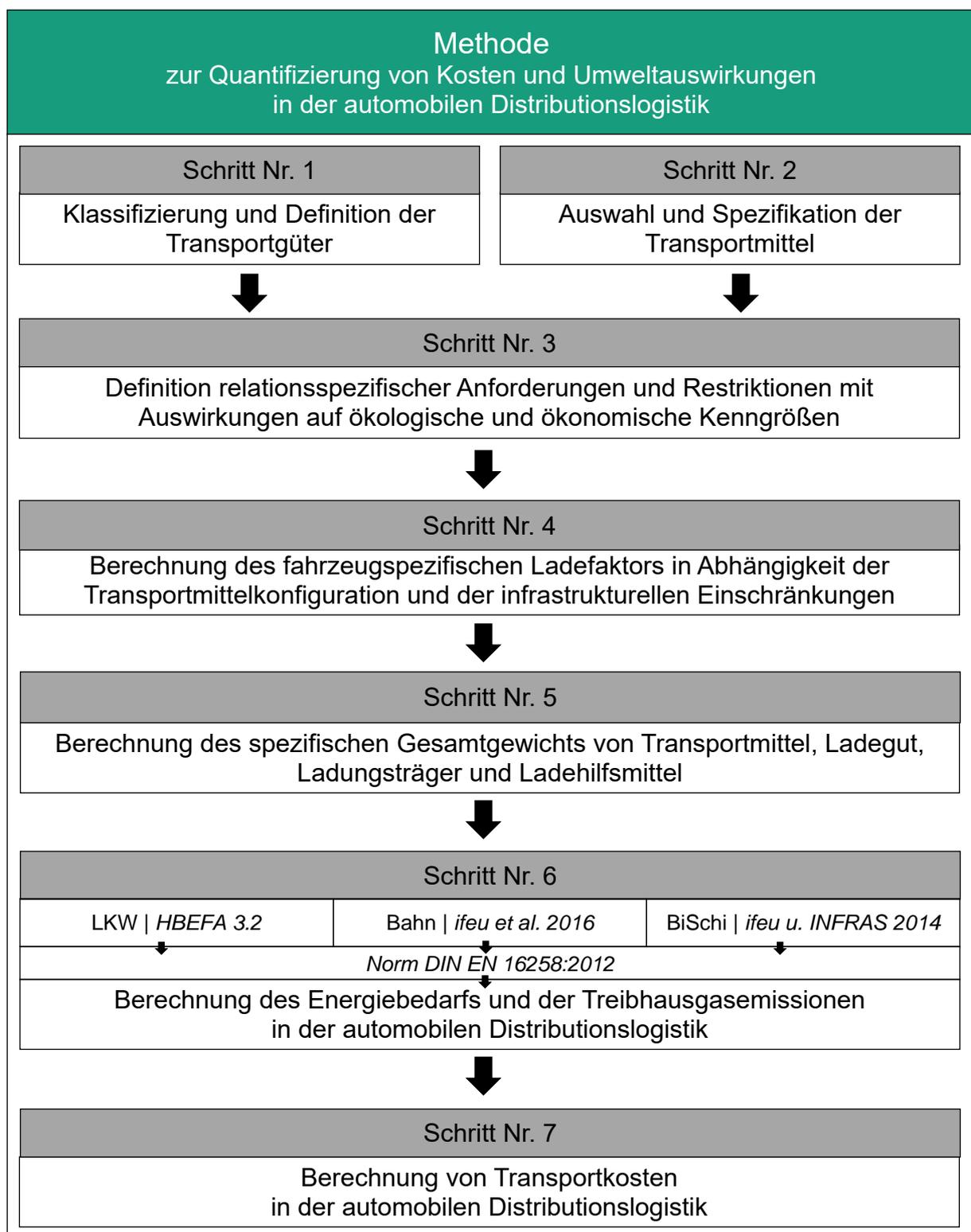


Abbildung 26: Methode zur Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen

5.1 Schritt Nr. 1 | Segmentierung der Transportgüter

Aufgrund der Tatsache, dass PKW hinsichtlich der Abmessungen und Gewichte unterschiedlich sind, werden sie zur Komplexitätsreduktion in Fahrzeugsegmente eingeteilt. Die Kategorisierung wird von unterschiedlichen Organisationen wie beispielsweise der *Europäischen Kommission*, dem *Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)* oder auch von den Automobilherstellern durchgeführt, ist jedoch nicht einheitlich. Für die weiteren Untersuchungen wird die Klassifizierung der Fahrzeugsegmente nach *KBA* (Stand 2014) herangezogen. Die Abgrenzungskriterien, die in die Einteilung einfließen, sind u. a. Größe, Gewicht, Motorisierung, Sitzplätze, Grundpreis u.v.m. (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2014). Dabei gilt es zu beachten, dass es für die Klassengrenzen keine definierten Werte für die Abmessungen und Gewichte gibt, da diese zeitweise angepasst werden müssen (vgl. Braess und Seiffert 2013, S. 132). Aufgrund der Bedeutung von Fahrzeugabmessungen und Gewichten für die weiteren Berechnungen müssen diese definiert werden. Zu diesem Zweck werden die PKW-Neuzulassungen aus dem Jahr 2014 für Deutschland, den wichtigsten europäischen Absatzmarkt, ausgewertet. Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen und Gewichte in den Fahrzeugsegmenten wurde ein Mittelwert aus den fünf meistverkauften Fahrzeugen je Segment gebildet (siehe Tabelle 3). Die Abmessungen und Gewichte wurden aus der Datenbank von dem *Allgemeiner Deutscher Automobil-Club* (vgl. 2015) entnommen.

Fahrzeugsegmentierung					
Segment	Fahrzeugmodelle (Deutschland Top 5 2014)	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [kg]
Minis	VW UP, Fiat 500, Opel Adam, Renault Twingo, Smart FORTWO	3.415	1.660	1.515	955
Kleinwagen	VW Polo, Opel Corsa, Ford Fiesta, Skoda Fabia, Mini	3.955	1.720	1.463	1.087
Kompaktklasse	VW Golf, Audi A3, BMW 1er, Ford Focus, Opel Astra	4.320	1.794	1.455	1.301
Mittelklasse	VW Passat, Mercedes C-Klasse, BMW 3er, Audi A4, Opel Insignia	4.724	1.827	1.450	1.452
Obere Mittelklasse	Audi A6, BMW 5er, Mercedes E-Klasse, Volvo 70, Jaguar XF	4.901	1.865	1.480	1.654
Oberklasse	Mercedes S-Klasse, Mercedes CLS, Audi A8, Audi A7, Porsche Panamera	5.035	1.914	1.442	1.844
SUV	Opel Mokka, Ford Kuga, BMW X1, Nissan Qashqai, Skoda Yeti	4.376	1.802	1.637	1.406
Geländewagen	VW Tiguan, Audi Q3, Audi Q5, BMW X3, BMW X5	4.597	1.871	1.674	1.723
Sportwagen	Mercedes E-Klasse Coupe, Porsche 911, Mercedes SLK, Audi TT, Porsche Boxter	4.376	1.807	1.327	1.433
Mini Vans	Mercedes B-Klasse, Opel Meriva, Renault Scenic, Ford C-Max, Skoda Roomster	4.321	1.794	1.620	1.366
Großraum Vans	VW Touran, Opel Zafira, VW Sharan, Ford S-MAX, Seat Alhambra	4.710	1.874	1.691	1.632

Tabelle 3: Fahrzeugsegmentierung(eigene Tabelle in Anlehnung an Kraftfahrt-Bundesamt 2014, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club 2015)

5.2 Schritt Nr. 2 | Auswahl und Spezifikation der Transportmittel

Hinsichtlich der Transportmittel, die im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet werden, wurde in Kapitel 2.4.2 eine Eingrenzung auf LKW, Bahn und Binnenschiff vorgenommen. In diesem Abschnitt werden die zu untersuchenden Transportmittel, Ladungsträger (z. B. Container) und Ladehilfsmittel (z. B. *R-RAK-System*) für die Quantifizierung der Kosten und Umweltauswirkungen spezifiziert.

5.2.1 LKW

Der RoRo-Transport von Fertigfahrzeugen im Straßenverkehr erfolgt mittels Gliederzügen, die sowohl mit der Zugmaschine als auch mit dem Anhänger Fahrzeuge befördern. Für den Transportmittelvergleich wird ein marktüblicher RoRo-LKW herangezogen (z. B. *Kässbohrer metago pro*).

Beim Containertransport wird der Transport von Sattelzugmaschinen mit Containerchassis durchgeführt. Als Ladungsträger werden bei dieser Untersuchung 40-Fuß- und 40-Fuß-High-Cube-Container sowie das Spezialbehältnis *VUCAFRAME* im Rahmen betrachtet. Im Container können die Fahrzeuge mit dem *Cronos Car Rack*, dem *R-RAK* von *Trans-Rak International* oder ohne Ladehilfsmittel transportiert werden. Die beschriebenen Ladungsträger und Ladehilfsmittel werden beim Bahn- und Binnenschifftransport analog zum Straßenverkehr eingesetzt.

5.2.2 Bahn

Für den Transport von Fertigfahrzeugen mit der Bahn wird in weiterer Folge als Referenzlokomotive die von Siemens entwickelte *Vectron* mit einer Länge von 18,98 m angenommen (vgl. Siemens Mobility 2015). Die max. zulässige Gesamtzuglänge wird mit 600 m berechnet, da diese im europäischen Schienenverkehr oftmals durch infrastrukturelle Einschränkungen vorgegeben ist (vgl. Plewa 2013, S. 17). Zudem kann dadurch auch die benötigte Bremsdistanz von 750 m eingehalten werden (vgl. Janic 2014, S. 128).

Für diese Studie werden ausgewählte Bahnwaggons des Hersteller Greenbrier betrachtet, die sowohl bei *BLG AUTORAIL* als auch bei *DB Schenker* zum Einsatz kommen. Beim Containertransport werden zweiachsige Tragwagen für die Berechnungen herangezogen. Diese sind von den Abmessungen so dimensioniert, dass jeweils ein 40-Fuß-Container pro Waggon transportiert werden kann. Die wichtigsten technischen Spezifikationen der ausgewählten Waggons sind in der nachfolgenden Tabelle 4 angeführt.

Dimensionen der RoRo-Waggons					
Waggontyp	Name	Länge über Puffer [m]	Ladelänge untere/obere Ebene [m]	Ladehöhe untere Ebene [m]	Ladehöhe obere Ebene (G1/G2) [m]
offener einstöckiger Flachwagen	Laaers 810 (obere Ebene abgesenkt)	31,0	30,6 / -	-	2,8 / 3,2
offener Doppelstockwagen	Laaers 810	31,0	30,1 / 30,6	1,8	1,8 / 2,2
					1,4 / 1,8
geschlossener Doppelstockwagen	Hcceerrs 330.1	54,0	52,5 / 52,7	1,8	- / 1,9

Tabelle 4: Dimensionen von RoRo-Waggons (eigene Tabelle in Anlehnung an The Greenbrier Companies 2015; BLG AUTORAIL 2015b; DB Schenker 2015)

5.2.3 Binnenschiff

Für die Wasserstraße werden Binnenschiffe von *Klasse IV* bis *Klasse VI* analysiert. Dadurch werden die Längen der zu untersuchenden Binnenschiffe von 85,00 m bis 135,00 m und die Breiten von 9,50 m bis 16,84 m begrenzt. Beim Containertransport kann von zwei bis vier bzw. beim RoRo-Transport von zwei bis sechs Schiffsdecks ausgegangen werden. Basis der weiteren Berechnungen ist das im Rahmen eines Forschungsprojekts entwickelte Binnenschiff *NEWS* der *Klasse V* (siehe Abbildung 27). Dieses wurde sowohl als RoRo- als auch als Container-Schiff konzipiert, wodurch es sich für einen Vergleich der unterschiedlichen Transportverfahren bestmöglich eignet. Um auch Aussagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit von Schiffen der *Klasse IV* und *VI* machen zu können, wurde das Binnenschiff anhand von Szenarien entsprechend adaptiert. Dieser Vorgang wurde in einem Expertengespräch mit dem Schiffahrtstechniker Herrn Anzböck (persönliche Korrespondenz, Ziviltechnikerkanzlei Anzböck, Wien, 24.11.2015) hinsichtlich Plausibilität geprüft.

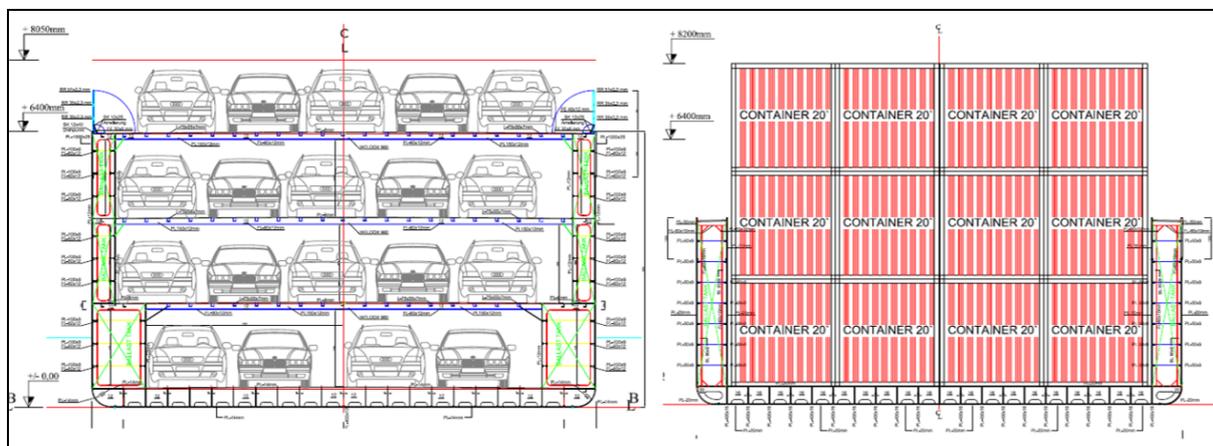


Abbildung 27: Querschnitt Binnenschiff *NEWS*: RoRo (links) und Container (rechts) (Anzböck 2015a, S. 64 und 2015b, S. 48)

5.3 Schritt Nr. 3 | Definition relationsspezifischer Anforderungen u. Restriktionen

Nach Auswahl des Transportguts und -mittels werden im dritten Schritt relationsspezifische Anforderungen und Restriktionen definiert, die signifikanten Einfluss auf die ökologischen und ökonomischen Kenngrößen haben und daher in weiterer Folge in den Berechnungen berücksichtigt werden. Dabei wird nicht nur auf die Quelle und Senke, an der die Be- und Entladung durchgeführt wird, sondern auch auf die Transportstrecke eingegangen.

Bei Verwendung von RoRo-LKWs werden an Quelle und Senke keine speziellen Anforderungen an die Infrastruktur gegeben. Einzig ein ebener und fester Untergrund muss für die sichere Be- und Entladung vorhanden sein (vgl. ECG 2013, S. 11). Als Restriktion hinsichtlich der Transportstrecke gilt im Straßenverkehr die Durchfahrtshöhe. Diese kann beispielsweise aufgrund von niedrigen Brücken geringer ausfallen als die gesetzlich erlaubte max. Fahrzeughöhe und somit Auswirkungen auf den Ladefaktor haben.

Für die Be- und Entladung von RoRo-Bahnwaggonen sind neben einem Gleisanschluss mobile bzw. fest installierte Verladerampen (ein- bzw. zweistöckig) an Quelle und Senke erforderlich. Die wichtigsten Restriktionen hinsichtlich der Transportstrecke sind die max. Gesamtzuglängen und der Querschnitt des Zuges. Die Gesamtzuglängen im definierten geographischen Untersuchungsraum darf inkl. Traktion max. 740 m betragen. Auf zahlreichen Relationen sind jedoch nur Gesamtzuglängen von 600 m möglich. Bezüglich des max. Querschnitts wird zwischen dem Lichtraumprofil G1 und G2 unterschieden. Bei Zugstrecken mit dem kleineren Lichtraumprofil G1 können größere Bahnwaggonen wie der *Greenbrier HCCRRSS* nicht zum Einsatz kommen.

Bei der Binnenschifffahrt wird für die Be- und Entladung eine RoRo-Rampe benötigt. Diese ist an vielen Häfen nicht vorhanden, wodurch die Wasserstraße für den Transport nicht genutzt werden kann bzw. weiter entfernte Häfen, im Vor- bzw. Nachlauf mittels LKW angefahren werden müssen. Beim Wasserstraßentransport resultiert in Abhängigkeit des zu erwartenden Pegelstandes der Wasserstraße (Hoch- bzw. Niedrigwasser), der Brückendurchfahrtshöhen und des nutzlastabhängigen Tiefgangs des Schiffes eine max. Zuladungshöhe. Diese beeinflusst die Anzahl der RoRo-Schiffsdecks bzw. Containerlagen und hat somit signifikanten Einfluss auf den Ladefaktor. Des Weiteren beeinflusst die Restriktion der Wasserstraßenklasse die max. Binnenschiffsdimensionen.

Für den LoLo-Fahrzeugtransport wird an Quelle und Senke Fördertechnik für Container (z. B. Reach-Stacker oder Portalkran) benötigt. Eine Auslieferung an Privatkunden bzw. Autohäusern ist somit in den meisten Fällen nicht möglich.

5.4 Schritt Nr. 4 | Berechnung des fahrzeugspezifischen Ladefaktors

Die Leistungsfähigkeit, der Bedarf und die Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Transportmittel werden u. a. durch die Transportkapazität bestimmt (vgl. Gudehus 2012, S. 848). Diese ist von der Auswahl des Transportmittels, der Dimensionierung des Ladeguts und -raums sowie von den vorgeschriebenen Sicherheitsabständen zwischen den Fahrzeugen abhängig. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Berechnungsweise für den RoRo- und LoLo-Transport bei LKW, Bahn und Binnenschiff beschrieben.

5.4.1 RoRo-LKW

Bei Fahrzeugtransporten auf der Straße variiert die Transportkapazität je nach Fahrzeugsegment zwischen sieben und elf je LKW (vgl. Klug 2010, S. 435). Bei besonders kleinen Fahrzeugen (z. B. Aixam City S) können sogar bis zu 14 Fahrzeuge geladen werden (Johannes Hödlmayr, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 13.01.2015). Im Qualitätshandbuch der ECG sind die Mindestabstände zwischen den Fahrzeugen für den Transport festgelegt. Demnach müssen zwischen den Fahrzeugen sowie zwischen dem Fahrzeugdach und der oberen Ladeebene min. 10 cm Abstand verbleiben. Zwischen einem Fahrzeug auf dem Motorwagen und einem anderen auf dem Anhänger sollte der Abstand sogar min. 20 cm betragen (vgl. ECG 2013, S. 10–26).

Trotz der ausgearbeiteten Richtlinien der ECG behalten sich die Automobilhersteller das Recht vor, strengere Regelungen für den Transport zu verlangen (z. B. größere Sicherheitsabstände). Um die maximale Transportmenge je nach zu transportierendem Fahrzeug und LKW bestimmen zu können und um das Risiko von Transportschäden zu minimieren, werden vor dem erstmaligen Transport Probeverladungen beim OEM durchgeführt. Die vom OEM zugelassene Transportkapazität kann je nach RoRo-LKW unterschiedlich ausfallen. Beispielsweise hat eine Probeverladung mit *Mercedes CLS* Fahrzeugen (Baureihe 218) ergeben, dass mit einem *Rolfo Pegasus 4/3C* maximal sechs und mit einem *Eurolohr 3.53 WXS* bis zu acht Fahrzeuge transportiert werden dürfen (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 13.10.2015). Aufgrund der Tatsache, dass das Ladegut, der RoRo-LKW und die spezifischen Vorgaben des OEMs Einfluss auf die Transportkapazität haben, kann diesbezüglich kein allgemeingültiger Wert angegeben werden. Um dennoch die Vergleichbarkeit mit den Transportmitteln Bahn und Binnenschiff herstellen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit ein durchschnittlicher Ladefaktor je Fahrzeugsegment für den Straßentransport ermittelt (siehe Tabelle 5).

Transportkapazität RoRo-LKW	
Fahrzeugsegment	max. Beladung
Minis	11
Kleinwagen	10
Kompaktklasse	9
Mittelklasse	8
Obere Mittelklasse	7
Oberklasse	6
SUV	7
Geländewagen	5
Sportwagen	9
Mini Vans	7
Großraum Vans	6

Tabelle 5: Durchschnittliche Transportkapazität je RoRo-LKW

Die angeführten Werte basieren auf den in Kapitel 5.1 definierten Fahrzeugsegmenten und wurden empirisch erhoben sowie im Rahmen eines Expertengesprächs mit dem Transportleiter der *Hödlmayr International AG* hinsichtlich Plausibilität geprüft (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 15.04.2015).

5.4.2 RoRo-Bahn

Bei der automobilen Distributionslogistik auf der Schiene kommen vorrangig Ganzzugsverkehre zum Einsatz. Zur Bestimmung der maximalen Anzahl Bahnwaggons werden Angaben hinsichtlich der zulässigen Gesamtzug-, Lokomotiven- und Waggonlänge benötigt. Wird von der max. zulässigen Gesamtzuglänge die Länge der Lokomotive subtrahiert, so erhält man jene Länge, die für die Waggons verbleibt. Bei einer im Güterverkehr üblichen max. zulässigen Gesamtzuglänge von 600 m entspricht dies nach Abzug von 18,98 m für eine *Siemens Vectron* Lokomotive beispielsweise 581,02 m.

Die Berechnung der max. Waggonanzahl wird mithilfe dieser Angaben wie folgt durchgeführt:

$$N_{Waggon_Zug} = \left\lfloor \frac{L_{Zug\ max.} - L_{Lok}}{L_{Waggon}} \right\rfloor$$

$$N_{Waggon_Zug} \in \mathbb{N}$$

mit

N_{Waggon_Zug} ... Anzahl Waggon pro Ganzzug [Stk.]

$L_{Zug\ max.}$... max. Gesamtzuglänge [m]

L_{Lok} ... Länge einer Lok (Länge über Puffer) [m]

L_{Waggon} ... Länge eines Waggon (Länge über Puffer) [m]

Formel 1: Berechnung der max. Anzahl Waggon eines Ganzzuges

Unter den beschriebenen Rahmenbedingungen können beim Einsatz von offenen bzw. geschlossenen Doppelstockwaggon der Firma *Greenbrier* je nach Bauweise 10 bzw. 18 Waggon eingesetzt werden. Bei Erhöhung der max. Gesamtzuglänge auf 740 m kann die Anzahl je nach Waggon typ um drei bis fünf zusätzliche Waggon gesteigert werden (siehe Tabelle 6).

Max. Anzahl Waggon bei Ganzzugverkehr			
Waggon typ	Bezeichnung	Gesamtzuglänge: 600 m	Gesamtzuglänge: 740 m
Offener Doppelstockwagen	Laaers 810	18	23
Geschlossener Doppelstockwagen	Hcceerrs 330.1	10	13

Tabelle 6: Anzahl Waggon bei Ganzzugverkehr

Die von der ECG definierten Mindestabstände für den Transport von Fahrzeugen mit der Bahn sehen vor, dass zwischen den Stoßstangen von Fahrzeugen 10 cm Sicherheitsabstand (SA_{zw}) und zwischen Fahrzeugdach und oberer Ladeebene 8 cm (SA_{ob}) verbleiben müssen (siehe Abbildung 28). Hinsichtlich der Sicherheitsabstände vorne (SA_{vo}) und hinten (SA_{hi}) bei offenen Bahnwaggon gibt es keine näheren Vorgaben. Bei geschlossenen Waggon sind zwischen dem Aufbau und der Stoßstange (SA_{vo} und SA_{hi}) jeweils 15 cm vorzuhalten (vgl. ECG 2013, S. 16–17).

In der nachfolgenden Abbildung 28 sind die Sicherheitsabstände für einen offenen doppelstöckigen Bahnwaggon eingezeichnet.

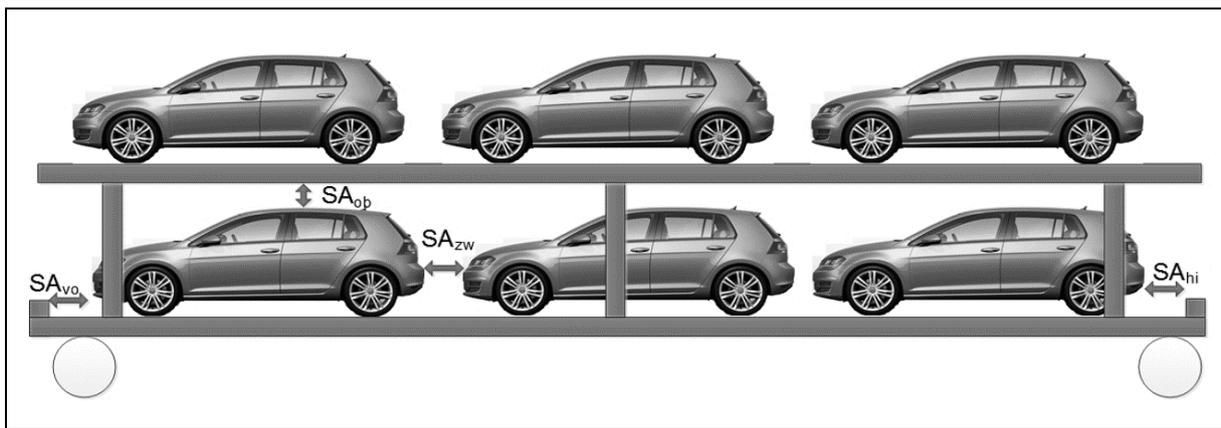


Abbildung 28: Sicherheitsabstände bei der Beladung von PKWs auf Bahnwaggons

Aus den beschriebenen Vorgaben lässt sich zur Berechnung der max. Transportkapazität je Ladeebene eines Bahnwaggons folgende Formel herleiten:

$$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}} = \frac{L_{\text{Ladeebene}} - SA_{vo} - SA_{hi} - SA_{zw} * (N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}} - 1)}{\overline{L_{\text{Fahrzeug}}}}$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}} \in \mathbb{N}$$

mit

$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}}$... Anzahl Fahrzeuge pro Waggonebene [Stk.]

$L_{\text{Ladeebene}}$... Länge der Ladeebene [m]

SA_{vo} ... Sicherheitsabstand zwischen Waggon und Stoßstange vorne [m]

SA_{zw} ... Sicherheitsabstand zwischen den Stoßstangen der Fahrzeuge [m]

SA_{hi} ... Sicherheitsabstand zwischen Waggon und Stoßstange hinten [m]

$\overline{L_{\text{Fahrzeug}}}$... durchschnittliche Fahrzeuglänge [m]

Formel 2: Herleitung Ladekapazität pro Waggonebene

Durch Umformen von Formel 2 erhält man die max. Anzahl Fahrzeuge je Ebene und in weiterer Folge die Gesamtanzahl für einen Bahnwaggon (siehe Formel 3).

$$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}} = \left\lfloor \frac{L_{\text{Ladeebene}} - SA_{vo} - SA_{hi} - SA_{zw}}{\overline{L_{\text{Fahrzeug}}} + SA_{zw}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Waggon}} = (N_{\text{Fahrzeuge_Ebene_unten}} + N_{\text{Fahrzeuge_Ebene_oben}})$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene}}, N_{\text{Fahrzeuge_Waggon}} \in \mathbb{N}$$

mit

$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene_unten}}$... Anzahl Fahrzeuge auf der unteren Ladeebene [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_Ebene_oben}}$... Anzahl Fahrzeuge auf der oberen Ladeebene [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_Waggon}}$... Anzahl Fahrzeuge pro Waggon [Stk.]

Formel 3: Berechnung Ladekapazität pro Waggonenebene bzw. Waggon

Neben den Restriktionen hinsichtlich der max. Längen sind auch die max. Ladehöhen der Waggonenebenen und das vorgegebene Lichtraumprofil auf der Transportrelation zu berücksichtigen (siehe Kapitel 2.2.3 und 2.3.4). Beispielsweise können mit dem Bahnwaggon *Laaers 810* – je nach Position der verstellbaren Ladeebenen – auf der unteren Ebene Fahrzeuge mit einer Höhe bis max. 1,97 m transportiert werden. Auf der oberen Ladeebene verbleibt dann eine Ladehöhe von 1,36 m (G1 Profil) bzw. 1,78 m (G2 Profil). Durch die Reduktion der unteren Ladehöhe auf 1,81 m kann die obere auf 1,79 m (G1 Profil) bzw. 2,21 m (G2 Profil) angehoben werden (vgl. BLG AUTORAIL 2015c).

Daraus lässt sich ableiten, dass der doppelstöckige Fahrzeugtransport mit einer jeweiligen max. Fahrzeughöhe von ca. 1,80 m (G1 Profil) möglich ist. Höhere Fahrzeuge müssen mittels Flachwagen transportiert werden (z. B. *Mercedes G-Klasse*). In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die Transportkapazitäten je Bahnwaggon in Abhängigkeit des definierten Fahrzeugsegments (siehe Kapitel 5.1) für das Lichtraumprofil G1 aufgeführt. Die Berechnungen basieren dabei auf der Formel 3.

Transportkapazität je RoRo-Waggon				
Fahrzeugsegment	Länge [m]	offener einstöckiger Flachwagen (Laaers 810 – obere Ebene abgesenkt)	offener Doppelstockwagen (Laaers 810)	geschlossener Doppelstockwagen (Hcceerrs 330.1)
Minis	3,415	8	16	28
Kleinwagen	3,955	7	14	24
Kompaktklasse	4,320	6	12	22
Mittelklasse	4,724	6	12	20
Obere Mittelklasse	4,901	6	11	20
Oberklasse	5,035	5	10	20
SUV	4,376	6	12	22
Geländewagen	4,597	6	12	22
Sportwagen	4,376	6	12	22
Mini Vans	4,321	6	12	22
Großraum Vans	4,710	6	12	20

Tabelle 7: Transportkapazität je RoRo-Waggon

Zur Ermittlung der Transportkapazität für einen Ganzzug ist die Kapazität je Bahnwaggon (siehe Formel 3) mit der max. Anzahl Waggon (siehe Formel 1) zu multiplizieren. Die diesbezügliche Rechenoperation ist in der nachfolgenden Formel 4 angegeben.

$$N_{\text{Fahrzeuge_Zug}} = N_{\text{Fahrzeuge_Waggon}} * N_{\text{Waggon_Zug}}$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Zug}} \in \mathbb{N}$$

mit

$$N_{\text{Fahrzeuge_Zug}} \dots \text{Anzahl Fahrzeuge pro Ganzzug [Stk.]}$$

Formel 4: Berechnung der Ladekapazität pro Ganzzug

Bei einer max. Gesamtzuglänge von 600 m und dem Einsatz von offenen Doppelstockwaggon können in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments zwischen 180 und 288 PKWs transportiert werden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Bahnwaggon hinsichtlich der Transportkapazität ist in Tabelle 11 angeführt.

5.4.3 RoRo-Binnenschiff

Bei der Beladung eines Binnenschiffes müssen zwischen den Fahrzeugen, von Stoßstange zu Stoßstange, min. 15 cm und von Spiegel zu Spiegel min. 10 cm an Sicherheitsabstand eingehalten werden. Des Weiteren müssen zu den Schiffswänden beifahrerseitig 10 cm, fahrerseitig 60 cm und vorne und hinten zur Stoßstange 15 cm vorgesehen werden (vgl. ECG 2013, S. 26).

In der nachfolgenden Abbildung 29 sind die Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen eingezeichnet.

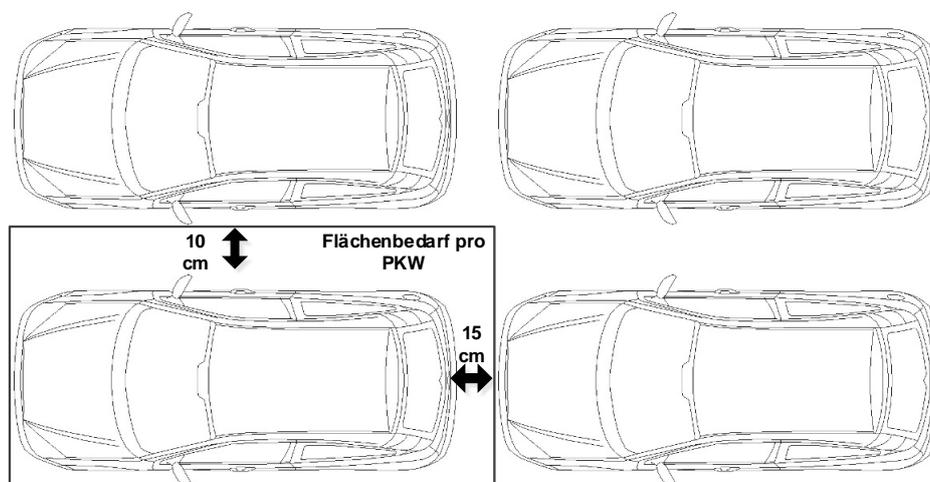


Abbildung 29: PKW-Flächenbedarf auf einem RoRo-Binnenschiff

Zur Verallgemeinerung der Ladekapazität von Binnenschiffen in Abhängigkeit der Abmessungen und Wasserstraßenklassen wurden im Rahmen dieser Arbeit Annahmen getroffen. Diese basieren auf Konstruktionszeichnungen des RoRo-Binnenschiffes *NEWS* und wurden mit dem Schifffahrtstechniker Herrn Richard Anzböck hinsichtlich Plausibilität diskutiert (persönliche Korrespondenz, Ziviltechnikerkanzlei Anzböck, Wien, 24.11.2015).

- Annahmen verfügbare Laderaumlänge

Von der Gesamtschiffslänge steht nur ein Teil für den Laderaum zur Verfügung, da sowohl im Bug als auch im Heck des Schiffes Platz für beispielsweise Maschinenraum oder Kajüten vorgehalten werden muss. Des Weiteren ist ein Binnenschiff aufgrund der angestrebten Optimierung der Hydrodynamik nicht quaderförmig, wodurch zusätzlich Ladelänge verloren geht.

Um auf Basis der genannten Anforderungen von der Gesamtschiffslänge auf die verfügbare Laderaumlänge von Binnenschiffen der Wasserstraßenklassen IV und V schließen zu können, sind für die unteren zwei Schiffsdecks 28,5 m und ab dem dritten Schiffsdeck 26,5 zu subtrahieren. Bei Binnenschiffen der Wasserstraßenklasse VI (z. B. Jowi-Klasse) verbleibt aufgrund der größeren Schiffsbreite mehr Raum wodurch auf dem obersten Schiffsdeck nur 11,5 m und auf allen weiteren 13,5 m für den Laderaum nicht zur Verfügung stehen.

- Annahmen verfügbare Ladebreiten

Die Laderaumbreite lässt sich über die Binnenschiffbreite abzüglich der Wandstärken bestimmen. Auf der untersten Ebene ist analog zu den Konstruktionszeichnungen des *NEWS*-Schiffes jeweils 1,2 m pro Seite abzuziehen. Auf der obersten Ebene ist die Ladebreite jeweils um 0,25 m zu reduzieren, da hier nur die Breite der Schiffs-Reling einzukalkulieren ist. Bei den Schiffsdecks dazwischen ist die Ladebreite um 0,5 m pro Seite zu reduzieren.

- Annahmen Rampen

Für die zwischen den Fahrzeugdecks benötigten Rampen, die ggf. nicht für Fahrzeuge zur Verfügung stehen, ist ein Flächenverlust einzukalkulieren. Dieser wird analog zum RoRo-Binnenschiff *NEWS* mit einer Länge von 12,3 m und einer Breite von 4,0 m angenommen (vgl. Anzböck 2015b, S. 47). Der Flächenverlust für die Rampen ist auf all jenen Ebenen einzurechnen, auf der das Binnenschiff nicht vom Hafen aus direkt befahren werden kann.

In der nachfolgenden Abbildung 30 ist der aus den beschriebenen Annahmen resultierende Gesamtladeraum schematisch eingezeichnet (schwarzes Rechteck). Jene Flächen, die nicht für die Fahrzeuge zur Verfügung stehen, sind ebenfalls dargestellt (rote Flächen). Für die mathematische Modellierung der Ladekapazität wurden die Ladeflächen in drei Bereiche eingeteilt (Ladeflächen 1 – 3).

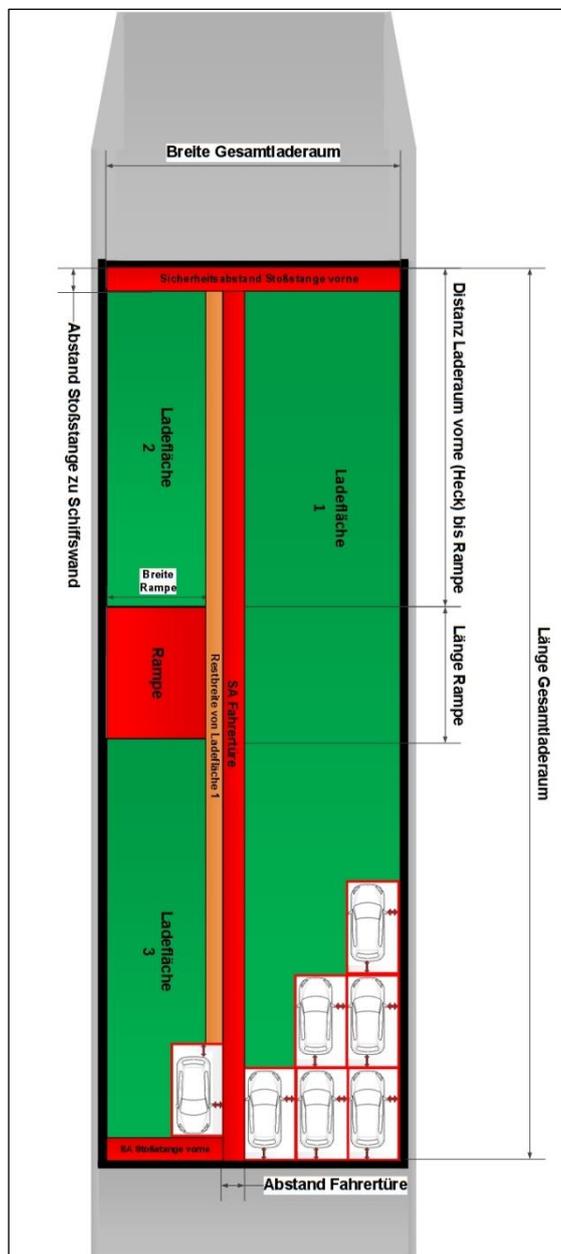


Abbildung 30: Schematische Darstellung der verfügbaren Ladeflächen auf einem Binnenschiff
 Basierend auf den genannten Annahmen und der daraus abgeleiteten Darstellung der Ladeflächen ist es möglich, die Berechnung der Transportkapazität mathematisch zu modellieren.

Die Transportkapazität von Ladefläche 1 ist in der nachfolgenden Rechenoperation angegeben:

$$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF1}} = \left\lfloor \frac{L_{\text{LF_Gesamt}} - SA_{\text{vo}}}{L_{\text{Fahrzeug}} + SA_{\text{hi}}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF1}} = \left\lfloor \frac{B_{\text{LF_Gesamt}} - B_{\text{Rampe}} - SA_{\text{Ft}}}{\overline{B_{\text{Fahrzeug}}} + SA_{\text{Ss}}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_LF1}} = N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF1}} * N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF1}}$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF1}}, N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF1}}, N_{\text{Fahrzeuge_LF1}} \in \mathbb{N}$$

mit

$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF1}}$... Anzahl Fahrzeuge in der Länge auf Ladefläche 1 [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF1}}$... Anzahl Fahrzeuge in der Breite auf Ladefläche 1 [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_LF1}}$... Anzahl Fahrzeuge auf Ladefläche 1 [Stk.]

$L_{\text{LF_Gesamt}}$... Länge des Gesamtladeraums [m]

$B_{\text{LF_Gesamt}}$... Breite des Gesamtladeraums [m]

B_{Rampe} ... Breite der Rampe [m]

SA_{Ft} ... Sicherheitsabstand auf der Seite der Fahrertüre zur Schiffswand [m]

SA_{Ss} ... Sicherheitsabstand zw. eingeklappten Seitenspiegeln der Fahrzeuge [m]

$\overline{B_{\text{Fahrzeug}}}$... Durchschnittliche Fahrzeugbreite [m]

Formel 5: Berechnung der Transportkapazität auf Ladefläche 1

Bei Schiffsdecks ohne Rampe wird die Berechnung mit $B_{\text{Rampe}} = 0$ durchgeführt. Die Berechnung für die Ladeflächen 2 und 3 (siehe Formel 7) erfolgt analog zur Ladefläche 1, jedoch ist die nicht genützte Restbreite aus Ladefläche 1 und die Länge und Breite in Abhängigkeit der Rampenposition zu bestimmen und vorab zu berechnen.

$$B_{\text{Rest_LF 1}} = (B_{\text{LF_Gesamt}} - B_{\text{Rampe}} - SA_{\text{Ft}}) - (N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF1}} * (\overline{B_{\text{Fahrzeug}}} + SA_{\text{Ss}}))$$

mit

$B_{\text{Rest_LF1}}$... nicht genützte Breite von Ladefläche 1 (Restbreite) [m]

Formel 6: Berechnung der Restbreite von Ladefläche 1

$$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF2}} = \left\lfloor \frac{L_{\text{Rampe Heck}} - SA_{vo}}{\overline{L}_{\text{Fahrzeug}} + SA_{hi}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF3}} = \left\lfloor \frac{L_{\text{LF_Gesamt}} - L_{\text{Rampe Heck}} - L_{\text{Rampe}} - SA_{vo}}{\overline{L}_{\text{Fahrzeug}} + SA_{hi}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF2}} = \left\lfloor \frac{B_{\text{LF_Gesamt}} - B_{\text{Rampe}} - SA_{Ft} + B_{\text{Rest_LF1}}}{\overline{B}_{\text{Fahrzeug}} + SA_{Ss}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_LF2}} = N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF2}} * N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF2}}$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_LF3}} = N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF3}} * N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF2}}$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Länge}}, N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF3}}, N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF2}} \in \mathbb{N}$$

mit

$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF2}}$... Anzahl Fahrzeuge in der Länge auf der Ladefläche 2 [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_Länge LF3}}$... Anzahl Fahrzeuge in der Länge auf der Ladefläche 3 [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_Breite LF2}}$... Anzahl Fahrzeuge in der Breite auf der Ladefläche 2 & 3 [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_LF2}}$... Anzahl Fahrzeuge auf der Ladefläche 2 [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_LF3}}$... Anzahl Fahrzeuge auf Ladefläche 3 [Stk.]

$L_{\text{Rampe Heck}}$... Abstand vom Gesamtladeraum vorne (Heck) bis zur Rampe [m]

L_{Rampe} ... Länge der Rampe [m]

Formel 7: Berechnung der Transportkapazität auf Ladefläche 2 und 3

Mithilfe der in Formel 5 und Formel 7 ermittelten Transportkapazitäten der Teilbereiche ist die Gesamtkapazität je Schiffsdeck und je Binnenschiff zu ermitteln:

$$N_{\text{Fahrzeuge_Schiffsdeck}} = N_{\text{Fahrzeuge_LF1}} + N_{\text{Fahrzeuge_LF2}} + N_{\text{Fahrzeuge_LF3}}$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_BiSchi}} = \sum_{i=1}^{i=n} N_{\text{Fahrzeuge_Schiffsdeck}}$$

mit

$N_{\text{Fahrzeuge_Schiffsdeck}}$... Anzahl Fahrzeuge pro Schiffsdeck [Stk.]

$N_{\text{Fahrzeuge_BiSchi}}$... Anzahl Fahrzeuge pro Binnenschiff [Stk.]

Formel 8: Berechnung der Transportkapazität pro Schiffdeck und Binnenschiff

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Berechnungen angeführt.

Dimensionen der Binnenschiffen																
Binnenschiffstyp	WSK IV (NEWS verkleinert)			WSK V (NEWS verkleinert)			WSK V (NEWS)			Jowi-Klasse (NEWS vergrößert)						
Länge [m]	85	110	110	110	110	110	110	110	110	135	135	135	135			
Breite [m]	9,50	9,50	9,50	9,50	11,40	11,40	11,40	11,40	16,84	16,84	16,84	16,84	16,84			
Anzahl Decks [#]	3	3	3	3	4	4	4	4	6	6	6	6	6			
Beschreibung:	Flächenverlust am untersten Deck aufgrund der Zwischenrampe. Deck 2 und 3 können vom Hafen direkt befahren werden.			Flächenverlust am untersten Deck aufgrund der Zwischenrampe. Deck 2 und 3 können vom Hafen direkt befahren werden.			Flächenverlust auf Deck 1, 2 und 4 aufgrund der Zwischenrampe. Deck 3 kann direkt befahren werden. Auf der untersten Ebene ist die Ladefläche aufgrund des Ballasttanks schmaler.			Flächenverlust auf Deck 1, 2, 3, 5, 6 aufgrund der Zwischenrampe. Deck 4 kann direkt befahren werden.						
Dimensionen der Binnenschiffdecks	Deck 1	Deck 2	Deck 3	Deck 1	Deck 2	Deck 3	Deck 1	Deck 2	Deck 3	Deck 4	Deck 1	Deck 2	Deck 3	Deck 4	Deck 5	Deck 6
Gesamtlänge Laderaum [m]	56,5	56,5	58,5	81,5	81,5	83,5	81,5	81,5	83,5	83,5	121,5	121,5	121,5	121,5	121,5	123,5
Gesamtbreite Laderaum [m]	8,5	8,5	9	8,5	8,5	9	9,0	10,4	10,4	10,9	15,84	15,84	15,84	15,84	15,84	16,34
Länge der Rampe [m]	12,33	0	0	12,33	0	0	12,33	12,33	0	12,33	12,33	12,33	12,33	0	12,33	12,33
Breite der Rampe [m]	4	0	0	4	0	0	4	4	0	4	4	4	4	0	4	4
Distanz Laderaum vorne bis Rampe [m]	34	0	0	34	0	0	34	22	0	34	34	22	34	0	22	34
Transportkapazität der Binnenschiffe																
Fahrzeugsegment	Kapazität mit 1 Deck	Kapazität mit 2 Decks	Kapazität mit 3 Decks	Kapazität mit 1 Deck	Kapazität mit 2 Decks	Kapazität mit 3 Decks	Kapazität mit 1 Deck	Kapazität mit 2 Decks	Kapazität mit 3 Decks	Kapazität mit 4 Decks	Kapazität mit 1 Deck	Kapazität mit 2 Decks	Kapazität mit 3 Decks	Kapazität mit 4 Decks	Kapazität mit 5 Decks	Kapazität mit 6 Decks
Minis	52	112	176	80	168	260	80	184	299	406	264	528	792	1064	1328	1592
Kleinwagen	46	98	154	70	146	226	70	159	259	353	226	452	678	910	1136	1368
Kompaktklasse	42	90	142	64	136	208	64	146	236	320	204	408	612	828	1032	1242
Mittelklasse	38	82	126	58	122	190	58	132	217	294	162	324	486	654	816	1008
Oberer Mittelklasse	32	76	120	52	116	180	56	114	178	236	160	322	482	650	812	995
Oberklasse	24	54	98	39	84	148	54	110	174	232	155	310	465	626	781	936
SUV	42	90	138	62	130	202	62	141	231	315	199	398	597	805	1004	1214
Geländewagen	38	82	130	59	127	195	62	122	190	252	169	338	507	682	851	1022
Sportwagen	42	90	138	62	130	202	62	141	231	315	176	352	528	710	886	1096
Mini Vans	42	90	142	64	136	208	64	146	236	320	204	408	612	828	1032	1242
Großraum Vans	35	79	127	55	119	187	58	116	184	244	162	324	486	654	816	983

Tabelle 8: Transportkapazität der Binnenschiffe

5.4.4 Containerisierter Fahrzeugtransport

Für Fahrzeugtransporte in Containern werden in der vorliegenden Arbeit 40-Fuß- und 40-Fuß-High-Cube-Container sowie das Spezialbehältnis *VUCAFRAME* im Detail betrachtet. Bei 40-Fuß-High-Cube-Containern wird zudem unterschieden, ob die Fahrzeuge mit dem *Cronos Car Rack*, dem *R-RAK* von *Trans-Rak International* oder ohne Spezialequipment transportiert werden.

Die Sicherheitsabstände für den Fahrzeugtransport in Containern sind im Qualitätshandbuch der ECG nicht geregelt, wodurch in weiterer Folge 10 cm – sowohl zwischen den Fahrzeugen als auch zu den Containertüren – angenommen werden (vgl. ECG 2013, S. 1 ff.). Der Ladefaktor eines Containers wird wie folgt berechnet:

$$N_{\text{Fahrzeuge_Container}} = \left\lfloor \frac{L_{\text{Container}} - SA_{Co}}{L_{\text{Fahrzeug}} + SA_{Co}} \right\rfloor$$

$$N_{\text{Fahrzeuge_Container}} \in \mathbb{N}$$

mit

$N_{\text{Fahrzeuge_Container}}$... Anzahl Fahrzeuge pro Container [Stk.]

$L_{\text{Container}}$... Länge der Ladefläche im Container [m]

SA_{Co} ... Sicherheitsabstand jeweils vorne, hinten und zwischen den Fahrzeugen [m]

Formel 9: Berechnung der Ladekapazität bei Container-Transporten

Die Formel gilt gleichermaßen für den Transport mittels des *VUCAFRAME* Containerrahmens, jedoch ist dabei zusätzlich auf die Höhenrestriktion von 1,469 m zu achten. Aufgrund der niedrigen Bauweise kann der *VUCAFRAME* zweilagig auf LKW-Containerchassis bzw. auf Bahnwaggons transportiert werden (siehe Kapitel 2.3.6).

Die Ladekapazitäten bei Einsatz des *R-RAK*-Systems variieren je nach Fahrzeugabmessungen, weshalb zwecks Komplexitätsreduktion ein durchschnittlicher Ladefaktor ermittelt und mit der Herstellerfirma abgestimmt worden ist (Paul Donaldson, E-Mail-Korrespondenz, Trans-Rak International, 20.02.2015 und 23.02.2015). Beim Einsatz eines *Cronos Car Rack* ist die max. Anzahl der Fahrzeuge aufgrund der drei mechanisch verstellbaren Rampen auf ebenso viele Fahrzeuge begrenzt. Beim Transport von Fahrzeugen der oberen Mittelklasse können nur mehr zwei Fahrzeuge verladen werden (vgl. Cronos Group Limited 2014). In Tabelle 9 sind die ermittelten Ladekapazitäten je Fahrzeugsegment und Containertyp aufgelistet.

Anzahl Fahrzeuge pro Container				
Fahrzeugsegment	40' Container (Höhe: 2,59 m)	VUCAFRAME (Höhe: 1,54 m)	40' HC Cronos Car Rack (Höhe: 2,89 m)	40' HC R-Rak (Höhe: 2,89 m)
Minis	3	0	3	4
Kleinwagen	2	3	3	4
Kompaktklasse	2	2	3	4
Mittelklasse	2	2	3	4
Obere Mittelklasse	2	0	2	4
Oberklasse	2	2	2	4
SUV	2	0	3	4
Geländewagen	2	0	2	3
Sportwagen	2	2	3	4
Mini Vans	2	0	3	4
Großraum Vans	2	0	2	3

Tabelle 9: Ladekapazität Fahrzeuge in Containern

Die max. Ladekapazität pro Transportmittel ist neben der Anzahl der Fahrzeuge pro Container auch von der möglichen Anzahl der Containerlagen abhängig. Diese ist auf Basis der in Kapitel 5.2 beschriebenen Transportmitteln in der nachfolgenden Tabelle 10 dargestellt. Aufgrund des höheren Stapelfaktors des VUCAFRAMES im Vergleich zum ISO-Container ist dieser separat angeführt.

Ladekapazität Container je Transportmittel (40' Container und VUCAFRAME)						
LKW						
Länge [m]	Anzahl Anhänger	FEU pro Anhänger	Anzahl Lagen FEU	Lagen VUCAFR.	Anzahl 40'-Container	Anzahl VUCAFR.
16,5	1	1	1	2	1	2
Ganzzug mit zweiachsigen Tragwagen						
Länge [m]	Anzahl Waggons	FEU pro Waggon	Anzahl Lagen FEU	Lagen VUCAFR.	Anzahl 40'-Container	Anzahl VUCAFR.
600	42	1	1	2	42	84
Binnenschiff						
Kategorie	FEU pro Reihe	Anzahl Reihen	Anzahl Lagen FEU	Lagen VUCAFR.	Anzahl 40'-Container	Anzahl VUCAFR.
Europaschiff L/B: 85/9,5m	3	4	2	3	24	36
Großmotorschiff L/B: 110/9,5m	3	6	3	5	54	90
Großmotorschiff L/B: 110/11,4m	4	6	3	5	72	120
Jowi L/B: 135/16,84m	6	10	4	7	240	420

Tabelle 10: Ladekapazität Container je Transportmittel

5.4.5 Kapazitätsvergleich der Transportmittel und -verfahren

Die Transportkapazität spielt bei der Ermittlung von Kosten- und Umwelteinwirkungen eine zentrale Rolle. Der Vergleich zwischen LKW, Bahn und Binnenschiff hinsichtlich Transportkapazitäten ist in der nachfolgenden Tabelle 11 angeführt. Bei einem Gütertransport mit Containern können mit dem LKW nur ein 40-Fuß-Container, mit der Bahn 42 (Gesamtlängung 600 m) und mit dem Binnenschiff 72 (Wasserstraßenklasse V) transportiert werden. Daraus resultiert ein Verhältnis von 1:42 bzw. 1:72 beim Vergleich von LKW mit Bahn bzw. Binnenschiff. Wird derselbe Vergleich für den RoRo-Transport von Fahrzeugen durchgeführt, fällt das Verhältnis mit 1:24 bzw. 1:36 deutlich niedriger aus. Dies hat zur Folge, dass allgemeingültige Aussagen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Transportmittel LKW, Bahn und Binnenschiff für den RoRo-Transport keine Gültigkeit besitzen.

Werden die einzelnen Containerlösungen miteinander verglichen, erzielt der Transport mittels *VUCAFRAME* im Fahrzeugsegment der Kompaktklasse den höchsten Ladefaktor. In den weiteren Fahrzeugsegmenten, in denen die Höhenrestriktion des *VUCAFRAMES* nicht überschritten wird (Kompaktklasse, Mittelklasse, Oberklasse und Sportwagen), ist der Ladefaktor derselbe wie beim *R-RAK*-System. Dieses verfügt in den restlichen Segmenten (Minis, Obere Mittelklasse, SUV, Geländewagen, Mini und Großraum Vans) über den höchsten Ladefaktor. Der *Cronos Car Rack* erzielt in keiner Kategorie den Höchstwert.

Die Gegenüberstellung von Container- und RoRo-Transport auf der Straße zeigt, dass je nach Fahrzeugsegment im Container zwei bis sieben Fahrzeuge weniger transportiert werden können. Das entspricht einer Reduktion von 33 % bis 64 %.

Beim Bahntransport können im Fahrzeugsegment der Kompaktklasse mit dem *VUCAFRAME* ebenso viele Fahrzeuge wie mit RoRo-Bahnwaggons transportiert werden. Bei den anderen Fahrzeugsegmenten führt der Containertransport zu einer Reduktion des Ladefaktors von 16 % bis 42 %.

Nachdem beim Bahntransport der *VUCAFRAME* zumindest in einer Kategorie dieselbe Kapazität wie der RoRo-Transport erzielt, hat im Bereich der Binnenschifffahrt (Wasserstraßenklasse V, Binnenschiff *NEWS*) in vier Kategorien (Kompaktklasse, Obere Mittelklasse, Oberklasse und SUV) der containerisierte Transport den höchsten Ladefaktor. Beim Fahrzeugsegment der Oberklasse könnten mit dem *R-RAK*-System auf dem *NEWS*-Containerschiff um 24 % mehr transportiert werden als bei der RoRo-Variante.

Ladekapazität der Transportmittel																			
Transportgut		LKW				Bahn (Gesamtlänge 600 m)				Binnenschiff (Wasserstraßenklasse V)									
Fahrzeugsegment	Fahrzeuglänge [m]	RoRo	Container			RoRo	Container			RoRo	Container								
		z.B. Metago	40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack	R-Rak 40' HC	Laaers 810 1 Ebene	Laaers 810 2 Ebenen	Hceerrs 2 Ebenen	40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack	R-Rak 40' HC	MS Heilbronn	NEWS	40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack	R-Rak 40' HC
Minis	3,42	11	3	/	3	4	144	288	280	126	/	126	168	260	406	216	/	216	288
Kleinwagen	3,96	10	2	6	3	4	126	252	240	84	252	126	168	226	353	144	360	216	288
Kompaktklasse	4,32	9	2	4	3	4	108	216	220	84	168	126	168	208	320	144	240	216	288
Mittelklasse	4,72	8	2	4	3	4	108	216	200	84	168	126	168	190	294	144	240	216	288
Obere Mittelklasse	4,90	7	2	/	2	4	108	198	200	84	/	84	168	180	236	144	/	144	288
Oberklasse	5,04	6	2	4	2	4	90	180	200	84	168	84	168	148	232	144	240	144	288
SUV	4,38	7	2	/	3	4	108	216	220	84	/	126	168	202	315	144	/	216	288
Geländewagen	4,60	5	2	/	2	3	108	216	220	84	/	84	126	195	252	144	/	144	216
Sportwagen	4,38	9	2	4	3	4	108	216	220	84	168	126	168	202	315	144	240	216	288
Mini Vans	4,32	7	2	/	3	4	108	216	220	84	/	126	168	208	320	144	/	216	288
Großraum Vans	4,71	6	2	/	2	3	108	216	200	84	/	84	126	187	244	144	/	144	216

Tabelle 11: Ladekapazität der Transportmittel

5.5 Schritt Nr. 5 | Berechnung des spezifischen Gesamtgewichts

Das spezifische Gesamtgewicht hat signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch. Es setzt sich zusammen aus dem Leergewicht des Transportmittels, ggf. zum Einsatz kommenden Ladungsträgern und Ladehilfsmitteln sowie aus der nutzlastabhängigen Zuladung.

5.5.1 LKW

Die Energieverbräuche für die Leer- und Lastfahrt mittels LKW werden aus der Datenbank *HBEFA 3.2* entnommen (siehe Kapitel 5.6.1). Die angegebenen Werte beziehen sich auf ein Referenzfahrzeug mit einem Leergewicht von 15,1 t. Damit die gemessenen Energieverbrauchswerte auch für Transportkonfigurationen mit abweichenden Leergewichten (z. B. RoRo-Transport) anzuwenden sind, ist die Gewichtsdivergenz zu berücksichtigen.

Das Leergewicht einer Sattelzugmaschine ist u. a. von der Fahrzeugart und dem Fahrerhaus abhängig. Ein betriebsfertiger *Mercedes-Benz Axor* wiegt beispielsweise 6,5 t (vgl. Hoepke et al. 2013, S. 31), ein *Gooseneck* Containerchassis von *Fliegl Fahrzeugbau* (vgl. 2016) variiert zwischen 3,6 t und 5,7 t. Das Leergewicht eines 40- bzw. 45-Fuß-Containers beträgt mit 4,0 t und 4,8 t (vgl. Hafen Halle 2016). Wird das Gewicht der Zugmaschine, des 40-Fuß-Containers und des 4,6 t schweren Containerchassis summiert, ergibt dies das in *HBEFA 3.2* angegebene Referenzleergewicht für Nutzfahrzeuge von 15,1 t.

In nachfolgender Tabelle 12 sind die Leergewichte von Zugmaschine, Anhänger, Ladungsträger und Ladehilfsmittel einzeln und aggregiert zum jeweiligen Gesamtleergewicht von unterschiedlichen Transportkonfigurationen angeführt.

Leergewichte Transportkonfiguration LKW					
Zusammensetzung der Transportkonfiguration	40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack im 40' HC	R-Rak im 40-Fuß-HC	RoRo-LKW
Zugmaschine [t]	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50
Anhänger [t]	4,60	4,60	4,60	4,60	6,85
Container [t]	4,00	0,00	4,00	4,00	0,00
Spezialequipment [t]	0,00	4,00	2,85	0,54	4,45
Gesamtleergewicht [t]	15,10	15,10	17,95	15,64	17,80
Differenz zu HBEFA (15,1 t) [t]	0,00	0,00	2,85	0,54	2,70
Differenz zu HBEFA [%]	0%	0%	19%	4%	18%

Tabelle 12: Leergewichte Transportkonfiguration LKW

Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, dass das Gesamtleergewicht je nach Transportkonfiguration bis zu 19 % größer als das Referenz-Leergewicht sein kann, daher wird diese Differenz in weiterer Folge als zusätzliche Zuladung in die Energieverbrauchsrechnung einbezogen. Bei einem RoRo-LKW sind beispielsweise aufgrund des Gesamtleergewichts von 17,80 t auf das Referenz-Leergewicht 2,70 t Zuladung aufzuschlagen. Ebenso ist auch für den containerisierten Fahrzeugtransport mit Spezialequipment das Gesamtleergewicht zu kalkulieren. Beispielsweise fallen für den Transport mittels *Cronos Car Rack* zusätzliche 2,85 t Leergewicht an (vgl. Cronos Group Limited 2014). Bei dem *R-RAK*-System sind für den Transport von vier Fahrzeugen im Container zwei Sets mit insgesamt 0,54 t einzurechnen (Paul Donaldson, E-Mail-Korrespondenz, Trans-Rak International, 23.02.2015). Beim Einsatz des Containerrahmens *VUCAFRAME* kommt es zu keiner Gewichtsdiﬀerenz, da jeweils zwei Containerrahmen pro LKW transportiert werden und diese gleich schwer wie ein 40-Fuß-Container sind (vgl. UNIT 45 2015).

5.5.2 Bahn

Für die Energiebedarfsrechnung beim Bahntransport wird gemäß der zur Anwendung kommenden Berechnung (siehe Kapitel 5.6.3) das von der Lok gezogene Gesamtgewicht benötigt. Das spezifische Eigengewicht der Lok muss daher nicht ermittelt werden. Das gezogene Gesamtleergewicht setzt sich aus den Bahnwaggons (Container- oder RoRo-Waggons), ggf. erforderlichen Ladungsträgern (z. B. Container) und Ladehilfsmitteln (z. B. *R-RAK*-System) zusammen (siehe Tabelle 13).

Gesamtleergewicht von Bahnwaggons (inkl. Ladungsträger und Ladehilfsmittel)					
Transportart	Detailbeschreibung	Waggon [t]	Container [t]	Spezial-equipment [t]	Gesamt-leergewicht [t]
Container auf Tragwagen	40' HC auf Lgs 579 (zweiachsig)	11,40	4,00	0,00	15,40
Containerrahmen auf Tragwagen	2x <i>VUCAFRAME</i> auf Lgs 579 (zweiachsig)	11,40	0,00	4,00	15,40
Container & Spezial-equipment auf Tragwagen	<i>Cronos Car Rack</i> im 40' HC auf Lgs 579 (zweiachsig)	11,40	4,00	2,90	18,30
Container mit Spezialequipment auf Tragwagen	<i>R-Rak</i> im 40' HC auf Lgs 579 (zweiachsig)	11,40	4,00	0,54 (0,27 t je 2 Fahrzeuge)	15,90
Offener einstöckiger Flachwagen (RoRo)	Laaers 810 (obere Ebene abgesenkt)	38,00	0,00	0,0	38,00
RoRo offener Doppelstockwagen	Laaers 810	38,00	0,00	0,0	38,00
RoRo geschlossener Doppelstockwagen	Hcceerrs 330.1	65,10	0,00	0,0	65,10

Tabelle 13: Gesamtleergewicht von Bahnwaggons

Die in Tabelle 13 ausgewiesenen Werte sind noch mit der max. Anzahl Waggon zu multiplizieren, die von den infrastrukturellen Restriktionen abhängig ist (siehe Kapitel 5.3). Das Gesamtleergewicht der Transportkonfiguration ist noch mit dem Gewicht der Zuladung zu beaufschlagen, das sich aus dem Produkt aus dem Ladefaktor (siehe Tabelle 11) und dem spezifischen Fahrzeuggewicht (siehe Tabelle 3) zusammensetzt.

5.5.3 Binnenschiff

Für die Energiebedarfsrechnung bei Binnenschifftransporten wird die Tragfähigkeitsklasse des Schiffes (siehe Tabelle 18) und das Gesamtgewicht der Zuladung benötigt. Das Gewicht der Zuladung ist vom Ladefaktor der Fahrzeuge abhängig, der insbesondere in der Binnenschifffahrt von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird (z. B. Dimensionen des Schiffes, Anzahl Schiffsdecks, max. Zuladungshöhe). Zudem ist beim containerisierten Fahrzeugtransport das Gesamtgewicht der Ladungsträger (z. B. Container) und Ladehilfsmittel als Zuladung einzukalkulieren.

Die Ergebnisse für die max. Zuladung auf einem Binnenschiff der Wasserstraßenklasse V bei einer max. Zuladungshöhe von 9 m sind in der nachfolgenden Tabelle 14 angeführt. Aus dieser kann entnommen werden, dass mit einer PKW-Zuladung von max. 858 t die max. Tragfähigkeit von 2.500 t nicht annähernd erreicht wird. Daraus ist ableitbar, dass der Vorteil der Binnenschifffahrt hinsichtlich der Massenfähigkeit im Bereich der automobilen Distributionslogistik nicht ausgenutzt werden kann.

Gesamtgewicht der Zuladung (Fahrzeuge, Container, Sonderequipment)					
Fahrzeugsegment	RoRo <i>NEWS</i> (V) [t]	40' Container [t]	40' <i>VUCA-FRAME</i> [t]	40' HC <i>Cronos</i> <i>Car Rack</i> [t]	40' HC <i>R-Rak</i> <i>Trans-Rak</i> [t]
Minis	388	494		503	602
Kleinwagen	384	445	631	531	640
Kompaktklasse	526	475	552	578	702
Mittelklasse	427	497	588	610	745
Obere Mittelklasse	390	526		535	803
Oberklasse	428	554	683	562	858
SUV	443	490		600	732
Geländewagen	434	536		545	680
Sportwagen	451	494	584	606	740
Mini Vans	437	485		592	720
Großraum Vans	398	523		532	660

Tabelle 14: Gesamtgewicht Zuladung bei Binnenschiff Klasse V

5.6 Schritt Nr. 6 | Berechnung der ökologischen Kenngrößen

5.6.1 Energiebedarf und Treibhausgasemissionen LKW

Die entfernungsbasierte Methode wird zur Bestimmung von Energieverbräuchen herangezogen, wenn keine gemessenen Verbrauchswerte für die zu untersuchenden Transporte vorliegen. In diesem Fall müssen Messwerte, die von anderen Transporten stammen, herangezogen und hinsichtlich der wichtigsten Einflussgrößen – wie beispielsweise der Auslastung – adaptiert werden (vgl. Kranke et al. 2011, S. 117).

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode soll u. a. die ökologische Bewertung von unterschiedlichen Szenarien, in denen Transportmittel und -verfahren variiert werden, ermöglichen. Dabei sollen sowohl Leerfahrten als auch nutzlastabhängige Lastfahrten kalkuliert werden. Da dafür naturgemäß keine gemessenen Verbrauchsdaten vorliegen, wird die entfernungsbasierte Methode unter Nutzung von Daten aus *HBEFA* 3.2 für die Berechnung herangezogen. Die Daten der Verbrauchswerte beziehen sich auf dieselbetriebene Nutzfahrzeuge mit einem Leergewicht von 15,1 t, einer max. Zuladung von 24,7 t und einem max. Gesamtgewicht von 34 t bis 40 t.

Je nach Topografie der Strecke ist mit unterschiedlichen Energieverbräuchen zu rechnen. Die durchschnittlichen Topografien der europäischen Länder werden durch die Längsneigung (Gradient) definiert. In *HBEFA* 3.2 wird zwischen flach (z. B. Schweden), hügelig (z. B. Deutschland) und bergig (z. B. Österreich) unterschieden. Die diesbezüglichen Treibstoffverbräuche sind in der nachfolgenden Tabelle 15 angeführt.

Dieserverbrauch von Last- und Sattelzügen (EURO VI, aggregierte Verkehrszustände, 2015)		
Topografie der Transportstrecke	Leerfahrt [g/km] (0 % Auslastung)	Lastfahrt [g/km] (100 % Auslastung)
flach (Referenzland Schweden)	187,23	308,00
hügelig (Referenzland Deutschland)	197,35	328,58
bergig (Referenzland Österreich)	211,79	364,84

Tabelle 15: Dieserverbrauch von Last- und Sattelzügen aus *HBEFA* 3.2 (eigene Tabelle in Anlehnung an *HBEFA* 3.2)

Da der Energieverbrauch bei einem Transportmittelvergleich je nach eingesetzter Form in unterschiedlichen Einheiten (z. B. Liter Treibstoff, Kilowattstunden Bahnstrom) vorliegt, sollte dieser für die bessere Vergleichbarkeit in der physikalischen Einheit Joule (J) bzw. Megajoule (MJ) angegeben werden. In der nachfolgenden Formel 10 ist die Umrechnung von Kraftstoffverbrauch in Energieverbrauch (TTW bzw. WTW) aufgeführt.

$$EV_{TTW-LKW} = KV_{LKW_Diesel} * e_{TTW}$$

$$EV_{WTW-LKW} = KV_{LKW_Diesel} * e_{WTW}$$

mit

$EV_{TTW-LKW}$... Energieverbrauch (TTW) von LKW [MJ/km]

$EV_{WTW-LKW}$... Energieverbrauch (WTW) von LKW [MJ/km]

KV_{LKW_Diesel} ... Kraftstoffverbrauch LKW pro km [kg/km]

e_{TTW} ... Energiefaktor (TTW) für den Kraftstoff [MJ/kg]

($e_{TTW} = 43,1$ [MJ/kg] bei Dieselkraftstoff)

e_{WTW} ... Energiefaktor (WTW) für den Kraftstoff [MJ/kg]

($e_{WTW} = 51,3$ [MJ/kg] bei Dieselkraftstoff)

Formel 10: Umrechnung von Kraftstoffverbrauch in Energieverbrauch (vgl. Norm DIN EN 16258 2013, S. 16–23)

Mithilfe der aus HBEFA 3.2 entnommenen Verbrauchswerte (siehe Tabelle 15) und der beschriebenen Umrechnung in Megajoule (siehe Formel 10) ist der nutzlastabhängige Energieverbrauch von Transporten zu ermitteln.

$$EV_{LKW} = EV_{leer} + (EV_{voll} - EV_{leer}) * (Nl_{LKW_ist} / Nl_{LKW_max})$$

mit

EV_{Lkw} ... Energiebedarf LKW bei def. Nutzlast [MJ/km]

EV_{leer} ... Energiebedarf im unbeladenen Zustand [MJ/km]

EV_{voll} ... Energiebedarf im max. beladenen Zustand [MJ/km]

Nl_{LKW_ist} ... tatsächliche Nutzlast [t]

Nl_{LKW_max} ... maximale Nutzlast [t]

Formel 11: Energieverbrauch in Abhängigkeit der Nutzlast (vgl. Kranke et al. 2011, S. 134)

Gemäß Formel 11 ist zwischen Leerfahrt und max. Zuladung, deren Werte aus der Datenbank zu entnehmen sind, von einem linearen Anstieg des Energieverbrauchs auszugehen. Außerdem geht aus der Formel hervor, dass das Leergewicht des LKWs und die Zuladung großen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Die Treibhausgasemissionen können aus dem ermittelten Energiebedarf mithilfe von Emissionsfaktoren umgerechnet werden.

$$CO_2e_{TTW-LKW} = EV_{TTW-LKW} \times em_{TTW}$$

$$CO_2e_{WTW-LKW} = EV_{TTW-LKW} \times em_{WTW}$$

mit

$CO_2e_{TTW-LKW}$... CO_2 – Äquivalent (TTW) LKW [kgCO₂e/km]

$CO_2e_{WTW-LKW}$... CO_2 – Äquivalent (WTW) LKW [kgCO₂e/km]

$EV_{TTW-LKW}$... Energieverbrauch (TTW) LKW [MJ/km]

em_{TTW} ... Emissionsfaktor (TTW) für Dieselkraftstoff [kgCO₂e/MJ]

($em_{TTW} = 0,0745$ [kgCO₂e/MJ] Dieselkraftstoff) (vgl. Norm DIN EN 16258 2013, S. 23).

em_{WTW} ... Emissionsfaktor (WTW) für Dieselkraftstoff [kgCO₂e/MJ]

($em_{WTW} = 0,0904$ [kgCO₂e/MJ] Dieselkraftstoff) (vgl. Norm DIN EN 16258 2013, S. 28)

Formel 12: CO₂-Äquivalent Emissionen LKW (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 28)

Alternativ kann die Berechnung mit nutzlastabhängigen Emissionswerten aus der HBEFA-Datenbank analog zur Energieverbrauchsrechnung durchgeführt werden (siehe Formel 11).

5.6.2 Berechnungsergebnisse LKW

Unter Berücksichtigung der Fahrzeuggewichte (siehe

Tabelle 3), des max. Ladefaktors (siehe Tabelle 5) und der Leergewichte der Transportkonfiguration (siehe Tabelle 12) kann mit den Verbrauchswerten aus HBEFA 3.2 (siehe Tabelle 15) der Energieverbrauch (siehe Formel 11) berechnet werden. Aus dem errechneten Energieverbrauch wird in weiterer Folge das CO₂-Äquivalent ermittelt (siehe Formel 12).

Unter Anwendung der beschriebenen Methode sind nachfolgend die Berechnungsergebnisse für den Transport von Fahrzeugen mittels LKW aufgeführt. Die Ergebnisse beziehen sich auf einen LKW mit der Emissionsklasse EURO 6 und sind für Länder mit Topografie *hügelig* gültig. Für *flache* Länder ist der Energiebedarf je nach Transportart um 6 % bis 7% geringer, für *bergige* Länder um 7 % bis 9 % höher. Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Containerlösungen miteinander verglichen, ist ersichtlich, dass durch den Einsatz von Spezialequipment der Energiebedarf und die Emissionen deutlich reduziert werden. Im Durchschnitt sind diese bei einem 40-Fuß-HC-Container mit 5,3 MJ/km pro transportiertes Fahrzeug um 59 % höher als bei einem Transport mit dem R-RAK-System. Der Transport mittels

VUCAFRAME ist aufgrund der Höhenrestriktion nicht für alle Fahrzeugkategorien geeignet, schneidet jedoch beim Transport von Kleinwägen besonders gut ab. In den weiteren Fahrzeugkategorien, bei denen ein Transport aufgrund der Höhenrestriktion möglich ist, ist der Energieverbrauch nahezu ident mit dem *R-RAK*-System.

Zusammenfassend ist aus den Ergebnissen ableitbar, dass der LoLo-Transport auf der Straße aufgrund des deutlich niedrigeren Ladefaktors eine Steigerung des Energieverbrauchs im Vergleich zum RoRo-Transport zur Folge hat. Der Energiebedarf ist beim *R-RAK*-System durchschnittlich um 66 % größer als beim RoRo-Transport (siehe Tabelle 16).

LKW Energiebedarf pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [MJ/km]					
Fahrzeugsegment	Container				RoRo
	40' HC	<i>VUCA-FRAME</i>	<i>Cronos Car Rack</i> im 40' HC	<i>R-Rak</i> im 40' HC	RoRo-LKW
Minis	3,63		3,89	2,83	1,25
Kleinwagen	5,36	1,98	3,93	2,86	1,38
Kompaktklasse	5,42	2,89	3,99	2,92	1,56
Mittelklasse	5,46	2,93	4,03	2,96	1,75
Obere Mittelklasse	5,51		5,90	3,02	2,00
Oberklasse	5,56	3,03	5,95	3,07	2,31
SUV	5,45		4,02	2,95	1,93
Geländewagen	5,53		5,92	3,87	2,64
Sportwagen	5,45	2,92	4,02	2,96	1,60
Mini Vans	5,43		4,01	2,94	1,92
Großraum Vans	5,51		5,90	3,84	2,25
LKW Emissionen pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [kg CO _{2e} /km]					
Fahrzeugsegment	Container				RoRo
	40' HC	<i>VUCA-FRAME</i>	40' HC	<i>VUCA-FRAME</i>	40' HC
Minis	0,27		0,29	0,21	0,09
Kleinwagen	0,40	0,15	0,30	0,22	0,10
Kompaktklasse	0,41	0,22	0,30	0,22	0,12
Mittelklasse	0,41	0,22	0,30	0,22	0,13
Obere Mittelklasse	0,42		0,44	0,23	0,15
Oberklasse	0,42	0,23	0,45	0,23	0,17
SUV	0,41		0,30	0,22	0,15
Geländewagen	0,42		0,45	0,29	0,20
Sportwagen	0,41	0,22	0,30	0,22	0,12
Mini Vans	0,41		0,30	0,22	0,14
Großraum Vans	0,41		0,44	0,29	0,17
Beschreibung: LKW Euro VI, hügeliges Land (z. B. Deutschland)					

Tabelle 16: Energiebedarf und Emissionen beim LKW-Transport

5.6.3 Energiebedarf und Treibhausgasemissionen Bahn

Die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs für Gütertransporte mit der Bahn wird gemäß der Vorgehensweise von *ifeu et al.* (vgl. 2016, S. 55-57) durchgeführt. Die nachfolgende Formel 13 wurde insbesondere für Bahntransporte mit einem Gesamtgewicht von 600 t bis 1.800 t entwickelt und kann daher auch für den Fahrzeugtransport herangezogen werden.

$$EV_{TTW-Zug} = 1200 \times gGG^{-0,62}$$

mit

$EV_{TTW-Zug}$... *Energieverbrauch (TTW) Zug [Wh/Gtkm]*

gGG ... *gezogenes Gesamtgewicht (exkl. Lokomotive) [t]*

Formel 13: Energiebedarf Bahntransport (z. B. ifeu et al. 2016, S. 56)

Der Energiebedarf in Wattstunden wird durch Multiplikation mit Faktor 0,036 in Megajoule umgewandelt (vgl. Norm DIN EN 16258 2013, S. 30). Im Berechnungstool *EcoTransIT* werden für die Berechnung des gezogenen Gesamtgewichts (gGG) Durchschnittswerte für Waggontypen und Fahrzeugklassen verwendet möglich (vgl. ifeu et al. 2016, S. 24). Ein Vergleich hinsichtlich unterschiedlicher Bahnwaggons (z. B. einstöckiger Flachwagen und Doppelstockwagen), Fahrzeugkategorien (z. B. Minis und Geländewagen) und Transportverfahren (z. B. RoRo und LoLo) ist bei dieser Methode – im Gegensatz zu der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode – nicht möglich. Mit der nachfolgend angeführten Formel lässt sich das von der Lok gezogene Gesamtgewicht (gGG) in Abhängigkeit der zu transportierenden Fahrzeuge und des gewählten Waggontyps berechnen:

$$gGG = (N_{Fahrzeuge_Zug} * G_{Fahrzeug}) + (N_{Waggon_Zug} * G_{Waggon})$$

mit

$N_{Fahrzeuge_Zug}$... *Anzahl Fahrzeuge pro Ganzzug [Stk.]* (siehe Formel 4)

$G_{Fahrzeug}$... *Gewicht pro Fahrzeug [t]* (siehe

Tabelle 3)

N_{Waggon_Zug} ... *Anzahl Waggone pro Zug [Stk.]* (siehe Formel 1)

G_{Waggon} ... *Gewicht pro Waggon [t]* (siehe Tabelle 13)

Formel 14: Gezogenes Gesamtgewicht der Lok

Für die WTW-Berechnung ist zusätzlich der WTT-Energieverbrauch für die Herstellung des Bahnstroms zu ermitteln. Dieser kann für Europa mit durchschnittlich 2,62 MJ pro

produzierten MJ Bahnstrom angesetzt werden. Des Weiteren ist die Topografie der Transportstrecke, die Einfluss auf den Energiebedarf hat, mittels eines Korrekturfaktors zu berücksichtigen. Dieser beträgt bei flachen bzw. bergigen Ländern 0,9 bzw. 1,1 (z. B. ifeu et al. 2016, S. 57). Die Treibhausgasemissionen können wie beim LKW direkt aus dem errechneten Energiebedarf ermittelt werden. Beim Betrieb der Elektro-Traktion entstehen keine Treibhausgasemissionen (TTW), diese entstehen ausschließlich im Vorfeld bei der Energiegewinnung und -distribution sowie bei der Umwandlung in Strom (WTT). Mithilfe von Emissionsfaktoren, die von der Erzeugungsart des Stroms abhängig sind, werden die Treibhausgasemissionen berechnet (vgl. Kranke et al. 2011, S. 194-195).

$$CO_2e_{WTW-zug} = EV_{TTW-zug} * em_{WTW}$$

mit

$CO_2e_{WTW-zug}$... CO_2 – Äquivalent Emissionen (WTW) eines Zuges [$kgCO_2e$]

$EV_{TTW-zug}$... Energieverbrauch (TTW) eines Zuges [MJ]

em_{WTW} ... Emissionsfaktor (WTW) für Bahnstrom [$kgCO_2e/MJ$]

($e_w = 0,137 [kgCO_2e/MJ]$) (z. B. ifeu et al. 2016, S. 94)

Formel 15: CO_2 -Äquivalent Emissionen Bahntransporte (vgl. Kranke et al. 2011, S. 196)

5.6.4 Berechnungsergebnisse Bahn

Unter Berücksichtigung des gezogenen Gesamtgewichts (siehe Formel 14), des max. Ladefaktors (siehe Tabelle 11) und des Leergewichts der Transportkonfiguration (siehe Tabelle 13) kann der Energieverbrauch (Formel 13) berechnet werden. Aus dem errechneten Energiebedarf können die Treibhausgasemissionen ermittelt werden (siehe Formel 18). Die Berechnungsergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 17 aufgeführt. Die Ergebnisse beziehen sich auf eine Elektro-Traktion mit einer Gesamtzuglänge von 600 m und sind für Länder mit einer hügeligen Topografie gültig. Für flache Länder ist der Energiebedarf je nach Transportart um 10 % geringer, für bergige Länder um 10 % höher. Der Vergleich von Containerlösungen für den Bahntransport liefert ähnliche Ergebnisse wie beim Straßentransport. Der Technikeinsatz führt zu einer Verbesserung des Ladefaktors und somit zu einem geringeren Energiebedarf gegenüber dem Standard 40-Fuß-Container.

Zusammenfassend ist auch im Bereich des Bahntransportes in den meisten Fahrzeugsegmenten das *R-RAK*-System die energieeffizienteste Containerlösung. Jedoch führen die Containerlösungen aufgrund des deutlich niedrigeren Ladefaktors zumeist zu einer Steigerung des Energieverbrauchs im Vergleich zum RoRo-Transport. Der Energiebedarf ist beim *R-RAK-System* durchschnittlich um 34 % größer

als beim RoRo-Transport. Nur in dem Fahrzeugsegment *Kleinwagen* bringt der Transport mittels *VUCAFRAME* einen minimalen Vorteil gegenüber dem RoRo-Transport.

Bahn Energiebedarf pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [MJ/km]							
Fahrzeugsegment	Container				RoRo		
	40' HC	<i>VUCAFRAME</i>	Cronos Car Rack im 40' HC	R-Rak im 40' HC	Flachwagen (Laaers 810)	Doppelstockwagen (Laaers 810)	Doppelstocktransportwagen (Hcceerrs 330)
Minis	1,12		1,18	0,87	1,01	0,53	0,54
Kleinwagen	1,66	0,60	1,19	0,88	1,15	0,61	0,63
Kompaktklasse	1,67	0,88	1,21	0,89	1,34	0,71	0,69
Mittelklasse	1,68	0,89	1,22	0,90	1,35	0,72	0,76
Obere Mittelklasse	1,70		1,79	0,91	1,62	0,79	0,78
Oberklasse	1,71	0,91	1,80	0,92	1,63	0,87	0,79
SUV	1,68		1,21	0,90	1,35	0,72	0,70
Geländewagen	1,70		1,80	1,18	1,37	0,74	0,72
Sportwagen	1,68	0,89	1,21	0,90	1,35	0,72	0,70
Mini Vans	1,68		1,21	0,89	1,35	0,72	0,70
Großraum Vans	1,70		1,79	1,17	1,37	0,73	0,77
Bahn Emissionen pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [kg CO ₂ e/km]							
Fahrzeugsegment	Container				RoRo		
	40' HC	<i>VUCAFRAME</i>	Cronos Car Rack im 40' HC	R-Rak im 40' HC	Flachwagen (Laaers 810)	Doppelstockwagen (Laaers 810)	Doppelstocktransportwagen (Hcceerrs 330)
Minis	0,06		0,06	0,05	0,05	0,03	0,03
Kleinwagen	0,09	0,03	0,06	0,05	0,06	0,03	0,03
Kompaktklasse	0,09	0,05	0,06	0,05	0,07	0,04	0,04
Mittelklasse	0,09	0,05	0,06	0,05	0,07	0,04	0,04
Obere Mittelklasse	0,09		0,09	0,05	0,08	0,04	0,04
Oberklasse	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,05	0,04
SUV	0,09		0,06	0,05	0,07	0,04	0,04
Geländewagen	0,09		0,09	0,06	0,07	0,04	0,04
Sportwagen	0,09	0,05	0,06	0,05	0,07	0,04	0,04
Mini Vans	0,09		0,06	0,05	0,07	0,04	0,04
Großraum Vans	0,09		0,09	0,06	0,07	0,04	0,04
Beschreibung: Elektro Traktion, Gesamtzuglänge 600 m, hügeliges Land (z. B. Deutschland)							

Tabelle 17: Energiebedarf und Emissionen beim Bahntransport

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Energieverbräuche für das Fahrzeugsegment Kompaktklasse (Beispiel A) und Kleinwagen (Beispiel B) dargestellt. Am Beispiel A wird ersichtlich, dass der Energiebedarf bei RoRo-Transporten geringer als bei Transporten mittels Container ist (siehe Abbildung 31). Der Energiebedarf ist mit dem Containerrahmen *VUCAFRAME* aufgrund des

niedrigeren Ladefaktors um 28 % höher als bei dem geschlossenen RoRo-Transport. In der Kategorie Kleinwagen (Beispiel B) verfügen der *VUCAFRAME* und der RoRo-Doppelstockwagen über denselben Ladefaktor (siehe Abbildung 32). In diesem Fall führt das um 5,7 % höhere Gesamtgewicht des RoRo-Zuges zu einem um 1,5 % höheren Energieverbrauch im Vergleich zum *VUCAFRAME*. Dieser hat in dieser Fahrzeugkategorie mit nur 0,54 MJ/km pro transportiertes Fahrzeug (Kleinwagen) den geringsten Energiebedarf. Zusammenfassend ist aus den Vergleichen ableitbar, dass der Ladefaktor einen signifikanten Einfluss auf den Energiebedarf pro Fahrzeug hat (siehe z. B. 28 % in Beispiel A) und die Gewichtsunterschiede der Systeme vergleichsweise geringe Auswirkungen haben (siehe 1,5 % in Beispiel B).

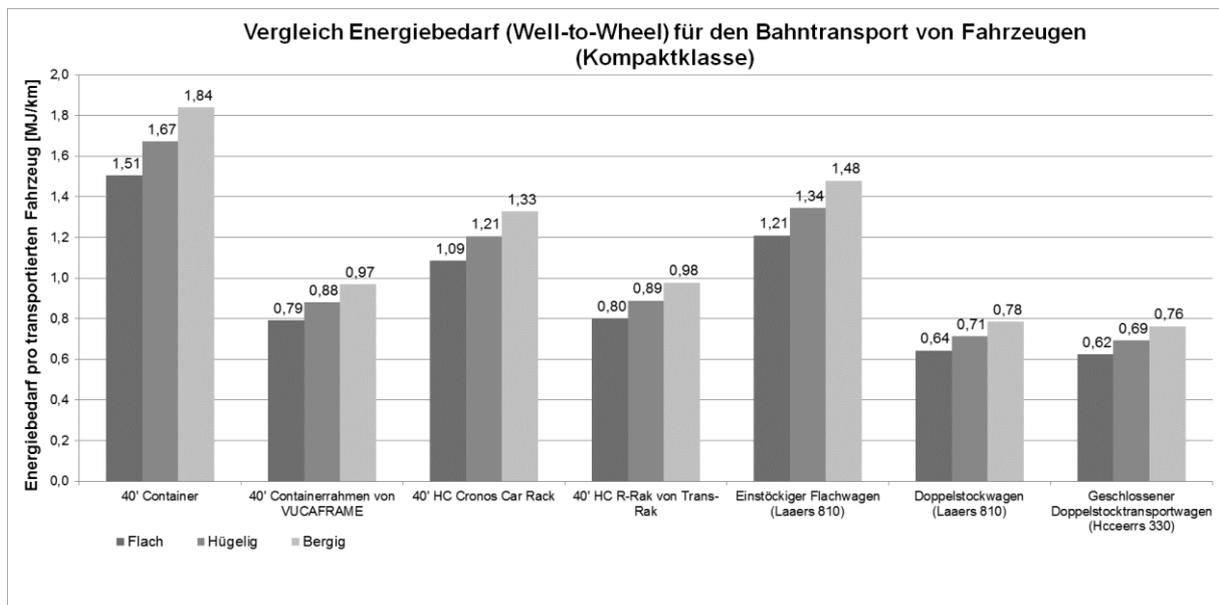


Abbildung 31: Beispiel A - Energiebedarf pro Kompaktklasse-Fahrzeug

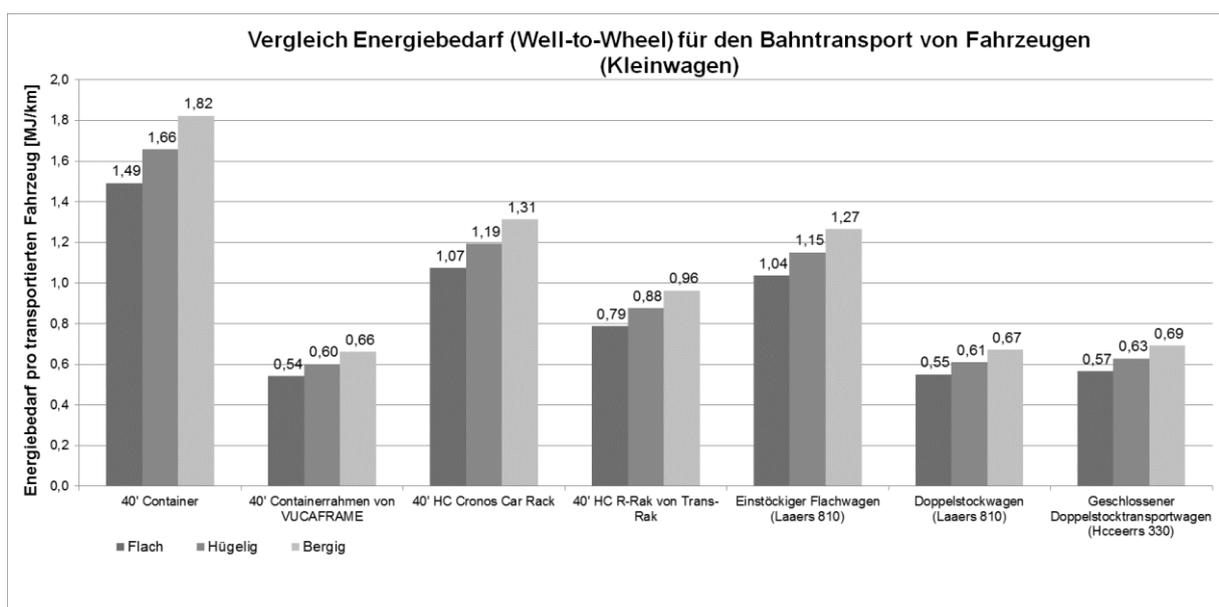


Abbildung 32: Beispiel B - Energiebedarf pro Kleinwagen-Fahrzeug

5.6.5 Energiebedarf und Treibhausgasemissionen Binnenschiff

Die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs für Gütertransporte auf der Wasserstraße wird gemäß der Berechnungsmethodik von ifeu und INFRAS (2013, S. 32–35) durchgeführt:

$$EV_{TTW-HA} = a * x^2 + b * x$$

$$EV_{TTW-BiSchi} = EV_{TTW-HA} * z_n * e_{TTW}$$

$$EV_{WTW-BiSchi} = EV_{TTW-HA} * z_n * e_{WTW}$$

mit

EV_{TTW-HA} ... Energieverbrauch (TTW) BiSchi Hauptaggregate [kg/km]

$EV_{TTW-BiSchi}$... Energieverbrauch (TTW) BiSchi inkl. Zuschläge [MJ/km]

$EV_{WTW-BiSchi}$... Energieverbrauch (WTW) BiSchi inkl. Zuschläge [MJ/km]

x ... Tragfähigkeit des Binnenschiffes (t)

a ... Faktor aus Regressionsrechnung

b ... Faktor aus Regressionsrechnung

z_n ... Zuschlagsfaktor für Nebenaggregate, Manövrieren in Häfen und Schleusen

($z_n = 1,05$)

e_{TTW}, e_{WTW} ... Energiefaktoren (TTW bzw. WTW) (siehe Formel 10)

Formel 16: Energiebedarf Binnenschifftransport (vgl. ifeu und INFRAS 2013, S. 32–35)

Die dafür benötigten Faktoren a und b sind je nach Art der Wasserstraße (freifließender Fluss, staugeregelter Fluss und Kanal), Beladungszustand (leer, vollbeladen) sowie hinsichtlich Berg- und Talfahrt unterschiedlich (siehe Anhang A.1).

Für die Tragfähigkeit der unterschiedlichen Binnenschiffe werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Werte angenommen:

Tragfähigkeit von Binnenschiffen		
Wasserstraßenklasse	Bezeichnung Binnenschiff	max. Tragfähigkeit [t]
IV	Europaschiff	1.350
V	Großmotorschiff	2.500
VI	Jowi-Klasse	5.300

Tabelle 18: Tragfähigkeit von Binnenschiffen (z. B. ifeu et al. 2016, S. 79)

Mit Formel 16 kann der Energiebedarf sowohl für ein leeres als auch für ein max. beladenes Binnenschiff ermittelt werden. Der nutzlastabhängige Energieverbrauch wird analog zur Berechnung für den LKW-Transport durchgeführt (siehe Formel 11). Die dafür benötigte Nutzlast wird mittels folgender Formel ermittelt:

$$Nl_{BiSchi_RoRo} = N_{Fahrzeuge_BiSchi} * G_{Fahrzeug}$$

$$Nl_{BiSchi_Container} = (N_{Fahrzeuge_Container} * G_{Fahrzeug} + G_{Container}) * N_{Container_Bischi}$$

mit

$$Nl_{BiSchi_RoRo} \dots \text{tatsächliche Nutzlast auf RoRo – Binnenschiff [t]}$$

$$Nl_{BiSchi_Container} \dots \text{tatsächliche Nutzlast auf Container – Binnenschiff [t]}$$

$$N_{Fahrzeuge_BiSchi} \dots \text{Anzahl Fahrzeuge pro Binnenschiff [Stk.]} \text{ (siehe Formel 8)}$$

$$N_{Fahrzeuge_Container} \dots \text{Anzahl Fahrzeuge pro Container [Stk.]} \text{ (siehe Formel 9)}$$

$$G_{Fahrzeug} \dots \text{Gewicht pro Fahrzeug [t]} \text{ (siehe}$$

Tabelle 3)

$$G_{Container} \dots \text{Gewicht pro Container inkl. Spezialequipment [t]} \text{ (siehe Tabelle 13)}$$

$$N_{Container_Bischi} \dots \text{Anzahl Container je Binnenschiff [Stk.]} \text{ (siehe Tabelle 10)}$$

Formel 17: Berechnung der Nutzlast Binnenschiff

Die Treibhausgasemissionen werden analog zur Berechnung der LKW- und Bahn-Transporte aus dem berechneten Energiebedarf mittels Emissionsfaktoren bestimmt. Im Unterschied zur Bahn werden nicht nur bei der Erzeugung und Distribution des Energieträgers (WTT) Emissionen, sondern analog zum LKW auch beim Betrieb (TTW).

In nachfolgender Formel 18 ist die Berechnung angeführt:

$$CO_2e_{TTW-BiSchi} = EV_{TTW-Binnenschiff} * em_{TTW}$$

$$CO_2e_{WTT-BiSchi} = EV_{WTT-Binnenschiff} * em_{WTT}$$

mit

$CO_2e_{TTW-BiSchi} \dots CO_2 - \text{Äquivalent Emissionen (TTW) Binnenschiff [kgCO}_2e]$

$CO_2e_{WTW-BiSchi} \dots CO_2 - \text{Äquivalent Emissionen (WTW) Binnenschiff [kgCO}_2e]$

$EV_{TTW-BiSchi} \dots \text{Energieverbrauch (TTW) Binnenschiff [MJ]}$

$EV_{WTW-BiSchi} \dots \text{Energieverbrauch (TTW) Binnenschiff [MJ]}$

$em_{TTW} \dots \text{Emissionsfaktoren (TTW) (siehe Formel 12)}$

$em_{WTW} \dots \text{Emissionsfaktoren (WTW)}$

Formel 18: CO₂-Äquivalent Emissionen Binnenschiff (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 28)

5.6.6 Berechnungsergebnisse Binnenschiff

Unter Anwendung der in Kapitel 5.6.5 beschriebenen Formeln und Faktoren kann der nutzlastabhängige Energiebedarf und daraus resultierende Treibhausgasemissionen für Binnenschifftransporte ermittelt werden. In der nachfolgenden Tabelle 19 sind die Ergebnisse für die Wasserstraßenklasse V bzw. VI mit einer max. Durchfahrtshöhe von 9 m bzw. 12 m dargestellt. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass aufgrund des höheren Ladefaktors auf Wasserstraßenklasse VI ein geringerer Energiebedarf je Fahrzeug im Vergleich zu V resultiert.

Werden die unterschiedlichen Transportverfahren auf Wasserstraßenklasse V verglichen, ist ersichtlich, dass in den Segmenten *Kleinwagen (VUCAFRAME)*, *Obere Mittelklasse* und *Oberklasse (R-RAK)* ein geringerer Energiebedarf beim Fahrzeugtransport in Containern entsteht.

Bei Steigerung auf Wasserstraßenklasse VI können beim RoRo-Transport bis zu zwei zusätzliche Decks und beim Containertransport nur eine zusätzliche Lage realisiert werden, wodurch der Vorteil des höheren Ladefaktors des containerisierten Transports nicht mehr gegeben ist.

Aus diesem Vergleich ist ableitbar, dass das optimale Transportverfahren immer nur unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren ausgewählt und keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann.

Binnenschiff V Energiebedarf pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [MJ/km]				Binnenschiff VI Energiebedarf pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [MJ/km]			
Fahrzeugsegment	Container			Fahrzeugsegment	Container		
	40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack im 40' HC		40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack im 40' HC
	RoRo	NEWS (V)	R-Rak im 40' HC	RoRo	NEWS (V)	R-Rak im 40' HC	RoRo
Minis	1,99	1,03	1,54	1,07	0,48	0,83	0,48
Kleinwagen	2,95	1,18	1,55	1,57	0,55	0,85	0,55
Kompaktklasse	2,98	1,32	1,58	1,59	0,62	0,86	0,62
Mittelklasse	2,99	1,44	1,60	1,60	0,75	0,88	0,75
Oberer Mittelklasse	3,02	1,77	1,62	1,62	0,77	0,90	0,77
Oberklasse	3,04	1,64	1,64	1,64	0,83	0,91	0,83
SUV	2,99	1,35	1,59	1,60	0,64	0,87	0,64
Geländewagen	3,02	1,68	2,09	1,63	0,76	1,14	0,76
Sportwagen	2,99	1,35	1,59	1,60	0,69	0,88	0,69
Mini Vans	2,98	1,33	1,59	1,59	0,62	0,87	0,62
Großraum Vans	3,01	1,72	2,08	1,62	0,78	1,14	0,78
Binnenschiff V Emissionen pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [kg CO ₂ e/km]				Binnenschiff VI Emissionen pro Fahrzeug (Well-to-Wheel) [kg CO ₂ e/km]			
Fahrzeugsegment	Container			Fahrzeugsegment	Container		
	40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack im 40' HC		40' HC	VUCA-FRAME	Cronos Car Rack im 40' HC
	RoRo	NEWS (V)	R-Rak im 40' HC	RoRo	NEWS (V)	R-Rak im 40' HC	RoRo
Minis	0,16	0,08	0,13	0,09	0,04	0,07	0,04
Kleinwagen	0,24	0,10	0,13	0,13	0,05	0,07	0,05
Kompaktklasse	0,25	0,11	0,13	0,14	0,05	0,08	0,05
Mittelklasse	0,25	0,12	0,14	0,14	0,06	0,08	0,06
Oberer Mittelklasse	0,25	0,14	0,14	0,14	0,07	0,08	0,07
Oberklasse	0,25	0,15	0,14	0,14	0,07	0,08	0,07
SUV	0,25	0,11	0,14	0,14	0,05	0,08	0,05
Geländewagen	0,25	0,14	0,18	0,14	0,07	0,10	0,07
Sportwagen	0,25	0,11	0,14	0,14	0,06	0,08	0,06
Mini Vans	0,25	0,11	0,13	0,14	0,05	0,08	0,05
Großraum Vans	0,25	0,14	0,18	0,14	0,07	0,10	0,07

Beschreibung: Wasserstraßenklasse V, Dieselantrieb, max. Höhe der Zuladung 9 m, Flussart: Mittelwert aus freifließendem Fluss, staugeregeltem Fluss (Tal- und Bergfahrt) und Kanal

Beschreibung: Wasserstraßenklasse VI, Dieselantrieb, max. Höhe der Zuladung 12 m, Flussart: Mittelwert aus freifließendem Fluss, staugeregeltem Fluss (Tal- und Bergfahrt) und Kanal

Tabelle 19: Energiebedarf und Emissionen beim Binnenschifftransport

5.6.7 Energiebedarf beim Transport

Nachdem die Methode zur Ermittlung des Energieverbrauchs beschrieben und die transportmittelspezifischen Ergebnisse angeführt worden sind, wird nun ein ökologischer Vergleich der Transportmittel durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 33 ist der Energiebedarf je transportierten Fahrzeug dargestellt. Sowohl von den infrastrukturellen Gegebenheiten (z. B. hügeliges Land) als auch von dem zu transportierenden Transportgut (Mittelwert über alle Fahrzeugkategorien) wurden möglichst durchschnittliche Gegebenheiten ausgewählt.

Der Vergleich der berechneten durchschnittlichen Energiebedarfe zeigt, dass diese beim Bahntransport nahezu ident, mit jenen des Binnenschifftransports auf Wasserstraßenklasse VI sind. Aufgrund der geringeren Treibhausgasemissionen beim elektrischen Antrieb ist der Bahntransport mit 0,037 kg CO₂e/km dem Binnenschifftransport mit 0,058 kg CO₂e/km aus ökologischen Gründen vorzuziehen.

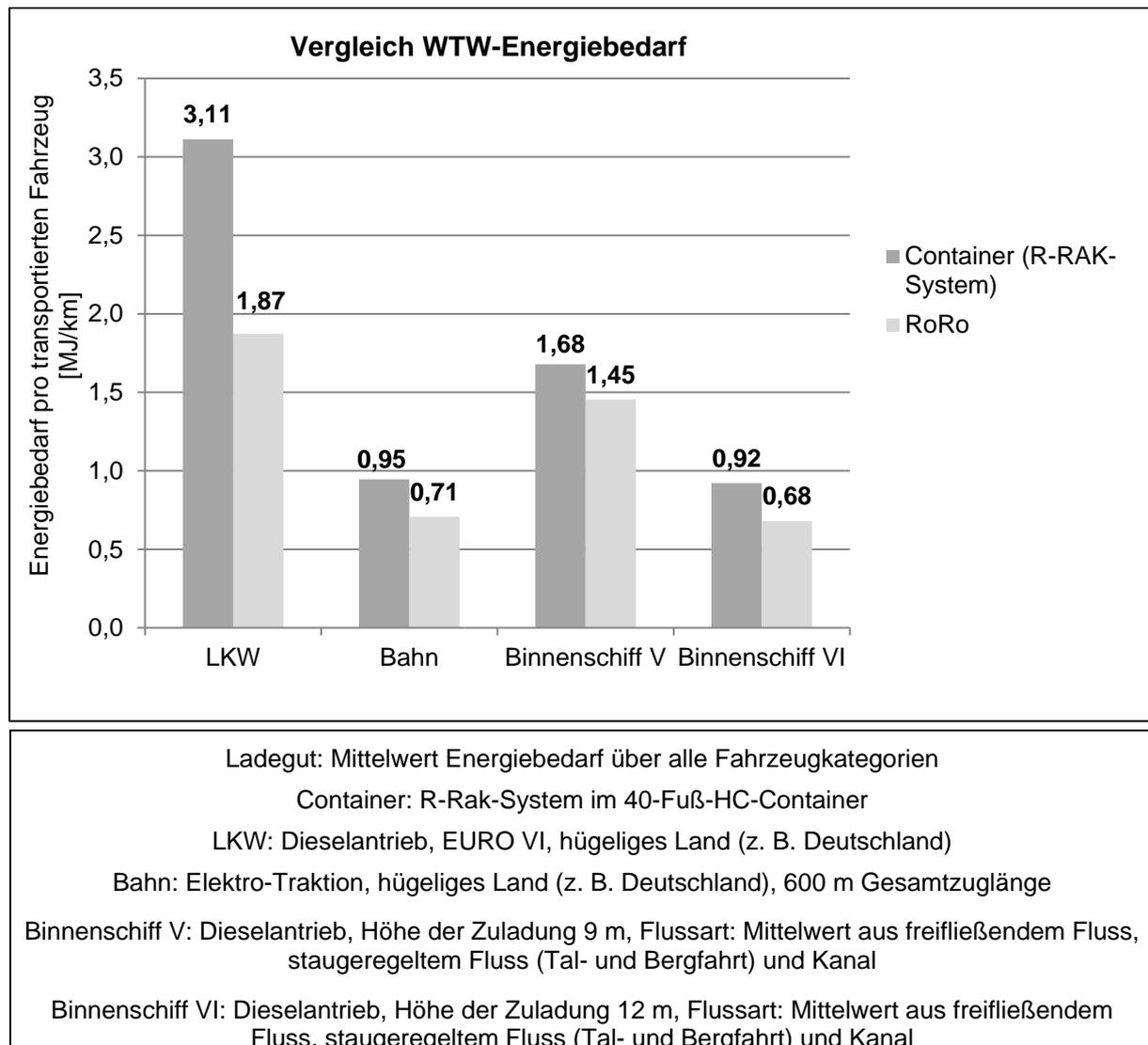


Abbildung 33: Durchschnittlicher Energiebedarf der Transportmittel

Der LKW-Transport hat im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern den höchsten durchschnittlichen Energiebedarf und erzeugt die meisten Treibhausgasemissionen. Der Unterschied zu den anderen Verkehrsträgern fällt jedoch insbesondere beim RoRo-Transport aufgrund des hohen Ladefaktors geringer aus als erwartet. Beispielsweise weist das Umweltbundesamt (vgl. Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2010b, S. 9) beim Containertransport einen um 127 % höheren Primärenergieverbrauch des LKW gegenüber dem Binnenschiff aus. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist dieser beim LKW-Transport von Fahrzeugen jedoch nur um 29 % höher als bei einem Binnenschiff der Wasserstraßenklasse V.

In der nachfolgenden Abbildung 34 ist der Energiebedarf pro Tonnenkilometer für den Transport von *Kompaktklasse*-Fahrzeugen abgebildet. Dabei wurden unterschiedliche Parameter (z. B. Topografie des Landes, Gesamtzuglänge, Wasserstraßenklasse) variiert, um deren Auswirkungen sichtbar zu machen. Die rot markierten Balken stellen die Energieverbräuche der LKW-Transporte dar. Die Schwankungsbreite von RoRo-Transporten zwischen 1,13 MJ und 1,32 MJ pro Tonnenkilometer resultiert aus einer Variation der topografischen Gegebenheiten (flaches bis bergiges Land).

Die in grün dargestellten Werte sind die Energieverbräuche der Bahntransporte, die ebenfalls hinsichtlich der Topografie des Landes mit unterschiedlichen Eingangsparametern berechnet worden sind. Zusätzlich wurde auch die Gesamtzuglänge zwischen 600 m und 740 m variiert. Die Gegenüberstellung der roten und grünen Balken zeigt, dass sowohl für den RoRo- als auch für den LoLo-Transport die Bahn aus ökologischen Gründen dem LKW-Transport vorzuziehen ist.

Im Bereich der Binnenschifftransporte (blaue Balken in Abbildung 34) gibt es aufgrund der Gegebenheiten der Wasserstraße eine Vielzahl von Einflussparametern. Neben der Wasserstraßenklasse, welche die max. Dimensionen des Binnenschiffes definiert, spielt auch die max. Zuladungshöhe eine entscheidende Rolle. Diese hängt von dem zu erwartenden Pegelstand der Wasserstraße (Hoch- bzw. Niedrigwasser), der Brückendurchfahrtshöhen und dem nutzlastabhängigen Tiefgang des Schiffes ab. Die Zuladungshöhe beeinflusst die Anzahl Containerlagen bzw. Schiffsdecks und wirkt sich somit signifikant auf den Ladefaktor und Energieverbrauch aus. Des Weiteren ist auch die Flussrichtung (Berg- oder Talfahrt) von entscheidender Bedeutung. Diese Vielzahl an Einflussparametern führt dazu, dass der Energieverbrauch pro Tonnenkilometer beim RoRo-Binnenschifftransport von 0,35 MJ (Binnenschiff Wasserstraßenklasse VI, 12 m Zuladung, Talfahrt) bis zu 1,23 MJ (Binnenschiff Wasserstraßenklasse V, 9 m Zuladung, Bergfahrt) die größte Schwankungsbreite hat.

Der Vergleich der Energieverbräuche bei den RoRo-Transporten zeigt, dass das Binnenschiff nur bei besonders günstigen Bedingungen bessere Werte als die Bahn erzielt. Bei für die Binnenschiffahrt ungünstigen Bedingungen schneidet diese schlechter als der LKW ab. Dabei noch nicht berücksichtigt ist, dass je nach Verlauf

der Wasserstraße die Gesamttransportstrecke deutlich länger als beim Straßentransport (siehe Fallbeispiele in Kapitel 6) sein kann, wodurch zusätzlicher Energiebedarf entsteht. Die Interpretation von Abbildung 34 verdeutlicht, dass die Veränderung von bestimmten Einflussparametern selbst bei gleichbleibendem Transportgut signifikante Auswirkungen auf den spezifischen Energiebedarf hat.

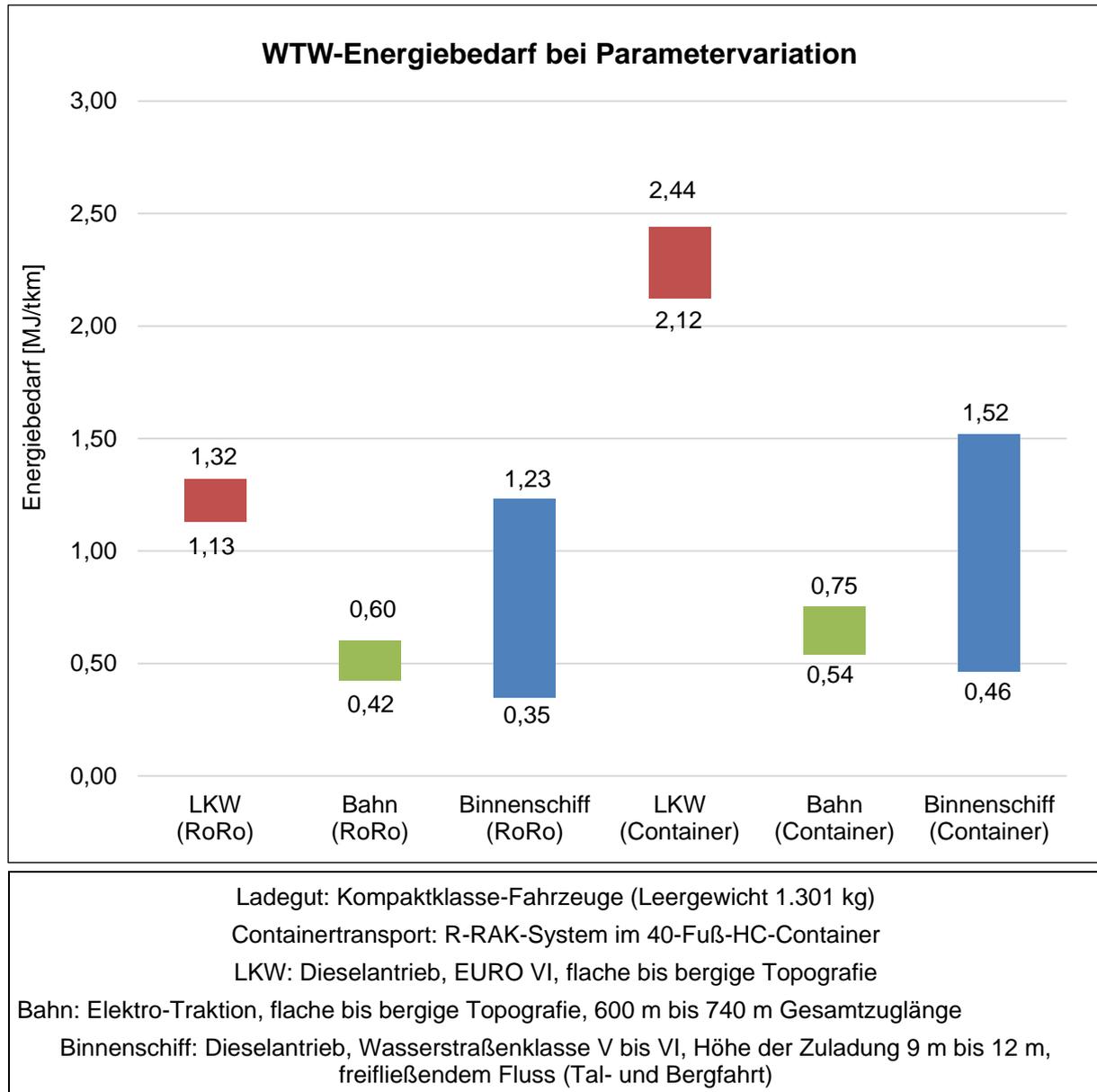


Abbildung 34: WTW-Energiebedarf bei Parametervariation

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine ökologische Verkehrsträgerbewertung immer nur für spezifische Gegebenheiten Gültigkeit besitzt und alle relevanten Berechnungsparameter beschrieben werden müssen. Dies verdeutlicht den Bedarf und die Notwendigkeit der im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Methode. Aus den Untersuchungen ist die zentrale Aussage ableitbar, dass für den Fahrzeugtransport zumeist gilt, dass die Bahn dem Binnenschiff und dieses dem LKW vorzuziehen ist.

5.6.8 Energiebedarf beim Umschlag

Die *Norm DIN EN 16258* (vgl. 2013, S. 1 ff.) berücksichtigt bei der Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen den Umschlag der Güter nicht). Der Vollständigkeit halber ist für den Vergleich von unterschiedlichen Transportverfahren nachfolgend die Berechnung des Energieverbrauchs beim Umschlag von Fahrzeugen angegeben.

Beim RoRo-Transport werden die Fahrzeuge mit eigenem Antrieb verladen. Somit wird durch die Startvorgänge und durch die zurückgelegte Distanz zwischen Parkplatz und Ladestelle Energie benötigt und dadurch werden Emissionen erzeugt. Die diesbezüglichen Energieverbrauchswerte für PKWs sind aus *HBEFA 3.2* zu entnehmen. Für die durchgeführte TTW-Berechnung wurde ein Mittelwert aus diesel- und benzinbetriebenen Fahrzeugen der EURO 6 Emissionsklasse herangezogen (siehe Tabelle 20). Die Umrechnungsfaktoren für die Bestimmung des WTW-Energieverbrauchs und der Emissionen wurden aus der *Norm DIN EN 16258* entnommen.

Bei jedem Be- bzw. Entladevorgang ist mindestens ein Startvorgang des zu transportierenden Fahrzeugs erforderlich. Die zurückzulegende Fahrdistanz setzt sich aus der Entfernung des Parkplatzes von der Ladestelle sowie aus der zurückzulegenden Distanz beim Be- bzw. Entladevorgang zusammen. Diese ist beim LKW-Transport vernachlässigbar gering, jedoch bei Bahn und Binnenschiff zu berücksichtigen.

Für die Berechnung des Energieverbrauchs und der Emissionen beim RoRo-Umschlag wurden für einen beispielhaften Logistikknoten folgende Annahmen getroffen:

- Die Wegstrecke zwischen Parkplatz und Ladestelle, die abhängig von der Gestaltung des Layouts ist, beträgt 500 m.
- Der Bahntransport wird mittels eines Ganzzuges mit einer Gesamtzuglänge von 600 m durchgeführt. Die Beladung erfolgt anhand drei Verladerampen auf parallelen Gleisanlagen, wodurch jeder PKW durchschnittlich 100 m (Strecke bis zur Mitte der zusammenhängenden Waggonen) beim Be- bzw. Entladevorgang zurücklegt.
- Der Transport auf der Wasserstraße wird mit einem Binnenschiff der Wasserstraßenklasse V auf vier Decks durchgeführt. Die Be- bzw. Entladung erfordert jeweils eine zusätzliche Wegstrecke von ca. 200 m (siehe Schiffsdimensionen *NEWS* in Tabelle 8)

In der nachfolgenden Tabelle 20 sind die Berechnungsergebnisse für die Energieverbräuche und die CO₂-Äquivalente für das beschriebene Fallbeispiel angeführt.

Energieverbrauch und Emissionen pro Fahrzeug bei RoRo-Umschlagvorgang						
Basiswerte	Umschlag PKW	Tank-to-Wheel		Well-to-Wheel		
		Energie [MJ]	Emission [kg CO2e]	Energie [MJ]	Emission [kg CO2e]	
		Fahren pro m	0,0021	0,0001	0,0025	0,0002
	Startzuschlag pro Vorgang	1,0573	0,0683	1,2432	0,0817	
Fallbeispiel		Tank-to-Wheel		Well-to-Wheel		
		Energie [MJ]	Emission [kg CO2e]	Energie [MJ]	Emission [kg CO2e]	
		Fahren: 500 m	1,04	0,07	1,23	0,08
LKW		Anzahl Startvorgänge: 1	1,06	0,07	1,24	0,08
		Gesamt pro Be- bzw. Entladungsvorgang	2,10	0,14	2,47	0,16
		Gesamt für Be- und Entladung	4,20	0,27	4,94	0,33
		Fahren: 600 m	1,25	0,08	1,47	0,10
Bahn		Anzahl Startvorgänge: 1	1,06	0,07	1,24	0,08
		Gesamt pro Be- bzw. Entladungsvorgang	2,31	0,15	2,72	0,18
		Gesamt für Be- und Entladung	4,62	0,30	5,43	0,36
		Fahren: 700 m	1,46	0,09	1,72	0,11
Bischi		Anzahl Startvorgänge: 1	1,06	0,07	1,24	0,08
		Gesamt pro Be- bzw. Entladungsvorgang	2,52	0,16	2,96	0,19
		Gesamt für Be- und Entladung	5,03	0,33	5,93	0,39

Tabelle 20: Energieverbrauch und Emissionen bei dem RoRo-Fahrzeugumschlag

Für einen eingliedrigen Transport auf der Straße werden gemäß des definierten Fallbeispiels 4,94 MJ pro transportiertes Fahrzeug an Energie benötigt. Die WTW-Energieverbräuche für die Be- bzw. Entladung auf die Bahn bzw. das Binnenschiff fallen um 10 % bzw. 20 % höher aus. Aus Tabelle 20 ist zu entnehmen, dass sich der WTW-Energieverbrauch für die Be- und Entladung beim LKW nahezu zu gleichen Teilen aus dem Startvorgang des PKWs und der zurückzulegenden Strecke zusammensetzt.

Für die Energiebedarfsberechnung beim LoLo-Verfahren ist der Energiebedarf der benötigten Fördermittel im Containerterminal (Reach Stacker, Portalkran etc.) zu ermitteln. Dieser ist von einer Vielzahl von Faktoren wie der Gestaltung des Layouts des Containerterminals, der Auslastungssituation und der Verteilung von 20- und 40-Fuß-Containern abhängig. Für den Umschlag eines 20-Fuß-Containers in einem Containerterminal sind ca. 4,4 kWh/TEU anzusetzen (vgl. ifeu et al. 2016, S. 95). Das Gesamtgewicht der 40-Fuß-Container im Fahrzeugtransport ist mit rund 10 t Gesamtgewicht sehr gering. Aus diesem Grund kann der angegebene Energieverbrauch von 4,4 kWh auch für den Fahrzeugtransport im 40-Fuß-Container herangezogen werden. Wird von Fördermitteln mit elektrischen Antrieben ausgegangen, kann die Umrechnung in den WTW-Energieverbrauch analog zu jener der Bahn durchgeführt werden (siehe Kapitel 5.6.3). Bei einem Ladefaktor von vier

Fahrzeugen je Container resultiert ein WTW-Energieverbrauch von 10,38 MJ pro Fahrzeug. Damit ist dieser etwa doppelt so hoch wie bei der Be- und Entladung mittels RoRo-Verfahren. Nachfolgend in Tabelle 21 sind die Berechnungsergebnisse je Fahrzeug in Abhängigkeit des Ladefaktors angegeben.

Energieverbrauch und Emissionen bei LoLo-Umschlag					
	Umschlag Container	Tank-to-Wheel		Well-to-Wheel	
		Energie [MJ]	Emission [kg CO ₂ e]	Energie [MJ]	Emission [kg CO ₂ e]
LoLo-Umschlag	Gesamt pro Container-Transfer im Terminal	15,84	0,00	41,50	5,69
	Gesamt pro Fahrzeug bei Ladefaktor 2	7,92	0,00	20,75	2,84
	Gesamt pro Fahrzeug bei Ladefaktor 3	5,28	0,00	13,83	1,90
	Gesamt pro Fahrzeug bei Ladefaktor 4	3,96	0,00	10,38	1,42

Tabelle 21: Energieverbrauch und Emissionen für den LoLo-Fahrzeugumschlag

Der Energieverbrauch für den LKW-Transport von Fahrzeugen der Kompaktklasse beträgt auf einer Strecke von 750 km in einem hügeligen Land (z. B. Deutschland) 1.170,98 MJ (siehe Kapitel 5.6.2). Bei Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs ist ersichtlich, dass die Be- und Entladung einen Anteil von nur 0,42 % bzw. 0,88 % bei dem RoRo- bzw. LoLo-Transport ausmacht.

Zusammenfassend ist aus diesen Berechnungen ableitbar, dass die Be- und Entladung bei ein- und mehrgliedrigen Transportketten keinen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch und die Emissionen hat.

5.7 Schritt Nr. 7 | Berechnung von Transportkosten

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Berechnungsmethodik der Kosten für Be- und Entladung, Transport und Umschlag für die Transportmittel LKW, Bahn und Binnenschiff erläutert.

Die Kostenrechnung wird im Detail für den LKW beschrieben, bei Bahn und Binnenschiff wird vorrangig auf die spezifischen Unterschiede eingegangen. In diesem Zusammenhang werden auch jeweils Referenzwerte für Kostensätze angeführt, die im Rahmen einer Literaturrecherche erhoben und durch Expertengespräche erweitert worden sind. Kostensätze sind zumeist unternehmens- bzw. länderspezifisch und können daher stark voneinander abweichen. Außerdem unterliegen sie einer ständigen Veränderung (z. B. Ölpreis, Gehälter, Zinsen), wodurch diese keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit haben. Des Weiteren wird in diesem Unterkapitel auch auf die Berechnung der Transportzeit eingegangen, die einen signifikanten Einfluss auf die Bestimmung der Transportkosten hat.

Neben der Transportgeschwindigkeit spielen auch die Be- und Entladezeit sowie etwaige Wartezeiten an Quelle und Senke des Transports wichtige Rollen bei der Berechnung der Transportkosten.

5.7.1 Kostenrechnung LKW

Die Kosten für den Gütertransport mit dem LKW setzen sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Kostenarten zusammen. Die Gliederung kann nach fixen, variablen sowie Gemeinkosten erfolgen (vgl. Wittenbrink 2014, S. 74–100).

1. Fixe Kosten

- Kalkulatorische Abschreibung (fixer Anteil)
- Kalkulatorische Zinsen
- Sonstige Vorhaltekosten (Steuern, Versicherungen, Telematik)
- Personalkosten

2. Variable Kosten

- Kalkulatorische Abschreibung (variabler Anteil)
- Kraft- und Schmierstoffe
- Wartung und Instandhaltung
- Reifen
- Mautkosten

3. Gemeinkosten

- Verwaltungskosten
- Wagniszuschlag

Fixe Kosten sind unabhängig vom Leistungsdurchsatz und fallen auch bei Nichtinanspruchnahme der Leistung an. Um die fixen Kosten auf einzelne Transporte umlegen zu können, sind diese durch die jährliche Einsatzzeit zu dividieren. Dafür werden Angaben hinsichtlich der durchschnittlichen Jahreseinsatztage und der täglichen Einsatzzeit benötigt.

Variable Kosten sind abhängig vom Leistungsdurchsatz und fallen bei Nichtinanspruchnahme einer Leistung weg. Damit diese Kosten auf einen einzelnen Transport umgelegt werden können, sind diese durch die Jahreskilometerleistung zu dividieren.

Gemeinkosten können dem Transport nicht direkt zugeordnet werden. Sie setzen sich aus den Verwaltungskosten und dem Wagniszuschlag zusammen und werden anteilmäßig auf die Transportkosten aufgeschlagen. In weiterer Folge wird in diesem Kapitel die Berechnung der einzelnen Kostenarten im Detail vorgestellt.

- **Zeitabhängige kalkulatorische Abschreibung**

Die Basis für die Berechnung der zeitabhängigen kalkulatorischen Abschreibung sind die Anschaffungskosten, aus denen mittels einer %-Preissteigerung über die Nutzungsdauer die sogenannten Wiederbeschaffungskosten ermittelt werden (vgl. Freidank und Fischbach 2012, S. 161). Der für die Abschreibung relevante Wertverlust ist aus den Wiederbeschaffungskosten durch Abzug von einem möglichen Restverkaufserlös (Restwert) zu bestimmen. Abschließend ist für die jährliche Abschreibung der ermittelte Abschreibungswert durch die effektive Nutzungsdauer zu dividieren (siehe Formel 19). Beispielhafte Werte für Anschaffungskosten sind in Tabelle 23 angeführt.

$$K_{\text{Abschreibung}} = \frac{K_{\text{Wiederbeschaffung}} - E_{\text{Restwert}}}{Z_{\text{Nutzungsdauer_effektiv}}}$$

mit

$K_{\text{Abschreibung}}$... Kalkulatorische Abschreibung [EUR/Jahr]

$K_{\text{Wiederbeschaffung}}$... Kosten bei Wiederbeschaffung [EUR]

E_{Rest} ... Restverkaufserlös nach Nutzungsdauer [EUR]

$Z_{\text{Nutz.}_\text{effektiv}}$... effektive Nutzungsdauer [EUR]

Formel 19: Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung (vgl. Freidank und Fischbach 2012, S. 161; Wittenbrink 2014, S. 110)

Als alternative Berechnungsweise der kalkulatorischen Abschreibung kann statt der Wiederbeschaffungskosten auch der Kaufpreis angesetzt werden. In diesem Fall ist der Restverkaufserlös als Rücklage für Preissteigerungen zu betrachten und somit mit $E_{\text{Rest}} = 0$ in Formel 19 einzusetzen (vgl. Wittenbrink 2014, S. 79). Da die Nutzungsdauer der zu vergleichenden Transportmittel teilweise sehr lang ist (z. B. Binnenschiff 50 Jahre) wird diese Variante in den weiteren Berechnungen herangezogen. Für die effektive Nutzungsdauer der Zugmaschine und des Anhängers sind nachfolgend beispielhafte Referenzwerte angeführt (siehe Tabelle 22).

LKW Nutzungsdauer und Restwert				
Referenzwerte	Monego 2011, S. 28	Wittenbrink 2014, S. 112–123	Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 15.04.2015	Mittelwert
Nutzungsdauer Zugmaschine [Jahre]	5	5	6	5,33
Nutzungsdauer Anhänger [Jahre]	10	8	12	10,00
Restwert [%]	15	20	k. A.	17,5

Tabelle 22: Beispielhafte Referenzwerte für Nutzungsdauer und Restwert von LKWs

Weiters sind in nachfolgender Tabelle 23 beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten angeführt. Für die bessere Vergleichbarkeit wurden die Kostensätze mittels einer jährlichen Preissteigerung von 2 %, die der durchschnittlichen österreichischen Inflationsrate der letzten 10 Jahre entspricht, auf das Jahr 2017 angepasst (vgl. Wirtschaftskammer Österreich 2015).

LKW Anschaffungskosten (Zugmaschine, Anhänger, Container und Spezialequipment)					
Kategorie		Kaufpreis [EUR]	Bezugs-jahr	Quelle	Kaufpreis 2017 [EUR]
Zugmaschine	DAF XF460 Super Spacecab	103.000	2014	EuroTransport Media Verlags- und Veranstaltungs- GmbH 2014	109.304
	MAN TGX 18.480 XXL	105.000	2014		111.427
	Mercedes Actros 1845 LS Gigaspace	110.000	2014		116.733
	Scania R 450 LA Topline	108.000	2014		114.610
	Volvo FH 460 Globetrotter XL	108.000	2014		114.610
	Scania P380	90.000 - 100.000	2015	Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, 07.03.2017	90.000 - 100.000
Anhänger	Containerchassis	25.000	2014	Wittenbrink 2014, S. 109	26.530
	RoRo Aufbau und Anhänger	100.000	2017	Schätzung des Autors	100.000
Container	40-Fuß-HC-Container (neuwertig)	6.500	2017	Container Service Hamburg 2017	6.500
	45-Fuß-Container (neuwertig)	8.000	2017	Container Service Hamburg 2017	8.000
	Cronos Car Rack	5.000	2017	Schätzung des Autors	5.000
	R-Rak von Trans-Rak (pro 2 Fahrzeuge)	1.370	2017	Paul Donaldson, E-Mail-Korrespondenz, 05.01.2017	1.370
	VUCAFRAME Containerrahmen	4.750	2013	Koen Smith, persönliche-Korrespondenz, 07.10.2013	5.142

Tabelle 23: Beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten LKW

Um den kostenintensiven RoRo-Spezialaufbau der Zugmaschine über dessen Nutzungsdauer hinaus einsetzen zu können, kann dieser demontiert und auf einer neuen Zugmaschine aufgebaut werden. Die dafür erforderlichen Umbaukosten betragen in etwa 35.000 Euro (vgl. Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 15.04.2015). Für Container und für das eingesetzte Spezialequipment (z. B. R-RAK-System) wird eine effektive Nutzungsdauer von 10 Jahren angenommen. Die berechnete kalkulatorische Abschreibung wird in einen fixen (zeitabhängig) und variablen (kilometerabhängig) Anteil aufgeteilt. Im europäischen Fernverkehr ist ein variabler Anteil von 70 % sinnvoll (vgl. Wittenbrink 2014, S. 113). Abschließend ist die ermittelte kalkulatorische Abschreibung mittels Angaben der Jahreskilometerleistung bzw. Einsatztage und -stunden (siehe Tabelle 24) auf einzelne Transporte herunterzubrechen.

Referenzwerte für den Einsatz von LKW und Personal				
Kategorie	Monego 2011, S. 28	Wittenbrink 2014, S. 112–126	Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, 15.04.2015	Mittelwert
Jahreskilometerleistung [km]	140.000	130.000	144.000	138.000
Jahreseinsatztage [d]	260	240	252	251
Faktor der Fahrpersonalbereitschaft [Fahrer/LKW]	k. A.	1,25	1,15	1,2
Einsatzstunden pro Tag [h]	10	12	k. A.	11

Tabelle 24: Beispielhafte Referenzwerte für den Einsatz von LKW und Personal

- **Kalkulatorische Zinsen**

Kalkulatorische Zinsen sind Kosten für das gebundene betriebsnotwendige Kapital. Diese sind aus den Fremdkapitalzinsen für aufgenommene Kredite und den Eigenkapitalzinsen als Ersatz für entgangene Gewinne für eine theoretisch denkbare Anlage des Eigenkapitals zu berechnen (vgl. Bachmann 2009, S. 79). Mit dem sogenannten Durchschnittsverfahren, in dem eine über den Zeitablauf gleichmäßige Verringerung des eingesetzten Kapitals angenommen wird, können diese, wie in Formel 20 dargestellt, berechnet werden.

$$K_{Zinsen} = 0,5 * K_{Anschaffung} * \frac{Zins_{FK} + Zins_{EK}}{2}$$

mit

K_{Zinsen} ... Kalkulatorische Zinsen für das Anlagevermögen [EUR]

$K_{Anschaffung}$... Kosten bei Anschaffung [EUR]

$Zins_{FK}$... Zinssatz für Fremdkapital [%]

$Zins_{EK}$... Zinssatz für Eigenkapital [%]

Formel 20: Berechnung der kalkulatorischen Zinsen (vgl. Röhrich 2014, S. 14)

Die Höhe der Zinsen ist von der wirtschaftlichen Gesamtsituation sowie von der individuellen Bonität des Unternehmers abhängig. In den nachfolgenden Berechnungen wird von einem Zinssatz für Eigenkapital von 3 % und für Fremdkapital von 6 % ausgegangen. Neben den kalkulatorischen Zinsen für das Anlagevermögen ist auch die Mittelbindung für das Umlaufvermögen (z. B. Tankvorrat, Schmierstoffe, Fahrerlöhne, Ladungssicherung, Ersatzteile) zu berücksichtigen. Bei einem beispielhaften Tagesumsatz von 750 Euro und einem Zahlungsziel von 20 Werktagen

ist das Umlaufvermögen mit 15.000 Euro je LKW anzusetzen (vgl. Wittenbrink 2014, S. 113).

- **Sonstige Vorhaltekosten**

Als sonstige Vorhaltekosten ($K_{Vorhalte}$) sind die Kfz-Steuer, die Fahrzeug- und Transportversicherung sowie die Kommunikationskosten zu nennen. Als beispielhafte Referenzwerte werden die Kosten für eine Zugmaschine und einen Anhänger mit insgesamt 8.825 Euro pro Jahr angegeben (vgl. Monego 2011, S. 25–30).

- **Personalkosten**

Die Personalkosten für einen LKW-Fahrer setzen sich aus Bruttogehalt, Lohnnebenkosten und etwaigen Sonderausgaben (z. B. Weiterbildungen) zusammen. Da die Anzahl der Einsatztage des LKWs oftmals jene eines Fahrers übertreffen, ist dies bei der Berechnung der Personalkosten mit einem Fahrerbereitstellungsfaktor zu berücksichtigen. In diesem sind auch sämtliche Abwesenheitszeiten des LKW-Fahrers (z. B. Krankenstand) berücksichtigt. Zusätzlich sind für Dienstreisen Tages- und Nächtigungsgelder (Diäten) zu bezahlen. Die Berechnung der daraus resultierenden Gesamtpersonalkosten ist in nachfolgender Formel 21 dargestellt:

$$K_{LKW_Personal} = (L_{LKW_Fahrer} * (1 + L_{Nebenk.}) + K_{Sonst.}) * F_{Personal} + K_{Diäten}$$

mit

$K_{LKW_Personal}$... *Kosten für Personal je LKW [EUR/Jahr]*

L_{LKW_Fahrer} ... *Lohn von LKW – Fahrer (Brutto) [EUR/Jahr]*

$L_{Nebenk.}$... *Lohnnebenkosten [%]*

$K_{Sonst.}$... *Sonstige Kosten für Personal [EUR/Jahr]*

$F_{Personal}$... *Faktor der Fahrerbereitstellung je LKW*

$K_{Diäten}$... *Diäten für Tages – und Nachtgeld [EUR/Jahr]*

Formel 21: Berechnung der Gesamtpersonalkosten je LKW (vgl. Wittenbrink 2014, S. 111)

Die Bruttogehälter und Lohnnebenkosten sind in Europa sehr unterschiedlich, wodurch eine länderspezifische Berechnung durchzuführen ist. Das kollektivvertragliche Mindestentgelt in Österreich für einen Kraftfahrer mit einer Betriebszugehörigkeit von länger als 10 Jahren liegt bei 22.767 Euro (vgl. Wirtschaftskammer 2017, S. 2). Das *Arbeitsmarktservice Österreich* (vgl. 2017) geht bei vorhandener Berufserfahrung von einem Einstiegsgehalt von 26.180 Euro aus. Die Lohnnebenkosten im definierten Untersuchungsgebiet im Jahr 2016 variieren zwischen 16 % in Luxemburg und 46 % in Frankreich. In Österreich betragen diese 36 % (vgl. Statistisches Bundesamt

Deutschland 2016). Als Faktor für die Personalbereitschaft für die definierte jährliche Einsatzzeit kann als Referenzwert 1,2 angegeben werden (siehe Tabelle 24). Sonstige Kosten für (z. B. Schulungen) werden mit 300 Euro pro LKW angenommen.

Aufgrund der Tatsache, dass LKW-Fahrer ihre Tätigkeit nicht am Dienort verrichten, erhalten sie bei Abwesenheit von mehr als 3 Stunden ein Tagesgeld. Im Fall einer Nächtigung ist zusätzlich ein Nächtigungsgeld fällig. Im Fernverkehr ist es durchaus üblich, dass ein Mitarbeiter jedes zweite Wochenende im Ausland verbringt, wodurch zusätzlich zu den Einsatztagen Reisediäten anfallen (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 07.03.2017).

Im österreichischen Kollektivvertrag für das Güterbeförderungsgewerbe sind für Dienstreisen in Österreich 26,40 Euro Tagesgeld pro Kalendertag (12 Stunden) und 15 Euro pro Nächtigung zu bezahlen. Für Dienstreisen im Ausland (im betrachteten Untersuchungsgebiet) schwanken die Tagesgelder zwischen 21,49 und 29,76 Euro und die Nachtgelder zwischen 12,92 und 28,59 Euro (vgl. Wirtschaftskammer Österreich 2017, S. 21–29). Als Mittelwert im definierten Untersuchungsbereich wird in weiterer Folge mit einem Tagesgeld von 26,45 Euro und mit einem Nachtgeld von 20,35 Euro gerechnet. Bei Anwendung von Formel 21 ergeben sich aufgrund der angegebenen Referenzwerte jährliche Gesamtpersonalkosten von ca. 56.000 Euro pro LKW.

- **Kraft- und Schmierstoffkosten**

Die Basis für die Ermittlung der Kraft- und Schmierstoffkosten bildet der spezifische Energieverbrauch, der in der ökologischen Berechnung angeführt ist (siehe Formel 10). Die Kraft- und Schmierstoffkosten sind wie folgt zu berechnen:

$$K_{Treibstoff} = K_{Diesel} * KV_{LKW_Diesel} * (1 + Z_{Schmierst.}) + K_{AdBlue} * KV_{LKW_AdBlue}$$

mit

$K_{Treibstoff}$... Kosten für Kraft – und Schmierstoffe [Euro/km]

K_{Diesel} ... Kosten für Dieselkraftstoff [Euro/l]

KV_{LKW_Diesel} ... Kraftstoffverbrauch Diesel von LKW [l/km]

$Z_{Schmierst.}$... Zuschlag für Schmierstoffe [%]

($Z_{Schmierst.} = 1,0$ [%])

K_{AdBlue} ... Kosten für AdBlue [Euro/l]

KV_{LKW_AdBlue} ... Kraftstoffverbrauch AdBlue von LKW [l/km]

Formel 22: Berechnung der Kraft- und Schmierstoffkosten (vgl. Wittenbrink 2014, S. 82–83)

Für die Umrechnung des Energieverbrauchs von der Einheit Megajoule in Liter wird der diesbezügliche Energiefaktor benötigt. Dieser kann bei Dieselkraftstoff mit $e_{TTW} = 35,9$ [MJ/l] angenommen werden (vgl. Norm DIN EN 16258 2013; S. 23).

Der Kostensatz für Dieselkraftstoff setzt sich bei Spediteuren aus einem Mischkostensatz aus dem Dieselpreis für Großabnehmer an der eigenen Tankstelle und aus jenem an externen Tankstellen zusammen. Als beispielhafte Referenzwerte kann dabei von durchschnittlich 0,86 Euro/l an der eigenen bzw. 0,95 Euro/l (exkl. USt.; Stand November 2016; Deutschland) an der externen Tankstelle ausgegangen werden (vgl. Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung 2014; Statista 2016).

Bei den betrachteten Zugmaschinen der Emissionsklasse Euro 6 ist die Zugabe von *AdBlue* erforderlich. Dadurch können die durch rußarme und verbrauchsgünstige Einstellung der Dieselmotoren entstehenden großen NO_x -Mengen weitgehend beseitigt werden (vgl. Schreiner 2015, S. 43). Der *AdBlue* Verbrauch ist fahrzeugabhängig und beträgt im Durchschnitt für die in dieser Arbeit betrachteten Zugmaschinen 1,55 l auf 100 km und kann mit 0,25 Euro/l kalkuliert werden (vgl. EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH; Wittenbrink 2014, S. 107).

Bei Anwendung von Formel 22 mit den angeführten beispielhaften Referenzwerten kommt ein beladener RoRo-LKW auf einen Dieselkraftstoffverbrauch von 36,15 Litern (Topografie Österreich, bergig) bzw. entstehen Treibstoff- und Schmierstoffkosten in Höhe von 33,34 Euro auf 100 km.

- **Wartungs- und Instandhaltungskosten**

Der Transportdienstleister *Hödlmayr* schätzt die Gesamtkosten für Wartung und Instandhaltung ($K_{Wartung}$) für einen RoRo-LKW auf etwa 1.000 Euro pro Monat (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 07.03.2017). Zusätzlich sind LKW-Reinigungen notwendig, die mit 45 Euro pro Vorgang zu kalkulieren sind (vgl. Wittenbrink 2014, S. 86). Diese werden monatlich durchschnittlich ein Mal im Sommer bzw. zwei Mal im Winter vorgenommen. Pro Jahr werden ca. 18 Reinigungen pro LKW durchgeführt (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 15.04.2015).

- **Reifenkosten**

Die betrachteten Zugmaschinen verfügen über zwei Achsen und sechs Reifen. Bei dem Containerchassis bzw. dem RoRo-Anhänger wird in der Kalkulation mit drei bzw. zwei Achsen und somit mit sechs bzw. vier Reifen kalkuliert (vgl. EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH 2014; Kässbohrer Transport Technik 2015).

Als beispielhafte Referenzwerte wird die Reifenlaufleistung im Fernverkehr mit 120.000 bzw. 150.000 km für die Zugmaschine bzw. für den Anhänger angenommen. Die Kosten pro Reifen liegen bei 420 bzw. 370 Euro für Zugmaschine bzw. Anhänger (vgl. Wittenbrink 2014, S. 86–125). Aus den genannten Angaben resultieren für den RoRo-Transport Reifenkosten von 3,09 Euro auf 100 km. Für den LoLo-Transport fallen aufgrund der höheren Achsenanzahl im gewählten Beispiel 3,58 Euro auf 100 km an.

- **Mautkosten**

Für die Benützung von Straßen können sogenannte Mautkosten anfallen, die länder- bzw. streckenspezifisch sind. Diese sind abhängig von der Fahrzeugart, vom max. zulässigen Gesamtgewicht und von der Emissionsklasse. Die Maut wird für eine bestimmte Fahrstrecke oder für einen bestimmten Nutzungszeitraum berechnet.

In Österreich wird eine fahrleistungsabhängige Maut verrechnet, die auch Zuschläge für Luftverschmutzung und Lärmbelästigung enthält. Für einen LKW mit über 3,5 t höchstzulässigem Gesamtgewicht mit vier oder mehr Achsen werden bei der EURO-Emissionsklasse VI 0,37 Euro pro Kilometer verrechnet. Auf definierten Sondermautstrecken (z. B. A 10 Tauerntunnel) kommt ein erhöhter Tarif zur Anwendung (vgl. ASFINAG 2017). Mithilfe von Online-Berechnungstools (z. B. *MAP&GUIDE*) können die Mautkosten auch für länderübergreifende Transporte berechnet werden.

- **Kosten für die Be- und Entladung**

Die Be- und Entladung beim RoRo-Transport wird vom LKW-Fahrer durchgeführt und wird dementsprechend in der LKW-Kostenrechnung den Personalkosten zugeordnet (Dauer – siehe Unterpunkt Transportzeit).

Für die Beladung der Fahrzeuge in die Container entstehen bei einem 40-Fuß-Container Zeitaufwände für das Ein- bzw. Ausfahren sowie für die Fixierung der Fahrzeuge. Beim *VUCAFRAME* werden vom Hersteller dafür 5 Minuten pro Containerrahmen mit drei Fahrzeugen angegeben (Koen Smith, E-Mail-Korrespondenz, UNIT45, Intermodal Europe Hamburg, 24.12.2013). Für die Be- bzw. Entladung bei Nutzung des *R-RAK-Systems* ist mit einem höheren Zeitaufwand zu rechnen (siehe Kapitel 2.3.6).

Des Weiteren entstehen für den Hub der Container am Umschlagsort Kosten für die Infrastruktur und Handling (z. B. Containerbrücke), die durchschnittlich 20 Euro je Vorgang betragen (vgl. BVU und TNS 2014, S. 160).

- **Gemeinkosten**

Die Gemeinkosten, die nicht direkt dem Fahrzeugeinsatz zuordenbar sind, setzen sich aus Verwaltungskosten, Wagnis, Unternehmerlohn und Gewinn zusammen. Für den Einsatz der Fahrzeugflotte wird ein Verwaltungsapparat benötigt, der für die Aufgaben der Fahrzeugdisposition, Personalverwaltung, IT, Marketing und Vertrieb verantwortlich ist. Zusätzlich entstehen u. a. Gebäude-, Energie-, Kommunikations- und Versicherungskosten. Diese Kosten für die Verwaltung sind auf die Fahrzeugflotte umzulegen (vgl. Wittenbrink 2014, S. 98–99).

Außerdem sind Kostenzuschläge für Wagnis und Gewinn des Spediteurs zu kalkulieren. Die Wagniskosten setzen sich aus Entwicklungsrisiken, Produktionsfaktorrisiken (z. B. Unfall), Leistungsartenrisiken (z. B. Transportschäden) und Finanzrisiken zusammen. In Kapitalgesellschaften wird die Tätigkeit des Geschäftsführers mit einem Gehalt vergütet, das in die Personalkosten einfließt. In Einzelunternehmen wird die Arbeit des Unternehmers in Form des Gewinns abgegolten (vgl. Barwig und Hartmann 2015, S. 36–39).

Die Höhe der Zuschläge ist u. a. von der Unternehmensgröße abhängig. Als Referenzwerte können auf die variablen und fixen Kosten des Fahrzeugeinsatzes die Verwaltungskosten mit 10 % und die die Wagniskosten mit 2 % aufgeschlagen werden (vgl. Wittenbrink 2014, S. 100–116). Die Gemeinkosten werden beim Bahn- und Binnenschifftransport analog auf die Kosten aufgeschlagen, wodurch darauf in weiterer Folge nicht mehr im Detail eingegangen wird.

- **Transportzeit**

In diesem Unterkapitel wird auch auf die Berechnung der Transportzeit eingegangen, da die Kenntnis dieser erforderlich ist, um fixe Kosten auf einzelne Transporte umzulegen.

Die Gesamtzeit von LKW-Transporten setzt sich im Wesentlichen aus der Be- und Entladung, der Fahrzeit sowie den gesetzlich vorgeschriebenen Pausen- und Ruhezeiten zusammen. Die Fahrgeschwindigkeit ist naturgemäß stark von der Strecke sowie von der Verkehrssituation abhängig. Im Fernverkehr ist als Referenzwert mit durchschnittlich 72 km/h zu rechnen (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 07.03.2017). Die gesetzlich erlaubte max. Lenkzeit pro Tag beträgt 9 Stunden und darf bis zu zweimal pro Woche auf 10 Stunden erhöht werden. Die auf die Lenkzeit folgende Ruhezeit muss mindestens 11 Stunden betragen. Zudem muss nach 4,5 Stunden Lenkzeit eine Pause von 45 Minuten eingelegt werden, die alternativ auch in Form von kleineren Pausen eingeplant werden darf (vgl. Wittenbrink 2014, S. 87).

Als Referenzwert aus der Praxis ist an Quelle und Senke des Transports inkl. etwaiger Wartezeiten mit durchschnittlich 1,5 Stunden Aufenthalt zu rechnen (Dorian Deisenhammer, persönliche Korrespondenz, Lagermax Autotransport GmbH, Wien, 15.10.2014).

5.7.2 Kostenrechnung Bahn

Die Kostenrechnung für den Schienengüterverkehr ist abgesehen von spezifischen Besonderheiten ähnlich aufgebaut wie jene für den Straßengüterverkehr. Analog zu diesem sind leistungs- und zeitabhängige Kostensätze zu entwickeln, um diese auf einzelne Transporte umlegen zu können. Dafür sind u. a. Annahmen hinsichtlich der Jahreskilometerleistung und der Einsatzzeit erforderlich.

- **Zeitabhängige kalkulatorische Abschreibung**

Die Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung erfolgt analog zur Berechnung für den LKW-Transport (siehe Formel 19). Zu diesem Zweck werden insbesondere die Anschaffungskosten, die Nutzungsdauer und die jährliche Laufleistung von Lokomotive, Waggons sowie ggf. Container und Spezialequipment benötigt. Mittels der nachfolgend angegebenen beispielhaften Referenzwerte kann die Berechnung durchgeführt werden (siehe Tabelle 25). Die ermittelten Referenzwerte für die Anschaffung stammen zum Teil aus unterschiedlichen Bezugsjahren und wurden analog zur LKW-Kostenrechnung – unter Berücksichtigung der jährlichen Inflation – auf das Jahr 2017 bezogen.

Anschaffungskosten Güterzug				
Kategorie	Kosten [EUR]	Bezugs-jahr	Quelle	Kosten 2017 [EUR]
Elektro-Lok Taurus	3.140.000	2008	Der Standard 2008	3.752.591
Containertragwagen (Sgns 691)	29.600	2010	BVU und TNS 2014, S. 154	34.001
Fahrzeugtragwagen (Laaers)	125.000	2017	Martin Kausal, persönliche Korrespondenz, 24.03.2017	125.000

Tabelle 25: Beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten Güterzug

Als Referenzbeispiel für die Lokomotive wird die von der ÖBB im Güterverkehr eingesetzte „Taurus“-Lok (Baureihen 1016, 1116 und 1216) herangezogen (vgl. Rechnungshof 2015, S. 539). Insgesamt wurden 382 „Taurus“-Lokomotiven mit einem durchschnittlichen Einkaufspreis von 3,14 Mio. Euro angeschafft (Der Standard 2008). Die Anschaffungskosten für einen Containertragwagen werden mit 29.600 Euro angegeben (Stand 2010) (vgl. BVU und TNS 2014, S. 154). Der Neupreis für einen doppelstöckigen Fahrzeugtragwagen (z. B. Laaers) ist mit ca. 125.000 Euro deutlich

höher (Martin Kausal, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 24.03.2017).

Neben dem Kauf sind auch alternative Finanzierungsformen wie Leasing oder Miete möglich. Die jährlichen Mietkosten für einen zweiachsigen Containerwaggon betragen 7.300 Euro (vgl. Barwig und Hartmann 2015, S. 114). Für einen offenen Doppelstockwaggon sind bei einer Leasinglaufzeit von 5 Jahren ungefähr 20.000 Euro pro Jahr für einen Waggon zu kalkulieren (Wolfgang Kragl, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 18.01.2016).

Die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer für Schienenfahrzeuge liegt bei 25 Jahren (vgl. Bundesministerium der Finanzen 2000). Die durchschnittliche jährliche Laufleistung einer Streckenlok der ÖBB beträgt 173.000 km (Stand 2013), wofür etwa 3.360 Einsatzstunden benötigt werden (vgl. Rechnungshof 2015, S. 445, BVU und TNS 2014, S. 152).

Die Einsatzstunden von Bahnwaggons sind aufgrund der Be- und Entladezeiten höher und sind für Container- bzw. Fahrzeugtragwagen mit 6.300 bzw. 5.100 Stunden pro Jahr anzusetzen (BVU und TNS 2014, S. 152). Bei einem Ganzzug-Rundlauf in Ost- und Westeuropa mit Be- und Entladung an vier Destinationen kommen eingesetzte Bahnwaggons auf ca. 120.000 km pro Jahr (Martin Kausal, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 24.03.2017).

- **Kalkulatorische Zinsen**

Die kalkulatorischen Zinsen für das benötigte Kapital (Investitions- und Umlaufvermögen) sind wie in Formel 20 dargestellt zu berechnen. Der Tagesumsatz eines Güterzuges ist bei einer beispielhaften Transportdistanz von 850 km mit 13.040 Euro anzunehmen (vgl. Barwig und Hartmann 2015, S. 115). Wird dieser Betrag analog zur LKW-Kostenrechnung mit einem Zahlungsziel von 20 Werktagen multipliziert, so resultiert daraus ein beispielhaftes Umlaufvermögen von 260.800 Euro pro Güterzug.

- **Sonstige Bahn-Vorhaltekosten**

Für die Versicherungen von Lok und Bahnwaggons ist mit 1,3% der Anschaffungskosten zu kalkulieren (vgl. BVU und TNS 2014, S. 154).

- **Wartungs- und Instandhaltungskosten**

Ein beispielhafter Referenzwert für die durchschnittlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten kann anhand der Triebfahrzeugflotte der ÖBB ermittelt werden. Die ÖBB hat insgesamt 311 Triebwagen mit Elektro-Traktion im Einsatz, die jährlich Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen in Höhe von 56,39 Mio. Euro verursachen (Stand 2013). Dies entspricht durchschnittlich 181.318 Euro pro Lok (vgl.

Rechnungshof 2015, S. 425–489). Die durchschnittlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten je Bahnwaggon können aus den jährlichen Vorhaltekosten für Container- und Fahrzeugtragwagen nach Abzug sonstiger Kosten kalkuliert werden und betragen etwa 3.000 Euro (vgl. BVU und TNS 2014, S. 155).

- **Personalkosten**

Das Personal setzt sich aus Lokführer, Lokrangierführer und Wagenmeister zusammen. Die Kostenkalkulation erfolgt analog zur LKW-Kostenrechnung, nachfolgend sind Referenzwerte für die Berechnung angegeben.

Die ÖBB hat insgesamt 1.654 Triebfahrzeuge im Einsatz und zu diesem Zweck 3.855 Lokführer eingestellt. Daraus resultiert ein Personalbereitschaftsfaktor von 2,33 je Triebfahrzeug. Die Gesamtkosten je Triebfahrzeugführer betragen bei der ÖBB 70.000 Euro pro Jahr (vgl. Rechnungshof 2015, S. 425–447). Bei jährlichen 3.360 Fahrzeugeinsatzstunden einer Lok resultiert daraus ein Kostensatz von 48,54 Euro/h für den Lokführer. Derselbe Kostensatz wird in weiterer Folge auch für den Lokrangierführer angesetzt. Für das Rangieren der Lok und der Waggon im Nahbereich von Quelle und Senke wird für jeweils 60 Minuten ein Lokrangierführer benötigt. Sollte zusätzlich ein Umspannen (z. B. von Diesel auf Elektro) erforderlich sein, sind dafür 30 Minuten zusätzlich zu kalkulieren. Des Weiteren muss vor jeder Zugfahrt die Betriebssicherheit und Verkehrstauglichkeit von Ganzzügen sichergestellt werden. Zu diesem Zweck ist der Personalaufwand eines Wagenmeisters für etwa 30 Minuten zu kalkulieren, für den ein Kostensatz von 25 Euro angesetzt wird (vgl. Barwig und Hartmann 2015, S. 114).

- **Infrastrukturkosten**

Eisbahnverkehrsunternehmen (EVU) müssen eine *Trasse*, eine geplante zeitliche und räumliche Belegung eines Streckenabschnitts, beantragen und dafür ein Trassenentgelt bezahlen (vgl. Janicki 2011, S. 30–37). Mithilfe des *Charging Information Systems (CIS)* von *RailNetEurope*, dem europäischen Verband für Schieneninfrastrukturunternehmen und -behörden, können die Kosten für grenzüberschreitende Fahrten berechnet werden. Zu diesem Zweck sind die Transportstrecke und der Güterzug zu definieren. Dafür werden Angaben hinsichtlich der Lokomotive und Waggon (Anzahl, Länge und Gewicht) sowie der Beladung (Gewicht und Achslasten) benötigt. Des Weiteren ist die Traktionsart (Diesel oder Elektro) und die durchschnittliche Geschwindigkeit anzugeben (vgl. RailNetEurope 2017). Wenn sich auf der Bahnstrecke die Traktionsart ändert (z. B. von Diesel auf Elektro) ist ein Traktionswechsel durchzuführen. Dieser ist mit einem Zeitaufwand von ca. 60 Minuten und einem Kostenaufwand von etwa 178 Euro verbunden (vgl. BVU und TNS 2014, S. 158–160).

Die Preise dafür sind sehr unterschiedlich. Beispielsweise setzt sich das Trassenpreissystem von DB Netz (vgl. 2016) aus einem Grundpreis je Streckenkategorie (von 2,25 bis 9,97 Euro pro Trassenkilometer auf der Fernstrecke), einem Trassenproduktfaktor (z. B. 1,0 bei Standard-Trasse) und diversen Aufschlägen (z. B. für laute oder schwere Güterzüge) zusammen.

- **Kosten für Traktionswechsel, erste bzw. letzte Meile und Zugbildung**

Neben den Trassengebühren sind für die sogenannte erste und letzte Meile zusätzliche Nutzungsentgelte erforderlich. Oftmals ist es für die EVU nicht möglich, den Transport auf der sogenannten ersten und letzten Meile selbst durchzuführen. Quelle und Senke der Transporte liegen meist in Gewerbegebieten bzw. Logistikknoten, deren Bahninfrastruktur oftmals an spezialisierte Infrastrukturunternehmen vermietet ist, wodurch die Tarifstrukturen sehr unterschiedlich sind. Als beispielhafter Referenzwert ist je ein- und ausfahrenden Waggon mit durchschnittlichen Kosten von 8 Euro zu rechnen. Sollte darüber hinaus ein Traktionswechsel erforderlich sein (z. B. von Elektro auf Diesel-Traktion), sind für die Ein- und Ausfahrt jeweils 85 Euro zu kalkulieren (vgl. BVU und TNS 2014, S. 154–159).

- **Energiekosten**

Die Basis für die Ermittlung der Energiekosten bildet der spezifische Verbrauch, der in der ökologischen Berechnung aufgeführt ist (siehe Formel 13). Wenn EVUs bei der elektrischen Bremsung der Triebfahrzeuge den dabei entstehenden Strom in die Oberleitung einspeisen, gibt es eine definierte Vergütungszahlung (vgl. DB Energie 2017, S. 2). Die in Formel 13 dargestellte Energieverbrauchsrechnung basiert auf durchschnittlichen Erfahrungswerten von EVUs, wodurch dieser Effekt bereits berücksichtigt ist.

Die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) im Untersuchungsgebiet bieten jeweils individuelle Tarife und Regelungen für die Verrechnung der verbrauchten Energie. Der Bahnstrompreis beträgt in Deutschland 12,20 ct/kWh (Mittel- und Hochtarif, 05:30–22.00 Uhr, Stand 2014) und in Österreich 11,95 ct/kWh (Tarif 1, 06:00–24:00 Uhr, Stand 2015) (vgl. Bundesnetzagentur 2013, S. 42; OEBB-Infrastruktur 2014).

Im Vergleich zum Strompreis für industrielle Verbraucher (Jahresverbrauch zwischen 500 MWh und 2.000 MWh) ist der ab Oberleitung geltende Bahnstrom in Deutschland bzw. Österreich um 47,7 % bzw. 63,7 % höher (vgl. Eurostat 2017). Um die länderspezifischen Unterschiede bei den Bahnstrompreisen abschätzen zu können, werden in weiterer Folge die länderspezifischen Statistiken zu Strompreisen für industrielle Verbraucher herangezogen und mit 55,7 % (Mittelwert aus den Mehrkosten aus Österreich und Deutschland) beaufschlagt. Neben einem definierten Entgelt je Entnahmemenge in kWh wird zusätzlich für die Auslesung der Energieverbrauchs-

Messeinrichtung sowie für die Weitergabe der Daten ein Entgelt berechnet. Dieses beträgt beispielsweise bei *DB Energie* (vgl. 2017, S. 1) 193,87 Euro/Jahr.

- **Kosten für die Be- und Entladung**

Die Personalkosten für die Be- und Entladung kosten je Vorgang in Billiglohnländern wie z. B. Rumänien ca. 5 Euro pro Fahrzeug. Im Vergleich dazu ist in Österreich mit 10–15 Euro pro Fahrzeug zu rechnen (Martin Kausal, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 24.03.2017). Die Kosten beim containerisierten Fahrzeugtransport setzen sich aus der Fixierung der Fahrzeuge im Container sowie aus dem Container-Hub zusammen (siehe LKW-Kostenrechnung).

- **Transportzeit**

Die Gesamttransportdauer eines Rundlaufs im Bahntransport ist abhängig von der Aufenthaltsdauer an Quelle und Senke sowie von der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit.

Je nach Abwicklung und infrastrukturellen Gegebenheiten (z. B. Traktionswechsel, Nebengleise, Anzahl Beladerampen) ist die Zeitspanne an Quelle und Senke des Transports stark schwankend und kann zwischen 8 und 48 Stunden betragen. Zudem kann keine allgemeingültige Transportgeschwindigkeit angegeben werden, da diese insbesondere von Ost- zu Westeuropa sehr unterschiedlich ist. Während bei einem Rundlauf zwischen Graz und Bremerhaven beispielsweise eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 45 km/h erreicht wird, so kann diese für einen Rundlauf zwischen Ost- und Westeuropa auf 20 km/h abfallen. Gründe dafür sind neben Grenzwarzeiten und Baustellen auch erforderliche Traktionswechsel während des Transports (Martin Kausal, persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 24.03.2017). Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass eine spezifische Planung des Rundlaufs erforderlich ist um einen realistischen Wert für die benötigte Gesamttransportdauer zu ermitteln.

5.7.3 Kostenrechnung Binnenschiff

Die Kostenrechnung für den Güterverkehr auf der Wasserstraße ist ähnlich aufgebaut wie jene der Verkehrsträger Straße und Schiene (siehe Kapitel 5.7.1 und 5.7.2). In weiterer Folge wird auf die spezifischen Gegebenheiten der Kostenrechnung für das Binnenschiff eingegangen (z. B. Ufergeld, Beladung RoRo-Binnenschiff).

- **Zeitabhängige kalkulatorische Abschreibung**

Mittels der nachfolgend angegebenen beispielhaften Referenzwerte (siehe Tabelle 26) für die Anschaffungskosten und Nutzungsdauer kann die Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung gemäß Formel 19 durchgeführt werden.

Anschaffungskosten Binnenschiff (Wasserstraßenklasse V)				
Kategorie	Kosten [EUR]	Bezugsjahr	Quelle	Kosten Jahr 2017 [EUR]
Kasko	1.610.000	2004	Versuchsanstalt für Binnenschiffbau 2004, S. 97	2.082.707
Antriebsanlage	740.000	2004		957.269
sonst. Maschinenanlagen	290.000	2004		375.146
Ausrüstung und Einrichtung	290.000	2004		375.146

Tabelle 26: Beispielhafte Referenzwerte für Anschaffungskosten Binnenschiff

Hinsichtlich der durchschnittlichen Nutzungsdauer von Binnenschiffen können für den Kasko, dem schwimmfähigen Rumpf des Schiffes, 50 Jahre angenommen werden. Für die Antriebsanlage des Schiffes liegt die durchschnittliche Nutzungsdauer bei 20 Jahren. Sonstige Maschinenanlagen sowie die Ausrüstung und Einrichtung des Schiffes müssen bereits nach 15 Jahren erneuert werden (vgl. Versuchsanstalt für Binnenschiffbau 2004, S. 97).

Für die Umlegung der Kosten auf einzelne Transporte werden leistungs- und zeitabhängige Kostensätze benötigt, wodurch Annahmen hinsichtlich der Jahreskilometerleistung und der Einsatzzeit zu treffen sind. Die jährliche Anzahl Einsatztage liegt bei einem Binnenschiff bei etwa 340 Tagen. In der Binnenschiffahrt wird zwischen der Tagesfahrt mit 14 Betriebseinsatzstunden, der halbständigen Fahrt mit 16 Stunden und einer ständigen Fahrt mit 22 Stunden unterschieden. Die bevorzugte Betriebsform der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Motorschiffe mit einer Tragfähigkeit von über 1.000 t ist die halbständige Fahrt mit 16 Stunden (vgl. BVU 2014, S. 177–178).

Bei 340 Einsatztagen pro Jahr resultiert daraus eine jährliche Fahrzeit von 5.440 Stunden. Bei einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h (siehe Kapitel 2.2.4) kann eine jährliche Laufleistung von 81.600 km erreicht werden. Zusätzlich zu der Fahrzeit ist die jährliche Be- und Entladezeit zu addieren, um die Gesamteinsatzzeit eines Binnenschiffes ermitteln zu können. Die Anzahl der Be- und Entladevorgänge des Binnenschiffes ist vom Fahrplan abhängig. Ein Liniendienst zwischen Passau (DE) und Orsova (RO) kommt beispielsweise auf 36 Rundläufe pro Jahr (vgl. Hohberger 2008, S. 5).

Wird von jeweils einer Be- und Entladung je Rundlauf mit einer Prozesszeit von 5 Stunden ausgegangen (siehe Kapitel 2.3.5), so ergeben sich im genannten Fallbeispiel 360 Stunden pro Jahr. Aus den genannten Angaben resultiert eine jährliche Gesamteinsatzzeit von 5.800 Stunden (Fahrzeit, Be- und Entladung), die in weiterer Folge als Basis für die zeitabhängigen Kostensätze herangezogen wird.

- **Kalkulatorische Zinsen**

Die kalkulatorischen Zinsen für das benötigte Kapital (Investitions- und Umlaufvermögen) können wie in Formel 20 dargestellt berechnet werden. Für das Umlaufvermögen eines Binnenschiffs werden die Personal- und Gasölkosten für 2 Monate herangezogen (vgl. Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung 2017). Diese betragen etwa 150.000 Euro pro Binnenschiff (siehe nachfolgende Angaben Personal- und Energiekosten).

- **Sonstige Vorhaltekosten**

Die jährlichen Versicherungskosten sind von der Art des verwendeten Binnenschiffs abhängig und betragen ca. 12 Euro pro tragfähige Tonne (vgl. Versuchsanstalt für Binnenschiffbau 2004, S. 88). Daraus ergibt sich für ein Motorgüterschiff der Wasserstraßenklasse V mit einer Tragfähigkeit von 2.500 Tonnen eine Versicherungssumme von 30.000 Euro pro Jahr.

- **Personalkosten**

Die Mindestbesatzung auf den europäischen Wasserstraßen ist nicht einheitlich. Sie ist abhängig von der Binnenschifffahrtsart (z. B. Einzelfahrer oder Schubverband) und der täglichen Einsatzzeit. Beispielsweise werden auf dem Rhein für Binnenschiffe der Wasserstraßenklasse V bei der halbständigen Fahrt (16 Stunden pro Tag) jeweils ein Schiffsführer, Steuermann und Matrose gefordert. Für die beschriebene Besatzung fallen bei 340 Einsatztagen Personalkosten von 315.085 Euro pro Jahr an. Die Personalkosten für eine Schiffsbesatzung in Österreich sind höher und werden mit 387.056 Euro pro Jahr angegeben (vgl. BVU 2014, S. 184).

- **Wartungs- und Instandhaltungskosten**

Die durchschnittlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten können mit 12 bzw. 25 Euro je tragfähige Tonne für ein neues bzw. ein gebrauchtes Binnenschiff angegeben werden (vgl. Versuchsanstalt für Binnenschiffbau 2004, S. 88). Über die gesamte Lebensdauer ist in weiterer Folge mit 18,5 Euro je tragfähiger Tonne, dem Mittelwert aus den angegebenen Werten, zu rechnen.

- **Infrastrukturkosten**

Neben dem Binnenschiff und dem Personal sind auch Kosten zur Nutzung der Infrastruktur zu berücksichtigen. Für das Befahren der Wasserstraße werden teilweise verkehrsleistungsabhängige Gebühren verrechnet. Diese entsprechen beispielsweise auf dem Main-Donau-Kanal für Fahrzeuge 0,36 Cent je Tonnenkilometer bzw. pro 40-Fuß-Container 5 Euro/km. Teilweise ist das Befahren der Wasserstraßen jedoch auch kostenlos – wie etwa auf der Donau, dem Rhein und der Elbe.

Die Gebühren für die Schleusungen werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da diese nur in Ausnahmefällen – außerhalb der Betriebszeiten – erhoben werden. Außerdem ist auch das sogenannte Hafengeld, das erst nach einer längeren kostenlosen Verweildauer anfallen würde, zu vernachlässigen. Relevant ist jedoch das Ufergeld, das sich an der Art und Höhe der umgeschlagenen Güter orientiert. Beim Umschlag von Fahrzeugen ist in deutschen Binnenhäfen von 0,55 Euro pro Tonne auszugehen (vgl. BVU und TNS 2014, S. 190).

- **Energiekosten**

Die Basis für die Ermittlung der Energiekosten bildet der spezifische Verbrauch, der in der ökologischen Berechnung aufgeführt ist (siehe Kapitel 5.6.5). Der für die Binnenschifffahrt relevante Gasölpreis der Bunkerbetriebe beträgt 0,5783 Euro pro Liter (Stand Februar 2017) (vgl. Alcotrans Container Line 2017).

Der Energieverbrauch eines Binnenschiffes der Wasserstraßenklasse V (Beladung: Kompaktklasse) beträgt ca. 368 MJ/km (Leerfahrtenanteil 50 %, Berg- und Talfahrt). Die Schmierstoffkosten können mit einem 5-%-Aufschlag der Treibstoffkosten berücksichtigt werden (vgl. Planco Consulting und bfg 2007, S. 223).

- **Kosten für die Be- und Entladung**

Wie in Kapitel 2.3.5 aufgeführt, werden für die komplette Be- bzw. Entladung eines Binnenschiffes der Wasserstraßenklasse V (z. B. MS Heilbronn mit 220 Fahrzeugen) bei acht Fahrern etwa 5 Stunden benötigt. Bei Annahme eines Stundensatzes von 30 Euro resultiert daraus ein Kostensatz von 5,45 Euro pro PKW. Für den Umschlag eines Containers sind jeweils ca. 20 Euro anzusetzen, was bei einem Ladefaktor von drei Fahrzeugen zu 6,66 Euro pro PKW führt (vgl. BVU und TNS 2014, S. 160).

Für die Lagerung von Fahrzeugen bzw. Containern werden an Binnenhäfen ebenfalls Gebühren eingehoben. Beispielsweise werden am Hafen Wien pro Fahrzeug bzw. Container ca. 0,8 bzw. 1,1 Euro pro Tag berechnet (vgl. Helmut Schütz, persönliche Korrespondenz, Wiener Hafen GmbH & Co KG, 09.01.2014).

- **Transportzeit**

Die Gesamttransportdauer eines Rundlaufs im Binnenschifftransport ist abhängig von der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit sowie der Aufenthaltsdauer in den jeweiligen Häfen. Auf dem Rhein, der als Schnellfahrstrecke einzustufen ist, liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit bei 15 km/h (vgl. Spitzer 2008, S. 80). Für einen Containerliniendienst auf der Donau ist eine durchschnittliche Transportgeschwindigkeit von 13 km/h mit einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer von 10 Stunden in den Häfen anzunehmen (vgl. Stein et al. 2014, S. 48).

5.7.4 Umlegung der Kosten auf spezifische Transporte

Durch Anwendung der entwickelten Methode (siehe Abbildung 26) und der in Kapitel 5 dargestellten Berechnungslogik können die Gesamtkosten je Transport und in weiterer Folge je Fahrzeug berechnet werden. Nachfolgend ist in Formel 23 und Formel 24 die Berechnung am Beispiel der LKW-Kostenrechnung dargestellt.

Für die Umlegung der fixen Kosten auf eine spezifische Transportrelation ($K_{Fix_spez.}$) werden die jährlichen Gesamtfixkosten durch die Gesamteinsatzzeit ($Zeit_{Gesamt_Jahr}$) dividiert und mit der spezifischen Einsatzzeit des zu kalkulierenden Transports multipliziert ($Zeit_{spez.}$). Die kalkulatorische Abschreibung ist mittels eines Faktors auf fixe (F_{fix}) und variable ($F_{var.}$) Kosten aufzuteilen (siehe Formel 23)

$$K_{Fix_spez.} = \frac{(K_{Abschreibung} * F_{Fix}) + K_{Zinsen} + K_{Vorhalte} + K_{LKW_Personal}}{Zeit_{Gesamt_Jahr}} * Zeit_{spez.}$$

Formel 23: Berechnung der fixen Kosten für eine spezifische Transportrelation

Neben den fixen Kosten entstehen beim Betrieb variable Kosten ($K_{Var_spez.}$). Kosten für den distanzabhängigen Anteil der Abschreibung, Wartung und Reifen werden durch die jährliche Gesamttransportdistanz (D_{Gesamt_Jahr}) dividiert und mit der spezifischen Distanz des Transports multipliziert ($D_{spez.}$). Kosten für Maut und Treibstoff sind relationsspezifisch ermittelbar und werden addiert (siehe Formel 24).

$$K_{Var_spez.} = \frac{(K_{Abschreibung} * F_{Var.}) + K_{Wartung} + K_{Reifen}}{D_{Gesamt_Jahr}} * D_{spez.} + K_{Treibstoff} + K_{Maut}$$

Formel 24: Berechnung der variablen Kosten für eine spezifische Transportrelation

Die Gesamtkosten des Fahrzeugtransports für eine spezifische Relation setzen sich aus fixen und variablen Kosten zusammen und werden mit den Gemeinkosten ($F_{Gemeinkosten}$) beaufschlagt. Mithilfe der Division der Gesamtkosten durch den definierten Ladefaktor (LF_{PKW}) erhält man die Kosten pro transportiertes Fahrzeug (siehe Formel 25).

$$K_{Gesamt_PKW} = \frac{(K_{Fix_spez.} + K_{Var_spez.}) * F_{Gemeinkosten}}{LF_{PKW}}$$

Formel 25: Berechnung der Gesamtkosten je transportiertes Fahrzeug

5.8 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde der Aufbau der entwickelten Methode dargestellt (siehe Abbildung 26) und nachfolgend im Detail erläutert. Dabei wurden die Vorgehensweise, die entwickelte Berechnungslogik und die empirisch ermittelten Informationen beschrieben.

6 Anwendung und Validierung der Methode

In diesem Kapitel wird die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode anhand von zwei ausgewählten Fallbeispielen beschrieben. Zuerst werden die Rahmenbedingungen und der Aufbau der Fallbeispiele definiert. Anschließend wird eine ökologische und ökonomische Bewertung der Transportketten durchgeführt. Für die rasche Gegenüberstellung von zahlreichen unterschiedlichen Varianten wurde die entwickelte Methode in einem elektronischen Bewertungstool hinterlegt, das in weiterer Folge als *Car-Distribution-Tool* bezeichnet wird. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Fallbeispiele verglichen und interpretiert.

6.1 Rahmenbedingungen der Fallbeispiele

Das Ziel der Fallbeispiele besteht darin, die entwickelte Methode anzuwenden und zu validieren. Die Quellen und Senken der Transporte in den Fallbeispielen sind dementsprechend gewählt, dass die Gestaltung von uni- und multimodalen Transportketten ermöglicht wird (siehe Abbildung 36 und Abbildung 40). Dadurch sollen die Auswirkungen von unterschiedlichen Einflussparametern auf die Verkehrsträgerwahl sichtbar gemacht werden.

Die für die Fallbeispiele benötigten Transportdistanzen können mittels der Routenplanungssoftware von *MAP&GUIDE* für den LKW (vgl. PTV Planung Transport Verkehr 2017) und mit *RailNetEurope* (vgl. 2017) für die Bahn berechnet werden. Die Distanzen und Wasserstraßenklasse für den Binnenschifftransport sind mittels der Angaben aus dem *Blue Book* (vgl. United Nations Economic Commission for Europe 2012a, S. 15–52) zu ermitteln.

In den Fallbeispielen wird als exemplarisches Transportgut das Fahrzeugsegment der *Kompaktklasse* ausgewählt, das mit 28,7 % das mengenmäßig stärkste Segment in Deutschland, dem wichtigsten Automobilmarkt in Europa, darstellt (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2015). Außerdem wird von einer max. Kapazitätsauslastung hinsichtlich der Fahrzeugbeladung der jeweiligen Transportmittel ausgegangen. Leerkilometeranteile werden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese nicht von der Transportmittelwahl, sondern von dem jeweiligen Auftragsbestand bzw. Logistiknetzwerk des Logistikdienstleisters abhängen.

Im Rahmen eines Vergleichs von unterschiedlichen Gestaltungsvarianten werden in weiterer Folge der Energiebedarf, die Treibhausgasemissionen, die Transportzeit und die Kosten je transportiertem Fahrzeug angegeben.

6.2 Anwendung der Methode

Die Berechnung der Kosten und Umweltauswirkungen (Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen) wird gemäß der in dieser Arbeit entwickelten Methode mittels des *Car-Distribution-Tools* durchgeführt. Mithilfe dieses Tools kann der Fahrzeugtransport mit den Transportmitteln LKW, Bahn und Binnenschiff einzeln und in beliebiger Kombination kalkuliert werden.

In Abbildung 35 ist die Ein- und Ausgabemaske für die Quantifizierung von ökologischen Kenngrößen bei LKW-Transporten dargestellt. In den gelb markierten Feldern ist die Auswahl der Emissionsklasse des LKWs und des zu transportierende Fahrzeugsegments sowie die Definition der Transportstrecke durchzuführen. Das gewählte Fahrzeugsegment hat signifikanten Einfluss auf den Ladefaktor und somit auf das Gewicht der Zuladung. Nach Eingabe der Parameter kann die Berechnung ausgeführt und die TTW- und WTW-Energieverbräuche sowie die erzeugten Treibhausgasemissionen können ausgegeben werden.

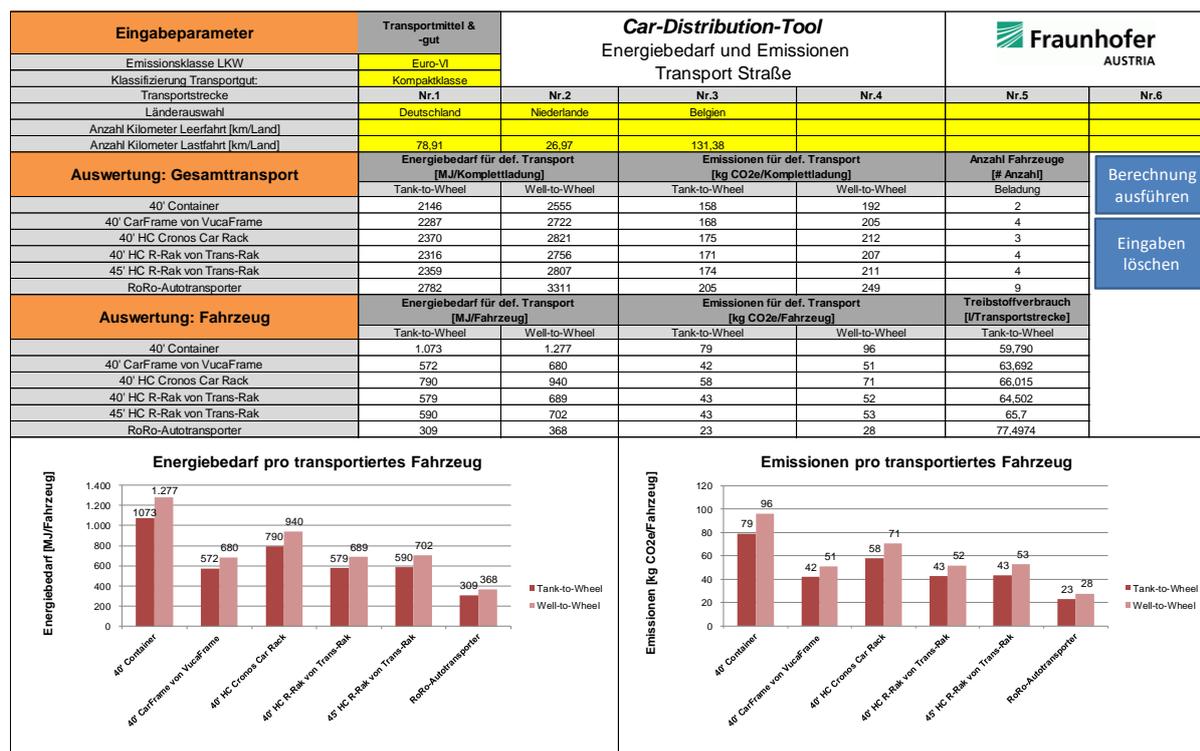


Abbildung 35: Energie- und Emissionsberechnung im Car-Distribution-Tool

6.3 Fallbeispiel 1: Mioveni (RO) – Schwertberg (AT)

6.3.1 Beschreibung der Transportketten

Im ersten Fallbeispiel wird der Fahrzeugtransport von einer Produktionsstätte in *Mioveni* (Rumänien) zu einem Distributionszentrum in *Schwertberg* (Österreich) untersucht. Zu diesem Zweck werden drei Transportketten (kurz *TK*) modelliert, bei denen im Hauptlauf Binnenschiff (*TK 1.1*), LKW (*TK 1.2*) oder Bahn (*TK 1.3*) zum Einsatz kommen.

In nachfolgender Abbildung 36 sind diese kartographisch dargestellt. Die Transportstrecken auf der Straße sind rot, auf der Schiene grün und auf der Wasserstraße blau gekennzeichnet.



Abbildung 36: Transportkette Mioveni – Schwertberg (eigene Darstellung, kartographische Umsetzung Ulrike Overbeck)

- **Beschreibung Transportkette 1.1 | Hauptlauf Binnenschiff**

In *TK 1.1* wird im Hauptlauf das Binnenschiff eingesetzt. Da weder die Produktionsstätte in *Mioveni* noch das Distributionszentrum in *Schwertberg* über einen direkten Zugang zur Donau verfügen, ist ein Vor- und Nachlauf mittels LKW erforderlich (siehe Abbildung 36). Der Transportmittelwechsel wird im Hafen *Giurgiu* (Rumänien) bzw. im Hafen *Enns* (Österreich) durchgeführt.

Für den Transport auf der Wasserstraße wird ein dieselbetriebenes Binnenschiff der Wasserstraßenklasse V gewählt. Der Hauptlauf von Rumänien nach Österreich muss auf der Donau flussaufwärts gefahren werden, wodurch ein erhöhter Energiebedarf entsteht. Aufgrund der niedrigen Brückenhöhen kann mit max. drei Containerlagen bzw. vier RoRo-Decks gefahren werden, was im Vergleich zu Transporten auf dem Rhein (siehe *Fallbeispiel 2*) zu einem vergleichsweise niedrigen Ladefaktor führt.

Aus den genannten Gründe ist davon auszugehen, dass das gewählte Fallbeispiel keine idealen Voraussetzungen für den Binnenschifftransport bietet.

- **Beschreibung Transportkette 1.2 | Direkttransport LKW**

Ein Direkttransport mittels LKW von *Mioveni* nach *Schwertberg* wird in *TK 1.2* modelliert, wodurch kein Umschlag erforderlich ist. Als Transportmittel wird eine dieselbetriebene Zugmaschine gewählt, die den Anforderungen der *EURO 6* Emissionsklasse entspricht. Es wird der Transport mittels RoRo-LKW und Sattelaufleger mit Containerchassis untersucht.

- **Beschreibung Transportkette 1.3 | Hauptlauf Bahn**

TK 1.3 ist so modelliert, dass nach einem Vorlauf mittels LKW nach *Craiova* (Rumänien) der Hauptlauf mittels Bahn durchgeführt wird. Da das Produktionswerk in *Mioveni* auch über einen Bahnanschluss verfügt, wäre auch ein Direkttransport ab Werk möglich, der im Rahmen dieses Fallbeispiels nicht untersucht wird. Ein Nachlauf mittels LKW ist nicht erforderlich, da das betrachtete Distributionszentrum in *Schwertberg* über einen Gleisanschluss verfügt. Beim Bahntransport wird aufgrund des geringen Anteils an dieselbetriebenen Triebfahrzeugen im europäischen Güterverkehr für die Berechnung eine elektrische Traktion herangezogen. Als Gesamtzuglänge werden 600 m angenommen, wobei für das Triebfahrzeug eine Länge von 20 m vorgesehen wird. Als Bahnwaggons werden 2-achsige Tragwagen für 40-Fuß-Container bzw. offene Doppelstockwagen für den RoRo-Transport gewählt.

Die detaillierte Beschreibung der Transportketten inkl. der jeweiligen Transportdistanzen ist in der nachfolgenden Tabelle 27 aufgeführt. Werden die Gesamttransportdistanzen der drei Varianten verglichen, ist ersichtlich, dass die Transportketten mit LKW und Bahn im Hauptlauf (*TK 1.2* und *TK 1.3*) nahezu gleich lang sind. Die Gesamttransportdistanz von *TK 1.1* mit dem Binnenschiff im Hauptlauf ist – aufgrund der großen Distanz im Vorlauf und des ungünstigen Flussverlaufs – um insgesamt 52 % länger als *TK 1.3*.

Fallbeispiel 1				
Von:	Produktionsstätte in Mioveni, Rumänien			
Nach:	Distributionszentrum in Schwertberg, Österreich			
Beschreibung		TK 1.1	TK 1.2	TK 1.3
Vorlauf	Transportmittel:	LKW	kein Vorlauf	LKW
	Von:	Mioveni (RO)		Mioveni (RO)
	Nach:	Giurgiu (RO)		Craiova (RO)
	Distanz [km]:	191		137
Hauptlauf	Transportmittel:	Binnenschiff	LKW	Bahn
	Von:	Giurgiu (RO)	Mioveni (RO)	Craiova (RO)
	Nach:	Enns (AT)	Schwertberg (AT)	Schwertberg (AT)
	Distanz [km]:	1.619	1.230	1.061
Nachlauf	Transportmittel:	LKW	kein Nachlauf	kein Nachlauf
	Von:	Enns (AT)		
	Nach:	Schwertberg (AT)		
	Distanz [km]:	18		
Gesamttransport	Distanz [km]:	1.827	1.230	1.198
Mehrdistanz zu TK 1.3	Prozent [%]:	52 %	3 %	0 %

Tabelle 27: Beschreibung der Transportketten in Fallbeispiel 1

6.3.2 Ergebnisse der ökologischen Berechnungen (Fallbeispiel 1)

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 1.1 | Hauptlauf Binnenschiff**

Die Ergebnisse von *TK 1.1* (siehe Abbildung 37) zeigen, dass die multimodale Transportkette mit RoRo-Binnenschiff im Hauptlauf zu einem Energiebedarf von 3.054 MJ pro transportiertes Fahrzeug führt. Damit ist der Einsatz des Binnenschiffes in *Fallbeispiel 1* mit dem höchsten Energiebedarf verbunden. Die Ursache dafür ist auf die beschriebenen ungünstigen Rahmenbedingungen zurückzuführen.

Insbesondere bei der Binnenschiffahrt sind in Abhängigkeit von den infrastrukturellen Gegebenheiten große Schwankungen im Energieverbrauch möglich. Wird beispielsweise in *Fallbeispiel 1* Quelle und Senke der Transportkette (d. h. Transport von Österreich nach Rumänien) vertauscht, würde der Wasserstraßentransport flussab- statt flussaufwärts erfolgen. Diese Veränderung würde den Energiebedarf pro transportiertes Fahrzeug um 36 % auf 1.956 MJ – dem Niveau des Straßentransports – absinken lassen.

Würde überdies die Produktionsstätte in *Mioveni* näher an der Wasserstraße liegen, wäre der multimodale Transport mittels Binnenschiff bereits effizienter als der Direkttransport mittels LKW. Dieses konstruierte Szenario zeigt, dass eine Vielzahl von Parametern signifikanten Einfluss auf die Energiebedarfshöhe hat, wodurch jede Transportkette individuell bewertet werden muss.

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 1.2 | Direkttransport LKW**

Der unimodale Transport mit dem LKW (*TK 1.2*) ist mit 1.958 MJ pro transportiertes Fahrzeug energieeffizienter als der multimodale Transport mit dem Binnenschiff im Hauptlauf (*TK 1.1*). Dies ist u. a. auf die um 33 % kürzere Gesamttransportstrecke zurückzuführen. Dieses Fallbeispiel zeigt, dass die Aussage, dass der LKW das umweltunfreundlichste Transportmittel ist, bei der Distribution von Fahrzeugen nicht immer Gültigkeit hat.

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 1.3 | Hauptlauf Bahn**

Die Ergebnisse von *TK 1.3* in Abbildung 37 zeigen, dass die multimodale Transportkette mit Vorlauf LKW und Hauptlauf Bahn im definierten *Fallbeispiel 1* am energieeffizientesten ist. Beim RoRo-Transport wird mit 989 MJ pro Fahrzeug am wenigsten Energie benötigt.

Beim Bahntransport in Containern mittels *R-RAK*-Systems wird mit 1.366 MJ pro Fahrzeug deutlich mehr Energie als bei der RoRo-Variante benötigt. Wird jedoch dieses Ergebnis mit *TK 1.1* und *TK 1.2* verglichen, ist ersichtlich, dass der containerisierte Transport mit der Bahn effizienter als der RoRo-Transport mit LKW oder Binnenschiff ist. Daraus ist ableitbar, dass, wenn kein RoRo-Transport mit der Bahn realisiert werden kann (z. B. zu geringe Transportmengen, kein Rundlauf möglich etc.), der LoLo-Transport mit Hauptlauf auf der Schiene die beste Alternative darstellt.

- **Zusammenfassung der ökologischen Ergebnisse aus Fallbeispiel 1**

Zusammenfassend ist aus *Fallbeispiel 1* zu schließen, dass aus ökologischer Sicht die Transportkette mit dem Hauptlauf auf der Schiene jener mit dem Direkttransport auf der Straße vorzuziehen ist. Dies ist bei nahezu identer Gesamttransportstrecke und den in Kapitel 5.6 ausgewiesenen niedrigeren Energieverbräuchen je Tonnenkilometer nicht überraschend. Die Tatsache, dass der Direkttransport auf der Straße dem multimodalen Transport auf der Wasserstraße aus ökologischer Sicht vorzuziehen ist, mag auf den ersten Blick unerwartet sein. Bei näherer Betrachtung der Rahmenbedingungen der multimodalen Transportkette (z. B. langer Vorlauf, Bergfahrt im Hauptlauf etc.) wird dies jedoch nachvollziehbar.

Die Emissionsberechnung (siehe Abbildung 38) liefert ein ähnliches Bild hinsichtlich der Rangordnung der unterschiedlichen Transportmittel, jedoch ist der Vorteil jener Transportkette mit der Bahn im Hauptlauf noch größer. Dies ist auf die Vorteile der Elektro-Traktion auf der Schiene im Vergleich zum Einsatz von Verbrennungsmotoren beim Straßen- und Wasserstraßentransport zurückzuführen.

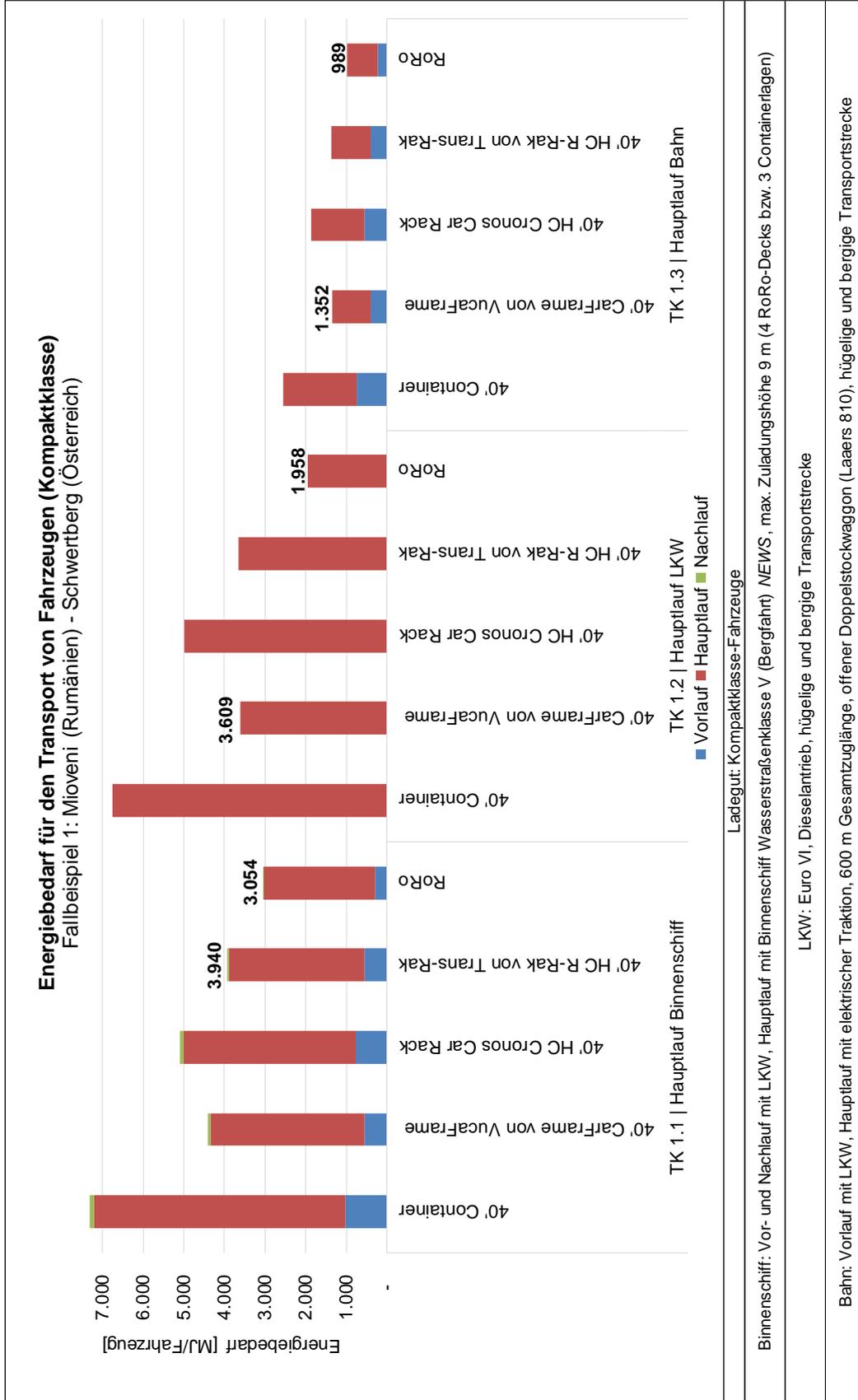


Abbildung 37: Ergebnisse der Energiebedarfsrechnung (Fallbeispiel 1)

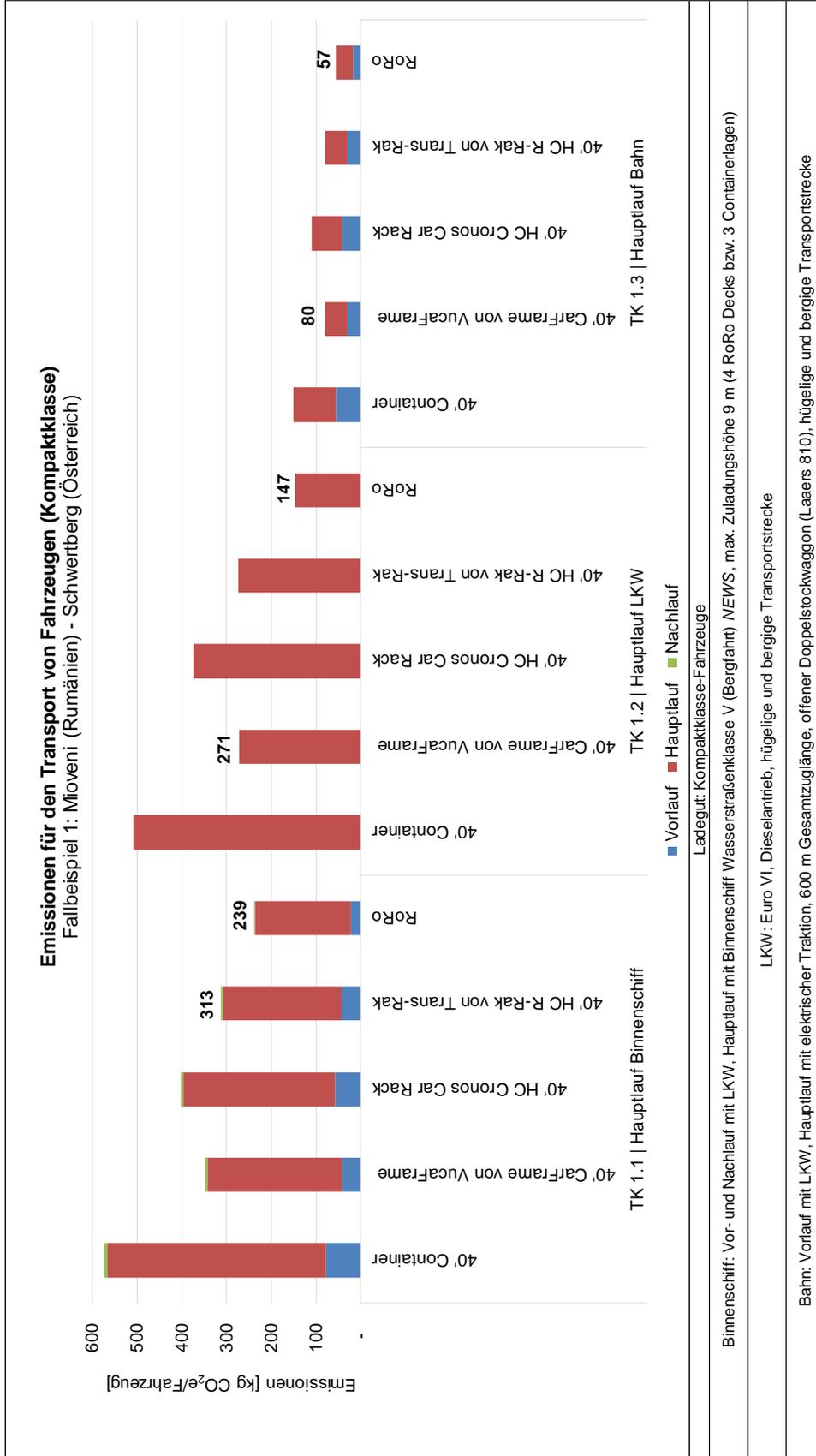


Abbildung 38: Ergebnisse der Emissionsberechnung (Fallbeispiel 1)

6.3.3 Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen (Fallbeispiel 1)

Nachfolgend werden unter Anwendung der in Kapitel 5.7 beschriebenen Methode die Ergebnisse von *Transportkette 1* dargestellt. Da in diesem Zusammenhang beispielhafte Referenzwerte für Zeit- und Kostenaufwände zur Anwendung kommen, haben die Ergebnisse keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Die für die beschriebene Methode benötigten Werte sind länder- und unternehmensspezifisch und unterliegen zumeist einer ständigen Veränderung (z. B. Ölpreis, Gehälter, Zinsen).

In Abbildung 39 sind die ökonomischen Ergebnisse für den Vor-, Haupt- und Nachlauf sowohl für den RoRo- als auch für den LoLo-Transport dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass der RoRo-Transport mit der Bahn mit 143 Euro pro transportiertes Fahrzeug, im Vergleich zum RoRo-Binnenschiff mit 169 Euro die kostengünstigste Variante darstellt. Der Transport mit dem RoRo-LKW mit 188 Euro pro transportiertes Fahrzeug stellt die teuerste Variante dar. Der Transport in Containern ist in *Fallbeispiel 1* aufgrund des deutlich niedrigeren Ladefaktors bei Kompaktklasse-Fahrzeugen (siehe Tabelle 11) teurer.

- **Ökonomische Ergebnisse Transportkette 1.1 | Hauptlauf Binnenschiff**

Wie in der Beschreibung von *TK 1.1* dargestellt, wird im Vor- und Nachlauf der LKW und im Hauptlauf das Binnenschiff eingesetzt. Zu diesem Zweck sind neben dem zweimaligen Umschlag im Vorlauf 191 km, im Hauptlauf 1.619 km und im Nachlauf 18 km zurückzulegen. In der nachfolgenden Tabelle 28 ist ein beispielhafter Zeitplan für *TK 1.1* angeführt, der für den Gesamttransport einen Zeitaufwand von etwa 190 Stunden vorsieht. Der Zeitplan berücksichtigt eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 10 km/h für das Binnenschiff (Bergfahrt) bzw. 72 km/h für den LKW. Die Be- und Entladung ist mit jeweils 5 Stunden beim Binnenschiff- und 1,5 Stunden beim LKW-Transport berücksichtigt.

TK 1.1	Tag	Uhrzeit	Dauer [h]	Tätigkeit
Vorlauf	Tag 1	06:00 – 07:30	1,50	Beladung LKW
		07:30 – 10:09	2,65	Lenkzeit
		10:09 – 11:39	1,50	Entladung LKW
Umschlag	Tag 1	11:39 – 19:09	7,50	Wartezeit und Beladung Binnenschiff
Hauptlauf	Tag 1–8	19:09 – 19:05	166,40	Fahrzeit inkl. Schleusungen
Umschlag	Tag 9	06:00 – 11:00	5,00	Entladung Binnenschiff
Nachlauf	Tag 9	11:00 – 12:30	1,50	Beladung LKW
		12:30 – 12:45	2,65	Lenkzeit
		12:45 – 14:15	1,50	Entladung LKW
Total			190,20	

Tabelle 28: Beispielhafter Zeitplan für Transportkette TK 1.1

Neben den angeführten Transportzeiten ist in der Kostenrechnung berücksichtigt, dass das Binnenschiff vor der eigentlichen Beladung bzw. nach der Entladung eine bestimmte Zeit im Hafen liegt, wodurch diese Kosten dem Transport zugeordnet werden müssen. Als Annahme werden jeweils 14 Stunden an Quelle und Senke gewählt. Die Kostenrechnung gemäß der im Rahmen der Arbeit definierten Methode unter Anwendung der angeführten Annahmen und Referenzwerte führt bei *TK 1.1* zu Gesamtkosten von 169 Euro pro PKW beim RoRo-Transport. Vor- und Nachlauf haben dabei einen Anteil von insgesamt 46 Euro. Die Gegenüberstellung mit dem containerisierten Fahrzeugtransport in Abbildung 39 zeigt, dass dieser in *Fallbeispiel 1* deutlich teurer ist. Die Ursache dafür ist u. a. der geringere Ladefaktor. Während beispielsweise 320 Kompaktklasse-Fahrzeuge auf einem RoRo-Binnenschiff der Wasserstraßenklasse V transportiert werden, muss diese Zahl beim Einsatz von *VUCAFRAME* Containerrahmen auf 240 reduziert werden. Der Ladefaktor ist beim containerisierten Fahrzeugtransport im Vor- und Nachlauf mittels LKW geringer, wodurch auch hierbei Mehrkosten entstehen.

- **Ökonomische Ergebnisse Transportkette 1.2 | Direkttransport LKW**

Bei *TK 1.2* wird ein Direkttransport mittels LKW über eine Distanz von 1.230 km mit einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 72 km/h modelliert. Daraus resultiert eine Gesamtlenkzeit von 17 Stunden und 5 Minuten, die aufgrund der gesetzlichen Vorgaben auf min. zwei Tage aufzuteilen ist. Wird von einem Dienstbeginn um 06:00 Uhr am Beladungsort und einer Be- bzw. Entladungszeit von jeweils 1,5 Stunden ausgegangen, so wird der definierte Transport unter Einhaltung der gesetzlichen Regelungen nach 34,33 Stunden abgeschlossen.

In der nachfolgenden Tabelle 29 ist ein möglicher zeitlicher Ablauf des Transports angeführt. Aus diesem sind die benötigten Informationen für die Kalkulation der zeitabhängigen Kosten wie beispielsweise Personalkosten (Arbeitszeit, Tagesdiäten und Nachtgeld) und kalkulatorische Abschreibung für den LKW (Anzahl Einsatztage) ableitbar.

TK 1.2	Tag	Uhrzeit	Dauer [h]	Tätigkeit
Hauptlauf	Tag 1	06:00 – 07:30	1,50	Beladung
		07:30 – 12:00	4,50	Lenkzeit
		12:00 – 12:45	0,75	Lenkpause
		12:45 – 17:15	4,50	Lenkzeit
		ab 17:15	12,75	Ruhepause
	Tag 2	06:00 – 10:30	4,50	Lenkzeit
		10:30 – 11:15	0,75	Lenkpause
		11:15 – 14:50	3,58	Lenkzeit
		14:50 – 16:20	1,50	Entladung
Total			34,33	

Tabelle 29: Beispielhafter Zeitplan für Transportkette TK 1.2

Unter Berücksichtigung von Mautkosten in Höhe von 196,67 Euro für die Gesamtstrecke (vgl. PTV Planung Transport Verkehr 2017) resultieren bei Anwendung der entwickelten Methode sowie angeführter beispielhafter Referenzwerte (siehe Kapitel 5), Gesamtkosten von 1.683,60 Euro für einen RoRo-Transport mit neun Kompaktklasse-Fahrzeugen. Dies entspricht 1,37 Euro pro Kilometer bzw. 187 Euro pro transportiertes Fahrzeug.

Analog zu Fallbeispiel TK 1.1 führt der containerisierte Fahrzeugtransport mit dem LKW aufgrund des deutlich verringerten Ladefaktors im Vergleich zum RoRo-Transport zu einer Steigerung der Kosten.

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 1.3 | Hauptlauf Bahn**

In *TK 1.3* wird ein Vorlauf mittels LKW von 137 km und ein Hauptlauf mittels Bahn mit insgesamt 1.198 km modelliert. In nachfolgender Tabelle 30 ist ein beispielhafter Zeitplan angeführt, der eine Gesamttransportdauer von 81,96 Stunden (3,42 Tage) ausweist.

TK 1.3	Tag	Uhrzeit	Dauer [h]	Tätigkeit
Vorlauf	Tag 1	06:00 – 07:30	1,50	Beladung LKW
		07:30 – 09:25	1,91	Lenkzeit
		09:25 – 10:55	1,50	Entladung LKW
Umschlag		10:55 – 22:55	12,00	Wartezeit und Beladung Bahn
Hauptlauf	Tag 1–4	22:55 – 03:58	53,05	Fahrzeit exkl. Rangierung
Umschlag	Tag 4	03:58 – 15:58	12,00	Wartezeit, Rangierung und Entladung Bahn
Total			81,96	

Tabelle 30: Beispielhafter Zeitplan für Transportkette TK 1.3

Die Berechnung der LKW-Kosten für den Vorlauf wird analog zu *TK 1.1* und *TK 1.2* mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 72 km/h sowie einer Be- und Entladezeit von 1,5 Stunden berechnet. Unter Verwendung dieser Eingangsparameter ergeben sich für den Vorlauf mittels RoRo-LKW Kosten von 26 Euro pro transportiertes Fahrzeug.

Im Hauptlauf mit der Bahn wird aufgrund der infrastrukturellen Gegebenheiten beim grenzüberschreitenden Transport zwischen Rumänien und Österreich und der damit verbundenen Zeitverluste (z. B. Traktionswechsel, Grenzwarzeiten) eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 20 km/h angesetzt. Für die Be- und Entladung inkl. etwaiger Rangiertätigkeiten an Quelle und Senke werden 12 Stunden für die Transportzeit kalkuliert. In der Kostenrechnung wird davon ausgegangen, dass die Bahnwaggons durchschnittlich 24 Stunden an Quelle und Senke verweilen. Auf Basis dieser Annahmen resultieren unter Anwendung der entwickelten Methode für den Hauptlauf Transportkosten von 117 Euro, wodurch sich die Gesamttransportkosten inkl. Vorlauf auf 143 Euro pro Fahrzeug summieren.

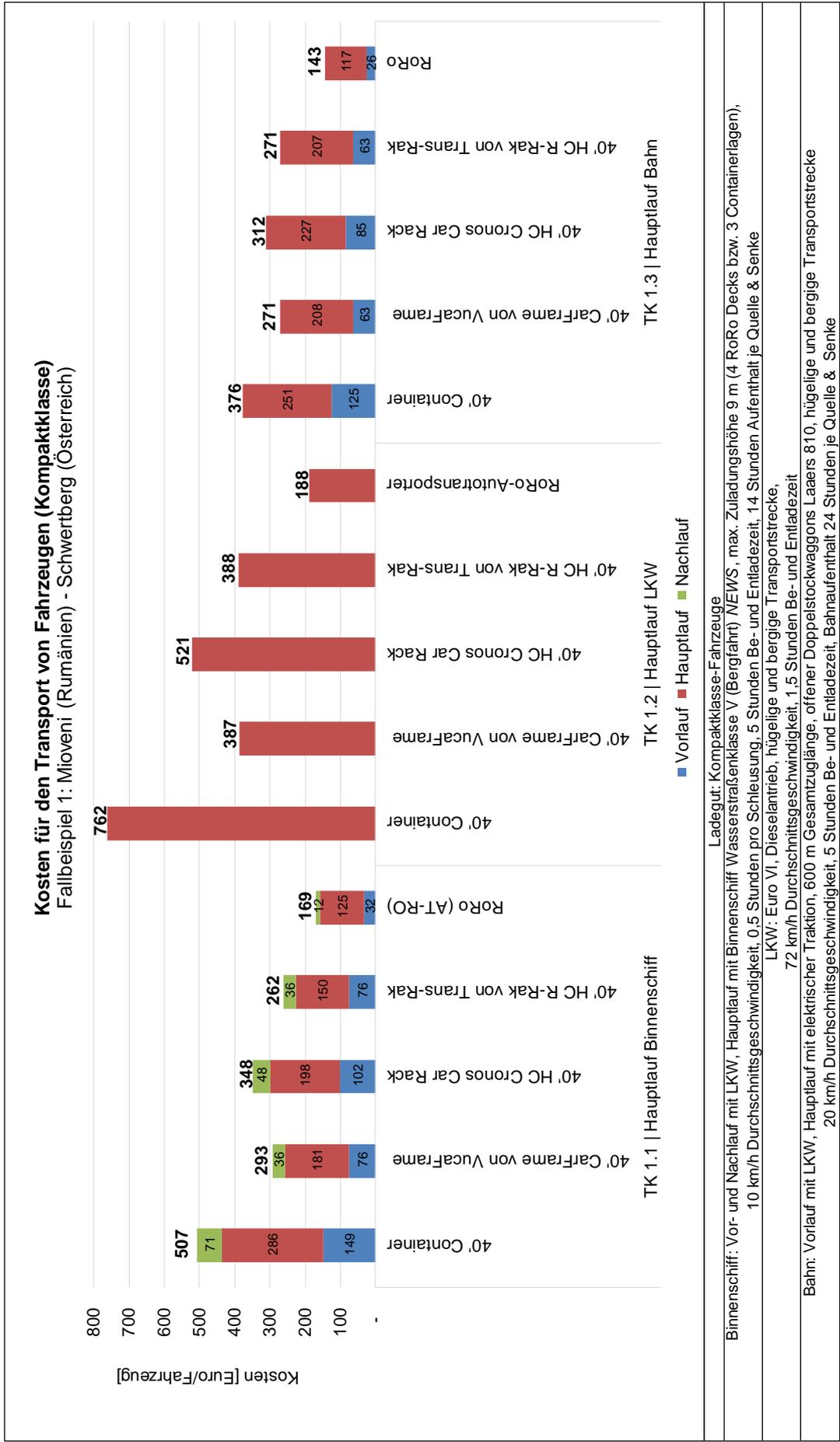


Abbildung 39: Ergebnisse der Kostenberechnung (Fallbeispiel 1)

• Zusammenfassung der ökonomischen Ergebnisse aus Fallbeispiel 1

Zusammenfassend ist aus *Fallbeispiel 1* zu schließen, dass aus ökonomischer Sicht *TK 1.1* mit Hauptlauf auf der Schiene den Varianten mit Hauptlauf auf der Wasserstraße bzw. Direkttransport auf der Straße vorzuziehen ist.

Wird *TK 1.1* (Binnenschiff) mit *TK 1.2* (LKW) verglichen, ist die erstgenannte Transportkette um 19 Euro pro transportiertes Fahrzeug günstiger. Jedoch ist bei *TK 1.1* die Gesamttransportdauer um 6,5 Tage länger, was in weiterer Folge zu höheren Kapitalbindungskosten des OEMs führt. Wird diese mit 3 Euro pro Fahrzeug pro Tag bewertet, so ist der Kostenvorteil von *TK 1.2* bereits eliminiert.

In *Fallbeispiel 1* bietet der LoLo-Transport von Fahrzeugen keinen ökonomischen Vorteil gegenüber dem RoRo-Transport. Das Transportgut *Kompaktklasse* führt beim LoLo-Verfahren zu einem niedrigeren Ladefaktor und hat dadurch negative Auswirkungen auf die Kostenstruktur.

6.4 Fallbeispiel 2: Köln (DE) – Antwerpen (BE)

6.4.1 Beschreibung der Transportketten

Im *Fallbeispiel 2* wird der Fahrzeugtransport von einer Produktionsstätte in *Köln* (Deutschland) zum Seehafen in *Antwerpen* (Belgien) untersucht. In diesem Fall werden drei unimodale Transportketten modelliert, da sowohl Quelle als auch Senke über eine Straßen-, Schienen- und Wasserstraßenanbindung verfügen. In der nachfolgenden Abbildung 40 sind die Transportketten kartographisch dargestellt.



Abbildung 40: Transportkette Köln – Antwerpen (eigene Darstellung, kartographische Umsetzung durch Ulrike Overbeck)

- **Beschreibung Transportkette 2.1 | Direkttransport Binnenschiff**

In *TK 2.1* wird ein Direkttransport mittels Binnenschiff durchgeführt. Vorlauf mittels LKW ist keiner erforderlich, da der Produktionsstandort direkt am Rhein gelegen ist.

Analog zu *Fallbeispiel 1* wird ein Schiff der Wasserstraßenklasse V eingesetzt. Im Vergleich zur Donau sind auf dem Rhein jedoch bessere infrastrukturelle Rahmenbedingungen gegeben, die zu einem höheren Ladefaktor führen. In *TK 2.1* wird die max. Zuladungshöhe von 9 m (siehe Transport auf der Donau in *TK 1.1*) auf 12 m angehoben. Vier Containerlagen bzw. fünf RoRo-Decks sind dadurch möglich, wodurch der Ladefaktor beim RoRo-Transport von 320 auf 404 *Kompaktklasse-Fahrzeuge* gesteigert werden kann.

Die von Ford am Rhein betriebenen Binnenschiffe können je nach Schiffstyp und Fahrzeugklasse sogar ca. 500 Fahrzeuge transportieren, was auf den Einsatz von Binnenschiffen der Wasserstraßenklasse VI zurückzuführen ist (z. B. *Forenso* mit 135 m) (vgl. Bernardts 2013, S. 33).

Des Weiteren erfolgt die Lastfahrt den Rhein flussabwärts bzw. im Kanal, was einen reduzierten Energieverbrauch im Vergleich zu *TK 1.1* zur Folge hat. Abgesehen von dem ungünstigen Flussverlauf, der zu einer längeren Transportdistanz führt, bietet *TK 2.1* gute Voraussetzungen für einen Binnenschifftransport.

- **Beschreibung Transportkette 2.2 | Direkttransport LKW**

In *TK 2.2* wird ein Direkttransport mittels LKW durchgeführt. Analog zu *Fallbeispiel 1* wird eine dieselbetriebene Zugmaschine der Emissionsklasse Euro 6 eingesetzt und eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 72 km/h angenommen.

- **Beschreibung Transportkette 2.3 | Direkttransport Bahn**

Bei *TK 2.3* wird die Bahn als Transportmittel eingesetzt. Die Konfiguration des Zuges (Gesamtzuglänge, Antrieb, Lokomotive und Bahnwaggons) bleibt gegenüber *Fallbeispiel 1* unverändert. Eine detaillierte Beschreibung der Transportketten inkl. Distanzen ist in der nachfolgenden Tabelle 31 angeführt. Werden die zurückzulegenden Distanzen der Transportketten verglichen, ist ersichtlich, dass auch in *Fallbeispiel 2* der Transport auf der Wasserstraße (*TK 2.1*) eine deutlich längere Transportdistanz erforderlich macht.

Fallbeispiel 2				
Von:	Produktionsstätte in Köln, Deutschland			
Nach:	Antwerpen Euroterminal, Belgien			
Beschreibung		TK 2.1	TK 2.2	TK 2.3
Vorlauf	Transportmittel:	kein Vorlauf	kein Vorlauf	kein Vorlauf
	Von:			
	Nach:			
	Distanz [km]:			
Hauptlauf	Transportmittel:	Binnenschiff	LKW	Bahn
	Von:	Köln (DE)	Köln (DE)	Köln (DE)
	Nach:	Antwerpen (BE)	Antwerpen (BE)	Antwerpen (BE)
	Distanz [km]:	337	237	228
Nachlauf	Transportmittel:	kein Nachlauf	kein Nachlauf	kein Nachlauf
	Von:			
	Nach:			
	Distanz [km]:			
Gesamttransport	Distanz [km]:	337	237	228
Mehrdistanz zu TK 2.3	Prozent [%]:	48 %	4 %	0 %

Tabelle 31: Beschreibung der Transportketten in Fallbeispiel 2

6.4.2 Ergebnisse der ökologischen Berechnungen (Fallbeispiel 2)

Die Berechnungen der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen werden analog zu *Fallbeispiel 1* gemäß der in dieser Arbeit entwickelten Methode durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen für *Fallbeispiel 2* sind in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt und lassen sich wie folgt interpretieren:

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 2.1 | Direkttransport Binnenschiff**

Der RoRo-Binnenschifftransport von *Köln* nach *Antwerpen* verursacht einen Energieverbrauch von 281 MJ pro Fahrzeug. Hinsichtlich der Verkehrsträgerwahl stellt in *Fallbeispiel 2* nach der Bahn das Binnenschiff die zweitbeste Lösung dar. An sich sind die Rahmenbedingungen für den Binnenschifftransport günstig, (z. B. kein Vor- und Nachlauf erforderlich, Zuladungshöhe von 12 m etc.), jedoch ist aufgrund des Flussverlaufes die Gesamttransportdistanz deutlich länger als beim Direkttransport auf der Straße (+42 %) oder der Schiene (+48 %).

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 2.2 | Direkttransport LKW**

Im Unterschied zu *Fallbeispiel 1* schneidet der Direkttransport mit dem LKW aus ökologischer Sicht in *Fallbeispiel 2* schlechter als das Binnenschiff ab. Für den Direkttransport mit dem LKW sind 368 MJ pro Fahrzeug notwendig. Dies entspricht einer Steigerung von 31 % gegenüber dem Binnenschifftransport.

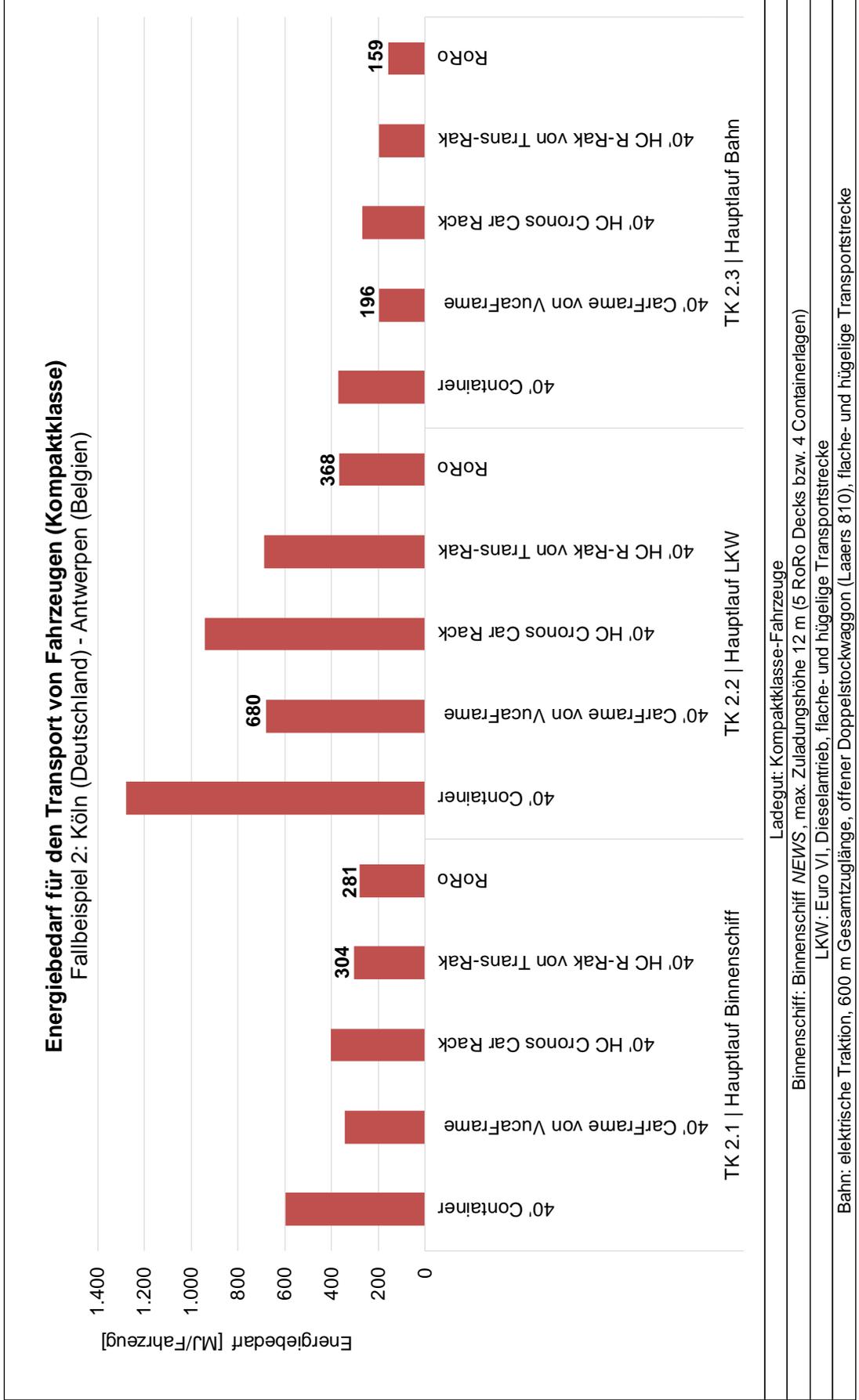


Abbildung 41: Ergebnisse der Energiebedarfsrechnung (Fallbeispiel 2)

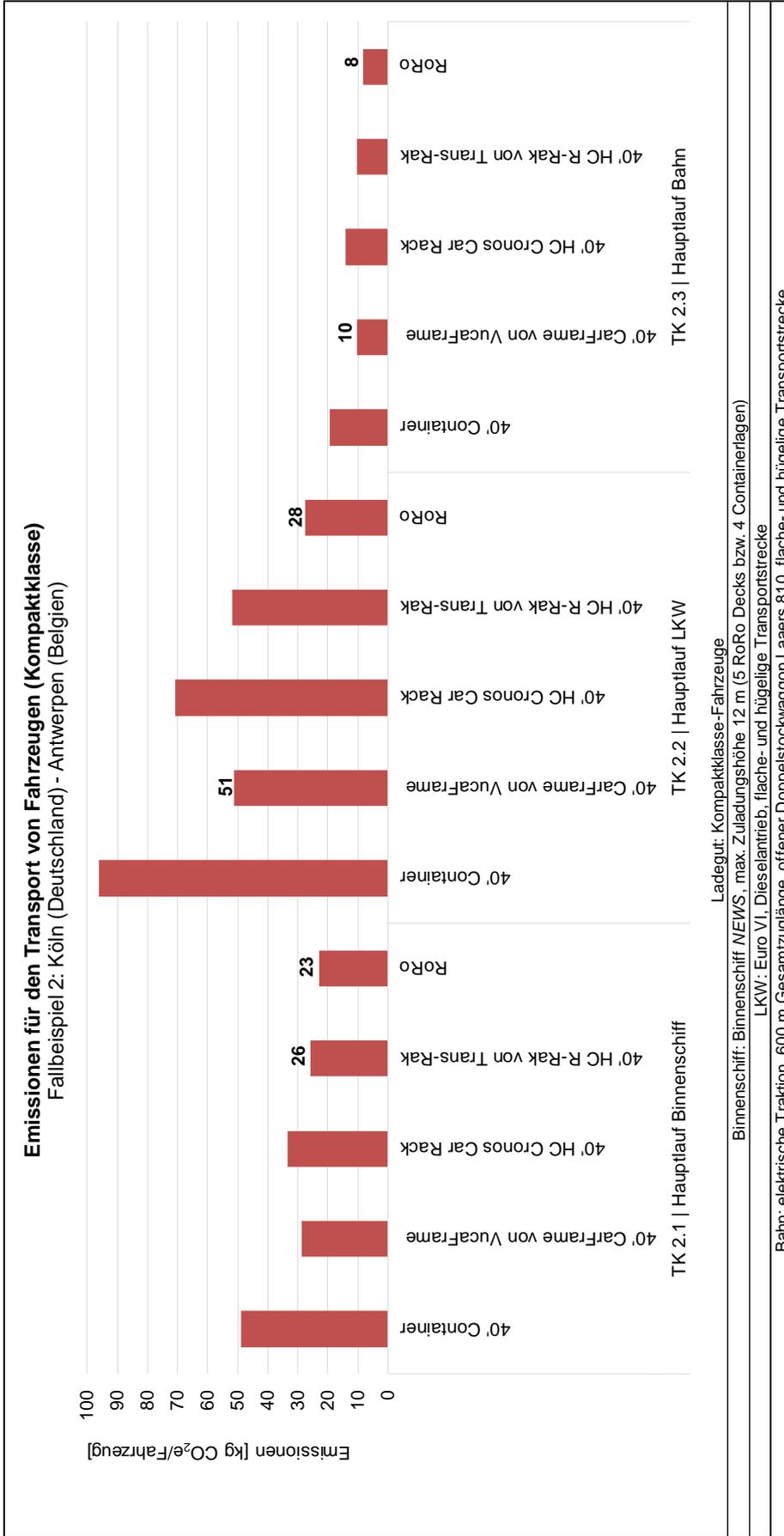


Abbildung 42: Ergebnisse der Emissionsberechnung (Fallbeispiel 2)

- **Ökologische Ergebnisse Transportkette 2.3 | Direkttransport Bahn**

Die Ergebnisse aus Fallbeispiel 2 zeigen, dass der Energiebedarf beim Direkttransport auf der Schiene mit 159 MJ pro Fahrzeug deutlich geringer als beim Transport auf der Straße bzw. Wasserstraße ausfällt (siehe Abbildung 41). Damit hat die in 5.5.7 formulierte Aussage, dass die Bahn in der automobilen Distributionslogistik aus ökologischer Sicht dem Binnenschiff vorzuziehen ist, auch für dieses Fallbeispiel Gültigkeit. Des Weiteren ist auch der Transport mit dem *VUCAFRAME* Containerrahmen mit 196 MJ pro Fahrzeug energieeffizienter als der RoRo-Transport mit LKW oder Binnenschiff.

- **Zusammenfassung der ökologischen Ergebnisse aus Fallbeispiel 2**

Analog zu Fallbeispiel 1 schneidet auch in Fallbeispiel 2 die Bahn aus ökologischer Sicht am besten ab. Hinsichtlich der Binnenschiff- und LKW-Transporte gibt es jedoch eine Veränderung der Rangordnung, die das Binnenschiff diesmal als energieeffizienter ausweist.

6.4.3 Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen (Fallbeispiel 2)

Nachfolgend werden unter Anwendung der in Kapitel 5.7 beschriebenen Methode die Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen von *Transportkette 2* dargestellt (siehe Abbildung 43).

- **Ökonomische Ergebnisse Transportkette 2.1 | Hauptlauf Binnenschiff**

Wie in der Beschreibung von *Fallbeispiel 2* dargestellt, sind die Rahmenbedingungen für das Binnenschiff im Vergleich zu *Fallbeispiel 1* günstiger. Aus Kostensicht ist der niedrigere Energieverbrauch (keine Bergfahrt), die Steigerung der Zuladungshöhe (von 320 auf 404 Fahrzeuge) und Transportgeschwindigkeit (von 10 auf 20 km/h) sowie die gewählte kürzere Verweildauer im Hafen aufgrund der geringeren Komplexität (von 14 auf 12 Stunden) zu nennen. Die Be- und Entladezeit verbleibt bei 5 Stunden. Diese Voraussetzungen sowie der direkte Zugang zum Wasserstraßennetzwerk bei Quelle und Senke führen dazu, dass der Transport mit 25 Euro pro Fahrzeug die günstigste Variante darstellt. Die Transportdauer, bestehend aus Beladung, Transport inkl. Schleusenzeiten und Entladung, nimmt gemäß den Annahmen etwa 28 Stunden ein.

- **Ökonomische Ergebnisse Transportkette 2.2 | Hauptlauf LKW**

Bei *TK 2.2* wird ein Direkttransport mittels LKW über eine Distanz von 237 km und einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 72 km/h modelliert. Mit der Be- und Entladezeit von jeweils 1,5 Stunden resultiert daraus eine Gesamttransportdauer von etwa 6 Stunden und 18 Minuten.

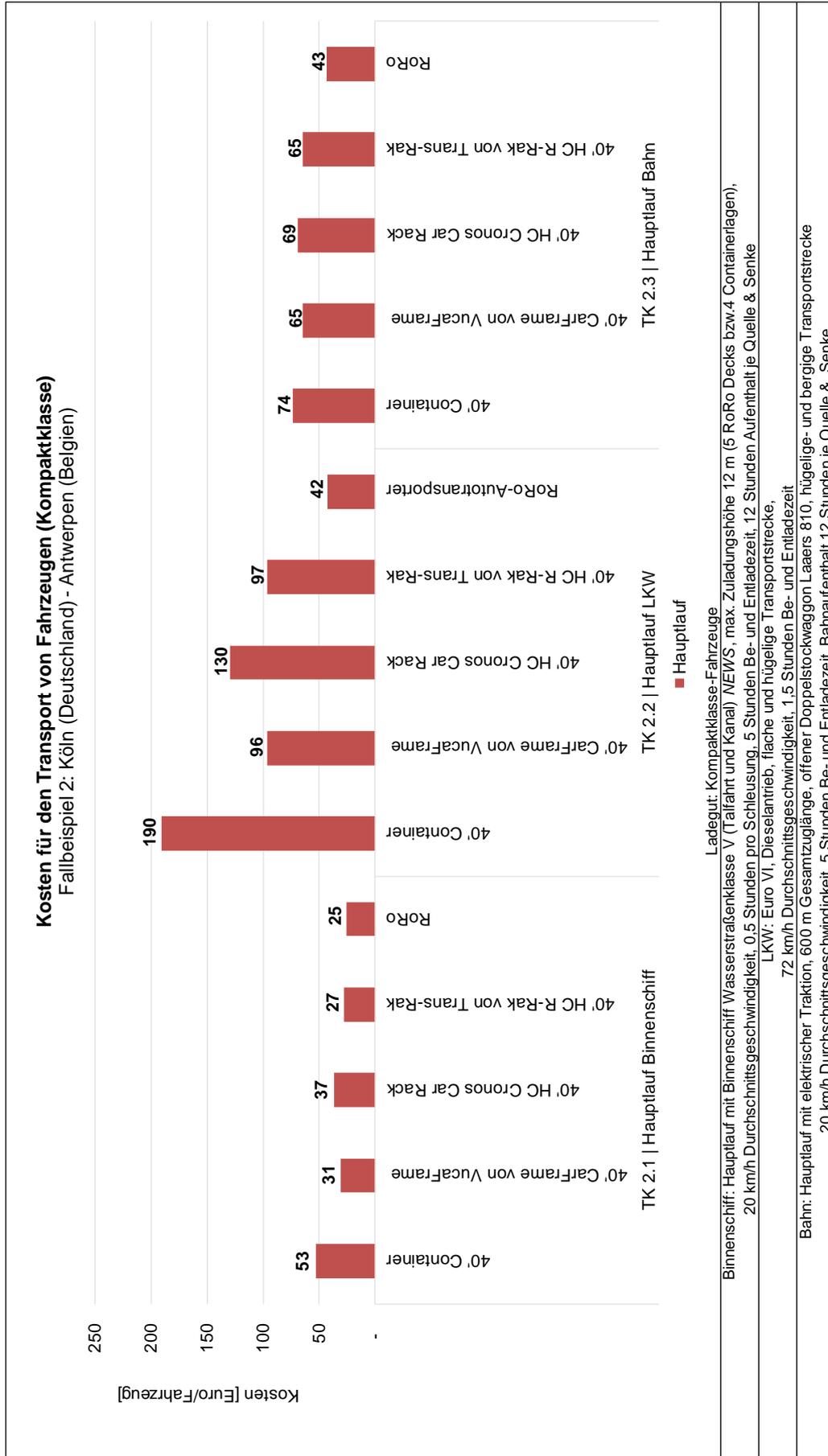


Abbildung 43: Ergebnisse der Kostenberechnung (Fallbeispiel 2)

- **Ökonomische Ergebnisse Transportkette 2.3 | Hauptlauf Bahn**

In *TK 2.3* erfolgt ein unimodaler Transport mit der Bahn. Im Gegensatz zu *Fallbeispiel 1* wird die durchschnittliche Transportgeschwindigkeit auf 45 km/h erhöht. Zudem wird der Gesamtaufenthalt der Waggon an Quelle und Senke aufgrund der Komplexitätsreduktion im Rundlauf auf 12 Stunden – analog zur Binnenschifffahrt – reduziert. Die Berechnung basierend auf den genannten Rahmenbedingungen, ergeben, dass die Bahn mit 43 Euro je transportiertes Fahrzeug in *Fallbeispiel 2* am teuersten ist. Der LKW-Transport ist nur minimal günstiger. Die Transportdistanz von 237 km auf der Straße ist unter den gewählten Rahmenbedingungen für einen Bahntransport zu kurz, um kostengünstiger als der LKW-Transport zu sein. Als Gesamttransportdauer sind für die Be- und Entladung sowie für die Fahrt 15 Stunden anzusetzen.

6.5 Vergleich der ökologischen Ergebnisse

Werden die Ergebnisse der beiden Fallbeispiele verglichen, so ist ersichtlich, dass der Bahntransport aus ökologischer Sicht im Rahmen von uni- und multimodalen Transportketten am besten abschneidet. Dies ist einerseits auf den geringen Energieverbrauch pro Tonnenkilometer (siehe Abbildung 33) und andererseits auf die im Vergleich zur Wasserstraße geringeren Transportdistanzen zurückzuführen. Werden die gewählten Transportketten für den Containertransport mithilfe des Berechnungstools *EcoTransIT* kalkuliert, so wird ebenfalls der Bahntransport als das energieeffizienteste Transportmittel ausgewiesen.

Bei Gegenüberstellung der LKW- und Binnenschifftransporte in den beiden Fallbeispielen werden unterschiedliche Verhältnismäßigkeiten sichtbar. Das Binnenschiff verfügt über ein sehr eingeschränktes Streckennetz, wodurch die Position von Quelle und Senke einen entscheidenden Einfluss hat. Diese Tatsache wirkt sich beispielsweise in *Fallbeispiel 1* negativ aus, da aufgrund einer langen Gesamttransportdistanz der Energiebedarf des multimodalen Transports sehr hoch ist. In *Fallbeispiel 2* ist die Gesamttransportdistanz zwar ebenfalls deutlich länger als beim LKW-Transport, jedoch sind die infrastrukturellen Rahmenbedingungen für das Binnenschiff günstiger, wodurch dieses aus ökologischer Sicht besser als der Straßentransport abschneidet. Entscheidend ist hierbei u. a. der Ladefaktor, wodurch auf dem Rhein deutlich mehr Fahrzeuge pro Binnenschiff im Vergleich zur Donau transportiert werden können (siehe Kapitel 2.3.5).

Der containerisierte Fahrzeugtransport erzielt bei den beiden Fallbeispielen im Vergleich zum RoRo-Transport des jeweiligen Transportmittels keine Effizienzsteigerung. Dies ist auf den geringeren Ladefaktor bei der untersuchten Fahrzeugkategorie *Kompaktklasse* zurückzuführen. Jedoch ist der containerisierte Fahrzeugtransport mit der Bahn beispielsweise energieeffizienter als der RoRo-

Transport auf dem LKW und dem Binnenschiff. Aus dieser Tatsache ist zu schließen, dass wenn kein RoRo-Transport auf der Bahn möglich ist (z. B. kein Rundlauf, keine RoRo-Waggons), der containerisierte Transport die beste Alternative darstellt. Hinsichtlich der unterschiedlichen Lösungen im containerisierten Fahrzeugtransport erzielen das *R-RAK*-System und der Containerrahmen *VUCAFRAME* die besten Ergebnisse. Letzteres System ist jedoch nicht zerlegbar, wodurch nur der Einsatz bei paarigen Verkehren bzw. Rundläufen sinnvoll ist.

6.6 Vergleich der ökonomischen Ergebnisse

Wie bereits bei der Methodenentwicklung in Kapitel 5.7 erwähnt, sind Kostensätze unternehmens- bzw. länderspezifisch und können stark voneinander abweichen. Außerdem unterliegen diese einer ständigen Veränderung, wodurch die Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen nicht als allgemeingültig bezeichnet werden können. Die Fallbeispiele demonstrieren jedoch, dass bei Anwendung der Methode unter bestimmten Annahmen und mithilfe von Referenzwerte die Transportkosten kalkuliert werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass bestimmte Einflussparameter signifikante Auswirkungen auf das Ergebnis haben und dass es je nach Gestaltung der Transportkette zu einer Verschiebung der Rangordnung kommt.

Während beispielsweise in *Fallbeispiel 1* der Transport mit der Bahn im Hauptlauf am günstigsten abschneidet, wird diese in *Fallbeispiel 2* aufgrund der deutlich kürzeren Transportdistanz als das teuerste Transportmittel ausgewiesen. Die Begründung dafür ist, dass durch die vergleichsweise lange Aufenthaltszeit bei der Be- und Entladung der Bahn hohe zeitabhängige Kosten für das teure Equipment entstehen. Die Transportstrecke ist dann vergleichsweise zu kurz, um diesen Mehraufwand gegenüber dem LKW-Transport aufholen zu können. Die Kosteneffizienz des Binnenschiffes ist stark von den Gegebenheiten der Wasserstraße abhängig, was dazu führt, dass die Ergebnisse aus den beiden Fallbeispielen sehr unterschiedlich ausfallen. Nachdem in *Fallbeispiel 1* das Binnenschiff beim Transport auf der Donau aufgrund der hohen Kosten und der langen Transportdauer aus Kostensicht nicht konkurrenzfähig ist, geht es in *Fallbeispiel 2* mit ca. 40% geringeren Kosten im Vergleich zu Bahn und Binnenschiff als klarer Sieger hervor (siehe Abbildung 43).

6.7 Zusammenfassung des Kapitels

In Kapitel 6 wurde die in dieser Arbeit entwickelte Methode anhand von zwei ausgewählten Fallbeispielen angewendet. Die Ergebnisse der Fallbeispiele hinsichtlich der optimalen Verkehrsträgerwahl unterscheiden sich. Zusammenfassend ist anzumerken, dass eine ökologische und ökonomische Verkehrsträgerbewertung immer nur für spezifische Gegebenheiten Gültigkeit besitzt und alle relevanten Berechnungsparameter berücksichtigt werden müssen.

7 Resümee und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurde eine Methode zur Quantifizierung von Kosten und Umweltauswirkungen in der automobilen Distributionslogistik entwickelt. Die Methode wurde in einem elektronischen Berechnungstool implementiert und ermöglicht einen raschen und unkomplizierten Vergleich von unterschiedlichen ein- und mehrgliedrigen Transportketten. Der Einsatz und die damit verbundene gesteigerte Transparenz bieten insbesondere für Verlagerer und Logistikdienstleister einen Mehrwert.

In der folgenden Zusammenfassung werden die Forschungsfragen beantwortet, es wird auf die Erfüllung der Methodenanforderungen eingegangen und zukünftiger Forschungsbedarf abgeleitet.

7.1 Diskussion der Forschungsfragen und -hypothese

Die in Kapitel 4.2 definierten Forschungsfragen können wie folgt beantwortet werden:

1. *Welche Teilbereiche von existierenden Methoden, die für die Berechnung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen bei Stückgut-, Massengut- bzw. Containertransport entwickelt worden sind, haben für die Fertigfahrzeugdistribution Gültigkeit?*

Aktuell (Stand 2017) existiert kein international anerkannter Standard zur Ermittlung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen im Gütertransport. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Quantifizierung von ökologischen Kenngrößen baut auf der *Norm DIN EN 16258* auf (siehe Abbildung 26). Die Norm stellt einen guten Leitfaden dar und mithilfe der spezifischen Verbrauchswerte für den LKW aus *HBEFA 3.2* und der Berechnungsmethodik für die Bahn nach *ifeu et al.* (vgl. 2016, S. 56) bzw. für das Binnenschiff nach *ifeu und INFRAS* (vgl. 2013, S. 32–35) kann eine detaillierte Berechnung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen durchgeführt werden. Analog zur Quantifizierung der ökologischen Kenngrößen wird bei der Kostenberechnung auf bestehende Methoden zurückgegriffen. Die LKW-Kostenrechnung wird nach den Ausführungen von *Wittenbrink* (vgl. 2014, S. 105 ff.) durchgeführt und auf die anderen Verkehrsträger übertragen.

Die entwickelte Methode wurde auf Basis der genannten wissenschaftlichen Arbeiten aufgebaut und um die untersuchungsrelevanten Gegebenheiten der automobilen Distributionslogistik erweitert. Zu diesem Zweck wurden Informationen der Fahrzeuglogistik empirisch erhoben und spezifische Berechnungsformeln entwickelt (z. B. Formel 5 bis Formel 8 zur Ermittlung des Ladefaktors von RoRo-Binnenschiffen).

2. *Welche spezifischen Gegebenheiten der automobilen Distributionslogistik haben signifikanten Einfluss auf die Höhe der Treibhausgasemissionen oder die Transportkosten und müssen dementsprechend in der zu entwickelnden Methode berücksichtigt werden?*

Als spezifische Gegebenheiten mit signifikantem Einfluss sind einerseits das im Vergleich zu Massengütern bzw. Containern leichte Transportgut PKW und andererseits die abweichenden Verhältnisse der Transportmittel hinsichtlich des Ladefaktors zu nennen.

Der Vorteil von Bahn und Binnenschiff im Vergleich zum LKW große Massen transportieren zu können, bleibt beim Fahrzeugtransport aufgrund des geringen Zuladungsgewichts größtenteils ungenutzt. Wird beispielsweise ein Binnenschiff mit einer Tragfähigkeit von 2.500 t (Wasserstraßenklasse V) mit 320 Kompaktklasse-Fahrzeugen beladen, so resultiert ein Zuladungsgewicht von etwa 416 t, was einer Auslastung von nur 16,7 % entspricht. Des Weiteren haben die Berechnungen des Ladefaktors gezeigt, dass die Verhältnismäßigkeit der unterschiedlichen Transportmittel beim RoRo-Transport stark von jenem des Stückgut-, Massengut- bzw. Containertransports abweicht. Während beispielsweise das Verhältnis der Ladefaktoren zwischen LKW und Binnenschiff (Wasserstraßenklasse V) beim Containertransport 1:72 beträgt, halbiert es sich beim RoRo-Transport auf 1:36.

Daraus ist ableitbar, dass Angaben in der Literatur hinsichtlich Kosten und Umweltauswirkungen unterschiedlicher Transportmittel, die nicht für den Fahrzeugtransport ermittelt worden sind, aufgrund der stark abweichenden Gegebenheiten für den RoRo-Transport keine Gültigkeit besitzen.

3. *Unter welchen Rahmenbedingungen führt der Einsatz von innovativen Logistiklösungen als Alternative zu dem RoRo-Transport zu einer Effizienzsteigerung in Bezug auf den Energiebedarf bzw. den Kosten des Transports?*

Die untersuchten Logistiklösungen für den containerisierten Fahrzeugtransport führen beim Transport auf der Straße zu keiner Effizienzsteigerung hinsichtlich Kosten und Umweltauswirkungen. Die Gründe dafür sind, dass RoRo-LKWs aufgrund ihrer Bauweise die max. zulässigen Höchstmaße des Straßenverkehrs besser ausnützen und mithilfe der verstellbaren Ladeebenen einen höheren Ladefaktor erzielen. Dies führt bei annähernd gleichem Energiebedarf bzw. gleichen Kosten für den Gesamttransport zu deutlich niedrigeren Werten pro transportiertem Fahrzeug.

Analog dazu gilt auch für den Bahntransport, dass der Transport in Containern durchschnittlich über alle Fahrzeugsegmente einen geringeren Ladefaktor aufweist. Die einzige Ausnahme stellt das Fahrzeugsegment *Kleinwagen* dar, das beim

Transport mittels *VUCAFRAME*-Containerrahmen denselben Ladefaktor wie beim RoRo-Transport erzielt.

Auf der Wasserstraße kann der containerisierte Fahrzeugtransport zu einer Effizienzsteigerung gegenüber dem RoRo-Transport führen. Wird beispielsweise der Ladefaktor eines im Einsatz befindlichen RoRo-Schiffes auf der Donau (z. B. MS Heilbronn) mit einem Containerschiff derselben Wasserstraßenklasse (z. B. Großmotorschiff) verglichen, so kann beim Transport mittels des *R-Rak*-Systems eine Steigerung des Ladefaktors von durchschnittlich 37 % über alle Fahrzeugsegmente erzielt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der containerisierte Transport nur auf der Wasserstraße das Potenzial besitzt, eine Effizienzsteigerung gegenüber bestehenden RoRo-Transportmitteln zu bewirken. Weiters stellt der containerisierte Transport eine Effizienzsteigerung dar, wenn der RoRo-Transport nicht hinreichend effizient realisiert werden kann. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn keine paarigen Verkehre oder Rundläufe erzeugt werden können und ein hoher Leerfahrtenanteil die Folge ist. In diesem Fall ist beispielsweise ein LoLo-Bahntransport dem RoRo-Straßentransport vorzuziehen.

Neben den Forschungsfragen wurde in Kapitel 4.2 folgende Forschungshypothese formuliert:

Der ökologische und ökonomische Transportmittelvergleich in der automobilen Distributionslogistik führt u. a. aufgrund des spezifischen Ladefaktors zu abweichenden Ergebnissen im Vergleich zu allgemeingültigen Aussagen aus den Bereichen des Stückgut-, Massengut- und Containertransports.

Der Vergleich der Transportmittel hinsichtlich Kosten zeigt, dass die Veränderung von bestimmten Einflussparametern signifikante Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Kostensätze sind unternehmens- bzw. länderspezifisch und weichen stark voneinander ab. Zusammenfassend ist daraus zu schließen, dass eine allgemeingültige Aussage hinsichtlich eines ökonomischen Transportmittelvergleichs nicht abgeleitet werden kann. Allein die Betrachtung von zwei unterschiedlichen Transportketten (siehe Fallbeispiele in Kapitel 6) zeigt, dass es in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen zu Verschiebungen in der Rangordnung kommt.

Hinsichtlich der ökologischen Bewertung wird im Grundlagenteil dieser Arbeit (siehe Kapitel 2) ausgeführt, dass für den Gütertransport allgemein gilt, dass der Binnenschifftransport dem Bahntransport und dieser dem LKW-Transport vorzuziehen ist (vgl. Engelfried 2011, S. 101–102).

Nach Auswertung und Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit ist zu folgern, dass diese Aussage keine Gültigkeit für den Fahrzeugtransport hat. Für den Fahrzeugtransport ist folgende Aussage zu treffen:

„Aus ökologischen Gründen gilt für den Fahrzeugtransport allgemein, dass die Bahn dem Binnenschiff und dieses dem LKW vorzuziehen ist. Aufgrund der Vielzahl an Einflussparametern kann es jedoch zu Verschiebungen der Reihenfolge kommen wodurch eine individuelle Bewertung jeder Transportrelation erforderlich ist“.

Aus Sicht des Autors ist somit die formulierte Forschungshypothese zu verifizieren.

7.2 Abgleich mit den Anforderungen an die Methode

In Kapitel 4.4 wurden zehn Anforderungen an die zu entwickelnde Methode definiert. Nachdem die Methode in Kapitel 5 beschrieben und in Kapitel 6 anhand von Fallbeispielen angewandt worden ist, wird nun ein Abgleich mit den definierten Anforderungen durchgeführt.

- *Anf. 1 – Definition des Transportguts:*

In *Schritt Nr. 1* der Methode wird eine Klassifizierung und Definition der Transportgüter durchgeführt. Zur Komplexitätsreduktion wurde die Vielzahl an unterschiedlichen Modellen in elf Fahrzeugsegmente eingeteilt. Das *Car-Distribution-Tool* ermöglicht die Berechnung der ökologischen und ökonomischen Kenngrößen in Abhängigkeit von der spezifischen Auswahl des Fahrzeugsegments.

- *Anf. 2 – Spezifikation der Transportmittel:*

Die Spezifikation der Transportmittel folgt in *Schritt Nr. 2*. Im *Car-Distribution-Tool* sind die am häufigsten zum Einsatz kommenden Transportmittelkonfigurationen mit den entscheidenden Einflussparametern (z. B. Eigengewicht, Antriebsart) hinterlegt.

- *Anf. 3 – Berücksichtigung der relationsspezifischen Gegebenheiten:*

Hinsichtlich des definierten Untersuchungsbereichs (siehe Kapitel 2.4) werden in *Schritt Nr. 3* die relationsspezifischen Faktoren mit signifikantem Einfluss auf das ökologische und ökonomische Bewertungsergebnis in der Methode berücksichtigt (z. B. Topografie der Länder, Fließrichtung der Wasserstraße).

- *Anf. 4 – Berechnung des spezifischen Ladefaktors:*

Der Berechnung des spezifischen Ladefaktors wird – aufgrund des signifikanten Einflusses auf das Gesamtergebnis – in *Schritt Nr. 4* besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Dabei können das Transportgut, das Transportmittel und die

relationsspezifischen Gegebenheiten ausgewählt und eine spezifische Berechnung durchgeführt werden.

- *Anf. 5 – Ökologische Bewertung der Transportkette:*

Die ökologische Bewertung wird in *Schritt Nr. 6* hinsichtlich des Energieverbrauchs (TTW und WTW) und der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalent) durchgeführt und ausgewiesen. Die Vorgehensweise entspricht der *Norm DIN EN 16258* und berücksichtigt die spezifischen Gegebenheiten der automobilen Distributionslogistik.

- *Anf. 6 – Ökonomische Bewertung der Transportkette:*

Die Berechnung der Transportkosten wird im abschließenden *Schritt Nr. 7* der Methode erläutert. Dabei wird auf die Be- und Entladung, den Transport und etwaige Umschlagvorgänge eingegangen. Da die Eingabewerte für Kosten einer ständigen Veränderung unterliegen (z. B. Entwicklung des Erdölpreises) bzw. unternehmensspezifisch sind (z. B. Prozentanteil des Overheads), ist eine Anpassung dieser Werte in den Stammdaten des *Car-Distribution-Tools* möglich.

- *Anf. 7 – Berücksichtigung des containerisierten Transports:*

Der containerisierte Transport ist durchgängig in den Schritten der Methode berücksichtigt, wodurch ein Vergleich mit dem RoRo-Verfahren ermöglicht wird.

- *Anf. 8 – Bewertung von Umschlagvorgängen:*

Die ökologische Berechnung von Umschlagvorgängen wurde in der Methodenbeschreibung aufgeführt, diese hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf die ökologischen Kennwerte. Bei der ökonomischen Berechnung führt insbesondere der Vergleich der RoRo- und LoLo-Verfahren zu signifikanten Unterschieden.

- *Anf. 9 – Transparenz der Berechnungen:*

In Kapitel 5 sind die Formeln zur Berechnung der ökonomischen und ökologischen Kenngrößen aufgeführt. Bei Anwendung dieser mit den genannten Referenzwerten sind die Ergebnisse aus Kapitel 6 (Fallbeispiele) reproduzierbar.

- *Anf. 10 – Praxistauglichkeit und Allgemeingültigkeit:*

Zur einfachen Handhabung wurden jene Parameter, die oftmals abgeändert werden in einer übersichtlichen Eingabemaske zur Anpassung integriert (siehe Abbildung 35). Die Detailinformationen sind in den Stammdaten hinterlegt und können für die Berechnungen unternehmensspezifisch angepasst werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass alle an die Methode gestellten Anforderungen erfüllt und im Rahmen der zwei Fallbeispiele verifiziert wurden.

Abschließend ist in nachfolgender Tabelle 32 eine Gegenüberstellung des *Car-Distribution-Tools* mit bestehenden Berechnungstools dargestellt.

Überblick und qualitativer Vergleich ausgewählter Berechnungstools							
Grad der Erfüllung	Symbol	EcoTransit	NTM Calc Freight	Map & Guide	Marco Polo Calculator	CO2-Tec	Car-Distribution-Tool
Nicht erfüllt	○						
Teilweise erfüllt	◐						
Vollständig erfüllt	●						
Verkehrsträgerwahl	LKW	●	●	●	●	●	●
	Bahn	●	●	○	●	○	●
	Binnenschiff	●	○	○	●	○	●
Straßentransport	LKW-Typ	●	●	●	○	●	●
	Emissionsklasse	●	●	●	○	●	●
Bahntransport	Waggontyp	◐	◐	○	○	○	●
	Antriebsart	●	◐	○	●	○	○
Binnenschifftransport	Wasserstraßenklasse	●	○	○	○	○	●
	Antriebsart	○	○	○	●	○	○
Transportgut	Gewichtsabhängiges Ladegut	●	●	●	●	●	●
	Standard-Container	●	○	○	○	○	●
	PKW	○	○	○	○	○	●
	Spezialequipment PKW	○	○	○	○	○	●
Ladefaktor	Leerfahrt	●	○	●	○	●	●
	Lastfahrt	●	●	●	●	●	●
	Auslastungsbezogen	●	○	●	○	●	●
Transportstrecke	Länderspezifische Berechnung	●	○	●	○	●	●
	Multimodale Transporte	●	○	○	●	●	●
	Umschlag	●	○	○	○	○	●
Ergebnisdarstellung	Automatische Routenplanung	◐	◐	●	○	○	○
	Vergleich der Verkehrsträger	●	○	○	◐	○	●
Energiebedarf	Tank-to-Wheel	●	○	●	○	●	●
	Well-to-Wheel	●	●	●	○	○	●
Emissionsberechnung	Tank-to-Wheel	●	○	●	○	●	●
	Well-to-Wheel	●	●	●	○	○	●
Zeit und Kosten	Transportzeit	○	○	○	○	○	●
	Kostenbewertung	○	○	◐	○	○	●

Tabelle 32: Vergleich bestehender Berechnungstools mit dem Car-Distribution-Tool

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

In Kapitel 7.2 wurde dargelegt, dass die definierten Anforderungen an die Methode erfüllt wurden. Darüber hinaus bleiben Fragen für weitere Forschungsaktivitäten offen. Aus Sicht des Autors sind dabei die Auswirkungen von zukünftigen technischen Entwicklungen – etwa der elektrische Antrieb und die Fähigkeit, autonom zu fahren – insbesondere bei LKWs von Relevanz.

Der elektrische Antrieb ist für die ökologische Bewertung von Transporten von Bedeutung, da dieser mit einer signifikanten Reduktion der Treibhausgasemissionen einhergeht (vgl. Meyer 2012, S. 266). Es besteht daher die Notwendigkeit, die entwickelte Methode zu erweitern, sodass auch eine Quantifizierung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen für Elektro-LKWs möglich wird.

Weiters sind beim Elektro-LKW neben den ökologischen auch die ökonomischen Auswirkungen zu betrachten. Veränderte Anschaffungs- und Betriebskosten haben wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Transporten. Diese sind jedoch bis heute bei Elektro-LKWs noch weitgehend unerforscht (vgl. Proff 2015, S. 430).

Als zweite technische Entwicklung ist sicherlich – wie auch im DHL Logistics Trend Radar angeführt (siehe Kapitel 2.1) – die Einführung von autonom fahrenden LKWs im Fernverkehr von Bedeutung. Die Nutzfahrzeugindustrie forscht intensiv am autonom fahrenden LKW, jedoch wird es noch Jahre dauern, bis die Marktreife erreicht ist und die gesetzlichen Rahmenbedingungen umgesetzt sind (vgl. Schroven 2015, S. 24).

Die Einführung von autonom fahrenden LKWs wird jedenfalls Auswirkungen auf die Transportzeit haben, da gesetzliche Lenk- und Ruhepausen für den LKW-Fahrer hinfällig werden. Außerdem sind auch Auswirkungen auf die Transportkosten zu erwarten. Die Fahrerpersonalkosten haben beim LKW-Transport einen deutlich höheren Anteil als beim Bahn- bzw. Binnenschifftransport. Im Fernverkehr betragen diese etwa 26,3 %, wodurch die Eliminierung dieser eine deutliche Verbesserung der Kostenstruktur von LKW-Transporten bedeutet (vgl. Wittenbrink 2014, S. 101).

Die zukünftigen technischen Entwicklungen, insbesondere bei LKW-Transporten, haben Einfluss auf die ökologischen und ökonomischen Kenngrößen wodurch eine Quantifizierung dieser als weiterer Forschungsbedarf definiert wird.

Literaturverzeichnis

- Alcotrans Container Line (2017): Bunkerzuschläge. [Online]
<http://www.alcotrans.nl/de/bunkerzuschlaege> [12.02.2017]
- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club (2015): Autodaten & Autokosten. [Online]
<http://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/> [19.02.2015]
- Ammoser, H. und Hoppe, M. (2006): *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften. Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens*. Dresden: Technische Universität Dresden, S. 6
- Anzböck, R. (2015a): *Concept and Specification of an Inland Waterway Container Vessel*. Forschungsbericht 1.3, Wien, S. 48
- Anzböck, R. (2015b): Development of an Easy-to-Load/Unload Car Carrier following the “NEWS Mk II“-Design. In: Anzböck, R.; Steinwender A.: *Concept and Specification of an Inland Waterway Container Vessel*. Forschungsbericht 1.4.1, Wien, S. 36–48
- Arbeitsmarktservice Österreich (2017): Berufsinformationssystem. BerufskraftfahrerIn in der Güterbeförderung. [Online]
<http://www.ams.at/bis/bis/StammberufDetail.php?noteid=116> [09.01.2017]
- Arencibia, A.; Feo-Valero, M.; García- Menéndez, L. und Román, C. (2015): *Modelling mode choice for freight transport using advanced choice experiments*. Transportation Research, Part A 75, S. 252
- Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hrsg.) (2008): *Handbuch Logistik*. 3. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 8–734
- Arnold, P.; Peeters, D. und Thomas, I. (2004): *Modelling a rail/road intermodal transportation system*. Transportation Research Part E 40, S. 255
- ASFINAG (2017): GO-Maut für Fahrzeuge über 3,5 Tonnen. [Online]
<https://www.asfinag.at/maut/maut-fuer-lkw-und-bus> [15.01.2017]
- Bachmann, P. (2009): *Controlling für die öffentliche Verwaltung. Grundlagen, Verfahrensweisen, Einsatzgebiete*. 2.Auflage, Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 79
- Barwig, U. und Hartmann, H. (2015): *Kosten- und Leistungsrechnung in der Spedition*. 2.Auflage, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, S. 1–115

-
- Bensel, N. (2008): Multimodale Transport- und Logistikketten unter besonderer Berücksichtigung der Schiene. In: Baumgarten, H. (Hrsg.): *Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 222
- Bernards, H. (2013): Ich erinnere mich: Wie wir den Autotransport revolutionierten. In: *WIR – MitarbeiterInnen-Magazin BLG Logistics*. Ausgabe 12/2013, S. 32–33
- Bichler, K.; Krohn, R. und Philippi, P. (Hrsg.) (2011): *Gabler Kompaktlexikon Logistik. 1.900 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*. 2. Auflage, Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 192
- BLG AUTOMOBILE LOGISTICS (2012): Nachhaltige Automobiltransporte – Chancen für die Schiene. [Online]
http://2012.konferenz-gruene-logistik.de/dokumentation/vortraege/WS_II_V_2_BLG_Automobiltransporte_Buenning.pdf [28.10.2015]
- BLG AUTORAIL (2015a): Waggonequipment. [Online]
<http://www.blg-autorail.de/de/waggonequipment/> [28.10.2015]
- BLG AUTORAIL (2015b): Startseite. [Online]
<http://www.blg-autorail.de/> [26.11.2015]
- BLG AUTORAIL (2015c): Waggonequipment. Laaers 810. [Online]
<http://www.blg-autorail.de/de/waggonequipment/> [24.11.2015]
- BLG AUTORAIL (2017): Waggonequipment. [Online]
<https://www.blg-autorail.de/kopie-von-services> [03.08.2017]
- BLG LOGISTICS GROUP (2015): Dienstleistungen. [Online]
<http://www.blg-logistics.com/de/dienstleistungen/transportlogistik/fahrzeugtransporte> [28.10.2015]
- Boschian, V. und Paganelli, P. (2016): Business Models for Advanced ICT in Logistics. In: Lu, M. (Hrsg.) und Bock, J. de (Hrsg.): *Sustainable Logistics and Supply Chains. Innovations and Integral Approaches*. Schweiz: Springer International Publishing, S. 23
- Braess, H. und Seiffert, U. (Hrsg.) (2013): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7.Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 132

-
- Brons, M. und Christidis, P. (2011): *External cost calculator for Marco Polo freight transport project proposals*. JRC Scientific and Technical Reports, Luxembourg, S. 1–5
- Bundesministerium der Finanzen (2000): AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter. [Online]
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [15.01.2017]
- Bundesnetzagentur (2013): *Marktuntersuchung. Eisenbahnen*. Bonn, S. 42
- Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (2014): Dieselpreis-Information (Großverbraucher). [Online]
<http://www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation.pdf>
[04.01.2017]
- BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt und TNS Infratest (2014): *Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung*. Vorläufiger Endbericht, S. 152-190
- Büter, C. (2010): *Außenhandel. Grundlagen globaler innergemeinschaftlichen Handelsbeziehungen*. 2. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 244
- Clausen U. (2013): Grundlagen der Verkehrs- und Transportlogistik. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 4–5
- Container Service Hamburg (2017): Container Angebote. [Online]
<https://www.containerbasis.de/marktplatz/> [05.01.2017]
- Cronos Group Limited (2014): Products. [Online]
<http://www.cronos.com/Products/Carracks.aspx> [12.08.2014]
- Cross, B. (2012): Boxing clever [Online]
<https://automotivelogistics.media/intelligence/boxing-clever> [28.12.2014]
- Dabidian, P. und Langkau, S. (2013): Straßengüterverkehr. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 137
- DB Cargo Logistics (2016): Zahlen und Fakten. [Online]
http://www.rail.dbschenker.de/rail-deutschland-automotive-de/start/unternehmen/zahlen_fakten.html [02.08.2016]

-
- DB Energie (2017): Preisblatt für die Nutzung des 16,7-Hz-Bahnstromnetzes (Bahnstromnetz) gültig ab 01.01.2017. [Online]
https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2334784/EIIT8LAtOVockQsHgRNggJ0NHo0/6566890/data/Anlage_Preisblatt_Netznutzung.pdf [24.01.2017]
- DB Netz (2016): Das Trassenpreissystem 2017 der DB Netz AG. [Online]
<https://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/2394144/5Nx6pkC1EU0R48cMFJpCgFAuzW4/10925598/data/tpsbrochure2017.pdf> [28.12.2014]
- DB Schenker (2012): Zahlen und Fakten. [Online]
http://www.rail.dbschenker.de/rail-deutschland-automotive-de/start/unternehmen/zahlen_fakten.html [16.11.2015]
- DB Schenker (2015): Kraftfahrzeugtransportwagen. [Online]
<https://www.gueterwagenkatalog.rail.dbschenker.de/gwk-de/start/kfz-transport/> [09.11.2015]
- Deiters, J.; Rodekoher, B. und Haneklaus, T. (2006): *Güterverkehrsgewerbe und verladende Wirtschaft in Westniedersachsen. Bedeutung der Verkehrsinfrastruktur, Transportorganisation, Auswirkungen der Lkw-Maut und die Rolle des kombinierten Verkehrs – eine empirische Analyse.* Abschlussbericht, LOGIS.NET, Osnabrück, S. 26–27
- Der Standard (2008): Letzte Taurus-Lok läuft vom Band. [Online]
<http://derstandard.at/3345740/Letzte-Taurus-Lok-laeuft-vom-Band> [15.01.2017]
- Deutsche Post DHL Group (2016a): Das Maximum an Flexibilität und Auslastung – Transportieren Sie Ihre Fahrzeuge mit dem patentierten „Car Rack“. [Online]
<http://www.dhl.de/de/logistik/frachttransport/automotive-vehicle-logistics-events/car-rack.html> [08.11.2016]
- Deutsche Post DHL Group (2016b): Logistics Trend Radar. Delivering insight today. Creating value tomorrow. [Online]
http://www.dhl.com/en/about_us/logistics_insights/dhl_trend_research/trendradar.html#.WF0G-xvhCUk [23.12.2016]
- Ebel, G. (2013): Akteure. In: Clausen, U., Geiger, C. (Hrsg.) (2013): *Verkehrs- und Transportlogistik*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 126
- ECG – Association of European Vehicle Logistics (2013): *Operatives Qualitätshandbuch*. Version 5.1, S. 5–26.

-
- Engelfried, J. (2011): *Nachhaltiges Umweltmanagement*. 2. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, S. 101–102
- Erol, S.; Schumacher, A. und Sihm, W. (2016): Auf dem Weg zur Industrie 4.0 – ein dreistufiges Vorgehensmodell. In: Biedermann, H. (Hrsg.): *Industrial Engineering und Management. Beiträge des Techno-Ökonomie-Forums der TU Austria*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016, S. 267
- European Automobile Manufacturers Association (2017a): Economic and Market Report. EU Automotive Industry. Quarter 4 2016, S. 18
- European Automobile Manufacturers Association (2017b): Key Figures. [Online] <http://www.acea.be/statistics/tag/category/key-figures> [02.08.2017]
- European Commission (2011): *White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. COM (2011) 144 final, Brüssel S. 9
- European Commission (2012): *Guidance document on Inland waterway transport and Natura 2000 – Sustainable inland waterway development and management in the context of the EU Birds and Habitats Directives*. S.31
- European Commission (2017): MOBILITY AND TRANSPORT. TRANS-EUROPEAN TRANSPORT NETWORK. [Online] <http://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/en/abouttent.htm> [02.08.2017]
- European Parliament (2016): *Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013, and amending and repealing Directive 97/68/EC*. Official Journal of the European Union, L 252/53, S. 1–24
- Eurostat (2015): Freight transport statistics – modal split. [Online] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics_-_modal_split [30.11.2015]
- Eurostat (2017): *Electricity prices for industrial consumers – bi-annual data (from 2007 onwards)*. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en [24.01.2017]
- EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs- GmbH (2014): Euro-6-Zugmaschinen im Vergleich. [Online]

-
- <http://www.eurotransport.de/test/1000-punkte-test-euro-6-zugmaschinen-im-vergleich-6529107.html> [04.01.2017]
- Fliegl Fahrzeugbau (2016): Fliegl Gooseneck Chassis. Der robuste Container-Allrounder. [Online]
<http://www.fliegl-fahrzeugbau.de/fliegl-gooseneck-chassis/150/1411/616/>
[20.01.2016]
- Fraunhofer SCS (2014): Presseinformation. Neueste Zahlen aus der Logistikwirtschaft: Die aktuelle »Top 100 der Logistik« erscheint zum 31. Deutschen Logistik-Kongress. Nürnberg, 16. Oktober 2014, S. 1
- Freidank, C. (2008): *Kostenrechnung. Grundlagen des innerbetrieblichen Rechnungswesens und Konzepte des Kostenmanagements*. 8. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 93
- Freidank, C. und Fischbach, S. (2012): *Übungen zur Kostenrechnung. Mit 130 Aufgaben und 10 Übungsklausuren sowie ausführlichen Lösungen*. 7. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 161
- Fuß, P. (2014): Die größten Automobilhersteller weltweit. Eine Analyse wichtiger Bilanzkennzahlen. [Online]
<http://www.automobil-produktion.de/uploads/2014/04/EY-Automotive-Bilanzen-Q4-2013-Pr%C3%A4sentation.pdf> [09.12.2015]
- García-Menéndez, L.; Martínez-Zaroso, I. und Miguel, D. (2004): *Determinants of Mode Choice between Road and Shipping for Freight Transport. Evidence for Four Spanish Exporting Sectors*. Journal of Transport Economics and Policy, Volume 38, Part 3, S. 448
- Gehr, F. und Hellingrath, B. (Hrsg.) (2007): *Logistik in der Automobilindustrie: Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 6
- Geiger, C. und Schmied, M. (2012): Carbon Footprint – Teilgutachten. “Abbau von Hemmnissen zur Emissionsminderung“. Umweltbundesamt, Texte 30/2012, S. 7–8
- Giese, A. (2012): *Differenziertes Performance Measurement in Supply Chains*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 16–17
- Grieneisen, E. und Hermes, A. (2013): Instrument zur komparativen Prozessanalyse und –bewertung für die Distributionslogistik am Beispiel der Volkswagen AG. In: Göpfert, I.; Braun, D. und Schulz, M. (Hrsg.): *Automobillogistik. Stands und Zukunftstrends*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler, S. 354–355

-
- Gronalt, M.; Höfler, L.; Humpl, D.; Käfer, A.; Peherstorfer, H.; Posset, M.; Pripfl, H. und Starkl, F. (2010): *Handbuch Intermodaler Verkehr. Kombiniertes Verkehr. Schiene-Straße-Binnenwasserstraße*. Wien: Bohmann Druck und Verlag, S. 4–6
- Gudehus, T. (2005): *Logistik: Grundlagen, Strategien Anwendungen*. 3. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 77
- Gudehus, T. (2012): *Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. 4. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 144–848
- Göpfert, I.; Schulz, M. und Wellbrock, W. (2013): Trends in der Automobillogistik. In: Göpfert, I.; Braun, D. und Schulz, M. (Hrsg.): *Automobillogistik. Stands und Zukunftstrends*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler, S. 4–5
- Günther, H.; Mattfeld, D. und Suhl, L. (Hrsg.) (2007): *Management logistischer Netzwerke. Entscheidungsunterstützung, Informationssysteme und OR-Tools*. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 331
- Hafen Halle (2016): Standardcontainer. [Online]
<http://www.ct-hs.de/lexikon/42-standardcontainer> [20.01.2016]
- Hecht, M. (2008): Produktiver Schienengüterverkehr durch innovative Güterwagen. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik*. Korschbroich, S. 114
- Herold, L. (2005): *Kundenorientierte Prozesssteuerung in der Automobilindustrie. Die Rolle von Logistik und Logistikcontrolling im Prozess „vom Kunden bis zum Kunden“*. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, S. 10–169
- Herry, M. (2001): *Transportpreise und Transportkosten der verschiedenen Verkehrsträger im Güterverkehr*. Verkehr und Infrastruktur Nr. 12, Wien: Kammer für Arbeiter und Angestellte, S. 24–25
- Hofmann, E. und Nothardt, F. (2009): *Logistics Due Diligence. Analyse – Bewertung – Anlässe – Checklisten*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 127
- Hohberger, K. (2008): *Moderne Logistik-Konzepte. Innovative Verkehre. Trailer und Ro-Ro*. Schifffahrtskonferenz IHK, Regensburg, S. 5
- Holweg, M. und Miemczyk, J. (2003): *Delivering the ‘3-day car’ – the strategic implications for automotive logistics operations*. Journal of Purchasing & Supply Management 9, S. 68
- Hoepke, E.; Appel, W.; Brähler, H.; Dahlhaus, U.; Esch, T.; Kopp, S.; Rhein und B.; Breuer, S. (Hrsg.) (2013): *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*. 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 31

-
- ten Hompel, M. und Heidenblut, V. (2011): *Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 3. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 262
- ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2012): *Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011)*. Endbericht, Heidelberg, S. 8–11
- ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg und INFRAS Forschung und Beratung (2013): *Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD*: Endbericht, Heidelberg, S. 24–35
- ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, INFRAS Forschung und Beratung und IVE – Ingenieurgesellschaft für Verkehrswesen (2016): *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports. Methodology and Data*. Heidelberg, S. 5–94
- Ihme, J. (2006): *Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. München: Carl Hanser Verlag, S. 147
- INFRAS Forschung und Beratung (2004): *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1. Dokumentation*. UFOPLAN-Ref.-Nr. 298 43 100/02, Bern, S. 11
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2014): *Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change*. New York: Cambridge University Press, S. 9
- Iskan, S. (2009): *Verkehrsmittelwahl für internationale Lieferbeziehungen. Dargestellt am Beispiel der Automotive Industrie*. 1. Auflage, Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, S. 69–70
- Janic, M. (2014): *Advanced Transport Systems. Analysis, Modelling and Evaluation of Performances*. London: Springer-Verlag, S. 128
- Janicki, J. (2011): *Systemwissen Eisenbahn. DB-Fachbuch*. 1. Auflage, Berlin: Bahn Fachverlag, S. 30–37
- Jong, G. de (2014): *Mode Choice Models*. In: Tavasszy, L. und Jong, G. de: *Modelling Freight Transport*. Amsterdam: Oxford Elsevier Ltd., S. 122

-
- Kaffka, J. (2013): Kombiniertes Verkehr. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 259–260
- Kaffka, J. (2014): *Assessment of current situation of inland ports*. Forschungsbericht 5.1, Dortmund, S. 17
- Keller, A. (2006): *Allgemeine Erkenntnistheorie. Grundkurs Philosophie 2*. 3. Auflage, Stuttgart: W. Kohlhammer, S. 71
- Keuschen, T. und Klumpp, M. (Hrsg.) (2010): *Weiterbildungshandbuch Grüne Logistik*. Berlin: Logos Verlag, S. 19–20
- Kim, N. und Wee, B. van (2011): *The relative importance of factors that influence the break-even distance of intermodal freight transport systems*. *Journal of Transport Geography* 19, S. 859
- Kleine Zeitung (2017): Eisbrecher auf der Donau. "MS Eisvogel" im Einsatz. [Online] http://www.kleinezeitung.at/oesterreich/5152296/Eisbrecher-auf-der-Donau_MS-Eisvogel-im-Einsatz#image-eisvogel_apa_006_1484138991291172 [02.08.2017]
- Klug, F. (2010): *Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 214–439
- Koch, S. (2012): *Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 292–293
- Koether, R. (2014): *Distributionslogistik. Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler, S. 11–168
- Kraftfahrt-Bundesamt (2014): Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Dezember 2014 nach Segmenten und Modellreihen (FZ 11). [Online] http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Segmente/2014/2014_segmente_node.html;jsessionid=54DEF1D6B589DC0BA2EB8AF96DD3CC9B.live2051 [19.02.2015]
- Kraftfahrt-Bundesamt (2015): Monatliche Neuzulassungen von Personenkraftwagen im September 2015. Top 3 je Segment im September. [Online] http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2015/201509GV1monatlich/201509_n_top3.html?nn=1180444 [05.11.2015]
- Kranke, A.; Schmied, M. und Schön, A. (2011): *CO₂-Berechnung in der Logistik. Datenquellen, Formeln, Standards*. 1. Auflage, München: Verlag Heinrich Vogel, S. 117–295

-
- Kuenheim, E. (1988): In: Spengler, G.: *Strategie- und Organisationsentwicklung. Konzeption und Umsetzung eines integrierten, dynamischen Ansatzes zum strategischen Management*. 1.Auflage, Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, S. 19
- Kuhlang, P.; Sunk, A.; Nemeth, T. und Kovacs, K. (2015): *Grundlagen der Logistik. Skriptum zur Unterstützung der Vorlesung Logistik (330.164)*. 6. Auflage, Wien: Bereich für Betriebstechnik und Systemplanung Eigenverlag, S. 166–170
- Kummer, S. (2010): *Einführung in die Verkehrswirtschaft*. 2.Auflage, Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG, S. 56–58
- Kummer, S. (Hrsg.); Grün, O. und Jammernegg, W. (2009): *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. 2. Auflage, München: Pearson Studium, S. 322–325
- Kässbohrer Transport Technik: Autotransporter. [Online]
<http://www.kaessbohrer.at/index.php/de/produkte-a-loesungen/metago>
[28.10.2015]
- Lichtblau, G. und Pötscher, F. (2014): *CO₂-Monitoring Pkw 2014. Zusammenfassung der Daten der Neuzulassungen von Pkw der Republik Österreich gemäß Entscheidung Nr. 1753/2000/EG für das Berichtsjahr 2013*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, S. 13–14
- Linke, R. (2013): *Optimierung der externen Transportkosten. Methoden zur Kosteneinsparung in der Distributionslogistik*. Hamburg: Diplomica Verlag, S. 21
- Lochmahr, A. (Hrsg.) (2016): *Praxishandbuch Grüne Automobillogistik*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 6–70
- Martin, H. (2014): *Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. 9. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 97
- Mauerer, S. (2005): *Der Einfluss von Produktlinienerweiterungen auf Premiumautomobilmarken – Wirtschaftsgeschichtliche und marketingwissenschaftliche Analysen*. Dissertation, Universität Regensburg, 2005, S. 11

-
- Meier, F.; Sender, J. und Voll, R. (2013): Schienengüterverkehr. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 161–163
- Meyer, R. (2012): Nachhaltigkeit durch Innovationen beim Fashion-Logistiker Meyer & Meyer. Ökologie und soziale Maßnahmen unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte. In: Stölzle, W. und Lieb, T. (Hrsg.): *Business Innovation in der Logistik. Chancen und Herausforderungen für Wissenschaft und Praxis*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 266
- Monego, T. (2011): *Einflussfaktoren auf den wirtschaftlichen Betrieb eines LKWs im Güterverkehr*. Hamburg: Diplomica Verlag GmbH, S. 25–30
- Muschket, M. (2013): Binnenschiffgüterverkehr. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 181
- Mosolf (2015): Automotive Logistics. [Online]
<http://www.mosolf.de/leistungen/automotive-logistics.html> [10.11.2015]
- Network for Transport Measures (2016): Calculation of Environmental Impact. [Online]
<https://www.transportmeasures.org/en/> [03.11.2016]
- Norm DIN EN 16258 (2013): *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- & Personenverkehr)*. Deutsche Fassung EN 16258:2013-03
- Nyhuis, P. (Hrsg.) (2008): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 71
- OEBB-Infrastruktur (2014): Bahnstrom 2015. Preisblatt für Langfristverträge. [Online]
http://www.oebb.at/infrastruktur/de/_p_3_0_fuer_Kunden_Partner/3_6_Bahnstromversorgung/___Dms_Dateien/_Bahnstrompreise_2014_Langfristvertrag.jsp [24.01.2017]
- Patt, H. und Gonsowski P. (2011): *Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen*. 7. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 365
- Pfohl, H. (2010): *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 160–161
- Planco Consulting und bfg – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2007): *Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger*

-
- Straße, Schiene und Wasserstraße*. Schlussbericht. Projekt 675 Magdeburg, S. 217–299
- Plewa, P. (2013): *Bedeutung der Schieneninfrastruktur von Deutschland nach Polen/Tschechien*. Vortrag KEO-EU-Expertendialog 25. Juni 2013, Brüssel
- Posset, M.; Gierlinger, D.; Gronalt, M.; Peherstorfer, H.; Pripfl, H. und Starkl, F. (2014): *Intermodaler Verkehr Europa*. 1. Auflage, Wien: Eigenverlag der FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH – Logistikkum Steyr, S. 152
- Proff, H. (Hrsg.) (2015): *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 430
- Prognos (1994): Prognos European Transport Report. In: IRE und Rapp Trans AG: *Bewertung von Qualitätsmerkmalen im Güterverkehr*. Schlussbericht. ASTRA 2002/011, 2005, S. 17
- PTV Planung Transport Verkehr (2016): LKW-Funktionen. [Online]
<https://www.mapandguide.com/de/lkw-funktionen/> [03.11.2016]
- PTV Planung Transport Verkehr (2017): Routenplaner für LKW – die professionelle Routenplaner Software. [Online]
<https://www.mapandguide.com/de/lkw-funktionen/routenplaner-lkw/> [01.03.2017]
- Quaresma Dias, J.; Calado, J. und Mendonça, M. (2010): *The role of European «ro-ro» port terminals in the automotive supply chain management*. Journal of Transport Geography 18, S. 120
- RailNetEurope (2017): Charging Information System (CIS). [Online]
<http://cis.rne.eu/> [24.01.2017]
- Rechnungshof (2015): Triebfahrzeugdisposition und Triebfahrzeugbeschaffungen der ÖBB-Unternehmensgruppe in Österreich. In: *Bericht des Rechnungshofes*. Reihe Bund 2015/17, Wien, S. 425–539
- Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung (2017): Preisbildung. [Online]
<http://www.risp-duisburg.de/files/preisbild.pdf> [10.02.2017]
- Rost, J. (2003): Zeitgeist und Moden empirischer Analysemethoden. In: *Forum Qualitative Sozialforschung*. Volume 4, No. 2, Art. 5, 2003, S. 9
- Röhrich, M. (2014): *Grundlagen der Investitionsrechnung. Darstellung anhand einer Fallstudie*. 2. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 14

-
- Sandberg Hanssen, T.; Mathisen, T. und Jørgensen, F. (2012): *Generalized transport costs in intermodal freight transport*. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 54, S. 189–190
- Schmied, M. und Knörr, W. (2013): *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Begriffe, Methode, Beispiele*. 2. Auflage, Bonn: Deutscher Speditions- und Logistikverband, S. 7–38
- Schmiedt, L. (2014): *Wechselwirkungen zwischen Kraftstoffkomponenten in biodieselbasierten Mischkraftstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Alterungsprodukte von Fettsäuremethylestern*. Göttingen: Cuvillier Verlag, S. 34
- Schreiner, K. (2015): *Basis Verbrennungsmotor. Fragen – Rechnen – Verstehen – Bestehen*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 43
- Schroven, A. (2015): Demographischer Wandel. Herausforderung für die Logistik. In: Voß, P. (Hrsg.): *Logistik – eine Industrie, die (sich) bewegt. Strategien und Lösungen entlang der Supply Chain 4.0*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 24
- Schuh, G. und Stich, V. (Hrsg.) (2013): *Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management* 6. 2. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer Vieweg, S. 16–139
- Schwarz, F. (2009): Modellierung und Analyse trimodaler Seehafenhinterlandverkehre unter Einsatz eines intermodalen geographischen Informationssystems. In: Buchholz, P. und Clausen, U. (Hrsg.): *Große Netze der Logistik. Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 385–390
- Schwede, C. (2014): *Integration von Auftragsreihenfolge- und Distributionstransportplanung in der Automobilindustrie*. Dissertation, Lehrstuhl für Unternehmenslogistik der Fakultät Maschinenbau an der technischen Universität Dortmund, S. 26–35
- Siemens Mobility (2015): Vectron. Universallokomotive für den europäischen Markt. [Online]
http://www.siemens.com/about/sustainability/pool/de/umweltportfolio/produkte-loesungen/mobility/hochleistungslokomotiven_vectron_de.pdf [24.11.2015]
- Speranza, M. (2016): *Trends in transportation and logistics*. *European Journal of Operational Research*, Volume 251-260
- Spitzer, E. (2008): Binnenschifffahrt. In: Klaus, P. und Krieger, W. (Hrsg.): *Gabler Lexikon Logistik*. 4. Auflage, Wiesbaden: GWV Gachverlage, S. 78–83

-
- Statista (2016): Durchschnittlicher Preis für Diesel-Kraftstoff in Deutschland zum 13. Dezember 2016 (in Euro-Cent pro Liter). [Online]
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/224105/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-diesel-kraftstoff/> [31.12.2016]
- Statista (2017a): Anzahl der weltweit produzierten Personenkraftwagen (Pkw) in den Jahren 1998 bis 2016 (in 1.000). [Online]
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159780/umfrage/weltweit-jaehrlich-hergestellte-pkw/> [01.08.2017]
- Statista (2017b): Statistiken zur Automobilproduktion. [Online]
<https://de.statista.com/themen/1140/automobilproduktion/> [02.08.2017]
- Statista (2017c): Anzahl der Neuzulassungen von Pkw in Deutschland von 1955 bis 2019 (in Millionen). [Online]
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74433/umfrage/neuzulassungen-von-pkw-in-deutschland/> [03.08.2017]
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2016): EU-Vergleich der Lohnnebenkosten. [Online]
<https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/BevoelkerungSoziales/Arbeitsmarkt/Hoehelohnnebenkosten.html> [31.12.2016]
- Steadie Seifi, M.; Dellaert N.; Nuijten W.; Van Woensel, T. und Raoufi, R. (2004): *Multimodal freight transportation planning: A literature review*. European Journal of Operational Research 233, S. 1
- Stein, S.; Pascher, H.; Brunthaler, G. und Steinwender, A.: *Description and reorganization of relevant logistics chains for NEWS*. Forschungsbericht 4.2, Wien, S. 46–48
- Steinle, C. (2005): *Ganzheitliches Management: Eine mehrdimensionale Sichtweise integrierter Unternehmensführung*. 1. Auflage, Wiesbaden: GWV Fachverlage, S. 292
- Steven, M. (2007): *Handbuch Produktion. Theorie – Management – Logistik – Controlling*. Stuttgart: W. Kohlhammer, S. 287
- Stock, W. und Bernecker, T. (2014): *Verkehrsökonomie. Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft*. 2.Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler, S. 9
- Straube, F. und Pfohl, H. (2008): *Trends und Strategien in der Logistik. Globale Netzwerke im Wandel*. Hamburg: DVV Media Group, S. 17–47

-
- The Greenbrier Companies (2015): Europe - Car Carrier Wagons. [Online]
http://www.gbrx.com/Car_Carrier_Wagons.php?expandable=1 [25.11.2015]
- Todsén, U. (2012): *Verbrennungsmotoren*. München: Carl Hanser Verlag, S. 146
- Trans-Rak International (2015): Products. [Online]
<http://www.trans-rak.com/#!about/c4nz> [30.10.2015]
- Töpfer A. (2012): *Erfolgreich forschen. Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden*. 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, S. 64
- Ulrich, H. (1994): Von der Betriebswirtschaftslehre zur systemorientierten Managementlehre. In: Wunderer, R. (Hrsg.): *Betriebswirtschaftslehre als Management- und Führungslehre*. 3. Auflage, Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, S. 161–164
- Umweltbundesamt (2012): *Daten zum Verkehr*. Ausgabe 2012, Dessau, S.14
- UNIT45 (2015): INNOVATION IN CAR LOGISTICS. VUCAFRAME. [Online]
<http://www.unit45.com/33/records/33/VUCAFRAME%20brochure.pdf>
[30.10.2015]
- United Nations Economic Commission for Europe (2012a): *Inventory of main standards and parameters of the E waterway network*. "BLUE BOOK": Second Revised Edition. New York, S. 15–52
- United Nations Economic Commission for Europe (2012b): Map of European Inland Waterway Network. [Online]
https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/sc3/European_inland_waterways_-_2012.pdf [25.11.2015]
- Vahrenkamp, R. und Mattfeld, D. (2007): *Logistiknetzwerke. Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 5–9
- Vannieuwenhuyse, B.; Gelders, L. und Pintelon, L. (2003): *An online decision support system for transportation mode choice*. Logistics Information Management, Vol. 16 Issue: 2, S. 125
- Verband der Automobilindustrie (2007): *Auto Jahresbericht 2007*. Frankfurt, S.224
- Verband der chemischen Industrie (2010): *VCI-Leitfaden zur Ermittlung der CO₂-Emissionen in der Logistik der chemischen Industrie*. Frankfurt, S. 3–7
- Versuchsanstalt für Binnenschiffbau (2004): *Technische und wirtschaftliche Konzepte für flußangepasste Binnenschiffe*. Bericht 1701, Duisburg, S. 88–97

-
- Via Donau (2016a): Historische Streckensperren 2015. [Online]
<http://www.doris.bmvit.gv.at/fahrwasserinformation/streckenverfuegbarkeit/hist-streckensperren/> [23.12.2016]
- Via Donau (2016b): Kein Eisstoß mehr in Sicht. [Online]
http://www.viadonau.org/de/newsroom/news/detail/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=503&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=1795acdf4272db0a1941522e50395b55 [25.12.2016]
- Voerckel, B. (2011): Fahren ist eine Art zu leben. In: Fordreport, Ausgabe Oktober 2011, S. 7–9
- Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A. und Olschewski, I. (2009): *Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen*. 1. Auflage, Wiesbaden: GWV Fachverlage, S. 1
- Wang, X. und Cheng T. (2009): *Logistics scheduling to minimize inventory and transport costs*. Int. J. Production Economics 121, S. 266
- Wannenwetsch, H. (2007): *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. 3. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 339
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2010a): Wasserstraßenklasse. [Online]
http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg_rhein/technische_daten/Wasserstrassenklasse.html [08.11.2016]
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2010b): *Gut zu wissen, was dahinter steckt. Wasserstraßen, Sicherheit, Vitalität*. Bonn, S. 9
- Weber, J. (2012): *Logistikkostenrechnung. Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik*. 3. Auflage, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 39–40
- Wehberg, G. (1997): *Ökologieorientiertes Logistikmanagement. Ein evolutionstheoretischer Ansatz*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, S. 96
- Wellbrock, W. und Kroner, M. (2013): Logistik in Ostasien. In: Göpfert, I. und Braun, D. (Hrsg.): *Internationale Logistik in und zwischen unterschiedlichen Weltregionen*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler, S. 208

-
- Wirtschaftskammer Österreich (2015): Inflationsrate 2006 – 2016. [Online]
http://wko.at/statistik/wgraf/2014_48_Inflationsrate_2006-2016.pdf
[23.01.2017]
- Wirtschaftskammer Österreich (2016): LKW-Kalkulation. [Online]
<http://dietransporteure.at/lkw-kalkulation/berechnung.php> [11.11.2016]
- Wirtschaftskammer Österreich (2017): *Kollektivvertrag für das Güterbeförderungsgewerbe. Kollektivvertrag für Arbeiter*. S. 21–29
- Wirtschaftsuniversität Wien (2016): Kompetenzzentrum für Nachhaltigkeit. [Online]
<https://www.wu.ac.at/sustainabilitycenter/overview/research/sustainable-transport-and-logistics/> [03.11.2016]
- Wittenbrink, P. (2014): *Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Wittenbrink, P. (2015): *Green Logistics. Konzept, aktuelle Entwicklungen und Handlungsfelder zur Emissionsreduktion im Transportbereich*. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Wittenbrink, P. und Gburek, G. (2012): „*Risikomanagement in Transport und Logistik 2015*“. *Ergebnisse der Umfrage*. Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. (BME) & Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, Lörrach, S. 8
- Wittenbrink, P. und Breisinger, M. (2014): *Umweltbarometer 2014*. Logistikcluster Region Basel, 2014, S. 10–12

Eigene unveröffentlichte Quellen

Anzböck, Richard: persönliche Korrespondenz, Ziviltechnikerkanzlei Anzböck, Wien, 24.11.2015

Deisenhammer, Dorian: persönliche Korrespondenz, Lagermax Autotransport GmbH, Wien, 15.10.2014

Donaldson, Paul: E-Mail-Korrespondenz, Trans-Rak International, 20.02.2015

Donaldson, Paul: E-Mail-Korrespondenz, Trans-Rak International, 23.02.2015

Feldmann, Susanne: E-Mail-Korrespondenz, BLG CarShipping GmbH & Co. KG, 09.01.2014

Hödlmayr Johannes: persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 13.01.2015

Kausal, Martin: persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 24.3.2017

Kragl, Wolfgang: persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 15.04.2015

Kragl, Wolfgang: persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 13.10.2015

Kragl, Wolfgang: persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 18.01.2016

Kragl, Wolfgang: persönliche Korrespondenz, Hödlmayr International AG, Schwertberg, 07.3.2017

Schütz, Helmut: persönliche Korrespondenz, Wiener Hafen GmbH & Co KG, 09.01.2014

Smith, Koen: Persönliche-Korrespondenz, UNIT45, Intermodal Europe Hamburg, 07.10.2013

Smith, Koen: E-Mail-Korrespondenz, UNIT45, 24.12.2013

Smith, Koen: E-Mail-Korrespondenz, UNIT45, 16.01.2014

Datenbanken

HBEFA Version 3.2, INFRAS [Online]

<http://www.hbefa.net/d/login/index.html> [30.04.2015]

Anhang

A.1 Kenndaten für Dieserverbrauch von Binnenschiffen

	Einheit	Talfahrt		Bergfahrt	
		leer	voll beladen	leer	voll beladen
Freifließender Fluss					
Motorauslastung	%	25,0%	30,0%	30,0%	70,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h	10,0	10,0	9,0	9,0
Schwellenwert	t	500	500	1000	1000
Faktor a		-0,000000188	-0,000000225	-0,000000250	-0,000000583
Faktor b		0,002880340	0,003456408	0,003840454	0,008961058
Staugeregelter Fluss					
Motorauslastung	%	20,0%	55,0%	42,5%	85,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h	11,0	11,0	10,0	10,0
Schwellenwert	t	500	500	1000	1000
Faktor a		-0,000000136	-0,000000375	-0,000000319	-0,000000638
Faktor b		0,002094793	0,005760680	0,004896578	0,009793157
Kanal					
Motorauslastung	%			25,0%	32,5%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h			10,0	10,0
Schwellenwert	t			500	1500
Faktor a				-0,000000188	-0,000000244
Faktor b				0,002880340	0,003744442
<i>Quellen:</i> BMVBS-Kompodium; eigene Berechnungen.					

Tabelle 33: Kenndaten für Dieserverbrauch von Binnenschiffen (ifeu und INFRAS 2013, S. 75)

A.2 Beispiel Fragebogen RoRo-LKW

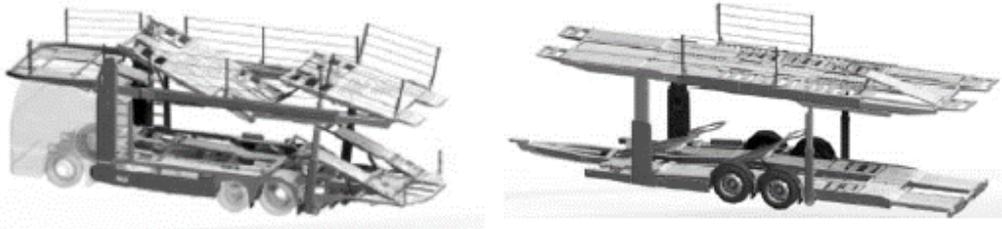
FRAGEBOGEN		
RoRo-Autotransporter Straße		
Datum:		
Gesprächspartner:		
RoRo-Transporter z.B. Kässbohrer Metago Pro M1		
		
Anschaffung		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Wird die Zugmaschine dem Hersteller von Autotransportern (z.B. Kässbohrer) zur Verfügung gestellt? 2. Unterscheidet sich die Zugmaschine im Aufbau von einer klassischen Sattelzugmaschine? 3. Wie hoch sind die Anschaffungskosten für die Sattelzugmaschine? 4. Wie hoch sind die Kosten für den Motorwagen-Aufbau? 5. Wie hoch sind die Kosten für den Anhänger? 6. Fallen sonstige Kosten bei der Anschaffung an (z.B. Telematik etc.)? 7. Wie hoch ist der Restwert am Ende der Nutzungsdauer? 		

Abbildung 44: Beispiel-Fragebogen RoRo-LKW Teil 1

Betrieb und Lebensdauer

8. Wie viel km fährt ein RoRo-Transporter im Fernverkehr jährlich?
9. Wie viel Einsatztage hat ein RoRo-Transporter pro Jahr?
10. Wie lang dauert ein durchschnittlicher Einsatztag?
11. Wie lang ist die Lebensdauer von Zugmaschine, Motorwagen-Aufbau und Anhänger?
12. Wie groß ist die Reifenlaufleistung eines RoRo-Autotransporters?
13. Wie hoch ist der durchschnittliche Spritverbrauch bei Leerfahrten?
14. Wie hoch ist der durchschnittliche Spritverbrauch mit Beladung?
15. Wie hoch sind die Kosten für Schmierstoffe?
16. Wie hoch sind die durchschnittliche Reparatur- und Instandhaltungskosten pro Autotransporter?
17. Wie hoch sind die durchschnittlichen LKW-Reinigungskosten?

Versicherungen & Steuern

18. Wie hoch ist die Kfz-Steuer auf RoRo-Autotransporter?
19. Wie hoch ist die Kfz-Versicherung auf RoRo-Autotransporter?
20. Wie hoch ist die Kasko-Versicherung auf RoRo-Autotransporter?
21. Wie viel kostet die jährliche LKW-Überprüfung?
22. Wie viel kostet die Versicherung für die Beladung?

Abbildung 45: Beispiel-Fragebogen RoRo-LKW Teil 2

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Managementwissenschaften (IMW) die im Folgenden aufgeführten Bachelor- und Masterarbeiten, in denen unterschiedliche Fragestellungen im Bereich der Transportlogistik untersucht worden sind. Die aufgeführten Arbeiten sind unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors der Dissertation entstanden. Die Arbeiten haben zur Definition der Forschungslücke beigetragen und sind in Teilen in das entwickelte Berechnungstool eingeflossen. Der Autor dankt allen Diplomanden für Ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Auberger, J.	Entwicklung eines Routenplanungstools für die europäischen Wasserstraßen, Diplomarbeit, 2016
Hoffmann, J.	Automobildistribution mittels Binnenschiff – eine Analyse der derzeitigen Situation in Europa, Diplomarbeit, 2014
Neuhauser, M.	Distribution von Fertigfahrzeugen über die Wasserstraße, Bachelorarbeit, 2015
Ramprecht, P.	Entwicklung eines Kostenmodells für den Containertransport auf der Schiene, Diplomarbeit, 2016
Raschke, M.	Innovative Konzepte im Rahmen der Automotive-Distributionslogistik mit besonderen Fokus auf die Nutzung der Binnenwasserstraße, Diplomarbeit, 2015

Tabelle 34: Bachelor- und Masterarbeiten am IMW im Bereich Transportlogistik

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name, Vorname, akad. Grad: Pascher, Heimo, Dipl.-Ing.
Staatsangehörigkeit: Österreich
Geburtsdatum und –ort: 22. April 1988, Graz

Berufserfahrung

01/2016 – dato: Projektleiter, Fraunhofer Austria Research GmbH,
Geschäftsbereich Produktions- und
Logistikmanagement, Wien

07/2013 – 12/2015: Projektassistent, Technische Universität Wien, Institut
für Managementwissenschaften, Betriebstechnik und
Systemplanung, Wien

03/2013 – 12/2015: Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer Austria
Research GmbH, Geschäftsbereich Produktions- und
Logistikmanagement, Wien

09/2012 – 02/2013: Key Account Manager, Hoerbiger Ventilwerke GmbH &
Co KG, Wien

Akademische Laufbahn

03/2013 – 11/2017: Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften,
Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau,
Technische Universität Wien

08/2011 – 06/2012: Master of Science, Wirtschaftsingenieurwesen –
Maschinenbau, Technische Universität Wien

08/2006 – 07/2011: Bachelor of Science, Wirtschaftsingenieurwesen –
Maschinenbau, Technische Universität Wien