

DIPLOMARBEIT

Ein Vergleich des Land- und Flusstransports von Gütern großer Abmessungen hinsichtlich Energieeinsatz, Emissionen und Dauer

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René HOFMANN

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas WERNER

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

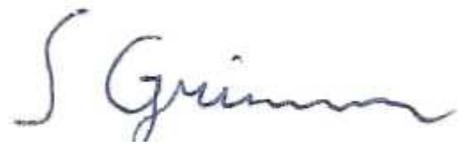
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Sascha Grimm

Matr.Nr. 01425895

Wien, am 15. September 2020



.....
(Sascha Grimm)

Vorwort/Danksagung

An diesem Thema zu forschen brachte mir viele neue Erfahrungen im Bereich der Logistik, sowie auch sehr interessante Einblicke in die Praxis des Transportwesens und die technische Umsetzung komplexer Vorgangsweisen.

Mein größter Dank geht an die beiden Hauptverantwortlichen für die Zusammenarbeit sowohl von der Firma Bolk Transport GmbH Gerhard Wagner und Andreas Bräu die mir immer alle benötigten Informationen zur Verfügung gestellt haben und mir interessante Einblicke in die Praxis gewährten, als auch an die beiden Universitätsprofessoren Andreas Werner und René Hofmann für ihre stetige Unterstützung und das Feedback zu meinen Tätigkeiten.

Kurzfassung

Transporte von Gütern großer Abmessungen werden derzeit zumeist per LKW durchgeführt. Eine interessante alternative dafür bildet die Binnenschifffahrt. Beide Varianten werden im Zuge dieser Diplomarbeit im Detail betrachtet und für individuelle Transporte in Bezug auf Energieaufwand, Emissionen und Dauer miteinander verglichen. Dabei werden Güter wie große Landmaschinen, Kräne und Windräder betrachtet.

Zunächst werden Details der zu analysierenden Transportmittel wie Masse, Kapazität und durchschnittliche Verbrauchswerte vorgestellt, sowie weitere Daten von Gütern, Häfen, Gesetzen und Normen die für die Berechnung der Transporte notwendig sind präsentiert und ihre Herkunft angeführt.

Im weiteren Vorgang wird auf die Berechnung, sowie alle zugehörigen Formeln näher eingegangen. Dabei wird auf das Verhalten des Treibstoffverbrauchs bedingt durch die Beladung und Streckenwahl eingegangen. Auch das Thema der Verbrauchsunterschiede von Binnenschiffen Fluss ab und Fluss aufwärts wird berücksichtigt. Die Ermittlung der klimarelevanten Emissionen, dem CO₂-Äquivalent (CO₂e), erfolgt nach der Norm DIN EN 16258 anhand der Verbrauchsergebnisse der Transportmittel. Die weiteren Emissionen wie NO_x, CO, HC und Feinstaub werden anhand der aktuellen gesetzmäßigen Grenzwerte berechnet. Abschließend wird die Dauer der Transporte durch Durchschnittsgeschwindigkeiten, Schleusenzeiten und Lenkzeiten analysiert.

Ergebnisse für drei repräsentative Transportvorgänge werden dargestellt, verglichen und interpretiert. Diese zeigen auf, dass keines der beiden Transportmittel Binnenschiff oder LKW in jedem Fall das effizientere ist, sondern es immer auf den jeweiligen Fall ankommt und Parameter wie Streckenlänge, Packungsdichte des Gutes, Anzahl der erforderlichen Transportmittel, das Ergebnis eklatant verschieben können.

Zum einen zeigt diese Arbeit einen direkten Vergleich der bereits erwähnten Transportmittel und zum anderen wurde ein umfangreiches allerdings sehr benutzerfreundliches Berechnungstool basierend auf „Microsoft Excel“ entwickelt. Dieses ermöglicht dem Benutzer jeden beliebigen Transport in Europa in Wasserstraßennähe von Rhein, Main, Main-Donau-Kanal oder der Donau einzugeben und einen Vergleich zwischen Wasser- und Straßentransport zu ermitteln und graphisch darzustellen. Diese Diplomarbeit beschränkt sich auf die zuvor erwähnten Wasserstraßen, da diese die Verbindung zwischen der Nordsee und dem schwarzen Meer darstellen und dies eine wichtige Route für Gütertransport in der Binnenschifffahrt ist. Ein eigenes Kapitel dieser Arbeit widmet sich der Beschreibung wie die Eingabeseite des Tools zu bedienen ist und wie die Ergebnisse dargestellt sind.

Abstract

Transportation of goods of large dimensions is currently carried out mostly by trucks. An interesting alternative for the transportation on street is inland shipping. In the course of this master thesis, both variants will be considered in detail and compared for individual transports in terms of energy consumption, emissions and duration. Goods such as large agricultural machinery, cranes and wind turbines are considered.

First of all, details of the means of transport to be analysed, such as weights, capacity and average consumption values, as well as further data of goods, ports, laws and standards necessary for the calculation of the transports are presented and their origin is indicated.

In the following process, the calculation and all related formulas are explained in more detail. The behaviour of the fuel consumption caused by the loading and the choice of route will be discussed. Also the topic of differences in consumption of inland vessels upstream and downstream is considered. The climate-relevant emissions of the CO₂-equivalent (CO₂e) are determined according to the DIN EN 16258 standard on the basis of the consumption results of the means of transport. The other emissions such as NO_x, CO, HC and particulate matter are calculated on the basis of the current legal limits. Finally, the duration of the transports is analysed by average speeds, lock times and driving times.

Results for three representative transport comparisons are presented and interpreted. These show that neither inland waterway vessel nor truck is always the more efficient means of transport, but that it always depends on the respective case and that parameters as length of the route, packing density of the cargo and number of means of transport can significantly shift the result.

On the one hand this thesis shows a direct comparison of the already mentioned means of transport and on the other hand a complex and user-friendly calculation tool within a

„Microsoft Excel “ File was developed. This tool enables the user to enter any transport in Europe near the waterways Rhine, Main, Main-Danube-Canal or the Danube. These rivers connect the northern sea with the black sea. It determinites and graphically displays a comparison between water and road transport. A separate chapter of this thesis is dedicated to the description how to use the input page of the tool and how the results are presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Aufgabenstellung und Forschungsfragen	2
1.2.1	Betrachtete Strecken	2
2	Herkunft der Daten	4
2.1	Überblick	4
2.2	Daten aus der Statistik	5
2.2.1	Straßentransport	5
2.2.2	Binnenschifftransport	8
2.3	Daten aus Erfahrungswerten	14
2.3.1	Straßentransport	14
2.3.2	Binnenschifftransport	16
2.4	Hafendaten	20
2.5	Güterdaten	22
2.5.1	Landmaschinen	22
2.5.2	Kräne	24
2.5.3	Windradtürme	25
2.5.4	Windkraftkomponente	25
2.6	Daten aus Normen	26
2.6.1	DIN EN 16258	26
2.6.2	Fahrzeitgesetz	28
2.6.3	Emissionsgrenzwerte von Binnenschiffsmotoren der Stufe V	28
2.6.4	Emissionsgrenzwerte von LKW-Motoren der EURO VI-Klasse	29
3	Methodik der Berechnung	30
3.1	Überblick	30
3.2	Systemgrenzen	30
3.3	Annahmen	32
3.3.1	Treibstoff	32
3.3.2	LKW-Geschwindigkeit	32
3.3.3	Strecken mit dem CE Delft LKW	32
3.3.4	Abhängigkeit von Verbrauch und Beladung	33
3.3.5	Abstände zwischen Gütern	33
3.3.6	Ermittlung der Dauer des Schifftransportes	34
3.3.7	LKW-Beladung	34
3.3.8	Berechnung der Emissionen	34

3.4	Berechnung LKW	35
3.4.1	Ermittlung des Beladungsfaktors	35
3.4.2	spezifische Verbrauchsrechnung	35
3.4.3	Vereinheitlichen der Berechnung	37
3.4.4	Streckenberechnung des LKW-Transportes	37
3.4.5	Berechnung der Emissionen des LKW-Transportes	38
3.4.6	Kalkulation der Transportdauer mit dem LKW	38
3.5	Berechnung Binnenschiff	39
3.5.1	Ermittlung des Beladungsfaktors	39
3.5.2	Interpolation und Extrapolation der Datenpunkte	41
3.5.3	Berechnung des Verbrauchs des RoRo-Schiffs	47
3.5.4	Vereinheitlichung der Berechnung	47
3.5.5	Streckenberechnung der Binnenschiffahrt	49
3.5.6	Ermittlung der Emissionen des Schiffs-Transportes	50
3.5.7	Kalkulation der Dauer eines Binnenschifftransportes	50
3.6	Darstellung der Ergebnisse	52
3.7	Vergleich mit anderen Berechnungsansätzen	53
3.7.1	Berechnungsfaktor MJ/tkm	53
3.7.2	Berechnung durch Grenzallokation der Güter	55
4	Beschreibung des Berechnungstools	56
4.1	Allgemeines	56
4.2	Wahl der Güter	57
4.3	Wahl der Transportmittel	58
4.4	Wahl der Strecke	60
4.4.1	Leerfahrt Binnenschiff	61
4.5	Ergebnisseite	62
5	Ergebnisse	65
5.1	Allgemeines	65
5.1.1	Angaben für alle drei Transportvergleiche	66
5.2	1. Vergleich von Transporten	67
5.2.1	Güter und zugehörige Transportmittel	67
5.2.2	Eingabetabelle Berechnungstool	67
5.2.3	Ergebnisse Berechnungstool	69
5.3	2. Vergleich von Transporten	71
5.3.1	Güter und zugehörige Transportmittel	71
5.3.2	Eingabetabelle Berechnungstool	71
5.3.3	Ergebnisse Berechnungstool	72
5.4	3. Vergleich von Transporten	74
5.4.1	Güter und zugehörige Transportmittel	74
5.4.2	Eingabetabelle Berechnungstool	74
5.4.3	Ergebnisse Berechnungstool	75
5.5	Diskussion der Ergebnisse	77
5.5.1	Energieverbrauch	77
5.5.2	Emissionen	79

5.5.3	Dauer der Transporte	80
5.6	Stärken und Schwächen des Tools	80
5.6.1	Vergleich mit EcoTransIT	81
5.7	Validierung des Berechnungstools	82
5.8	Weiterentwicklungspotenzial	83
5.8.1	Erweiterung der implementierten Hafensliste	83
5.8.2	Schüttgut berechnen	83
5.8.3	Aufteilung der Güter auf Binnenschiffe	84
6	Schlussfolgerung und Ausblick	85
6.1	Ausblick	86
A	Anhang für Bolk Transport	92

Formelverzeichnis

Formel 2.1:	Berechnung der Emissionen eines unbeladenen LKW	7
Formel 2.2:	Ermittlung der Emissionen eines voll beladenen LKW	7
Formel 2.3:	Berechnung des Energieverbrauchs eines beladenen LKW	7
Formel 2.4:	Ermittlung des Beladungsfaktors eines Binnenschiffes	13
Formel 3.1:	Ermittlung der benötigten Grundfläche eines Gutes auf dem Schiff . . .	33
Formel 3.2:	Berechnung der Anzahl an benötigten LKW für einen Transport	35
Formel 3.3:	spez. Verbrauchsrechnung für LKW-Transporte mit den Werten der CE Delft-Statistik	36
Formel 3.4:	spez. Verbrauchsrechnung für LKW-Transporte mit Erfahrungswerten .	37
Formel 3.5:	Anzahl der erforderlichen Schiffe für einen Transport, anhand des zu- lässigen Gewichts	39
Formel 3.6:	Anzahl der erforderlichen Schiffe für einen Transport, anhand der mög- lichen Beladungsfläche	39
Formel 3.7:	Anzahl der erforderlichen Schiffe für einen Transport	39
Formel 3.8:	Ermittlung des Beladungsfaktors eines Schiffes für einen Transport . .	39
Formel 3.9:	spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den Rhenus-Daten, des großen Rheinschiffs bei der Bergfahrt	42
Formel 3.10:	spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den Rhenus-Daten, des Rhein- Herne-Kanalschiffs bei der Bergfahrt	42
Formel 3.11:	spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den Rhenus-Daten, des großen Rheinschiffs bei der Talfahrt	42
Formel 3.12:	spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den Rhenus-Daten, des Rhein- Herne-Kanalschiffs bei der Talfahrt	42
Formel 3.13:	spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den CE Delft-Daten, des Eu- ropaschiffs für die Wasserstraßenklasse CEMT V	45

Formel 3.14: spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den CE Delft-Daten, des Europaschiffs für die Wasserstraßenklasse CEMT VI	45
Formel 3.15: spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den CE Delft-Daten, des Rhein-Herne-Kanalschiffs für die Wasserstraßenklasse CEMT V	45
Formel 3.16: spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den CE Delft-Daten, des Rhein-Herne-Kanalschiffs für die Wasserstraßenklasse CEMT VI	45
Formel 3.17: spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den CE Delft-Daten, des großen Rheinschiffs für die Wasserstraßenklasse CEMT V	45
Formel 3.18: spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf den CE Delft-Daten, des großen Rheinschiffs für die Wasserstraßenklasse CEMT VI	45
Formel 3.19: spez. Verbrauchsrechnung, basierend auf Erfahrungswerten, vgl. [21], des RoRo-Pontons mit Schubschiff	46
Formel 3.20: Grundlage für die Ermittlung des durchschnittlichen spez. Verbrauchs eines Binnenschiffes	48
Formel 3.21: Verbrauchsfaktor eines Binnenschiffes für die fahrt „zu Berg“	48
Formel 3.22: Verbrauchsfaktor eines Binnenschiffes für die fahrt „zu Tal“	48
Formel 3.23: Berechnung der gesamten Schleusungsdauer eines Schiffstransportes . .	51
Formel 3.24: Verbrauchsberechnung eines Transportes	53
Formel 5.1: Verhältnis der zulässigen Masse zur Ladefläche eines Binnenschiffes . .	78
Formel 5.2: Packungsdichte eines Gutes	78

Symbolverzeichnis

A_{Gut} = Grundfläche eines Gutes in m^2

$A_{GutBrutto}$ = Grundfläche eines Gutes inkl. 0,2 m Abstand in m^2

A_{Schiff} = Beladbare Grundfläche eines Schiffes in m^2

Anz_{LKW_s} = Anzahl der erforderlichen LKW für einen Transport

Anz_S = Anzahl der erforderlichen Schiffe für einen Transport

Anz_{SFl} = Anzahl der erforderlichen Schiffe, berechnet anhand der Ladefläche

Anz_{SG} = Anzahl der erforderlichen Schiffe, berechnet anhand der Kapazität

B_f = Beladungsfaktor eines Schiffes zwischen 0 (leer) und 1 (voll beladen)

Bel = Beladung bzw. Masse der transportierten Nutzlast in kg

$Beladung_{aktuell}$ = Transportierte Nutzlast eines Schiffes in kg

$Beladung_{max}$ = Maximal mögliche Nutzlast eines Schiffes in kg

$Capacity$ = Maximal zulässige Nutzlast in kg

$CO_{2Diesel}$ = Auf den Heizwert bez. CO_2 -Emission von Diesel in gCO_2/MJ

$D_{Europaschiff}$ = Kapazität zu Beladungsfläche des Europaschiffs in t/m^2

$D_{gr.Rheinschiff}$ = Kapazität zu Beladungsfläche des großen Rheinschiffs t/m^2

D_{Gut} = Packungsdichte des betrachteten Gutes in t/m^2

$D_{RHC-Schiff}$ = Kapazität zu Beladungsfläche des Rhein-Herne-Kanalschiffs in t/m^2

$D_{RoRo-Ponton}$ = Kapazität zu Beladungsfläche des RoRo-Ponton t/m^2

$D_{RoRo-Schiff}$ = Kapazität zu Beladungsfläche des RoRo-Schiff t/m^2

D_{Schiff} = Verhältnis der zul. Masse zur Ladefläche des betrachteten Schiffes in t/m^2

D_{Schl} = Dauer einer Schleusung in h

$D_{Schl_{ges}}$ = Gesamte Dauer der Schleusungen eines Transportes in h

$difCO_2$ = Verbrauchsfaktor je Beladung, $13,25 \Delta(gCO_2/km) / \Delta kg$

$E_{Beladung}$ = Energieverbrauch abhängig von der Beladung in MJ/km

$EF_{average-load}$ = Emissionen des durchschnittlich beladenen LKW in gCO_2/km

$EF_{Beladung}$ = CO_2 -Emissionen abhängig von der Beladung in gCO_2/km

EF_{empty} = Emissionen des leeren LKW in gCO_2/km

EF_{full} = Emissionen des voll beladenen LKW in gCO_2/km

i = Zählvariable der Güter

j = Anzahl aller Güter des berechneten Transportes

k = Zählvariable der jeweils betrachtete Wasserstraße

L_{bef_k} = Befahrener Streckenabschnitt eines Transports des Flusses k in km

L_{bek_k} = Gesamtlänge der Wasserstraße k , die mit Güterschiffen befahrbar ist, in km

$Load_{average}$ = Durchschnittliche Beladung des LKW in kg

m = Anzahl aller betrachteten Wasserstraßen

M = (Motorway) Autobahnstreckenanteil der Gesamtstrecke in %

M_{Gut} = Masse des zu transportierenden Gutes je Stück in kg

M_{Komb} = Masse der ausgewählten Kombination (Zugmaschine und Auflieger) in kg

M_{leer} = Masse der unbeladenen Kombination in kg

M_{Schiff} = Zulässige Masse, Kapazität des jeweiligen Schiffes in kg

M_{zul} = Zulässige Gesamtlast eines LKW in kg

$M_{zul.N}$ = Masse der zulässigen Nutzlast des LKW in kg

R = (Rural) Landstraßenstreckenanteil der Gesamtstrecke in %

Schleusen_k = Anzahl der Schleusen im Streckenabschnitt L_{bek_k}

Stk = Anzahl der zu transportierenden Güter

U = (Ural) stättischer Streckenanteil der Gesamtstrecke in %

V_B = Spezifischer Verbrauchswert „zu Berg“ des jeweiligen Schiffes in L/100 km

V_D = Durchschnittlicher spezifischer Verbrauchswert des jeweiligen Schiffes in L/100 km

V_{EU_V} = Spez. Verbrauch des Europaschiffs auf CEMT V in MJ/km

$V_{EU_{VI}}$ = Spez. Verbrauch des Europaschiffs auf CEMT VI in MJ/km

V_{fB} = Verbrauchsfaktor für die Fahrt „zu Berg“

V_{fT} = Verbrauchsfaktor für die Fahrt „zu Tal“

$V_{fLKW_{leer}}$ = Verbrauchsfaktor der leeren Kombination in L/(100 km t)

$V_{fLKW_{Nutz}}$ = Verbrauchsfaktor der Nutzlast in L/(100 km t)

V_{fTM} = Verbrauchsfaktor des Transportmittels in MJ/tkm

$V_{Gr.Rh_B}$ = Spezifischer Verbrauch des großen Rheinschiffs „zu Berg“ in L/100 km

$V_{Gr.Rh_T}$ = Spezifischer Verbrauch des großen Rheinschiffs „zu Tal“ in L/100 km

$V_{Gr.Rh_V}$ = Spez. geleistete Arbeit des großen Rheinschiffs auf CEMT V in kWh/km

$V_{Gr.Rh_{VI}}$ = Spez. geleistete Arbeit des großen Rheinschiffs auf CEMT VI in kWh/km

$V_{LKW_{CEDelft}}$ = Spez. Verbrauch mit Beladung eines LKW aus Tabelle 2.1 in L/100 km

$V_{LKW_{leer}}$ = Spez. Verbrauch eines unbeladenen LKW in L/100 km

$V_{LKW_{voll}}$ = Spez. Verbrauch eines LKW mit voller Beladung in L/100 km

V_{RHC_B} = Spezifischer Verbrauch des Rhein-Herne-Kanalschiffs „zu Berg“ in L/100 km

V_{RHC_T} = Spezifischer Verbrauch des Rhein-Herne-Kanalschiffs „zu Tal“ in L/100 km

V_{RHC_V} = Spez. geleistete Arbeit des Rhein-Herne-Kanalschiffs auf CEMT V in kWh/km

$V_{RHC_{VI}}$ = Spez. geleistete Arbeit des Rhein-Herne-Kanalschiffs auf CEMT VI in
kWh/km

V_T = Spezifischer Verbrauchswert „zu Tal“ des jeweiligen Schiffes in L/100 km

V_{TM} = Energieaufwand des Transportmittels bei einem Transport in MJ

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Amsterdam-Rotterdam-Antwerpen
avg	average
Bf	Beladungsfaktor
CBS	Zentrales Amt für Statistik, in Niederlande
cons	consumption
exkl	exklusive
EU	Europäische Union
gr	großes
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquid natural gas
max	maximal
med	medium
RHC	Rhein-Herne-Kanalschiff
RoRo	Roll-on-Roll-off
SCR	Selective Catalytic Reduction
spez	spezifisch

THG Treibhausgas

TTW Tank-To-Wheel

vol voluminös

WHSC World Harmonized Stationary Cycle

WTT Well-To-Tank

WTW Well-To-Wheel

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Energiewirtschaft befindet sich in einer Phase des Umbaus. Der Anteil an dezentralen erneuerbaren Energieanlagen im Stromerzeugungssektor steigt stetig. Hierbei gewinnen unter anderem Windkraftanlagen immer mehr an Bedeutung. Für klimaschonende Energieerzeugung ist neben der Frage welche Primärenergie genutzt wird, auch der Energieaufwand für den Transport der Anlagen von Interesse.

Diese Arbeit beschäftigt sich im Detail mit dem Vergleich des energetischen Aufwandes und den Emissionen zwischen dem Transport unterschiedlicher großvolumiger Güter auf LKW und Binnenschiffen. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde ein Berechnungstool entwickelt, dass für individuelle Transporte jenen Vergleich direkt ermittelt und darstellt. Bei diesem ökologischen Transportmittelvergleich werden neben Windrädern, auch andere Güter, wie zum Beispiel Bagger und Kräne betrachtet, die aufgrund ihrer Größe für den Schienentransport nicht in Frage kommen. Dieses Berechnungsprogramm kann in Zukunft dafür eingesetzt werden, die ökologisch interessantere Variante eines Transportes je nach Gut, Strecke und Transportmittel zu finden.

Wird innerhalb dieser Diplomarbeit erwähnt, dass es sich um einen Transport handelt, so ist damit die Überführung verschiedenster Güter auf einem Transportmittel von einem

bestimmten Startpunkt bis zu einem bestimmten Zielpunkt die Rede. Sobald die Strecke oder das Transportmittel sich ändert, unabhängig davon ob sich die transportierten Güter ändern, handelt es sich um einen weiteren Transport.

1.2 Aufgabenstellung und Forschungsfragen

Im wesentlichen werden zwei große Ziele verfolgt:

- Analyse des Energieverbrauchs, der Emissionen und Dauer bestimmter Gütertransporte mittels LKW und Binnenschiff
- Entwicklung eines Berechnungstools, das für individuelle Strecken einen Vergleich der beiden Transportmittel ermöglicht

1.2.1 Betrachtete Strecken

In dieser Arbeit wird fokussiert auf Transporte zwischen der Nordsee und dem schwarzen Meer. Die Streckenwahl beschränkt sich daher auf die Umgebung um die zusammenhängenden Wasserstraßen, welche die zuvor erwähnten Meere verbinden. Folgende Flüsse und Kanäle sind im Berechnungsprogramm implementiert:

- Antwerpen-Rotterdam-Amsterdam-Kanäle (ARA-Kanäle) (CEMT V, vgl. [16])
- Rhein (CEMT VI, vgl. [16])
- Main (CEMT V, vgl. [16])
- Main-Donau-Kanal (CEMT V, vgl. [16])
- Donau (CEMT VI, vgl. [43])
- Konstanz Kanal (CEMT V, vgl. [43])

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [39], (S. 5) angeführt::

CEMT I-VI bestimmt die Klasse der betrachteten Wasserstraße, begründet durch die Conférence Européenne des Ministres de Transport, kurz CEMT. Jene Klassen legen die maximalen Abmessungen eines Schiffes fest, welches die jeweilige Wasserstraße befahren darf.

Die Formulierung der Streckenbegrenzung ist bewusst vage gewählt. Im Grunde genommen kann dieses Berechnungstool jede beliebige LKW-Strecke in Europa berücksichtigen. Um diese jedoch mit der entsprechenden Schifffahrtsstrecke sinnvoll vergleichen zu können, sollte die Distanz zwischen der Enddestination abseits des Flusses und dem naheliegendsten Frachthafen nicht zu groß werden. Gleiches gilt für den Ausgangspunkt abseits einer Wasserstraße und dem naheliegendsten Frachthafen. Jene Begrenzung der Distanz liegt im Ermessen des Benutzers des Tools.

Kapitel 2

Herkunft der Daten

2.1 Überblick

Daten werden sowohl aus einer Statistik von CE Delft bezogen, als auch aus Erfahrungswerten von Schiffs- sowie LKW-Betreibern.

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [30] angeführt:

CE Delft ist eine unabhängige Forschungs- und Consulting-Organisation spezialisiert auf die Entwicklung von innovativen Lösungen zu Umweltproblemen.

Die erste Frage die sich stellt ist, welche Daten werden überhaupt benötigt, um Energieverbräuche, Emissionen und Fahrtzeiten berechnen zu können. Dafür werden die Transportmittel zunächst getrennt betrachtet.

Das Programm „Microsoft Excel“ dient zum einen als Datenbank aller erforderlichen Parameter und zum Anderen als Berechnungsoberfläche für das entwickelte Tool.

Da das Tool für den Anwender möglichst benutzerfreundlich gestaltet werden sollte, wurde mittels der „Microsoft Excel“ internen Programmierplattform, den sogenannten Makros, ein Code entwickelt, der die Berechnung selbstständig koordiniert und die Ergebnisse automatisch und übersichtlich darstellt.

2.2 Daten aus der Statistik

Sowohl Verbrauchsdaten für den LKW-Transport, als auch für die Binnenschifffahrt werden von CE Delft zur Verfügung gestellt. Alle Daten aus Statistiken werden aus den zwei Berichten „STREAM Freight transport 2016 - Emissions of freight transport modes“, vgl. [39] und „STREAM International Freight 2011 - Comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database“, vgl. [28] für die Berechnung entnommen.

2.2.1 Straßentransport

Für diese Diplomarbeit liegen transportierte Güter großer Abmessungen im Fokus. Aus diesem Grund wird für den LKW-Transport aus dieser Statistik nur der Tractor-semitrailer, heavy betrachtet. Die Sinnhaftigkeit dieser Vorgangsweise wurde durch eine Expertenmeinung bestätigt, vgl. [22].

CE Delft 2016: Tractor-semitrailer, heavy				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
zul. Gesamtmasse	44.900	kg	[39], (S. 40)	
Leermasse mit Auflieger	15.700	kg	[39], (S. 40)	
Nutzlast	29.200	kg	[39], (S. 40)	
Beladungsfaktor (leicht)	37	%	[39], (S. 66)	Durchschnittswert
Prozent beladener Kilometer	80	%	[39], (S. 66)	Durchschnittswert
mittlere Last exkl. Leerfahrten	10.804	kg	[39], (S. 66)	
Verbrauch (urban) leer	19,5	MJ/km	[39], (S. 42)	5 Prozent
Verbrauch (urban) voll	30,4	MJ/km	[39], (S. 42)	5 Prozent
Verbrauch (rural) leer	12,1	MJ/km	[39], (S. 42)	8 Prozent
Verbrauch (rural) voll	18,9	MJ/km	[39], (S. 42)	8 Prozent
Verbrauch (motorway) leer	8,5	MJ/km	[39], (S. 42)	87 Prozent
Verbrauch (motorway) voll	13,2	MJ/km	[39], (S. 42)	87 Prozent
Verbrauch (average, light)	1,3	MJ/tkm	[39], (S. 22)	
Verbrauch (average, med.)	0,9	MJ/tkm	[39], (S. 23)	
Verbrauch (average, heavy)	0,8	MJ/tkm	[39], (S. 24)	

Tabelle 2.1: Schwere Sattelzugmaschine

Die Quelle des folgenden Absatzes, sowie der Gleichungen 2.1 bis 2.3 ist in [39] angeführt:
Beschreibung der Tabelle 2.1

Die Masse des betrachteten LKW-Typs werden aus Flottenwerten von LKW aus der Datenbank Statline vom „Zentralen Amt für Statistik“ in Niederlande (CBS) geschätzt. Darin wird angeführt, dass die Zugmaschine ca. 7.000 kg und der Sattelanhängen zwischen 7.000 und 9.000 kg wiegt.

Die Prozentangaben in der Spalte Zusatz gibt an, wie groß im Durchschnitt der Anteil der gefahrenen Strecke an Stadtgebiet, Landstraßen und Autobahn sind.

Die spezifischen Verbrauchswerte in Megajoule je Kilometer basieren auf CO₂-Emissionswerten von durchschnittlichen Fahrzeugen mit durchschnittlicher Beladung aus der Task Force on Transportation 2016, vgl. [8]. Zunächst wurden aus den Durchschnittswerten die CO₂-Emissionen für leere und 100 % beladene Fahrzeuge berechnet. Für diese lineare Extrapolation wird der Skallierungsfaktor aus CBS 2014, vgl. [5], verwendet, siehe Gleichung 2.1 und Gleichung 2.2 . Abschließend werden die in Tabelle 2.1 angeführten Energieverbräuche aus den errechneten CO₂-Werten je Kilometer ermittelt, wie Gleichung 2.3 zeigt.

$$EF_{empty} = EF_{average-load} - difCO_2 Load_{average} \quad (2.1)$$

$$EF_{full} = EF_{average-load} + difCO_2 (Capacity - Load_{average}) \quad (2.2)$$

$$E_{Beladung} = \frac{EF_{Beladung}}{CO_{2Diesel}} \quad (2.3)$$

EF_{empty}	= Emissionen des leeren LKW in gCO_2/km
EF_{full}	= Emissionen des voll beladenen LKW in gCO_2/km
$EF_{average-load}$	= Emissionen des durchschnittlich beladenen LKW in gCO_2/km
$Capacity$	= Maximal zulässige Nutzlast in kg
$Load_{average}$	= Durchschnittliche Beladung des LKW in kg
$diffCO_2$	= Verbrauchsfaktor je Beladung, $13,25 \Delta(gCO_2/km) / \Delta kg$, vgl. [39]
$E_{Beladung}$	= Energieverbrauch abhängig von der Beladung in MJ/km
$EF_{Beladung}$	= CO_2 -Emissionen abhängig von der Beladung in gCO_2/km
$CO_{2Diesel}$	= auf den Heizwert bez. CO_2 -Emission von Diesel in gCO_2/MJ , vgl. [39]

2.2.2 Binnenschifftransport

In der Binnenschifffahrt wird fast 50 Prozent der gesamt transportierten Fracht von nur zwei Schiffstypen transportiert, dem Rhein-Herne-Kanalschiff und dem großen Rheinschiff, vgl. [39], (S. 13). Folgende Schiffstypen werden in die Berechnung inkludiert:

- Rhein-Herne-Kanalschiff (Europaschiff) aus CE Delft 2011, vgl. [28]
- Rhein-Herne-Kanalschiff aus CE Delft 2016, vgl. [39]
- Großes Rheinschiff aus CE Delft 2016, vgl. [39]

Rhein-Herne-Kanalschiff EU-Durchschnitt (Europaschiff)				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
Kapazität	1.350.000	kg	[28], (S. 15)	
Außenlänge	85	m	[41]	
Außenbreite	9,5	m	[41]	
max. Tiefgang	2,5	m	[41]	
Ladelänge	58	m	[23]	
Ladebreite	8	m	[23]	
Beladungsfläche	464	m ²		berechnet
Beladungsfaktor	43	%	[28], (S. 40)	voluminöses Gut
Prozent beladener Fahrten	80	%	[28], (S. 40)	in km _{bel} /km _{ges}
Durchsch. Beladung	581	t	[28], (S. 40)	exkl. Leerfahrten
Verbrauch vol.	0,49	MJ/tkm	[28], (S. 47)	CEMT V
Verbrauch vol.	0,54	MJ/tkm	[28], (S. 47)	CEMT VI
Verbrauch avg.	0,44	MJ/tkm	[28], (S. 48)	CEMT V
Verbrauch avg.	0,47	MJ/tkm	[28], (S. 48)	CEMT VI
Verbrauch heavy	0,45	MJ/tkm	[28], (S. 50)	CEMT V
Verbrauch heavy	0,44	MJ/tkm	[28], (S. 50)	CEMT VI
Beladungsfaktor 1	0,43	-	[28], (S. 40)	
Beladungsfaktor 2	0,60	-	[28], (S. 41)	
Beladungsfaktor 3	0,90	-	[28], (S. 42)	
Dieserverbrauch BF1	228	MJ/km	[28], (S. 30)	CEMT V
Dieserverbrauch BF2	270	MJ/km	[28], (S. 30)	CEMT V
Dieserverbrauch BF3	327	MJ/km	[28], (S. 30)	CEMT V
Dieserverbrauch BF1	249	MJ/km	[28], (S. 30)	CEMT VI
Dieserverbrauch BF2	283	MJ/km	[28], (S. 30)	CEMT VI
Dieserverbrauch BF3	322	MJ/km	[28], (S. 30)	CEMT VI

Tabelle 2.2: Rhein-Herne-Kanalschiff (Europaschiff)

Rhein-Herne-Kanalschiff M6				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatzinfos
Kapazität	1.537.000	kg	[39], (S. 47)	
max. Tiefgang	2,9	m	[39], (S. 84)	0,75 m unbeladen
Beladungsfaktor	45	%	[39], (S. 66)	leichte Fracht
Beladene Fahrten	75	%	[39], (S. 66)	in km _{bel} /km _{ges}
Durchsch. Beladung	692	t	[39], (S. 66)	exkl. Leerfahrten
Ladelänge	58	m	[23]	
Ladebreite	8	m	[23]	
Beladungsfläche	464	m ²		berechnet
Beladungsfaktor 1	0,45	-	[39], (S. 66)	light
Beladungsfaktor 2	0,75	-	[39], (S. 66)	mid-weight
Beladungsfaktor 3	0,90	-	[39], (S. 66)	heavy
CEMT V				
Motor power cons. BF1	28,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT V
Motor power cons. BF2	37,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT V
Motor power cons. BF3	40,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT V
Verbrauch tkm light	0,510	MJ/tkm	[39], (S. 28)	CEMT V
Verbrauch tkm med.	0,420	MJ/tkm	[39], (S. 29)	CEMT V
Verbrauch tkm heavy	0,450	MJ/tkm	[39], (S. 30)	CEMT V
CEMT VI				
Motor power cons. BF1	29,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT VI
Motor power cons. BF2	36,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT VI
Motor power cons. BF3	38,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT VI
Verbrauch tkm lighth	0,520	MJ/tkm	[39], (S. 28)	CEMT VI
Verbrauch tkm med.	0,410	MJ/tkm	[39], (S. 29)	CEMT VI
Verbrauch tkm heavy	0,420	MJ/tkm	[39], (S. 30)	CEMT VI

Tabelle 2.3: Rhein-Herne-Kanalschiff M6

Großes Rheinschiff M8				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
Kapazität	3.013.000	kg	[39], (S. 47)	
Außenlänge	110	m	[39], (S. 84)	
Außenbreite	11,4	m	[39], (S. 84)	
max. Tiefgang	3,3	m	[39], (S. 84)	0,95 m unbeladen
Ladelänge	80	m	[23]	
Ladebreite	8,5	m	[23]	
Beladungsfläche	680	m ²		berechnet
Beladungsfaktor	40	%	[39], (S. 66)	leichte Fracht
beladene Fahrten	87	%	[39], (S. 66)	in km _{bel} /km _{ges}
Durchschn. Beladung	1.205	t	[39], (S. 66)	exkl. Leerfahrten
Beladungsfaktor 1	0,40	-	[39], (S. 66)	
Beladungsfaktor 2	0,65	-	[39], (S. 66)	
Beladungsfaktor 3	0,80	-	[39], (S. 66)	
CEMT V				
Motor power cons. BF1	27,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT V
Motor power cons. BF2	35,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT V
Motor power cons. BF3	42,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT V
Verbrauch tkm light	0,240	MJ/tkm	[39], (S. 28)	CEMT V
Verbrauch tkm med.	0,200	MJ/tkm	[39], (S. 29)	CEMT V
Verbrauch tkm heavy	0,230	MJ/tkm	[39], (S. 30)	CEMT V
CEMT VI				
Motor power cons. BF1	36,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT VI
Motor power cons. BF2	44,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT VI
Motor power cons. BF3	48,00	kWh/km	[39], (S. 50)	CEMT VI
Verbrauch tkm light	0,320	MJ/tkm	[39], (S. 28)	CEMT VI
Verbrauch tkm med.	0,240	MJ/tkm	[39], (S. 29)	CEMT VI
Verbrauch tkm heavy	0,260	MJ/tkm	[39], (S. 30)	CEMT VI

Tabelle 2.4: Großes Rheinschiff M8

Beschreibung der Tabellen 2.2, 2.3 und 2.4

In CE Delft 2011 wird unterschieden in voluminöses Gut $< 0,4$ kg/L, durchschnittliches Gut $0,5- 1,2$ kg/L und schweres Gut $> 1,3$ kg/L, vgl. [28], (S. 15).

CE Delft 16 benennt die verschiedenen Gutklassen wie folgt, leichter Transport $< 0,4$ kg/L, mittlere Masse-Transport $0,5- 1,2$ kg/L und schwerer Transport $> 1,3$ kg/L, vgl. [39], (S. 21).

Um Energieverbräuche in MJ/km aus Tabelle 2.2, Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 zu ermitteln wird von CE Delft das Model für die Schätzung des Energieverbrauchs von Binnenschiffen vom „Dutch Pollutant Release and Transfer Register“ verwendet. Weitere Informationen zu jenem Model, siehe AVV, 2003, vgl. [2].

Wobei darauf zu achten ist, dass die Modellparameter für die Ermittlung der Verbrauchswerte in Tabelle 2.2 ein wenig von denen der Tabellen 2.3 und 2.4 abweichen, vgl. [39], (S. 11). CE Delft schätzt den Energieverbrauch anhand von Wasserstraßenparametern (Tiefe, Breite, Durchfluss), Schiffparametern (Länge, Breite, voller und leerer Schiffszug) und Betriebsparametern (Fahrtgeschwindigkeit, Ladung). Der Beladungsfaktor beeinflusst die Eintauchtiefe und damit den Energieverbrauch. Abbildung 2.1 zeigt diese Abhängigkeit für verschiedene Schiffstypen, vgl. [39], (S. 48).

Gleichung ?? zeigt wie der Beladungsfaktor eines Schiffes ermittelt wird.

Des Weiteren werden die Modellergebnisse durch CE Delft mittels praktischer Daten von 100 Binnenschiffen, zusammengetragen von BLN Schuttevaer, verifiziert. Jene realen Daten werden über die Modellergebnisse in Abbildung 2.2 abgebildet, vgl. [39], (S. 49).

Die Verbrauchsdaten der Tabellen 2.2, 2.3 und 2.4 in MJ/tkm beschreiben den Verbrauch für eine transportierte Tonne bei einem Kilometer zurückgelegter Strecke, [39], (S. 5).

Diese Werte basieren auf den Daten der durchschnittlichen Verbrauchswerte je Kilometer und sie werden über den durchschnittlichen Beladungsfaktor des jeweiligen Schiffstyps dividiert, vgl. [39], (S. 38).

Es ist ein eklatanter Unterschied der spezifischen Verbräuche in Abbildung 2.1 zwischen dem Spits CEMT I Binneschiff und dem 4-barge push convoy CEMT Vib, zu erkennen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das kleinere Spits Schiff bei voller Beladung 365.000 kg transportiert, während der 4-barge push convoy 11.181.000 kg bei voller Auslastung beladen hat, vgl. [39], (S. 47).

$$B_f = \frac{Beladung_{\text{aktuell}}}{Beladung_{\text{max}}} \quad (2.4)$$

B_f = Beladungsfaktor eines Schiffes

$Beladung_{\text{aktuell}}$ = die transportierte Nutzlast eines Schiffes in kg

$Beladung_{\text{max}}$ = maximal mögliche Nutzlast eines Schiffes in kg

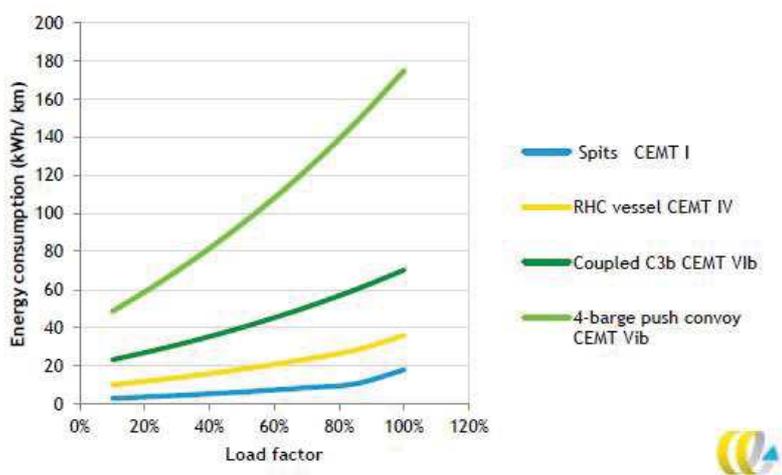


Abbildung 2.1: Beladungsfaktor über Energieverbrauch verschiedener Binnenschiffstypen, vgl. [39], (S. 48)

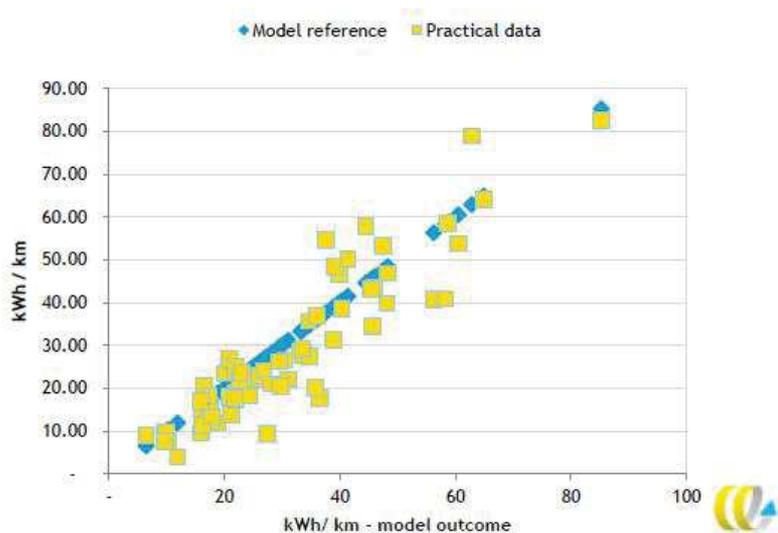


Abbildung 2.2: Reale Messwerte über Modellergebnisse, vgl. [39], (S. 49)

2.3 Daten aus Erfahrungswerten

LKW-Daten werden von der Firma „Bolk Transport GmbH“ zur Verfügung gestellt.

Für die Schifffahrt liegen Erfahrungswerte von der Firma „Rhenus Danube Shipping GmbH“ und dem belgischen Unternehmen „VICTROL N.V.“ vor.

Bolk Transport stellt über einen Kooperationspartner Erfahrungswerte für das RoRo-Schiff (Roll-on-Roll-off-Schiff) zur Verfügung.

2.3.1 Straßentransport

Bolk-Flottendurchschnittswerte 2019 133 LKW				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
Leistung 4 x 2	347	kW	[27]	Durchschnittswert
Leistung 6 x 2	359	kW	[27]	Durchschnittswert
Leistung 6 x 4	416	kW	[27]	Durchschnittswert
Leistung 8 x 4	461	kW	[27]	Durchschnittswert
Geschwindigkeit 4 x 2	69,46	km/h	[27]	Durchschnittswert
Geschwindigkeit 6 x 2	69,64	km/h	[27]	Durchschnittswert
Geschwindigkeit 6 x 4	65,55	km/h	[27]	Durchschnittswert
Geschwindigkeit 8 x 4	60,31	km/h	[27]	Durchschnittswert
maximal zul. Gesamtlast	40.000	kg	[22]	für teilbares Gut
4 x 2 Kombination	50.000	kg	[22]	zul. Gesamtmasse
6 x 2 Kombination	75.000	kg	[22]	zul. Gesamtmasse
6 x 4 Kombination	90.000	kg	[22]	zul. Gesamtmasse
8 x 4 Kombination	160.000	kg	[22]	zul. Gesamtmasse

Tabelle 2.5: Bolk-LKW-Typen sowie ihre Auflieger

Masse Bolk-LKW				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
4 x 2-Zugmaschinentyp	8.230	kg	[27]	durchschn. Leermasse
6 x 2-Zugmaschinentyp	8.986	kg	[27]	durchschn. Leermasse
6 x 4-Zugmaschinentyp	10.974	kg	[27]	durchschn. Leermasse
8 x 4-Zugmaschinentyp	13.010	kg	[27]	durchschn. Leermasse
3-Achs-open-mega	9.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
3-Achs-Eben	9.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
3-Achs-Semi	11.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
4-Achs-Semi	15.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
2-Achs-Euro	18.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
4-Achs-Teleskop	20.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
5-Achs-Semi	22.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
6-Achs-Semi	24.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
7-Achs-Semi	27.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
3-Achs-Super-Wing-Carrier	28.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
8-Achs-Semi	30.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
9-Achs-Semi	33.000	kg	[22]	Aufliegerleermasse
NEK-Modular, Dolly, Adapter	60.000	kg	[22]	inkl. Zugmaschine

Tabelle 2.6: Massen aller Bolk-LKW-Typen sowie ihrer Auflieger

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Beschreibung der Tabellen 2.5 und 2.6

Alle Leistungen, Geschwindigkeiten und Eigenmassen der Zugmaschinen werden aus den 133 LKW der Datenbank Mytransics von Bolk-Transport für die jeweiligen Klassen gemittelt. Die maximal zul. Gesamtlast in Tabelle 2.5 bedeutet, dass falls es sich um teilbare Güter handelt die Zugmaschine, der Auflieger und die Güter eine Gesamtmasse von 40.000 kg nicht überschreiten dürfen. Werden die Güter auf mehrere LKW aufgeteilt, sodass nur noch ein einzelnes unteilbares Gut auf einem LKW transportiert wird, so darf diese Masse überschritten werden.

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Die Bezeichnungen mit Zahl x Zahl wie zum Beispiel 4 x 2-Zugmaschinentyp bedeuten folgendes: (Anzahl der Räder) x (Anzahl der angetriebenen Räder). Die Auflieger sind ebenfalls beziffert, diese Zahl bezieht sich allerdings auf die Anzahl der Achsen des Aufliegers. Der „NEK Modular“ ist eine kombinierbare Version eines Anhängers der stückweise Erweiterung zulässt. In dieser Diplomarbeit wird aus Gründen der Vereinfachung allerdings bei Auswahl des „NEK Modular, Dolly, Adapter“ als Aufliegertyp ein gesamte Leermasse inklusive der Zugmaschine von 60.000 kg angenommen.

2.3.2 Binnenschiffstransport

Im Fachjargon der Binnenschifffahrt bedeutet „zu Tal“, die Fahrt mit der Strömung und „zu Berg“ bedeutet gegen die Strömungsrichtung des Fließgewässers zu fahren. In den folgenden Tabellen finden sich diese Bezeichnungen wieder.

Das Schubschiff aus Tabelle 2.8 mit einer Leistung von 574 kW, wird von zwei 287 kW Caterpillar C12 Motoren angetrieben.

Die in Tabelle 2.9 angeführten Geschwindigkeiten gelten für das Europaschiff, das Rhein-Herne-Kanalschiff und das große Rheinschiff.

Die in den Tabellen 2.10 bis 2.12 gezeigten Schiffe von „Rhenus Danube Shipping“, besitzen die gleiche Beladungskapazität und Beladungsfläche wie jene Schiffe aus den Tabellen 2.2 bis 2.4.

RoRo-Schiff				
Maximale Traglast	1.372.000	kg	[24]	
Ladefläche	1.600	m ²	[23]	80 m x 20 m
Beladung durchschnitt	550.000	kg	[23]	
Strecke	3.454	km	[38]	Passau->Russe->Passau
Dieserverbrauch	Vertraulich	L	[23]	siehe Anhang A
Geschwindigkeit „zu Tal“	300	km/ Tag	[23]	24 h Fahrt inkl. Schleusen
Geschwindigkeit „zu Berg“	200	km/Tag	[23]	Durchschnittswert
Beladung	40	%	[23]	Durchschnittswert
Tiefgang des Schiffes	1,5	m	[24]	bei Durchschnittsbeladung
Kritische Flusstiefe	2,15	m	[24]	Niedrigwasser
Maximalgeschw. „zu Tal“	20	km/h	[24]	
Maximalgeschw. „zu Berg“	13	km/h	[24]	

Tabelle 2.7: RoRo-Schiff (Roll-on-Roll-off)

Schubschiff mit RoRo-Ponton als Leichter				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatzinfos
Maximale Traglast	1.450.000	kg	[23]	
Ladefläche	800	m ²	[23]	80 m x 10 m
Durchschnittsbeladung	580.000	kg	[23]	40 % beladen
Strecke hin	1.416	km	[38]	unbeladen Antwerpen->Enns
Strecke retour	1.434	km	[38]	40 % beladen Enns->Terneuzen
Dieserverbrauch	Vertraulich	L	[21]	siehe Anhang A

Tabelle 2.8: Schubschiff mit RoRo-Ponton

Schiffsgeschwindigkeiten				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
Geschw. „zu Berg“ leer	9	km/h	[25]	unbeladen
Geschw. „zu Berg“ BF1	8	km/h	[25]	40 % beladen
Geschw. „zu Berg“ BF2	8	km/h	[25]	60 % beladen
Geschw. „zu Berg“ BF3	7	km/h	[25]	80 % beladen
Geschw. „zu Tal“ leer	20	km/h	[25]	unbeladen
Geschw. „zu Tal“ BF1	18	km/h	[25]	40 % beladen
Geschw. „zu Tal“ BF2	15	km/h	[25]	60 % beladen
Geschw. „zu Tal“ BF3	15	km/h	[25]	80 % beladen

Tabelle 2.9: „Rhenus Danube Shipping“ Schiffsgeschwindigkeiten je Beladungsfaktor

Europaschiff von Rhenus				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
Verbrauch „zu Berg“ leer	780	L/100 km	[25]	unbeladen
Verbrauch „zu Berg“ BF1	880	L/100 km	[25]	40 % beladen
Verbrauch „zu Berg“ BF2	1.000	L/100 km	[25]	60 % beladen
Verbrauch „zu Berg“ BF3	1.210	L/100 km	[25]	80 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ leer	280	L/100 km	[25]	unbeladen
Verbrauch „zu Tal“ BF1	330	L/100 km	[25]	40 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ BF2	430	L/100 km	[25]	60 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ BF3	470	L/100 km	[25]	80 % beladen

Tabelle 2.10: Daten des Europaschiffs von Rhenus

Rhein-Herne-Kanalschiff von Rhenus				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatzinfos
Verbrauch „zu Berg“ leer	780	L/100 km	[25]	unbeladen
Verbrauch „zu Berg“ BF1	880	L/100 km	[25]	40 % beladen
Verbrauch „zu Berg“ BF2	1.000	L/100 km	[25]	60 % beladen
Verbrauch „zu Berg“ BF3	1.210	L/100 km	[25]	80 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ leer	280	L/100 km	[25]	unbeladen
Verbrauch „zu Tal“ BF1	330	L/100 km	[25]	40 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ BF2	430	L/100 km	[25]	60 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ BF3	470	L/100 km	[25]	80 % beladen

Tabelle 2.11: Daten des Rhein-Herne-Kanalschiffs von Rhenus

Großes Rheinschiff von Rhenus				
Verbrauch „zu Berg“ leer	1.110	L/100 km	[25]	unbeladen
Verbrauch „zu Berg“ BF1	1.290	L/100 km	[25]	40 % beladen
Verbrauch „zu Berg“ BF2	1.500	L/100 km	[25]	60 % beladen
Verbrauch „zu Berg“ BF3	1.860	L/100 km	[25]	80 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ leer	350	L/100 km	[25]	unbeladen
Verbrauch „zu Tal“ BF1	440	L/100 km	[25]	40 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ BF2	600	L/100 km	[25]	60 % beladen
Verbrauch „zu Tal“ BF3	670	L/100 km	[25]	80 % beladen

Tabelle 2.12: Daten des großen Rheinschiffs von Rhenus

2.4 Hafendaten

Tabelle 2.13 und Tabelle 2.14 zeigen die Positionen der wichtigsten Häfen für den Gütertransport der Binnenschifffahrt anhand des jeweiligen Flusskilometers. Die Reihenfolge der aufgelisteten Häfen in den Tabellen 2.13 und 2.14 beruht auf einer Fahrt vom schwarzen Meer bis zur Nordsee. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Wasserstraßen mit unterschiedlicher Fließrichtung durchfahren werden und der Beginn der Kilometrierung der Wasserstraßen nicht immer am Ursprung des Flusses ist.

Hafendetails Schwarzes Meer bis zur Nordsee Teil 1			
Fließgewässer	Flusskm	Hafen	Quelle
Donau	0	Sulina	[40]
Konstanza Kanal	0	Konstanza	[40]
Konstanza Kanal	64	Cernavoda	[40]
Donau	300	Cernavoda	[40]
Donau	496	Russe	[40]
Donau	1048	Moldova_Veche	[40]
Donau	1870	Bratislava	[40]
Donau	1920	Wien	[40]
Donau	1998	Krems	[40]
Donau	2112	Enns	[40]
Donau	2127	Linz	[40]
Donau	2233	Passau	[40]
Donau	2283	Deggendorf	[40]
Donau	2313	Straubing	[40]
Donau	2376	Regensburg	[40]
Donau	2411	Kelheim	[40]
Main-Donau-Kanal	171	Kelheim	[11]
Main-Donau-Kanal	72	Nürnberg	[11]
Main-Donau-Kanal	0	Bischberg	[11]

Tabelle 2.13: Wichtige Häfen und ihre jeweiligen Flusskilometer

Hafendetails Schwarzes Meer bis zur Nordsee Teil 2				
Fließgewässer	Flusskm	Hafen	Quelle	Zusatz
Main	384	Bischberg	[10]	
Main	0	Mainz	[18]	
Rhein	497	Mainz	[36]	
Rhein	427	Mannheim	[36]	
Rhein	592	Koblenz	[36]	
Rhein	612	Andernach	[36]	
Rhein	660	Bonn	[36]	
Rhein	687	Köln	[36]	
Rhein	743	Neuss	[36]	
Rhein	764	Krefeld	[36]	
Rhein	780	Duisburg	[36]	
Rhein	913	Tiel	[36]	
Rhein	959	Werkendam	[36]	
Rhein	1030	Rotterdam	[36]	
ARA-Kanäle	75	Amsterdam	[38]	Distanz von Tiel
ARA-Kanäle	109	Antwerpen	[38]	Distanz von Werkendam
ARA-Kanäle	117	Terneuzen	[38]	Distanz von Werkendam

Tabelle 2.14: Wichtige Häfen und ihre jeweiligen Flusskilometer

2.5 Güterdaten

2.5.1 Landmaschinen

Landmaschinen Teil 1			
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle
Bagger Doosan DX 180LC			
Länge Korpus	5,69	m	[12]
Breite Korpus	2,9	m	[12]
Länge Arm	3,16	m	[12]
Breite Arm	1,45	m	[12]
Höhe	3,15	m	[12]
Masse	19,3	t	[12]
Bagger Doosan DX 235LCR			
Länge Korpus	5,75	m	[19]
Breite Korpus	2,99	m	[19]
Länge Arm	3,23	m	[19]
Breite Arm	1,50	m	[19]
Höhe	3,39	m	[19]
Masse	24.300	kg	[19]
Bagger Doosan DX 340LC			
Länge Korpus	7,46	m	[13]
Breite Korpus	3,28	m	[13]
Länge Arm	3,89	m	[13]
Breite Arm	1,64	m	[13]
Höhe	3,55	m	[13]
Masse	37.100	kg	[13]

Tabelle 2.15: Daten unterschiedlicher Bagger

Landmaschinen Teil 2			
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle
Bagger Doosan DX 380LC			
Länge Korpus	7,7	m	[14]
Breite Korpus	3,35	m	[14]
Länge Arm	3,58	m	[14]
Breite Arm	1,68	m	[14]
Höhe	3,39	m	[14]
Masse	41.200	kg	[14]
Bagger Doosan DX 530LC			
Länge Korpus	7,99	m	[15]
Breite Korpus	3,35	m	[15]
Länge Arm	8,74	m	[15]
Breite Arm	1,68	m	[15]
Höhe	4,07	m	[15]
Masse	53.900	kg	[15]
Mähdrescher Deutz Fahr C7205			
Länge Korpus	9,24	m	[6]
Breite Korpus	3,30	m	[6]
Höhe Korpus	3,99	m	[6]
Länge Schneidwerk	1,65	m	[6]
Breite Schneidwerk	4,19	m	[6]
Masse	16.280	kg	[6]

Tabelle 2.16: Daten unterschiedlicher Bagger

2.5.2 Kräne

In Tabelle 2.17 haben alle Kräne eine Höhe von vier Meter. Die Daten stammen aus einer Transportliste von Bolk Transport, zusätzlich wurden diese durch die Beilage der jeweiligen Zulassungsscheine bestätigt.

Selbstfahrende Kräne der Marke Demag			
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle
PTK 1000			
Länge	20,7	m	[22]
Breite	3	m	[22]
Masse	108.000	kg	[22]
PTK 500			
Länge	19,29	m	[22]
Breite	3	m	[22]
Masse	98.000	kg	[22]
PTK 250			
Länge	15,45	m	[22]
Breite	3	m	[22]
Masse	72.000	kg	[22]
PTK 200			
Länge	14,7	m	[22]
Breite	3	m	[22]
Masse	60.000	kg	[22]
PTK 150			
Länge	14,57	m	[22]
Breite	3	m	[22]
Masse	60.000	kg	[22]

Tabelle 2.17: Daten unterschiedlicher selbstfahrender Kräne

2.5.3 Windrattürme

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Die Abmessungen und Massen der einzelnen Teile der Türme der Windkraftanlage gelten als vertrauliche Daten und werden daher nicht angeführt. Der Windratturm besteht aus 91 Einzelteilen und einem Fundament. Das Fundament muss beim LKW-Transport einzeln transportiert werden, aufgrund der Überschreitung der zulässigen maximalen Gesamtlast eines LKW, siehe Tabelle 2.5. Alle weiteren Teile können kombiniert transportiert werden.

2.5.4 Windkraftkomponente

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Aus Gründen der Geheimhaltung, darf in dieser Arbeit nicht genannt werden, um welche Komponente es sich dabei handelt.

Windkraftkomponente			
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle
Grundfläche	28	m ²	[22]
Masse	79.000	kg	[22]

Tabelle 2.18: Daten einer Windkraftkomponente

2.6 Daten aus Normen

2.6.1 DIN EN 16258

Der Treibstoff „Diesel B7“ in Tabelle 2.19 steht für herkömmlichen Diesel mit 7 % Biodieselanteil. Die Tank-to-Wheel-Faktoren (TTW) beziehen sich auf die Bewertung des Fahrzeugprozesses, vgl. [1], (S. 10).

Die Well-to-Wheel-Faktoren (WTW) berücksichtigen sowohl die Fahrzeugprozesse als auch die Energieprozesse, vgl. [1], (S. 11).

Wobei bei den Energieprozessen sämtliche Energieverbräuche, beziehungsweise Emissionen gemeint sind die zwischen der Gewinnung des Treibstoffes bis hin zur Befüllung des Tanks anfallen, vgl. [1].

Der spez. Dieserverbrauch in Tabelle 2.19 beschreibt den Wirkungsgrad zwischen des Heizwertes des Diesels im Tank und der Motor vom Motor geleisteten Arbeit. In anderen Worten beschreibt dieser Ausdruck, wie viel kg Diesel verbraucht werden, um eine kWh Energie am Motor zu erhalten.

Treibstoff Faktoren			
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle
spez. Dieserverbrauch	0,204	kg/kWh	[39], (S. 86)
Faktoren für B7 Diesel			
Energiefaktor TTW	42,66	MJ/kg	[1], (S. 27)
Energiefaktor WTW	53,08	MJ/kg	[1], (S. 27)
Energiefaktor TTW	35,64	MJ/L	[1], (S. 27)
Energiefaktor WTW	44,48	MJ/L	[1], (S. 27)
THG-Emissionsfaktor TTW	2,48	kg CO ₂ e/L	[1], (S. 27)
THG-Emissionsfaktor WTW	3,15	kg CO ₂ e/L	[1], (S. 27)
Dichte „Diesel B7“	0,83606	kg/L	[1], (S. 27)
Faktoren für reinen Diesel			
Energiefaktor TTW	43,10	MJ/kg	[1], (S. 23)
Energiefaktor WTW	51,29	MJ/kg	[1], (S. 23)
Energiefaktor TTW	35,86	MJ/L	[1], (S. 23)
Energiefaktor WTW	42,67	MJ/L	[1], (S. 23)
THG-Emissionsfaktor TTW	2,67	kg CO ₂ e/L	[1], (S. 23)
THG-Emissionsfaktor WTW	3,24	kg CO ₂ e/L	[1], (S. 23)
Dichte Diesel	0,83	kg/L	[1], (S. 23)

Tabelle 2.19: Umrechnungsfaktoren für Treibstoffe laut DIN EN 16258

2.6.2 Fahrzeitgesetz

Betriebszeitgesetze				
Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Zusatz
Lenkzeitvorgabe des LKW				
Durchgehende Lenkdauer	6	h	[3]	eine Stunde Pause
max. Lenkdauer Tag	9	h/Tag	[3]	
max Lenkdauer Tag	10	h/Tag	[3]	zwei mal pro Woche
max. Lenkdauer Woche	56	h/Woche	[3]	
max. Lenkdauer 2 Wochen	90	h/2 Wochen	[3]	
Betriebsdauer der Binnenschiff				
Betriebsform A1	14	h/Tag	[9]	
Betriebsform A2	18	h/Tag	[9]	
Betriebsform B	24	h/Tag	[9]	

Tabelle 2.20: Gesetze zu aktiven Betriebszeiten von Transportmitteln

2.6.3 Emissionsgrenzwerte von Binnenschiffsmotoren der Stufe V

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [32] angeführt:

Die „VERORDNUNG (EU) 2016/1628 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES, vom 14. September 2016, über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG“, wird in dieser Arbeit vereinfacht mit „EU Stufe V Standard“ abgekürzt. Die Emissionsgrenzwerte aus Tabelle 2.21 gelten für Binnenschiffe mit Antriebsleistung größer 300 kW. Dabei ist zu beachten, dass jene Grenzwerte derzeit nur dann gültig sind, wenn es sich um einen Motor handelt der entweder nach dem 01.01.2020 neu zugelassen wurde, oder ein Motor der nach jenem Datum erneuert wurde.

Für die Emissionsgrenzwerte in Tabelle 2.21 wird der Messzyklus für Nicht-Straßenmotoren ISO 8178 angewandt, vgl. [33].

Emissionswerte nach Stufe V			
Schadstoff	Wert	Einheit	Quelle
CO-Grenzwert	3,5	g/kWh	[32]
HC-Grenzwert	0,19	g/kWh	[32]
NO _x -Grenzwert	1,8	g/kWh	[32]
PM ₁₀ -Grenzwert	0,015	g/kWh	[32]

Tabelle 2.21: Emissionsfaktoren EU V, für Binnenschiffe

2.6.4 Emissionsgrenzwerte von LKW-Motoren der EURO VI-Klasse

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [29] angeführt:

Die „Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen“ wird in dieser Diplomarbeit vereinfacht mit „EURO VI Standard“ abgekürzt. Die in Tabelle 2.22 angeführten Grenzwerte gelten für LKW mit einer Masse von über 3.500 kg, gemessen mit dem standardisierten Zyklus WHSC (World Harmonized Stationary Cycle).

Emissionswerte nach EURO VI			
Schadstoff	Wert	Einheit	Quelle
CO Grenzwert	1,5	g/kWh	[29] & [4]
HC Grenzwert	0,13	g/kWh	[29] & [4]
NO _x Grenzwert	0,4	g/kWh	[29] & [4]
PM ₁₀ Grenzwert	0,01	g/kWh	[29] & [4]

Tabelle 2.22: Emissionsfaktoren EURO VI, für LKW

Kapitel 3

Methodik der Berechnung

3.1 Überblick

Dieses Kapitel präsentiert die Vorgangsweise für die Berechnung des Energieaufwandes sowie der daraus resultierenden Emissionen im Detail. Des Weiteren wird auf die Ermittlung der Fahrdauer des jeweiligen Transportmittels eingegangen.

Zunächst beschäftigt sich die Methodik der Berechnung mit den Systemgrenzen, der im Zuge dieser Arbeit verwendeten Berechnungen. Priorität ist es die Berechnung so zu gestalten, dass die Ergebnisse für individuelle Transporte möglichst realitätsnah sind.

Spezielle Annahmen und Randbedingungen werden aufgezeigt und deren Verwendung begründet. Anschließend wird auf die Berechnung selbst eingegangen und mit anderen möglichen Berechnungsansätzen verglichen.

3.2 Systemgrenzen

Die folgenden Punkte zeigen wichtige Abgrenzungen dieser Diplomarbeit.

- Die Berechnung ist so konzipiert, dass Transporte von Stückgut ermittelt werden. Das sogenannte Massengut oder auch Schüttgut wie zum Beispiel Kies, soll in diesem Berechnungsprogramm eine untergeordnete Rolle spielen.

- Als Transportmittel werden ausschließlich die in Kapitel 2 erwähnten Fahrzeuge berücksichtigt.
- Die zu betrachteten Strecken der Binnenschifffahrt beschränken sich auf die in Absatz 1.2.1 erwähnten Wasserstraßen. Hierbei werden ausschließlich Binnenschiffe betrachtet und keine Seeschiffe.
- Eine LKW Kombination kann eine maximale Masse von 150.000 kg transportieren, vgl. [22]. Aus diesem Grund ist die Masse des Transportguts in der Berechnung auf 150 Tonnen je Stück begrenzt.
- Da sich die Daten der Transportmittel auf Europa beschränken, gelten die Berechnungen nur für LKW Strecken in Europa. Außerdem macht ein Vergleich zwischen Binnenschifftransport und LKW-Transport nur dann Sinn, wenn der Startpunkt der beiden zwei Transportvarianten übereinstimmt und auch der Zielpunkt bei LKW und Schifftransport der gleiche ist.
- In der Berechnung wird die Dauer, der Energieaufwand und die entstehenden Emissionen durch Beladen, Entladen sowie Umladen nicht berücksichtigt.
- Aufgrund der verhältnismäßig großen Breite des Roll-on-Roll-off-Katamarans, Abmessungen siehe Tabelle 2.7, kann dieser Schiffstyp auf dem Main-Donau-Kanal nicht verkehren, dies ist bei der Eingabe im Berechnungstool zu beachten, vgl. [23].

3.3 Annahmen

3.3.1 Treibstoff

Als Treibstoff wird Diesel mit 7 % Biodieselanteil gewählt, da es laut einem Artikel der Shell Austria Gesellschaft m.b.H. eine Beimischungspflicht von Biotreibstoffen gibt, vgl. [37]. Um einen fairen Vergleich zwischen den beiden Transportmitteln zu erhalten wird angenommen, dass der gleiche Treibstoff in allen in Kapitel 2 genannten LKW und Binnenschiffen verwendet wird, vgl. [23].

Ein Bericht des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH bestätigt, dass bei Binnenschiffen und LKW durchaus der gleiche Treibstoffanteil an Biodiesel Anwendung findet, vgl. [42], (S. 34).

3.3.2 LKW-Geschwindigkeit

Da es sich bei dem LKW aus der CE Delft Statistik, Tabelle 2.1 um eine Standard 44.900 kg Kombination handelt wurde die gleiche Durchschnittsgeschwindigkeit wie bei der Bolk-4 x 2-Zugmaschine verwendet, siehe Tabelle 2.5.

3.3.3 Strecken mit dem CE Delft LKW

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [39] angeführt:

Es wird angenommen, dass alle Strecken die von CE Delft-LKW zurückgelegt werden, in dem in dieser Diplomarbeit entwickelten Berechnungstool folgendermaßen aufgeteilt sind.

- 5 % Stadtfahrt
- 8 % Landstraßenfahrt
- 87 % Autobahnfahrt

Dies ist unabhängig davon wie groß der Anteil der Straßenkategorie bei der betrachteten Strecke tatsächlich ist. Diese Annahme dient der Vereinfachung der Streckenermittlung.

Laut CE Delft sind jene erwähnten Anteile in Prozent die Durchschnittswerte für den betrachteten LKW-Typ.

3.3.4 Abhängigkeit von Verbrauch und Beladung

Wie Abschnitt 3.5.2 zeigt, werden Interpolationspolynome zwischen den effektiven Datenpunkten der Verbrauchswerte aus Kapitel 2 angenommen, um eine Berechnung mit jedem beliebigen Beladungsfaktor zu ermöglichen. Weiters werden die Kurven bis zum Beladungsfaktor 1 extrapoliert. Die Annahme dieses Verhaltens des Binnenschiffsverbrauchs über dem Beladungsfaktor bestätigt auch CE Delft, siehe Abbildung 2.1.

Für die Binnenschiffe aus CE Delft, siehe Tabelle 2.2, 2.3 und 2.4, sind Messwerte für 3 Beladungsfaktoren vorhanden. Da es sich um die gleichen Schiffstypen handelt wurde hierbei für die Extrapolation angenommen, dass sich die Kurven ähnlich verhalten wie jene der Rhenus Schiffsdaten.

3.3.5 Abstände zwischen Gütern

Es wird für die Binnenschifffahrt angenommen, dass zwischen zwei Gütern ein Abstand von 0,2 m eingehalten wird. Dadurch vergrößert sich die Grundfläche jedes Gutes. Für die Berechnung der Vergrößerung der Grundfläche wurde die Vereinfachung getroffen jedes Gut quadratisch darzustellen, um aus der Grundfläche die Seitenlänge ermitteln zu können und anschließend wie in Gleichung 3.1 beschrieben eine vergrößerte Fläche zu erhalten.

$$A_{GutBrutto} = (\sqrt{A_{Gut}} + 0,2)^2 \quad (3.1)$$

3.3.6 Ermittlung der Dauer des Schiffstransportes

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [23] und [26] angeführt:

Es wird für alle in dieser Arbeit betrachteten Binnenschiffe angenommen, dass die Betriebsform B (siehe Tabelle 2.20) verwendet wird. Bei einem Transport gilt also 24 Stunden pro Tag Betriebsdauer wobei ein Wechsel der Kapitäne vorgesehen ist. Diese Annahme dient der Vereinfachung der Zeit-Berechnung.

Für Schleusen wurde eine Durchfahrtsdauer von 20 min je Schleuse angenommen. Da es sich um einen Durchschnittswert handelt ist dieser unabhängig von der Fahrtrichtung und dem Schiffstyp.

3.3.7 LKW-Beladung

Im Fokus dieser Arbeit stehen schwere Güter großer Abmessungen. Da diese Güter oft an die zulässige Gesamtlast eines LKW, siehe Tabelle 2.5, nah herankommen, wird bei der Berechnung der Anzahl der Güter je LKW nur auf die Masse eingegangen und nicht auf die Grundfläche.

3.3.8 Berechnung der Emissionen

Die klimarelevanten Emissionen des Transportes wurden nach der Norm DIN EN 16258 ermittelt.

Aufgrund des Mangels an Emissionsmessungen an Binnenschiffen, werden für den Emissionsvergleich der Schadstoffe Kohlenmonoxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Feinstaub für die Berechnung die aktuellen Grenzwerte des Stufe V Standards für Binnenschiffe, vgl. [32] und die Grenzwerte des EURO VI Standards für schwere Laststraßenfahrzeuge, vgl. [29], herangezogen.

3.4 Berechnung LKW

3.4.1 Ermittlung des Beladungsfaktors

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Bei allen in dieser Arbeit betrachteten LKW-Typen ist der Verbrauch von der Beladung linear abhängig. Für eine Berechnung des Energieaufwandes, muss also zunächst bestimmt werden, wie viele Güter auf einen LKW passen und daraus folgernd die transportierte Masse je LKW.

Die Anzahl der Güter je LKW wird so bestimmt, dass für einen Transport und LKW-Typ die Leermasse der Kombination von der zulässige Gesamtlast abgezogen wird und die daraus folgende zulässige Nutzlast durch die Masse des Gutes dividiert wird. Die Zahl der erforderlichen LKW ergibt sich anschließend, durch multiplizieren der Stückanzahl der Güter, siehe auch Gleichung 3.2. Sollte der Wert der Anzahl kleiner als 1 werden so wird dieser auf 1 gesetzt da bei unteilbarem Gut die maximal zulässige Gesamtlast überschritten werden darf.

$$Anz_{LKW_s} = \frac{M_{zul} - M_{Komb}}{M_{Gut}} Stk \quad (3.2)$$

Beschreibung der Gleichung 3.2

Anz_{LKW_s} = Anzahl der erforderlichen LKW für einen Transport

M_{zul} = zulässige Gesamtlast eines LKW in kg, siehe Tabelle 2.5

M_{Komb} = Masse der ausgewählten Kombination (Zugmaschine und Auflieger) in kg

M_{Gut} = Masse des zu transportierenden Gutes je Stück in kg

Stk = Anzahl der zu transportierenden Güter

3.4.2 spezifische Verbrauchsrechnung

Für die LKW aus der Statistik sind die spezifischen Verbrauchswerte von leeren und voll beladenen Fahrzeugen unterteilt in Streckenkategorien gegeben, siehe Tabelle 2.1. Der gesamte

Energieaufwand eines Transportes mit einem LKW von CE Delft wird von der Beladung abhängig wie in Gleichung 3.3 gezeigt berechnet.

Sollte ein Formelsatz in dieser Diplomarbeit einen Zeilenumbruch erfordern, wie zum Beispiel in Gleichung 3.3, so erfolgt die Schreibweise nach DIN 1338:2011-03. Demnach erfolgt die Teilung vor einem Rechenoperator und dieser wird ausschließlich in der nächsten Zeile aber versetzt angeführt, vgl. [7].

$$V_{LKW_{CEDelft}}(Bel) = (0,87 (V_{LKW_{vollM}} - V_{LKW_{leerM}}) + 0,08 (V_{LKW_{vollR}} - V_{LKW_{leerR}}) + 0,05 (V_{LKW_{vollU}} - V_{LKW_{leerU}})) \frac{Bel}{M_{zul.N}} \quad (3.3)$$

Beschreibung der Gleichung 3.3

$V_{LKW_{CEDelft}}$ = spez. Verbrauch mit Beladung eines LKW aus Tabelle 2.1 in L/100 km

Bel = Beladung bzw. Masse der transportierten Nutzlast in kg

$M_{zul.N}$ = Masse der zulässigen Nutzlast des LKW in kg, siehe Tabelle 2.1

$V_{LKW_{voll}}$ = spez. Verbrauch mit voller Beladung aus Tabelle 2.1 in L/100 km

$V_{LKW_{leer}}$ = spez. Verbrauch unbeladen aus Tabelle 2.1 in L/100 km

M = Motorway (Autobahnstrecke) 87 % Anteil, siehe Tabelle 2.1

R = Rural (Landstraßen) 8 % Anteil, siehe Tabelle 2.1

U = Ural (Strecke in der Stadt) 5 % Anteil, siehe Tabelle 2.1

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Der spezifische Verbrauchswert von Bolk-LKW wird aus Erfahrungswerten ermittelt. Dabei wird so vorgegangen, dass zwei Faktoren vorgegeben werden die über die Leermasse der Kombination (LKW und Auflieger) und über die Nutzlast jeweils einen spezifischen Verbrauch ergeben. Diese werden anschließend zum spezifischen Gesamtverbrauch aufsummiert. Die Gleichung 3.4 zeigt die Vorgangsweise dafür. Grundsätzlich können die Verbrauchsfaktoren bei jedem Transport variiert werden. Richtwerte für die Verbrauchsfaktoren der LKW liegen bei **1** L/(100 km t) für die Eigenmasse und **0,75** L/(100 km t) für die Nutzlast.

$$V_{LKW_{Bolk}}(Bel) = V_{fLKW_{leer}} M_{leer} + V_{fLKW_{Nutz}} Bel \quad (3.4)$$

Beschreibung der Gleichung 3.4

$V_{fLKW_{leer}}$ = Verbrauchsfaktor der leeren Kombination in L/(100 km t)

M_{leer} = Masse der unbeladenen Kombination in kg, aus Tabelle 2.6

$V_{fLKW_{Nutz}}$ = Verbrauchsfaktor der Nutzlast in L/(100 km t)

Bel = Beladung bzw. Masse der transportierten Nutzlast in kg

$V_{LKW_{Bolk}}$ = gesamter spez. Verbrauch eines Bolk-LKW bei einem Transport in L/100 km

3.4.3 Vereinheitlichen der Berechnung

Da die spezifischen Verbrauchsdaten der LKW aus der Statistik in MJ/km gegeben sind und jene aus den Erfahrungswerten in L/100 km, werden alle Werte zuerst mit der Norm 16258 (Tabelle 2.19) umgerechnet und anschließend mit der Strecke des Transportes multipliziert. Es werden alle Verbräuche sowohl in MJ und L dargestellt, als auch die vom Motor geleistete Arbeit in kWh anhand des Dieserverbrauchs ermittelt.

3.4.4 Streckenberechnung des LKW-Transportes

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Die zurückgelegten Kilometer zwischen Start und Ziel eines Transportes wird über „Google Maps“⁴ ermittelt. Zusätzlich zur beladenen Strecke wird ein so genannter Leerfahrtenanteil hinzugerechnet. Dieser beschreibt wie viele Kilometer die Kombination unbeladen zurücklegen muss, um den beladenen Transport durchführen zu können. Er wird in Prozent von der Strecke zwischen Start und Ziel angegeben und beträgt üblicherweise 15 %.

⁴<https://www.google.at/maps>

Um den gesamten Energieaufwand eines Transportes zu ermitteln, wird der spezifische Verbrauch, siehe Gleichung 3.4 und Gleichung 3.3 mit der ermittelten beladenen Strecke multipliziert. Anschließend wird die unbeladen zurückgelegte Strecke über den Leerfahrtenanteil ermittelt und mit dem spezifischen Verbrauch der unbeladenen Kombination multipliziert.

3.4.5 Berechnung der Emissionen des LKW-Transportes

Neben dem Energieaufwand stellen die Emissionen eines Transportes ein weiteres wichtiges Ergebnis der Berechnung dar. Die klimatechnisch relevanten Gase werden laut DIN EN 16258 in einem CO₂e (Kohlendioxid-Äquivalent) zusammengefasst, vgl. [1].

Dieser Wert wird anhand des Treibstoffverbrauches eines Transportes über den CO₂e Faktor je Liter verbrauchtem Kraftstoff aus Tabelle 2.19 ermittelt. Wie jener Faktor zustande kommt beschreibt die Norm DIN EN 16258, [1], (Anhang der Norm).

Die weiteren Emissionen wie Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Feinstaub werden aufgrund der Grenzwerte aus dem EURO VI Standard für schwere Lastfahrzeuge berechnet. Dabei werden die Faktoren aus Tabelle 2.22 mit der vom Motor geleisteten Arbeit in kWh multipliziert.

3.4.6 Kalkulation der Transportdauer mit dem LKW

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [22] angeführt:

Die Dauer eines LKW-Transportes zwischen Startpunkt und Zielpunkt wird so berechnet, dass die Strecke des Transportes durch die Geschwindigkeit des LKW dividiert wird. Dabei werden je nach gewählter Zugmaschine unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeiten verwendet, siehe Tabelle 2.5.

Sobald diese sogenannte Fahrtzeit ermittelt ist, werden die gesetzlich einzuhaltenden Ruhe und Stillstandzeiten aus Tabelle 2.20 hinzugerechnet, um die effektive Dauer des Transportes zu erhalten.

3.5 Berechnung Binnenschiff

3.5.1 Ermittlung des Beladungsfaktors

Die Tabellen 2.2 bis 2.4 und die Tabellen 2.7 bis 2.8 zeigen die maximale Ladefläche, sowie die maximale Beladungsmasse (Kapazität) aller in dieser Arbeit angeführten Binnenschiffe. Um zu ermitteln wie viele Schiffe für den zu betrachteten Transport erforderlich sind, werden die Grundflächen und Masse aller Güter von einem Transport aufsummiert und diese Werte durch die Ladefläche sowie die Kapazität des jeweilig betrachteten Schiffes dividiert. Wobei ein Transport bedeutet, dass ein Schiffstyp verwendet wird und eine Strecke vom Starthafen bis zum Zielhafen befahren wird, dabei können aber durchaus unterschiedliche Güter transportiert werden. Die effektive Anzahl der erforderlichen Schiffe ergibt sich durch Aufrunden des größeren Wertes von Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6.

Um den jeweiligen Beladungsfaktor pro Schiff zu ermitteln, wird die Masse aller Güter eines Transportes durch die Anzahl der erforderlichen Schiffe gleichen Typs dividiert. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Aufteilung aller Güter auf die Binnenschiffe.

$$Anz_{SG} = \frac{\sum_{i=1}^j M_{Gut_i}}{M_{Schiff}} \quad (3.5)$$

$$Anz_{SFl} = \frac{\sum_{i=1}^j A_{GutBrutto_i}}{A_{Schiff}} \quad (3.6)$$

$$Anz_S = \max(Anz_{SG}, Anz_{SFl}) \quad (3.7)$$

$$B_f = \frac{\sum_{i=1}^j Gut_{mas_i}}{Anz_S M_{Schiff}} \quad (3.8)$$

Beschreibung der Gleichungen 3.5 bis 3.8

i	= Zählvariable der Güter
j	= Anzahl aller Güter des berechneten Transportes
Anz_{SG}	= Anzahl der erforderlichen Schiffe aufgrund der Kapazität berechnet
M_{Gut}	= Masse des zu transportierenden Gutes je Stück in kg
M_{Schiff}	= zulässige Masse, Kapazität des jeweiligen Schiffes in kg
Anz_{SFl}	= Anzahl der erforderlichen Schiffe aufgrund der Ladefläche berechnet
$A_{GutBrutto}$	= Grundfläche eines Gutes inkl. 0,2 m Abstand in m ²
A_{Schiff}	= maximale Fläche, welche für die Beladung zur Verfügung steht
Anz_S	= Anzahl der erforderlichen Schiffe (aufgerundet auf ganze Zahl)
B_f	= Beladungsfaktor des jeweiligen Schiffes, siehe Gleichung 2.4

3.5.2 Interpolation und Extrapolation der Datenpunkte

Die strukturelle Grundlage der Berechnung des Verbrauchs eines Binnenschiffes bilden in dieser Arbeit die Erfahrungswerte von „Rhenus Danube Shipping GmbH“, da diese Quelle die meisten Daten für Beladungsfaktoren zur Verfügung stellt.

Die als Ringe markierten Messwerte in Abbildung 3.1 widerspiegeln die Verbrauchswerte je Kilometer die von „Rhenus Danube Shipping“ zur Verfügung gestellt wurden, siehe auch Tabelle 2.10, 2.11 und 2.12. Es wird unterschieden in Verbrauchswerte „zu Tal“ und „zu Berg“ wobei die Verbrauchswerte des Rhein-Herne-Kanalschiff (RHC) mit denen des Euro-paschiffs im Falle der Rhenus-Daten übereinstimmen.

Da für eine Berechnung allerdings jeder Beladungsfaktor einen zugehörigen Verbrauchswert erfordert, werden zwischen den Messwerten Interpolationspolynome verwendet. Diese Polynome werden mit der in „Microsoft Excel“ vorhandenen Funktion „Trendlinie“ ermittelt, sodass alle gegebenen Messpunkte auf der entsprechenden Kurve liegen.

Die folgenden Gleichungen 3.9 bis 3.12 zeigen die Interpolationen für jede Kurve.

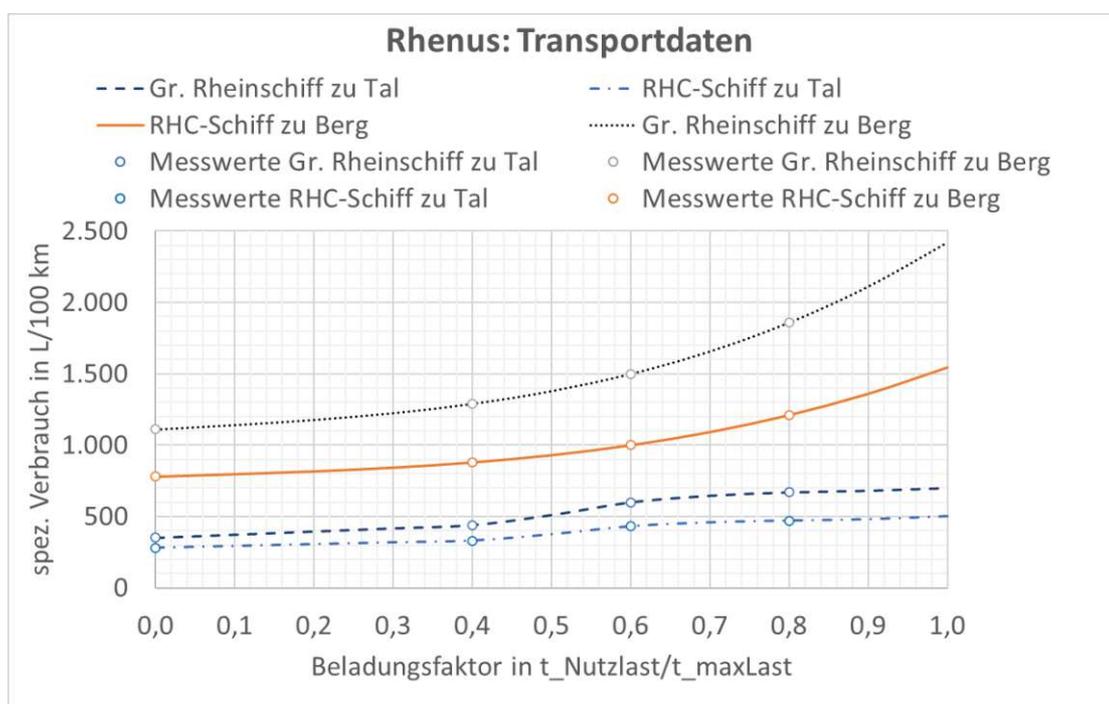


Abbildung 3.1: Einfluss des Beladungsfaktors auf den Dieserverbrauch der Rhenus-Binnenschiffstypen, siehe Tabelle 2.10 bis 2.12

$$V_{Gr.Rh_B}(B_f) = 1.110 + 313 B_f - 94 B_f^2 + 1.094 B_f^3 \quad (3.9)$$

$$V_{RHC_B}(B_f) = 780 + 179 B_f - 94 B_f^2 + 677 B_f^3 \quad (3.10)$$

$$V_{Gr.Rh_T}(B_f) = \begin{cases} \frac{440-350}{0,4} B_f + 350, & \text{für } 0 \leq B_f \leq 0,4 \\ 958,33 B_f^2 - 158,33 B_f + 350, & \text{für } 0,4 \leq B_f \leq 0,6 \\ 3645,8 B_f^4 - 9166,7 B_f^3 \\ +7354,2 B_f^2 - 1483,3 B_f + 350, & \text{für } 0,6 < B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$V_{RHC_T}(B_f) = \begin{cases} \frac{330-280}{0,4} B_f + 280, & \text{für } 0 \leq B_f \leq 0,4 \\ 625 B_f^2 - 125 B_f + 280, & \text{für } 0,4 \leq B_f \leq 0,6 \\ 2760,4 B_f^4 - 6687,5 B_f^3 \\ +5214,6 B_f^2 - 1067,5 B_f + 280, & \text{für } 0,6 < B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.12)$$

Beschreibung der Gleichungen 3.9 bis 3.12

B_f = Beladungsfaktor zwischen 0 (leer) und 1 (voll beladen)

$V_{Gr.Rh_B}$ = spezifischer Verbrauch des großen Rheinschiffs „zu Berg“ in L/100 km

V_{RHCB} = spezifischer Verbrauch des Rhein-Herne-Kanalschiffs „zu Berg“ in L/100 km

$V_{Gr.Rh_T}$ = spezifischer Verbrauch des großen Rheinschiffs „zu Tal“ in L/100 km

V_{RHCT} = spezifischer Verbrauch des Rhein-Herne-Kanalschiffs „zu Tal“ in L/100 km

Für die Binnenschiffe aus CE Delft, siehe Tabelle 2.2, 2.3 und 2.4, sind Messwerte für jeweils 3 Beladungsgrade vorhanden. Die Interpolation zwischen jenen Datenpunkten erfolgte nach dem gleichen Prinzip, wie im Falle der Rhenus-Schiffs-Daten. Die Extrapolation beruht auf dem Verhalten der Rhenus-Schiffsdaten, weil es sich um die gleichen Schiffstypen handelt und somit Ähnlichkeit des Verbrauchsverhaltens angenommen werden kann. Die Verbrauchskurven der CE Delft-Daten werden jedoch nicht in Fahrt „zu Berg“ und „zu Tal“ unterschieden, sondern je nach befahrener Wasserstraße in die Klassen CEMT V und CEMT VI unterteilt, Details hierzu siehe Absatz 1.2.1. Jene Kurven inklusive der Datenpunkte aus Kapitel 2 zeigen Abbildung 3.2 bis 3.4 und die Gleichungen 3.13 bis 3.18.

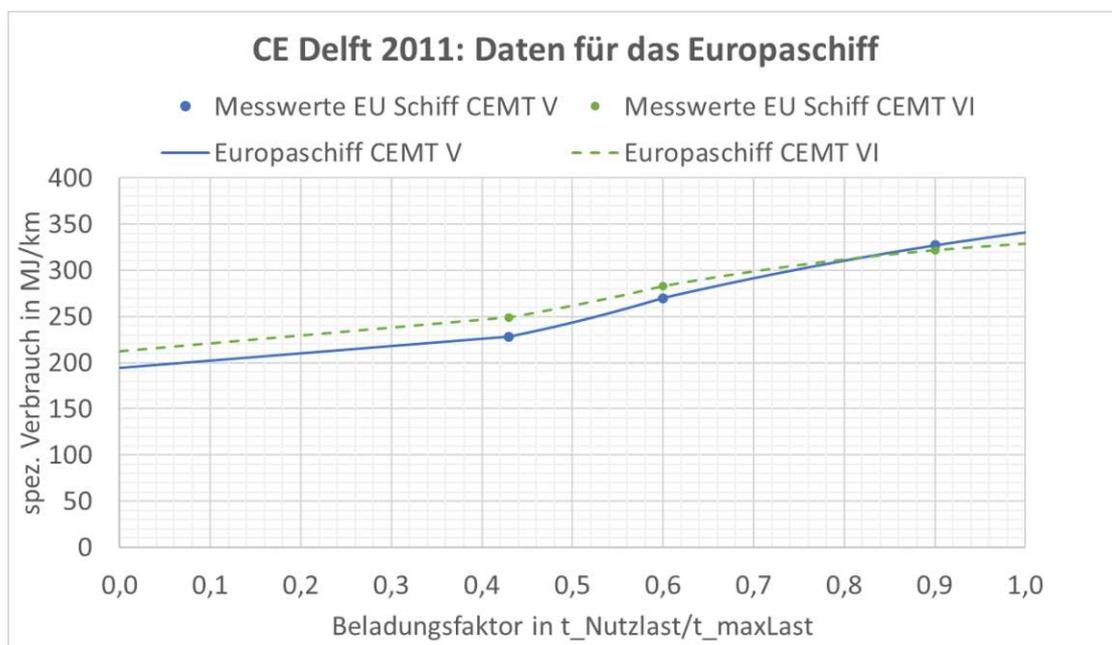


Abbildung 3.2: Einfluss des Beladungsfaktors auf den Dieserverbrauch des Europaschiffs, siehe Tabelle 2.2

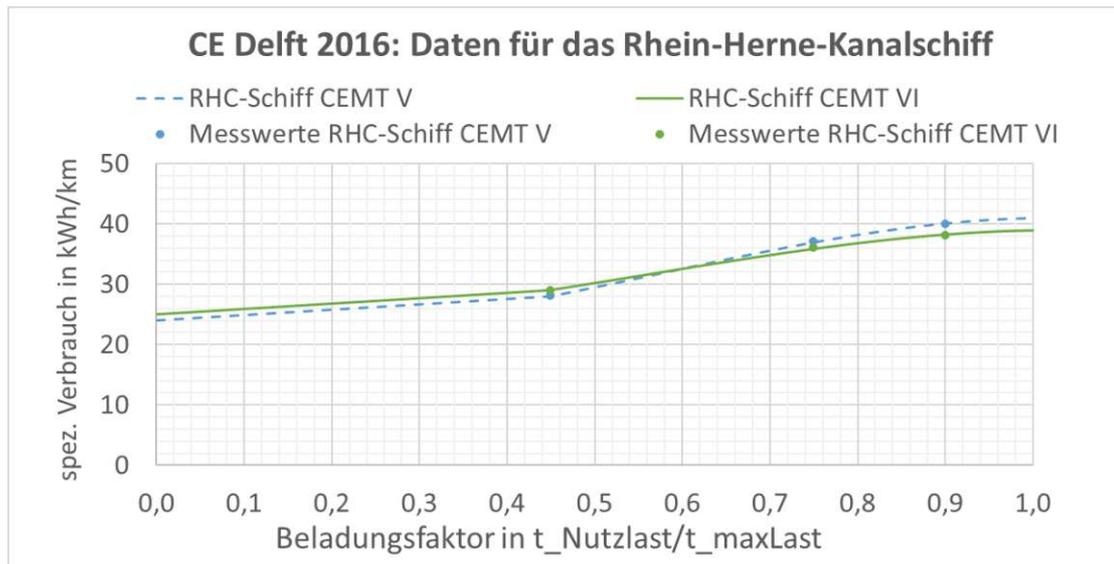


Abbildung 3.3: Einfluss des Beladungsfaktors auf die vom Motor geleistete Arbeit des Rhein-Herne-Kanalschiffs, siehe Tabelle 2.3

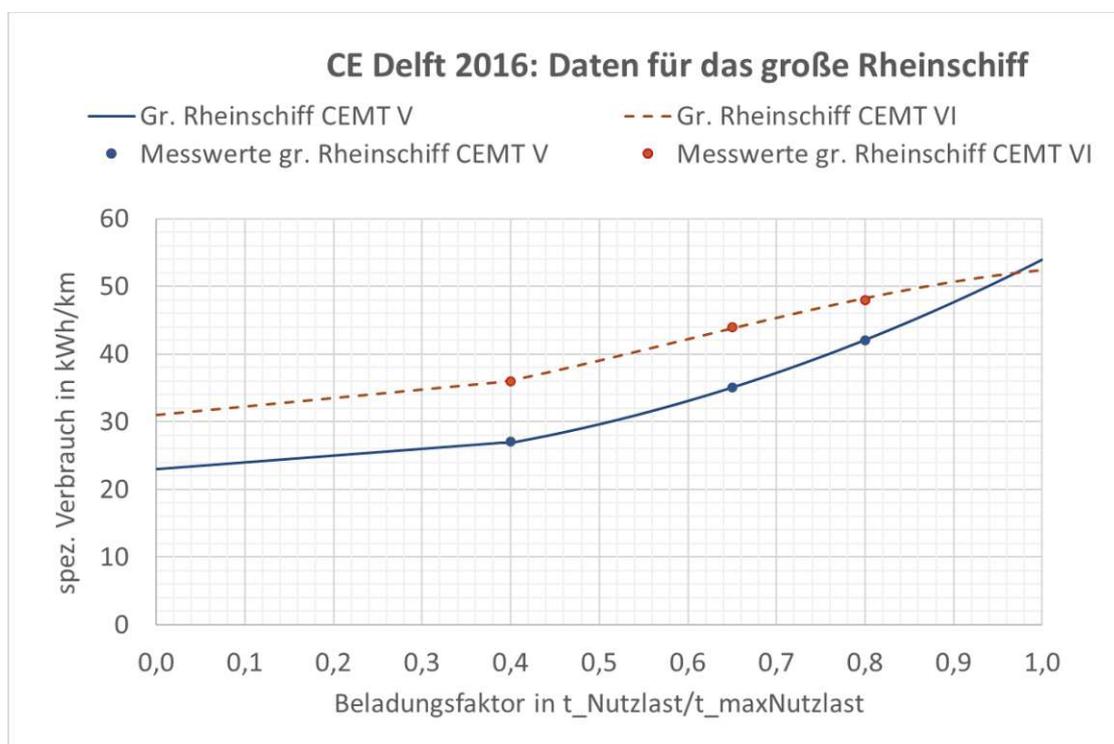


Abbildung 3.4: Einfluss des Beladungsfaktors auf die vom Motor geleistete Arbeit des großen Rheinschiffs, siehe Tabelle 2.4

$$V_{EU_V}(B_f) = \begin{cases} \frac{228-194}{0,43} B_f + 194, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,43 \\ 279,98 B_f^2 - 41,322 B_f + 194, & \text{für } 0,43 \leq B_f \leq 0,6 \\ -121,4 B_f^2 + 372,1 B_f + 90,443, & \text{für } 0,6 < B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$V_{EU_{VI}}(B_f) = \begin{cases} \frac{249-212}{0,43} B_f + 212, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,43 \\ 189,92 B_f^2 + 4,3798 B_f + 212, & \text{für } 0,43 \leq B_f \leq 0,6 \\ -148,94 B_f^2 + 353,4 B_f + 124,57, & \text{für } 0,6 < B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$V_{RHC_V}(B_f) = \begin{cases} \frac{28-24}{0,45} B_f + 24, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,45 \\ -52,608 B_f^3 + 90,899 B_f^2 \\ -21,326 B_f + 23,998, & \text{für } 0,45 \leq B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$V_{RHC_{VI}}(B_f) = \begin{cases} \frac{29-25}{0,45} B_f + 25, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,45 \\ -37,247 B_f^3 + 62,959 B_f^2 \\ -11,803 B_f + 24,996, & \text{für } 0,45 \leq B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

$$V_{Gr.Rh_V}(B_f) = \begin{cases} \frac{27-23}{0,4} B_f + 23, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,4 \\ 35,44 B_f^2 - 4,5315 B_f + 23,03, & \text{für } 0,4 \leq B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

$$V_{Gr.Rh_{VI}}(B_f) = \begin{cases} \frac{36-31}{0,4} B_f + 31, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,4 \\ -37,979 B_f^3 + 67,551 B_f^2 \\ -8,2099 B_f + 30,99, & \text{für } 0,4 \leq B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.18)$$

Beschreibung der Gleichungen 3.13 bis 3.18

- B_f = Beladungsfaktor zwischen 0 (leer) und 1 (voll beladen)
 V_{EU_V} = spez. Verbrauch des Europaschiffs auf CEMENT V in MJ/km
 $V_{EU_{VI}}$ = spez. Verbrauch des Europaschiffs auf CEMENT VI in MJ/km
 V_{RHC_V} = spez. geleistete Arbeit des Rhein-Herne-Kanalschiffs auf CEMENT V in kWh/km
 $V_{RHC_{VI}}$ = spez. geleistete Arbeit des Rhein-Herne-Kanalschiffs auf CEMENT VI in kWh/km
 $V_{Gr.Rh_V}$ = spez. geleistete Arbeit des großen Rheinschiffs auf CEMENT V in kWh/km
 $V_{Gr.Rh_{VI}}$ = spez. geleistete Arbeit des großen Rheinschiffs auf CEMENT VI in kWh/km

Für den Roll-on-Roll-off-Ponton (RoRo-Ponton) mit Schubschiff ist eine bestimmte Strecke vorgegeben und der Gesamtdieserverbrauch beim Befahren jener Strecke bekannt, siehe Tabelle 2.8. Aus jenen Faktoren wird durch eine Division der spezifische Verbrauch ermittelt. Anschließend wird die Verbrauchskurve je Beladungsfaktor in Abbildung 3.5 konstruiert. Die fehlenden Stützstellen werden auf der Grundlage ermittelt, dass das Verhältnis zwischen dem Mittelwert des Verbrauchs und dem Verbrauch durch die Fahrt „zu Tal“ bzw. „zu Berg“ beim RoRo-Ponton mit Schubschiff das gleiche ist, wie beim großen Rheinschiff, vgl. [23]. Gleichung 3.19 zeigt den Verlauf der spezifischen Verbrauchskurve des RoRo-Pontons mit Schubschiff.

$$V_{RoRo-Ponton}(B_f) = \begin{cases} \frac{1018-876}{0,4} B_f + 876, & \text{für } 0 \leq B_f < 0,4 \\ -377 B_f^2 + 1300 B_f + 558, & \text{für } 0,4 \leq B_f \leq 1 \end{cases} \quad (3.19)$$

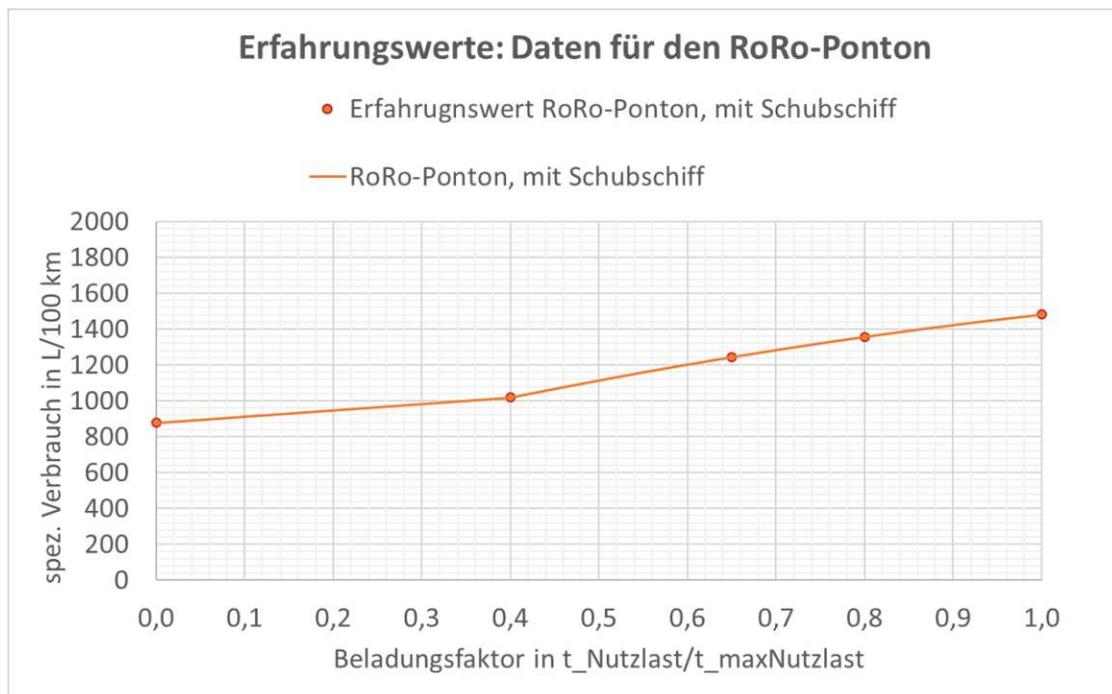


Abbildung 3.5: Einfluss des Beladungsfaktors auf den Dieselverbrauch des RoRo-Pontons mit Schubschiff, siehe Tabelle 2.8

3.5.3 Berechnung des Verbrauchs des RoRo-Schiffs

Die Berechnung des Verbrauchs des RoRo-Schiffs, siehe Tabelle 2.7 wurde so konzipiert, dass spezifische Verbrauchswerte „zu Tal“ und „zu Berg“ vor der Berechnung, in L/100 km, durch den Anwender des Berechnungstools festgelegt werden.

3.5.4 Vereinheitlichung der Berechnung

In Abschnitt 3.5.2 zeigen manche Verbrauchskurven direkt den Unterschied der Fahrt „zu Tal“ und „zu Berg“ und andere noch nicht. Die Rhenus-Daten in Abbildung 3.1 stellen das Verhältnis der Verbrauchswerte „zu Tal“ und „zu Berg“ dar. Daraus ergeben sich wie Gleichung 3.21 und Gleichung 3.22 zeigen die Faktoren je Beladungsgrad und Schiffstyp, wobei der durchschnittliche Verbrauch wie in Gleichung 3.20 gezeigt ermittelt wird. Diese Faktoren, siehe Abbildung 3.6, werden nun auf alle anderen Schiffsdaten übertragen und damit erhält jede Kurve einen Verbrauchswert „zu Tal“ und „zu Berg“. Hierbei ist zu erwähnen, dass auf den RoRo-Ponton mit Schubschiff die Faktoren des großen Rheinschiffes

angewendet werden. Diese Vorgangsweise wurde in Übereinstimmung mit [23] so festgelegt.

$$V_D = \frac{V_B + V_T}{2} \tag{3.20}$$

$$V_{fB} = \frac{V_B}{V_D} \tag{3.21}$$

$$V_{fT} = \frac{V_T}{V_D} \tag{3.22}$$

Beschreibung der Gleichungen 3.5 bis 3.8

V_{fB} = Verbrauchsfaktor für die Fahrt „zu Berg“

V_B = spezifischer Verbrauchswert „zu Berg“ des jeweiligen Schiffes in L/100 km

V_D = durchschnittlicher spezifischer Verbrauchswert des jeweiligen Schiffes in L/100 km

V_{fT} = Verbrauchsfaktor für die Fahrt „zu Tal“

V_T = spezifischer Verbrauchswert „zu Tal“ des jeweiligen Schiffes in L/100 km

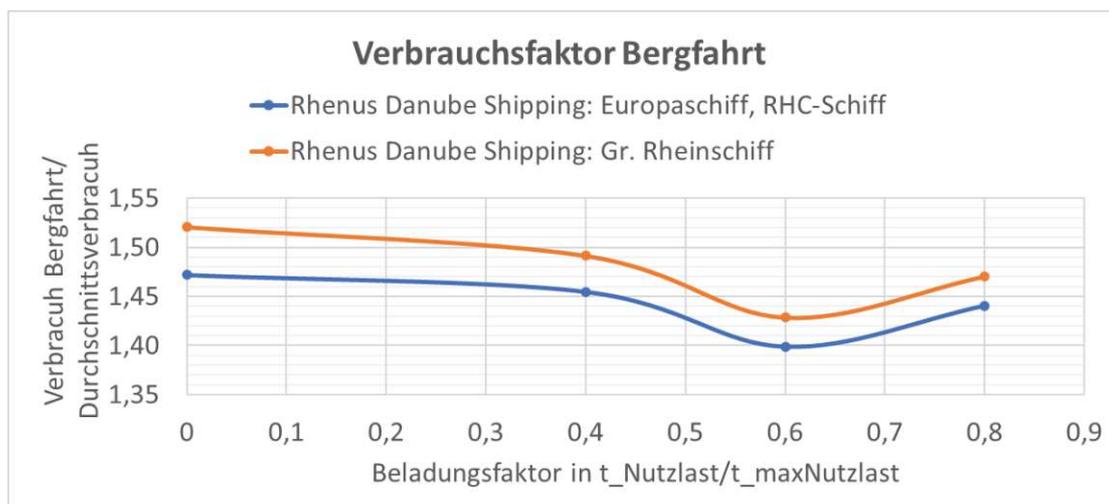


Abbildung 3.6: Verbrauchsverhältnisse der Fahrt „zu Berg“ und „zu Tal“

Die Datenpunkte in Abbildung 3.2 beschreiben den spez. Dieserverbrauch in MJ/km, während die Datenpunkte aus den Abbildungen 3.3 und 3.4 die vom Motor geleistete spez. Arbeit in kWh/km zeigen. Die Abbildungen 3.1 und 3.5 zeigen Datenpunkte des Dieserverbrauchs in L/100 km.

Für jedes betrachtete Schiff sollen sowohl Dieserverbrauch in MJ und L als auch die vom Motor geleistete Arbeit in kWh errechnet werden. Dafür werden die Umrechnungsfaktoren für den gewählten Treibstoff „Diesel B7“, aus Tabelle 2.19 verwendet.

3.5.5 Streckenberechnung der Binnenschifffahrt

Bisher wurden spezifische Werte pro Kilometer berechnet. Um nun den Energieverbrauch eines Transportes zu erhalten, muss noch die zurückgelegte Strecke ermittelt werden.

Hierbei wird darauf geachtet in welche Richtung gefahren wird, um die jeweilige Strömungsrichtung des Fließgewässers zu berücksichtigen und somit die Verbrauchsfaktoren aus Abbildung 3.6 korrekt anzuwenden.

Alle Kanäle können annähernd als ruhende Gewässer angenommen werden, die Fließgeschwindigkeit ist also vernachlässigbar. Außerdem gilt auf Kanälen eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 11 km/h für Binnenschiffe des Gütertransportes, vgl. [26].

Für die Berechnung der zurückgelegten Kilometer je Wasserstraße zwischen dem gewählten Starthafen und Zielhafen eines Transportes, werden die Flusskilometerdaten aus den Tabellen 2.13 und 2.14 verwendet.

3.5.6 Ermittlung der Emissionen des Schiffs-Transportes

Die treibhaustechnisch relevanten Gase werden auch hier wie in Abschnitt 3.4.5 laut DIN EN 16258 in einem CO₂e (Kohlendioxid-Äquivalent) zusammengefasst, vgl. [1].

Dieser Wert wird anhand des Treibstoffverbrauches eines Transportes über den CO₂e-Faktor je L aus Tabelle 2.19 ermittelt. Wie jener Faktor zustande kommt beschreibt die Norm DIN EN 16258, vgl. [1], (Anhang der Norm).

Die weiteren Emissionen wie Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Feinstaub werden aufgrund der Grenzwerte aus der EU Norm für Emissionsgrenzwerte von Nicht-Straßenfahrzeugen, anhand der Werte für Binnenschiffe der Stufe V berechnet, vgl. [32]. Dabei werden die Faktoren aus Tabelle 2.21 mit der vom Motor geleisteten Arbeit in kWh multipliziert.

3.5.7 Kalkulation der Dauer eines Binnenschiffstransportes

Für die Berechnung der Dauer des Transportes wird je nach Schiff, je nach Wasserstraße die entweder „zu Tal“ oder „zu Berg“ befahren wird und je nach Beladungsfaktor, eine andere Geschwindigkeit gewählt, siehe Tabelle 2.9 und Tabelle 2.7. Hierbei wird die Annahme getroffen wird, dass bis zum zugehörigen Beladungsfaktor im Zusatz in Tabelle 2.9 die Geschwindigkeit der jeweiligen Spalte verwendet wird. Es gibt hierbei also keine Interpolation. Die Dauer der Fahrt wird durch Division der Strecke durch die Geschwindigkeit errechnet. Zusätzlich zur effektiven Fahrtzeit wird auch der Zeitaufwand durch Schleusungen berücksichtigt. Die Anzahl der Schleusen für den betrachteten Transport wird durch eine vereinfachte Rechnung ermittelt. In der Beschreibung von Gleichung 3.23 bezeichnet der „befahrene Streckenabschnitt“ die zurückgelegten Kilometer eines Transportes auf der jeweiligen Wasserstraße. Darin ist die Anzahl der Schleusen unbekannt. Auf der „Gesamtlänge der Wasserstraße“ hingegen, ist die Anzahl der Schleusen bekannt. Die durchschnittliche Schleusungsdauer des jeweiligen Streckenabschnittes kann somit wie in Gleichung 3.23 beschrieben ermittelt werden.

$$D_{Schl_{ges}} = \sum_{k=1}^m \frac{L_{bef_k}}{L_{bek_k}} \text{Schleusen}_k D_{Schl} \quad (3.23)$$

Beschreibung der Gleichung 3.23

- k = Zählvariable der jeweils betrachtete Wasserstraße
 m = Anzahl aller betrachteten Wasserstraßen
 $D_{Schl_{ges}}$ = gesamte Dauer der Schleusungen eines Transportes in h
 L_{bef_k} = befahrener Streckenabschnitt eines Transports des Flusses k in km
 L_{bek_k} = Geesamtlänge der Wasserstraße k die mit Güterschiffen befahrbar ist in km
 Schleusen_k = Anzahl der Schleusen im Streckenabschnitt L_{bek_k}
 D_{Schl} = Dauer einer Schleusung in h, siehe Absatz 3.3.6

Die Berechnung der Dauer der verschiedenen Transporte wird immer anhand eines Transportmittels des betrachteten Typs berechnet. Da in vielen Fällen aber mehr als ein LKW oder Binnenschiff für einen Transport benötigt werden, wird die Anzahl der erforderlichen Transportmittel zusätzlich im Ergebnis abgebildet. Diese Ergebnisse dienen als Hilfestellung für die Ermittlung der gesamten Transportdauer aller Fahrzeuge. Jene Gesamtdauer wird in dieser Diplomarbeit nicht berechnet.

3.6 Darstellung der Ergebnisse

Sollte sich der Startpunkt und/oder Zielpunkt nicht an einem Hafen befinden, so wird in der Berechnung der Schifffahrt ein sogenannter Vorlauf und/oder Nachlauf zwischen dem naheliegendsten Hafen zum Start- und/oder Zielpunkt miteinbezogen. Der Vor- und Nachlauf wird mit den gleichen LKW berechnet die im Vergleich des betrachteten Transportes herangezogen werden. Die Berechnung erfolgt äquivalent zur Berechnung des direkten LKW-Transportes, siehe Abschnitt 3.4, sie wird im Ergebnis allerdings der Schifffahrt hinzugerechnet. Nachdem alle Berechnungen abgeschlossen sind, werden die beiden Transportvarianten in Balkendiagrammen miteinander verglichen. Dabei wird der Energieaufwand einmal in L/100 km und zusätzlich in MJ präsentiert, um normkonform nach DIN EN 16258 zu bleiben und zugleich ein für die Praxis schnell vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Zusätzlich werden die Ergebnisse jedes Transportes in Tabellenform im Detail aufgelistet.

3.7 Vergleich mit anderen Berechnungsansätzen

3.7.1 Berechnungsfaktor MJ/tkm

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [1] angeführt:

Die Norm DIN EN 16258 empfiehlt eine weitere Berechnungsmethode zur Ermittlung des Energieaufwandes und der Emissionen eines Transportmittels. Dabei soll der durchschnittliche Verbrauch durch die durchschnittliche Beladung und die gesamt zurückgelegten Kilometer dividiert werden, um einen bestimmten MJ/tkm Wert zu erhalten. Diese Daten sollen aus einem vorher festgelegten Fahrzeugeinsatz-System stammen, damit sind zum Beispiel Durchschnittswerte einer bestimmten LKW-Flotte über einen betrachteten Zeitraum gemeint. Dieser Wert wird als nicht variabler Berechnungsfaktor für das bestimmte Fahrzeugeinsatz-System angewandt.

Zur Ermittlung des Energieaufwandes und der Emissionen eines bestimmten Transportes wird anschließend die zu transportierende Masse und die zurückgelegte Strecke mit dem vorher errechneten MJ/tkm-Wert multipliziert, siehe Gleichung 3.24.

$$V_{TM} = \frac{V_{fTM} \text{ Strecke } Bel}{1000} \quad (3.24)$$

Beschreibung der Gleichung 3.24

V_{TM} = Energieaufwand des Transportmittels bei einem Transport in MJ

V_{fTM} = Verbrauchsfaktor des Transportmittels in MJ/tkm

Strecke = zurückgelegte Strecke des Transportes in km

Bel = Beladung des Transportmittels in kg

Das Online-Berechnungs-Tool von „EcoTransIT“ verwendet die in diesem Abschnitt behandelte Methode zur Berechnung des Energieaufwandes als Grundlage, vgl. [17] und [20].

Diese Berechnungsvariante wird innerhalb dieser Diplomarbeit weder im Balkendiagramm abgebildet noch für die Emissionsrechnung herangezogen. Die Ermittlung des Energieauf-

wandes in MJ über den MJ/tkm-Wert der einzelnen Transportmittel, siehe Kapitel 2, dient in dieser Arbeit nur als kleiner Zusatz, soll aber nicht repräsentativ für das Vergleichsergebnis sein.

Den MJ/tkm-Wert als Grundlage für die Berechnung zu verwenden ist zwar in der Norm DIN EN 16258 empfohlen, impliziert aber eine lineare Abhängigkeit zwischen Verbrauch und Beladung die beim Binnenschiff in der Praxis nicht gegeben ist. Das Ergebnis ist in jenem Fall nur nahe der Durchschnittsbeladung realitätsnah. In der Praxis führen unbeladene Transportstrecken zur Erhöhung des Gesamtverbrauches, dies bleibt in dieser Berechnungsvariante unberücksichtigt. Abbildung 3.7 zeigt die Unterschiede zwischen der Berechnungsvariante 1 ausgehend von den MJ/tkm-Werten und der Berechnungsvariante 2 die in dieser Diplomarbeit angewendet wird, siehe Abschnitt 3. Nur bei durchschnittlicher Beladung, in Abbildung 3.7 Beladungsfaktor von ca. 0,3 stimmen die beiden Kurven überein. Während bei Variante 2 Daten für voll beladene und unbeladene Transporte gegeben sind, ist für Variante 1 nur der Verbrauchswert bei Durchschnittsbeladung bekannt, daher ist die Kurve von Variante 2 deutlich realitätsnäher, vgl. [22].

Zusammenfassend ist die MJ/tkm-Berechnungsvariante nur für durchschnittlich beladene Transporte interessant, da in dieser Arbeit individuelle Transporte mit einer breiten Spanne an Beladungsfaktoren betrachtet werden, findet jene Methode hier keine Anwendung.

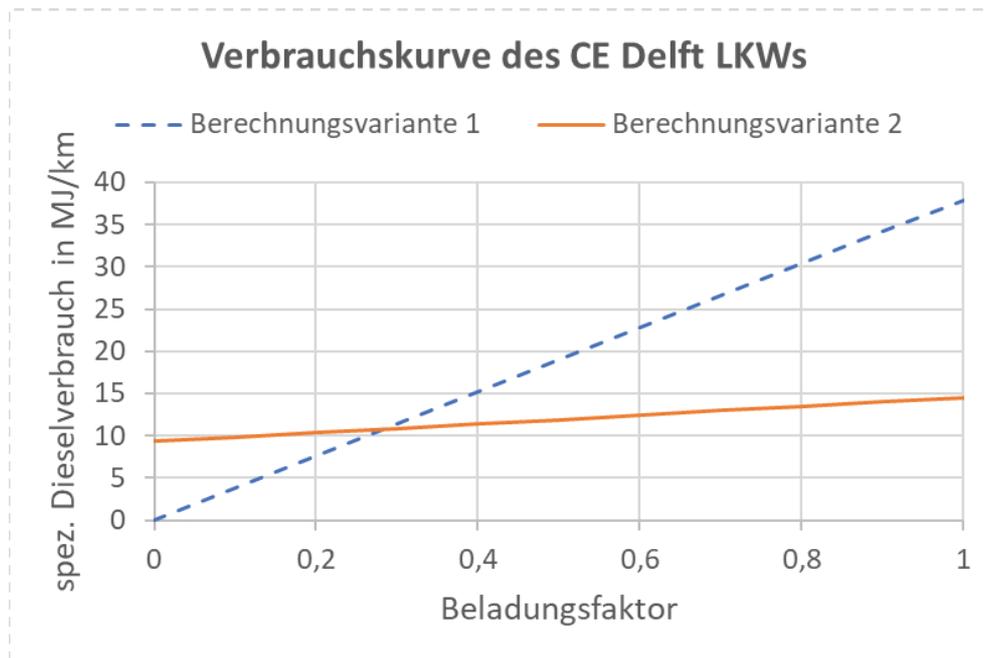


Abbildung 3.7: Vergleich der Berechnungsmethoden anhand des Beipiels eines CE Delft-LKW, siehe Tabelle 2.1

3.7.2 Berechnung durch Grenzallokation der Güter

Die Grenzallokation ist beim Frachttransport die Zuordnung bestimmter Werte zu den einzelnen Gütern auf Basis von nicht-physikalischen Kriterien. Werden bei einem Sammeltransport mehrere Güter transportiert, so wird bei der Grenzallokation zum Beispiel der Treibstoffverbrauch auf die einzelnen Güter aufgeteilt.

Die sogenannten Allokationsparameter (entweder in kg oder in m^3) dienen der Berechnung des Anteils an Treibstoffverbrauch oder Emissionen, der einem bestimmten Gut zugeordnet werden soll.

Diese Berechnungsmethode findet bei Sammeltransporten Anwendung, bei denen unterschiedliche Güter von einem Transportmittel vom gleichen Start an verschiedene Endpunkte transportiert werden. Da sich diese Diplomarbeit hauptsächlich mit dem Transport von Gütern großer Abmessungen beschäftigt und die Strecke eines Transportes einen bestimmten Start und Endpunkt haben soll, wird diese Berechnungsvariante hier nicht weiter berücksichtigt.

Kapitel 4

Beschreibung des Berechnungstools

4.1 Allgemeines

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde ein Berechnungstool mit Hilfe des Programms „Microsoft Excel“ entwickelt. Dieses Kapitel soll eine kurze Anleitung sein, wie das Tool zu bedienen ist.

Abbildung 4.1 zeigt das Interface des Berechnungstools. Die einzelnen Themenbereiche Güter, Transportmittel und Strecke sind grau hinterlegt. Bei der Eingabe der Daten des gewünschten Transportes wird von links nach rechts und von oben nach unten vorgegangen. Über den Eingabefeldern in Gelb und hellem Orange befinden sich die jeweils zugehörigen beschreibenden Felder. Sollte ein Eingabefeld für den Nutzer unklar sein, so ist bei einigen Feldern ein Hinweis hinterlegt, sobald der Mauszeiger darüber platziert wird. Grüne Felder sind informative Felder, in diesen kann keine Eingabe getätigt werden. Sobald alle Eingaben fertig sind, werden diese durch Klicken auf das Feld „Transport hinzufügen“ in die blaue Tabelle am unteren Rand übertragen. Sollten unzureichende oder falsche Eingaben gemacht worden sein macht das Programm den Nutzer nach einem Klick auf den Button „Transport hinzufügen“ automatisch darauf aufmerksam. Dies verschafft einerseits einen Überblick über den hinzugefügten Transport und zum anderen können in jener Tabelle mehrere Eingaben aufgelistet werden, um zum Beispiel unterschiedliche Güter in einem Transport zu berücksichtigen. Sollte ein Fehler in der Eintragung eines Wertes in der unteren blauen Tabelle

entdeckt werden, so können alle Zeilen der Tabelle durch klicken des Buttons „Alle Löschen“ gelöscht werden. Des Weiteren können einzelne Zellen innerhalb der Tabelle ausgewählt und ausgebessert werden.

Sobald die Tabelle am unteren Ende der Eingabeseite für einen Transport vollständig ist, kann auf den Button „Berechnung“ gedrückt werden und es wird automatisch die Ergebnis-seite angezeigt, siehe Abschnitt 4.5.



Abbildung 4.1: Eingabeseite des Berechnungstools

4.2 Wahl der Güter



Abbildung 4.2: Erster Themenbereich der Eingabeseite

Abbildung 4.2 zeigt die erste Spalte der Eingabeseite vergrößert. Zunächst wird durch Klicken auf das gelbe Feld unter “Transportgut, ein Gut aus der Auswahlliste gewählt.

Dadurch werden in den beiden hellgrünen Feldern unterhalb von ‘Masse,’ und ‘Grundfläche,’ automatisch die zugehörigen Daten zum ausgewählten Gut angezeigt. Möchte ein Nutzer ein eigenes Gut hinzufügen so kann unter dem Feld ‘Transportgut,’ ‘Eingabe neu,’ ausgewählt werden und die entsprechende Masse, sowie die Grundfläche des neuen Gutes in die hell orange hinterlegten Felder eingetragen werden.

Anschließend wird unter Anzahl noch ausgewählt wie viele Stück des ausgewählten Gutes transportiert werden sollen.

4.3 Wahl der Transportmittel

Wahl der Transportmittel:	
	Nur für Erfahrungswerte:
LKW-Typ	BOLK-Zugmaschine
CE Delft 16 44 t	
	BOLK-Auflieger
	BOLK-spez.V. leer
	BOLK-spez.V. Nutzlast
	Nur für RoRo-Schiff:
Schiffstyp	RoRo-Verbrauch Berg
Gr. Rheinschiff CE Delft	
	RoRo-Verbrauch Tal

Abbildung 4.3: Zweiter Themenbereich der Eingabeseite

In Abbildung 4.3 kann unter dem Feld ‘LKW-Typ’ aus einem Dropdown-Menü der gewünschte LKW für den Transport ausgewählt werden. Sollte so wie in Abbildung 4.3 der LKW aus der Statistik von CE Delft ausgewählt sein so sind die Felder rechts davon irrelevant. Möchte man allerdings einen LKW aus Erfahrungswerten für den Transport heranziehen, so müssen alle Felder die mit ‘Bolk’ beschriftet sind ausgefüllt werden. Dabei sind unter den Feldern ‘Bolk-Zugmaschinen’ und ‘Bolk-Auflieger’ Dropdown-Menüs zur

Auswahl der Daten aus den Tabellen 2.5 und 2.6 und unter „Bolk-spez.V. leer“ und „Bolk-spez.V. Nutzlast“ müssen die Erfahrungswerte der Verbrauchsfaktoren eingetragen werden, siehe Abschnitt 3.4.2.

Unterhalb des Feldes „Schiffstyp“ kann nun aus einer Dropdown-Liste das gewünschte Schiff für den Transport ausgewählt werden. Wird dabei das „RoRo-Schiff“ ausgewählt, so müssen in die Felder „RoRo-Verbrauch Berg“ und „RoRo-Verbrauch Tal“ die jeweiligen spezifischen Verbrauchswerte, durch den Benutzer des Tools, eingegeben werden.

Abbildung 4.4 zeigt die spezifischen Verbräuche der aktuellen Auswahl der Transportmittel unmittelbar an.

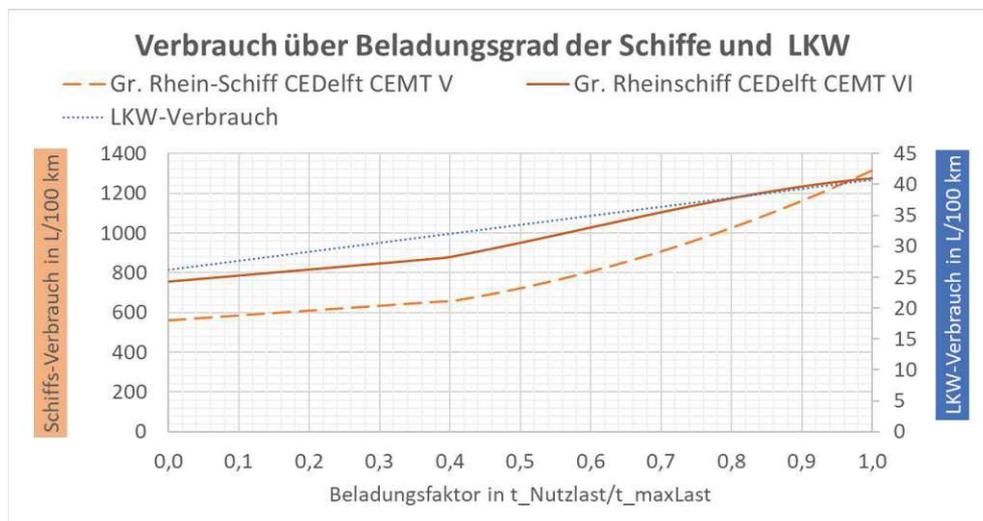


Abbildung 4.4: Zweiter Themenbereich der Eingabeseite

4.4 Wahl der Strecke

Wahl der Strecke:		
LKW-Strecke:		
LKW-Gesamtstrecke in km	LKW-Leerfahrtenanteil der Gesamtstrecke in %	
2378	15	
Schiffs-Strecke:		
Starthafen	Schiffs-Vorlauf mit LKW in km	Leerfahrtenanteil von Vorlauf und Nachlauf in %
Antwerpen	55	
Zielhafen	Schiffs-Nachlauf mit LKW in km	
Konstanza	43	100

KM-Ermittlung:
Startort Brüssel
Zielort Medgidia, Rumänien
Google Maps LKW
Häfen:
Hafenkarte

Abbildung 4.5: Dritter Themenbereich der Eingabeseite

Abbildung 4.5 zeigt sowohl die in Gelb gehaltenen Felder für die verpflichtende Eingabe, als auch orange hinterlegte Felder die bei Bedarf hinzugezogen werden können.

Für die Eingabe der zurückgelegten Strecke mit dem LKW ist es erforderlich die Distanz zwischen Startpunkt und Zielpunkt zu kennen und in das Feld unter „LKW-Gesamtstrecke“ einzugeben. Im Eingabefeld rechts daneben ist der sogenannte Leerfahrtenanteil der Gesamtstrecke in % einzutragen. Beträgt der Leerfahrtenanteil zum Beispiel 15 %, so werden in der Berechnung zu der eingegebenen Strecke von 2378 km eine weitere Strecke von 357 km ohne Beladung hinzugerechnet.

Anschließend werden unter den Feldern „Starthafen“ und „Zielhafen“ aus der Auswahlliste Häfen für die Binnenschifffahrt ausgewählt. Sollte sich der Startpunkt und/oder Zielpunkt nicht direkt an einem Hafen befinden, so entsteht ein Schiffs-Vorlauf und/oder ein Schiffs-Nachlauf mit LKW.

Sollte die Kilometeranzahl der LKW-Strecken nicht bekannt sein, so kann die „KM-Ermittlung“ Hilfestellung leisten. Dabei wird unter den Feldern „Startort“ und „Zielort“ der Abfahrts-

ort und das Ziel des Transportes eingegeben. Diese Eingabe kann eine Adresse, ein Ort oder Koordinaten sein. Dabei ist zu beachten, dass die Eintragung ohne Abstände erfolgen muss, um korrekte Ergebnisse zu erhalten. Wird anschließend auf den Button „Google Maps LKW“ geklickt so werden umgehend drei Browserfenster von „Google Maps“ geöffnet. Im ersten Fenster wird die LKW-Gesamtstrecke abgebildet. Im zweiten Fenster wird die LKW-Strecke zwischen dem Startort und dem eingegebenen Starthafen abgebildet (Vorlauf der Schifffahrt) und im dritten Fenster die Strecke zwischen dem eingegebenen Zielhafen und dem Zielort gezeigt (Nachlauf der Schifffahrt). Aus jenen Browserfenstern können nun die durch „Google Maps“ errechneten Kilometer in das Berechnungsprogramm übertragen werden. Auch der Vor- und der Nachlauf der Schifffahrt per LKW beinhaltet einen Leerfahrtenanteil der nach gleichem Prinzip wie zuvor einzutragen ist.

Die „Hafenkarte“ zeigt die wichtigsten Frachthäfen auf den in dieser Arbeit betrachteten Wasserstraßen, siehe Absatz 1.2.1, vgl. [18], [40], [10], [11] und [36].

4.4.1 Leerfahrt Binnenschiff

Der Leerfahrtenanteil für die Schifffahrt wurde nicht direkt als Eingabefeld implementiert, da Binnenschiffe zumeist am Zielhafen des eines Transportes mit anderen Gütern für die Retourfahrt beladen werden, vgl. [23]. Dennoch kann eine reine Leerfahrt per Binnenschiff berücksichtigt werden, indem unter dem Feld „Transportgut“ „Eingabe neu“ ausgewählt wird, anschließend die einzugebende Masse und die Grundfläche 0 gesetzt werden und unter den Feldern „LKW-Gesamtstrecke“ „Schiffs-Vorlauf mit LKW“ und „Schiffs-Nachlauf mit LKW“ 0 eingetragen wird. Abschließend wird das gewünschte Binnenschiff unter dem Feld „Schiffstyp“ ausgewählt und der Starthafen und Zielhafen der leer zu fahrenden Strecke ausgewählt. Durch Klicken auf den Button „Transport hinzufügen“ und Bestätigen der Warnmeldung, ob die Berechnung ohne Berücksichtigung von LKW durchgeführt werden soll, wird die Binnenschiffsleerfahrt der Transporttabelle (Abbildung 4.1 in blau) hinzugefügt.

4.5 Ergebnisseite

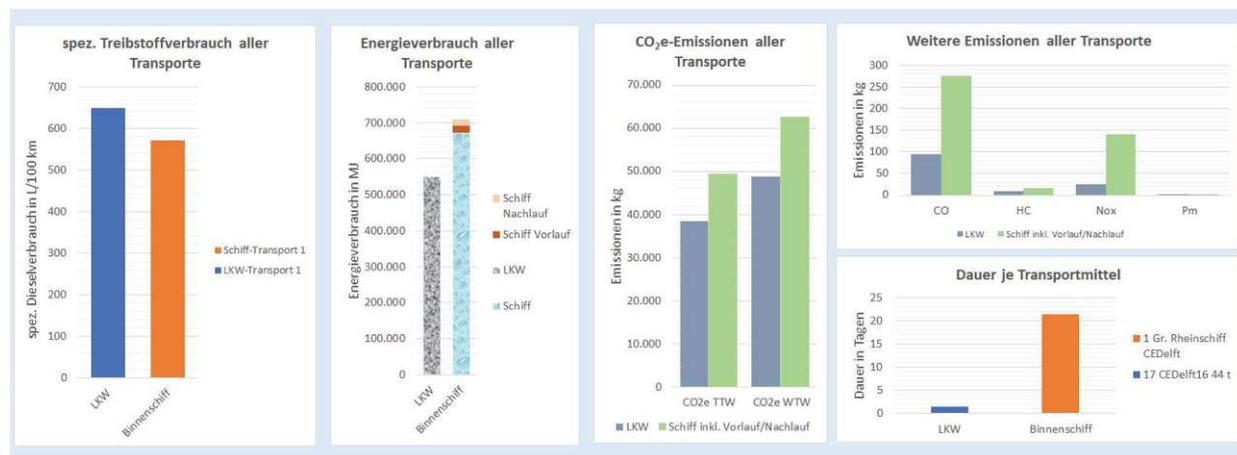


Abbildung 4.6: Darstellung der Ergebnisse in Balkendiagrammen

Das Ergebnis der Berechnung wird wie in Abbildung 4.6 gezeigt in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Es wird der direkte Vergleich des Treibstoffverbrauchs, der Emissionen und der Dauer zwischen Binnenschiff- und LKW-Transport abgebildet.

Im Diagramm „spez. Treibstoffverbrauch aller Transporte“ soll von der Strecke unabhängig gezeigt werden, ob bei den betrachteten Transporten das Binnenschiff oder der LKW einen höheren Treibstoffverbrauch haben. Vor- und Nachlauf werden in diesem Diagramm nicht berücksichtigt, da diese den gleichen spezifischen Treibstoffverbrauch haben wie der LKW-Direkttransport. Den Einfluss des Vorlaufs und des Nachlaufs der Schifffahrt auf den gesamten Energieverbrauch der Transporte wird anschließend im Diagramm „Energieverbrauch aller Transporte“ abgebildet.

Im Diagramm „Dauer je Transportmittel“ wird auf der Seite der Binnenschiffe die Dauer des Vor- und Nachlaufs vernachlässigt, da dieser verhältnismäßig zur Dauer der Schifffahrt, innerhalb dieser vereinfachten Berechnung, vernachlässigbar ist. Eine detailliertere Betrachtung der Ergebnisse und Balkendiagramme finden in Kapitel 5 statt.

Für den Fall, dass der Nutzer des Tools mehr Details zu den einzelnen Transporten bzw. den Ergebnissen wissen möchte, wurden alle Ergebnisse der Berechnung strukturiert in Tabellen eingetragen. Diese Tabellen befinden sich auf der Ergebnisseite unterhalb der Balkendiagramme.

Die dunkel hinterlegten Bereiche der Tabelle bilden Überschriften und zeigen die Nummer des Transportes an, zum Beispiel "Transport 1,, in Abbildung 4.1, sowie das jeweilige Transportmittel, zum Beispiel "LKW CE DELFT 16 / 44,9 t GVW (NL),, in Abbildung 4.1. In jenen Tabellen werden zunächst die eingegebenen Parameter des betrachteten Transportes angeführt und anschließend die Ergebnisse auflistet.

Die Ergebnisse der Vorläufe und der Nachläufe der Schifffahrt aller berechneten Transporte werden jeweils aufsummiert und die Summe wird im Balkendiagramm abgebildet.

Der Energieaufwand „aus MJ/tkm“ siehe in Abbildung 4.1, spielt wie bereits erwähnt in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle und ist nicht in den Balkendiagrammen abgebildet. Der Energieaufwand eines „individuellen Transports“, siehe in Abbildung 4.1, zeigt den Energieverbrauch, gemessen am Heizwert des Diesels, eines Transports, der nach der in dieser Diplomarbeit verwendeten Methode ermittelt wurde, siehe Kapitel 3.

Ergebnisse der LKW				Ergebnisse der Binnenschiffe			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung	Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Transport 1				Transport 1			
Anzahl der Güter	17	-	Mähdrescher	Antwerpen-Konstanza			
LKW-Typ Leermasse	7,70	t	CE Delft 16 44 t	Anzahl der Güter	17	-	Mähdrescher
Auflieger-Typ Leermasse	8,00	t		Strecke Ara-Kanäle	109	km	
Anzahl der LKW	17	-		Strecke Rhein	462	km	zu Berg
Nutzlast pro LKW	16,28	t	Durchschnitt	Strecke Main	384	km	zu Berg
Grundfläche pro LKW	37	m ²	Durchschnitt	Strecke Main-Donau-Kanal	171	km	
Strecke	2378	km		Strecke Kelheim-Passau	178	km	Donauabschn.
Strecke Leerkilometer	357	km		Strecke Donau	1933	km	zu Tal
LKW CE DELFT 16 / 44,9 t GVW (NL)				Strecke Konstanza-Kanal	64	km	
				Gesamtstrecke	3301	km	
Energieaufwand Version 1	855.313	MJ	aus MJ/tkm	CE DELFT 16: Großes Rheinschiff M8			
Energieaufwand Version 2	550.793	MJ	individueller Tr.	Verbrauchs faktor Tal/Ø	0,48	-	
spez. Energieaufwand	232	MJ/km		Verbrauchs faktor Berg/Ø	1,52	-	
Dieserverbrauch	15.454	L		Energieaufwand Version 1	3.628.124	MJ	aus MJ/tkm
spez. Dieserverbrauch	650	L/100 km		Energieaufwand Version 2	672.827	MJ	individueller Tr.
geleistete Motorarbeit	63.334	kWh		spez. Energieaufwand	203,83	MJ/km	
CO ₂ -Äquiv. TTW	38.400	kg		Dieserverbrauch	18.865	L	
CO ₂ -Äquiv. WTW	48.680	kg		spez. Dieserverbrauch	571	L/100 km	
CO TTW	95,00	kg		geleistete Motorarbeit	77.315	kWh	
HC TTW	8,23	kg		Anzahl der Schiff(e)	1	-	Gr. Rheinschiff CE Delft
NO _x TTW	25,33	kg		Beladungsfaktor Schiff(e)	0,09	% t/tmax	
PM TTW	0,63	kg		CO ₂ -Äquiv. TTW	46.876	kg	DIN 16258
				CO ₂ -Äquiv. WTW	59.426	kg	DIN 16259
				CO TTW	270,60	kg	Stuve V Grenze
				HC TTW	14,69	kg	Stuve V Grenze
				NO _x TTW	139,17	kg	Stuve V Grenze
				PM TTW	1,16	kg	Stuve V Grenze

Tabelle 4.1: Darstellung der Ergebnisse für LKW und Binnenschiff in Tabellenform

Ergebnisse der LKW				Ergebnisse der LKW			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung	Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Transport	1	Vorlauf		Transport	1	Nachlauf	
Anzahl der Güter	17	-	Mähdrescher	Anzahl der Güter	17	-	Mähdrescher
LKW-Typ Leermasse	7,70	t	CE Delft16 44 t	LKW-Typ Leermasse	7,70	t	CE Delft16 44 t
Auflieger-Typ Leermasse	8,00	t		Auflieger-Typ Leermasse	8,00	t	
Anzahl der LKW	17	-		Anzahl der LKW	17	-	
Nutzlast pro LKW	16,28	t	Durchschnitt	Nutzlast pro LKW	16,28	t	Durchschnitt
Grundfläche pro LKW	37	m ²	Durchschnitt	Grundfläche pro LKW	37	m ²	Durchschnitt
Strecke	55	km		Strecke	43	km	
Strecke Leerkilometer	55	km		Strecke Leerkilometer	43	km	
LKW CE DELFT 16 / 44,9 t GVW (NL)				LKW CE DELFT 16 / 44,9 t GVW (NL)			
Energieaufwand Version 1	19.782	MJ	aus MJ/tkm	Energieaufwand Version 1	15.466	MJ	aus MJ/tkm
Energieaufwand Version 2	20.160	MJ	individueller Tr.	Energieaufwand Version 2	15.762	MJ	individueller Tr.
spez. Energieaufwand	367	MJ/km		spez. Energieaufwand	367	MJ/km	
Dieserverbrauch	566	L		Dieserverbrauch	442	L	
spez. Dieserverbrauch	1.028	L/100 km		spez. Dieserverbrauch	1.028	L/100 km	
geleistete Motorarbeit	2.318	kWh		geleistete Motorarbeit	1.812	kWh	
CO ₂ -Äquiv. TTW	1.406	kg		CO ₂ -Äquiv. TTW	1.099	kg	
CO ₂ -Äquiv. WTW	1.782	kg		CO ₂ -Äquiv. WTW	1.393	kg	
CO TTW	3,48	kg		CO TTW	2,72	kg	
HC TTW	0,30	kg		HC TTW	0,24	kg	
NO _x TTW	0,93	kg		NO _x TTW	0,72	kg	
PM TTW	0,02	kg		PM TTW	0,02	kg	

Tabelle 4.2: Darstellung der Ergebnisse für den Vorlauf und den Nachlauf der Schifffahrt in Tabellenform

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Allgemeines

Um einen guten Überblick über den Vergleich von Transporten zwischen Binnenschiff und LKW zu geben werden 3 möglichst repräsentative Vergleiche ausgewählt und anschließend im Detail behandelt.

Um alle in dieser Diplomarbeit implementierten Wasserstraßen in die Beispielstrecke einzubinden wurde für alle 3 Beispiele als Startpunkt Brüssel in Belgien und als Zielpunkt Medgidia in Rumänien gewählt. Zum einen widerspiegelt diese Strecke vom Starthafen Antwerpen (Belgien) zum Zielhafen Konstanza (Rumänien) die Verbindung zwischen der Nordsee und dem schwarzen Meer und zum anderen werden damit auch ein Schiffsvorlauf, sowie ein Schiffsnachlauf berücksichtigt.

Die Beispiele sollen genauer analysieren, welchen Einfluss die verschiedenen zu transportierenden Güter auf die Vergleichsrechnung haben.

Für die Binnenschifffahrt werden bei allen drei Vergleichen, jeweils die gleiche Anzahl an Gütern mit Schiffen aus unterschiedlicher Datenquelle transportiert. Die Berechnung über Erfahrungswerte der Binnenschifffahrt, soll in den folgenden Vergleichen durch das große Rheinschiff der Rhenus-Daten erfolgen, da diese Datenquelle, aufgrund der Anzahl an Messpunkten, die zuverlässigste ist, siehe Tabelle 2.12. Für die Berechnung aus Daten von Statistiken wird das große Rheinschiff von CE Delft herangezogen, siehe Tabelle 2.4. Es

gilt je größer die Grundfläche eines Schiffes ist, desto effizienter der Transport, unter der Voraussetzung, dass das jeweilige Schiff möglichst voll beladen ist. Da die Binnenschiffe Europaschiff, sowie das Rhein-Herne-Kanalschiff die kleinsten Beladungsflächen besitzen und damit auch die geringste Effizienz aufweisen, werden diese in den repräsentativen Vergleichen nicht berücksichtigt.

In den Vergleichen wird die Anzahl der Güter so gewählt, dass keines der Transportmittel benachteiligt ist. Es wird darauf geachtet sowohl alle betrachteten Binnenschiffe und LKW, auf die Grundfläche bezogen möglichst voll zu beladen.

Ein „Vergleich von Transporten“ beinhaltet mehrere einzelne Transporte, siehe Abschnitt 1.1, da unterschiedliche LKW und Binnenschiffe aus verschiedenen Datenquellen, in einen Vergleich miteinbezogen werden.

5.1.1 Angaben für alle drei Transportvergleiche

Strecke

- Startpunkt: Brüssel in Belgien
Starthafen: Antwerpen
- Zielpunkt: Medgidia in Rumänien
Zielhafen: Konstanz

Binnenschiffe

- Großes Rheinschiff aus den Rhenus-Daten, siehe Tabelle 2.12
- Großes Rheinschiff aus der CE Delft-Statistik, siehe Tabelle 2.4

5.2 1. Vergleich von Transporten

5.2.1 Güter und zugehörige Transportmittel

Beim ersten Vergleich werden 34 Mähdrescher, siehe Tabelle 2.15, je Schiffstyp aus unterschiedlicher Datenquelle transportiert, siehe Absatz 5.1.1. Alle in diesem Vergleich betrachteten Transporte ergeben in Summe 68 Mähdrescher, aufgeteilt auf 4 Binnenschiffe.

Für den LKW Transport aus Erfahrungswerten werden 4 x 2-Zugmaschinen mit 3-Achs-Semi-Aufliegern, aus den Tabellen 2.5 und 2.6 gewählt. Des Weiteren werden LKW aus der Statistik von CE Delft, Tabelle 2.1 für den Vergleich herangezogen.

Um einen sinnvollen Vergleich zu bilden, müssen gleich viele Güter durch LKW und Binnenschiffe transportiert werden, daher werden je LKW-Typ 34 Mähdrescher transportiert.

5.2.2 Eingabetabelle Berechnungstool

	Güter	Anzahl	Masse	Grundfläche	LKW-Typ	LKW-Auflieger
	-	-	in t	in m ²	-	-
Tr. 1	Mähdrescher	34	16,275	37,36	Bolk-4 x 2	3-Achs-Semi
Tr. 2	Mähdrescher	34	16,275	37,36	CE Delft 16 44 t	

	Schiffstyp	Strecke	Vorlauf	Nachlauf	Starthafen	Zielhafen
	-	in km	in km	in km	-	-
Tr. 1	Gr. Rheinschiff Rhenus	2378	55	43	Antwerpen	Konstanz
Tr. 2	Gr. Rheinschiff CE Delft	2378	55	43	Antwerpen	Konstanz

	Bolk-V. leer	Bolk-V. Nutzl.	LF-Ant. S	LF-Ant. VL/NL	RoRo-V. Berg	RoRo-V. Tal
	in L/(100 km t)	in L/(100 km t)	in %	in %	in L/100 km	in L/100 km
Tr. 1	1	0,75	15	100		
Tr. 2			15	100		

Tabelle 5.1: Angabe der zu berechnenden Transporte des 1. Vergleichs, von der Transporttabelle der Eingabeseite des Tools

Die letzten sechs Spalten in der Tabelle 5.1 sind abgekürzt dargestellt. In der folgenden Auflistung werden diese im Detail erläutert:

- „Bolk V. leer“ beschreibt den Verbrauchsfaktor der leeren Kombination in $L/(100 \text{ km t})$, siehe Gleichung 3.4.
- „Bolk V. last“ beschreibt den Verbrauchsfaktor der Nutzlast in $L/(100 \text{ km t})$, siehe Gleichung 3.4
- „LF-Ant. S“ steht für den Leerfahrtenanteil der LKW Strecke, siehe Abschnitt 3.4.4.
- „LF-Ant. VL/NL“ steht für den Leerfahrtenanteil des Vorlaufs und des Nachlaufs der Schifffahrt mittels LKW, dieser beträgt üblicherweise 100 %, vgl. [22].
- „RoRo-V. Berg“ beschreibt den vor der Berechnung festgelegten Durchschnittsverbrauch des RoRo-Katamaran bei der Fahrt „zu Berg“, siehe in Abschnitt 3.5.3.
- „RoRo-V. Tal“ beschreibt den vor der Berechnung festgelegten Durchschnittsverbrauch des RoRo-Katamaran bei der Fahrt „zu Tal“, siehe in Abschnitt 3.5.3.

5.2.3 Ergebnisse Berechnungstool

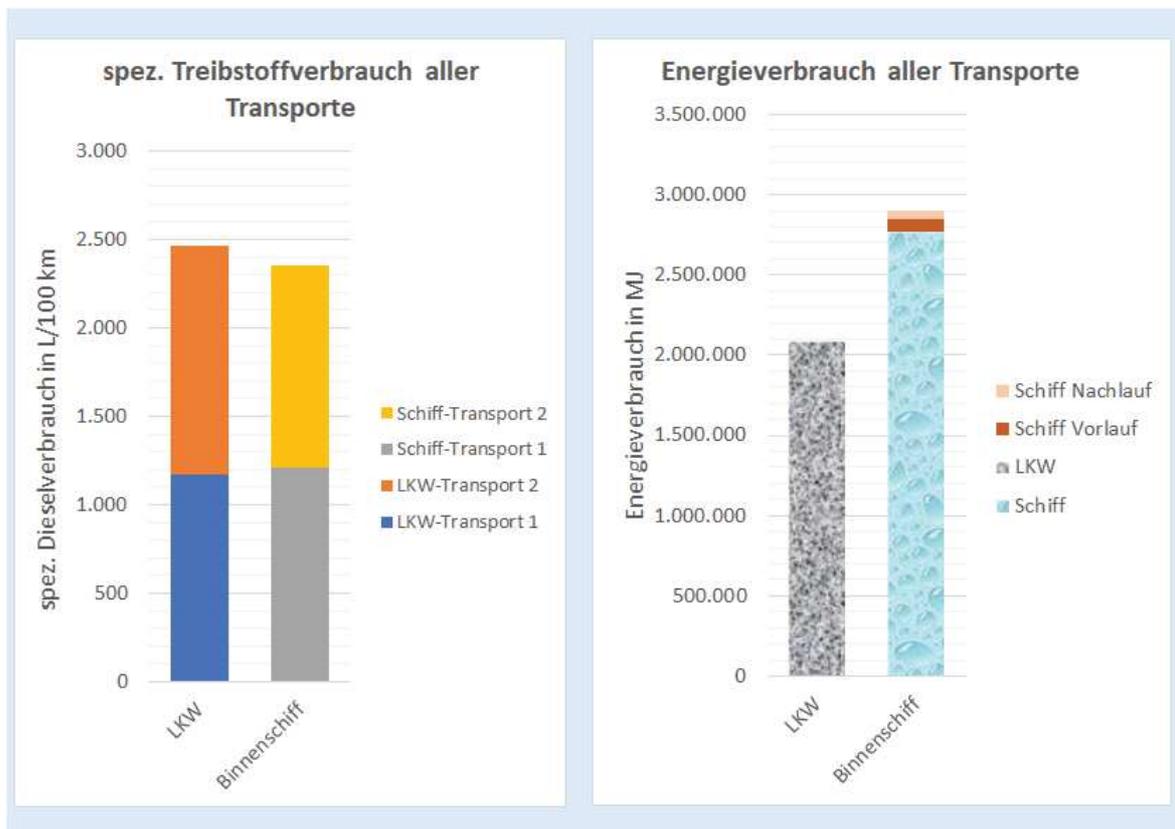


Abbildung 5.1: Kraftstoffverbrauch und Energieeinsatz des 1. Vergleichs von Transporten

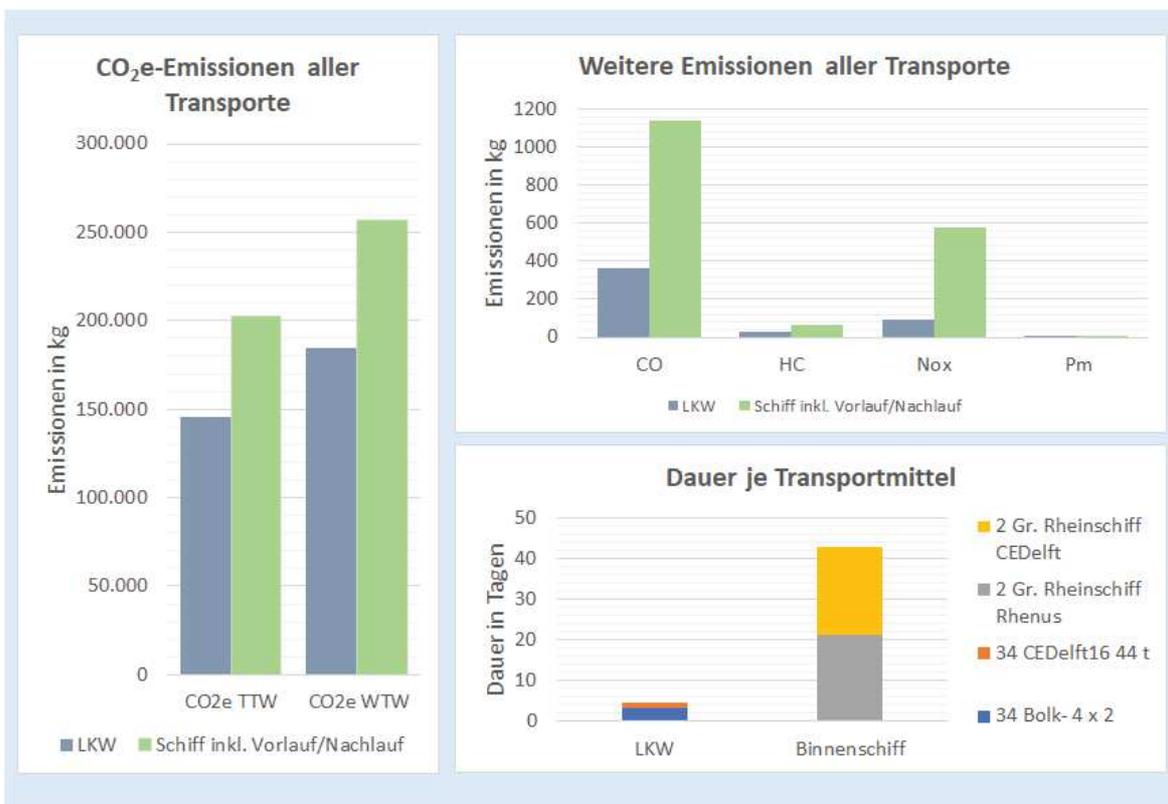


Abbildung 5.2: Emissionen und Dauer des 1. Vergleichs von Transporten

Ergebnisse LKW			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Transport 1			
Durchschnittswert betrachteter BOLK-LKW			
Anzahl der Güter	34	-	Mähdrescher
LKW-Typ Leermasse	8,23	t	Bolk-4 x 2
Auflieger-Typ Leermasse	11,00	t	3-Achs-Semi
Anzahl der LKW	34	-	
Nutzlast pro LKW	16,28	t	Durchschnitt
Grundfläche pro LKW	37	m ²	Durchschnitt
Strecke	2378	km	
Strecke Leerkilometer	357	km	
Bolk-Verbrauch leer	1,00	L/(100 km t)	
Bolk-Verbrauch Nutzlast	0,75	L/(100 km t)	
Transport 2			
LKW CE DELFT 16 / 44,9 t GVW (NL)			
Anzahl der Güter	34	-	Mähdrescher
LKW-Typ Leermasse	7,70	t	CEDelft16 44 t
Auflieger-Typ Leermasse	8,00	t	
Anzahl der LKW	34	-	
Nutzlast pro LKW	16,28	t	Durchschnitt
Grundfläche pro LKW	37	m ²	Durchschnitt
Strecke	2378	km	
Strecke Leerkilometer	357	km	

Ergebnisse Schiff			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Anzahl der Güter	68	-	Mähdrescher
Strecke Ara-Kanäle	109	km	
Strecke Rhein	462	km	zu Berg
Strecke Main	384	km	zu Berg
Strecke Main-Donau-Kanal	171	km	
Strecke Kelheim-Passau	178	km	Donauabschn.
Strecke Donau	1933	km	zu Tal
Strecke Konstanz-Kanal	64	km	
Gesamtstrecke	3301	km	
Transport 1 Antwerpen-Konstanz			
Rhenus Logistics: Großes Rheinschiff M8			
Anzahl der Schiff(e)	2	-	
Beladungsfaktor Schiff(e)	0,09	% t/tmax	
Transport 2 Antwerpen-Konstanz			
CE DELFT 16: Großes Rheinschiff M8			
Anzahl der Schiff(e)	2	-	
Beladungsfaktor Schiff(e)	0,09	% t/tmax	

Tabelle 5.2: Zu den Ergebnissen zugehörige Eingabewerte des 1. Vergleichs von Transporten

5.3 2. Vergleich von Transporten

5.3.1 Güter und zugehörige Transportmittel

Im 2. Vergleich von Transporten wird 1 Windradturm, siehe Absatz 2.5.3, je Schiffstyp aus unterschiedlicher Datenquelle transportiert, siehe Absatz 5.1.1. In Summe werden 2 Windradtürme aufgeteilt auf 4 Binnenschiffe.

Für den LKW Transport aus Erfahrungswerten werden für alle 2 Windradtürme 4 x 2-Zugmaschinen mit 3-Achs-Semi-Aufliegern für die Windradeinzelteile sowie 8 x 4-Zugmaschinen mit 6-Achs-Semi-Aufliegern für die Fundamente, aus den Tabellen 2.5 und 2.6 gewählt. Die CE Delft-LKW werden in diesem Beispiel nicht betrachtet, da diese nicht für den Windradtransport geeignet sind, vgl. [39].

5.3.2 Eingabetabelle Berechnungstool

	Güter	Anzahl	Masse	Grundfläche	LKW-Typ	LKW-Auflieger
	-	-	in t	in m ²	-	-
Tr. 1	Windradturm	1	1252,8	999,16	Bolk-4 x 2	3-Achs-Semi
	Fundament	1	56	20,50	Bolk-8 x 4	6-Achs-Semi
Tr. 2	Windradturm	1	1252,8	999,16	Bolk-4 x 2	3-Achs-Semi
	Fundament	1	56	20,50	Bolk-8 x 4	6-Achs-Semi

	Schiffstyp	Strecke	Vorlauf	Nachlauf	Starthafen	Zielhafen
	-	in km	in km	in km	-	-
Tr. 1	Gr. Rheinschiff Rhenus	2378	55	43	Antwerpen	Konstanza
	Gr. Rheinschiff Rhenus	2378	55	43	Antwerpen	Konstanza
Tr. 2	Gr. Rheinschiff CEDelft	2378	55	43	Antwerpen	Konstanza
	Gr. Rheinschiff CEDelft	2378	55	43	Antwerpen	Konstanza

	Bolk-V. leer	Bolk-V. Nutzl.	LF-Ant. S	LF-Ant. VL/NL	RoRo-V. Berg	RoRo-V. Tal
	in L/(100 km t)	in L/(100 km t)	in %	in %	in L/100 km	in L/100 km
Tr. 1	1	0,75	15	100		
	1	0,75	15	100		
Tr. 2	1	0,75	15	100		
	1	0,75	15	100		

Tabelle 5.3: Angabe der zu berechnenden Transporte des 2. Vergleichs, von der Transporttabelle der Eingabeseite des Tools

5.3.3 Ergebnisse Berechnungstool

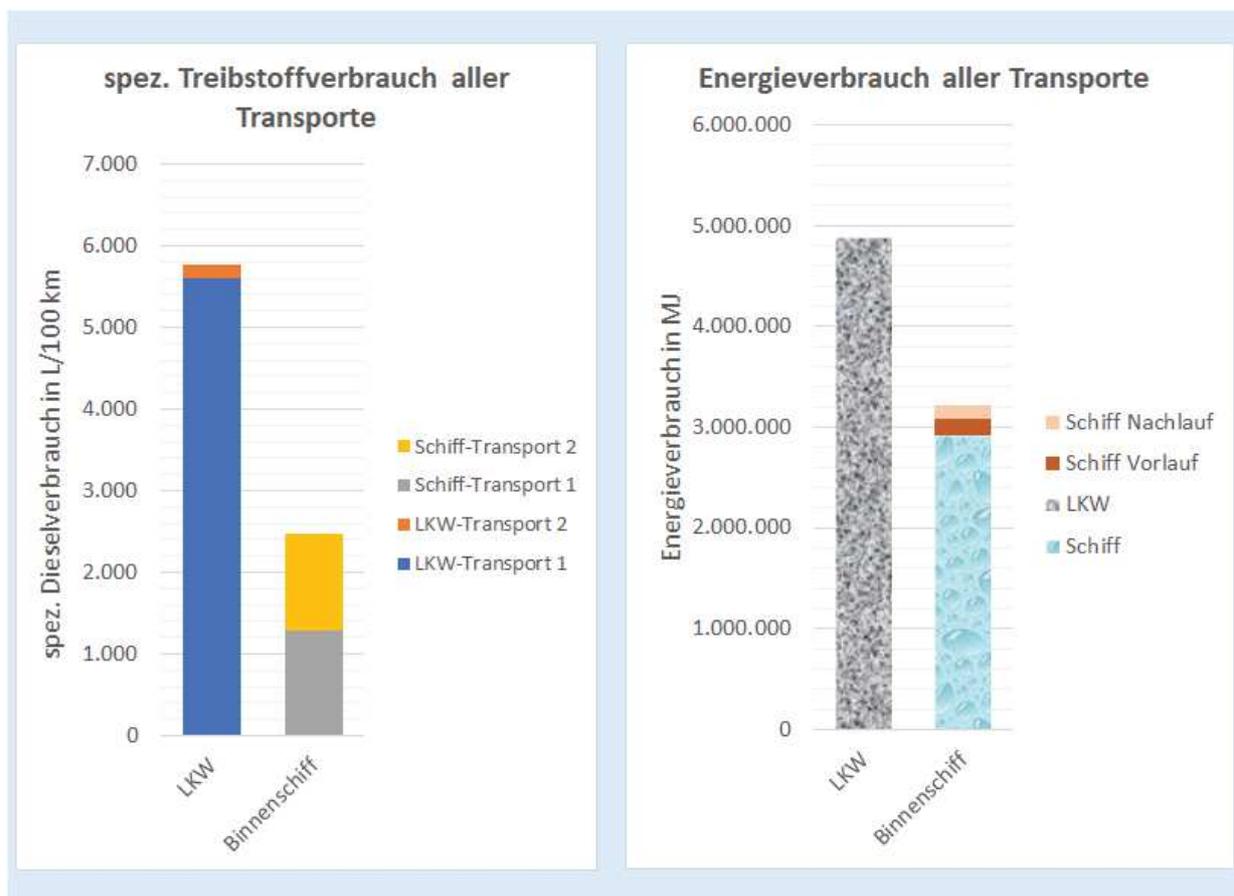


Abbildung 5.3: Kraftstoffverbrauch und Energieeinsatz des 2. Vergleichs von Transporten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

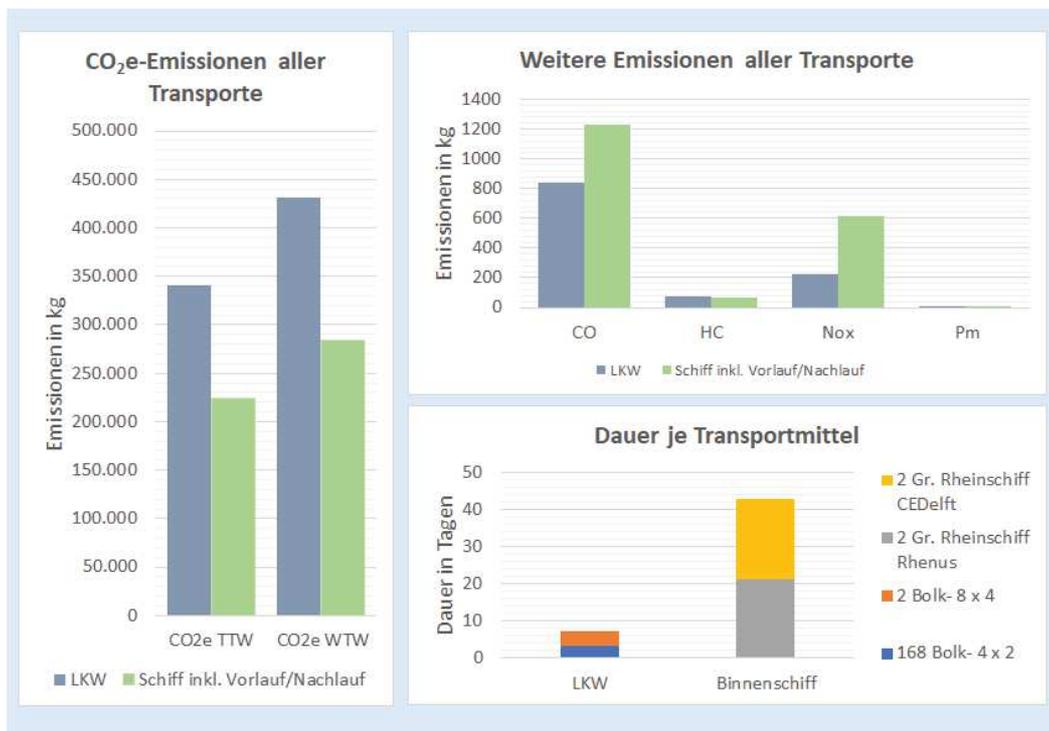


Abbildung 5.4: Emissionen und Dauer des 2. Vergleichs von Transporten

Ergebnisse LKW			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Transport	1		
Durchschnittswert betrachteter BOLK-LKW			
Anzahl der Güter	2	-	Windradturm
LKW-Typ Leermasse	8,23	t	Bolk-4 x 2
Auflieger-Typ Leermasse	11,00	t	3-Achs-Semi
Anzahl der LKW	168	-	
Nutzlast pro LKW	14,91	t	Durchschnitt
Grundfläche pro LKW	12	m ²	Durchschnitt
Strecke	2378	km	
Strecke Leerkilometer	357	km	
Bolk-Verbrauch leer	1,00	L/(100 km t)	
Bolk-Verbrauch Nutzlast	0,75	L/(100 km t)	
Transport	2		
Durchschnittswert betrachteter BOLK-LKW			
Anzahl der Güter	2	-	Fundament
LKW-Typ Leermasse	13,01	t	Bolk-8 x 4
Auflieger-Typ Leermasse	24,00	t	6-Achs-Semi
Anzahl der LKW	2,00	-	
Nutzlast pro LKW	56,00	t	Durchschnitt
Grundfläche pro LKW	20	m ²	Durchschnitt
Strecke	2378	km	
Strecke Leerkilometer	357	km	
Bolk-Verbrauch leer	1,00	(L/100 km)/t	
Bolk-Verbrauch Nutzlast	0,75	(L/100 km)/t	

Ergebnisse Schiff			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Anzahl der Güter	2	-	Windradturm Fundament
Strecke Ara-Kanäle	109	km	
Strecke Rhein	462	km	zu Berg
Strecke Main	384	km	zu Berg
Strecke Main-Donau-Kanal	171	km	
Strecke Kelheim-Passau	178	km	Donauabschn.
Strecke Donau	1933	km	zu Tal
Strecke Konstanza-Kanal	64	km	
Gesamtstrecke	3301	km	
Transport	1		Antwerpen-Konstanza
Rhenus Logistics: Großes Rheinschiff M8			
Anzahl der Schiff(e)	2	-	
Beladungsfaktor Schiff(e)	0,22	% t/tmax	
Transport	2		Antwerpen-Konstanza
CE DELFT 16: Großes Rheinschiff M8			
Anzahl der Schiff(e)	2	-	
Beladungsfaktor Schiff(e)	0,22	% t/tmax	

Tabelle 5.4: Zu den Ergebnissen zugehörige Eingabewerte des 2. Vergleichs von Transporten

5.4 3. Vergleich von Transporten

5.4.1 Güter und zugehörige Transportmittel

Im 3. Vergleich werden 44 Windkraftkomponenten, siehe Tabelle 2.18, je Schiffstyp aus unterschiedlicher Datenquelle transportiert, siehe Absatz 5.1.1. In Summe werden 88 Windkraftkomponenten aufgeteilt auf 4 Binnenschiffe.

Für den LKW Transport aus Erfahrungswerten werden für alle 88 Windkraftkomponenten 8 x 4-Zugmaschinen mit 9-Achs-Semi-Aufliegern, aus den Tabellen 2.5 und 2.6 gewählt. Die CE Delft-LKW werden in diesem Beispiel nicht betrachtet, da diese nur eine maximale Nutzlast von 29.200 kg transportieren können, vgl. [39].

5.4.2 Eingabetabelle Berechnungstool

	Güter	Anzahl	Masse	Grundfläche	LKW-Typ	LKW-Auflieger
	-	-	in t	in m ²	-	-
Tr. 1	Windkraftkomponente	44	79	28,00	Bolk- 8 x 4	9-Achs-Semi
Tr. 2	Windkraftkomponente	44	79	28,00	Bolk- 8 x 4	9-Achs-Semi

	Schiffstyp	Strecke	Vorlauf	Nachlauf	Starthafen	Zielhafen
	-	in km	in km	in km	-	-
Tr. 1	Gr. Rheinschiff Rhenus	2378	55	43	Antwerpen	Konstanza
Tr. 2	Gr. Rheinschiff CEDelft	2378	55	43	Antwerpen	Konstanza

	Bolk-V. leer	Bolk-V. Nutzl.	LF-Ant. S	LF-Ant. VL/NL	RoRo-V. Berg	RoRo-V. Tal
	in L/(100 km t)	in L/(100 km t)	in %	in %	in L/100 km	in L/100 km
Tr. 1	1	0,75	15	100		
Tr. 2	1	0,75	15	100		

Tabelle 5.5: Angabe der zu berechnenden Transporte des 3. Vergleichs, von der Transporttabelle der Eingabeseite des Tools

5.4.3 Ergebnisse Berechnungstool

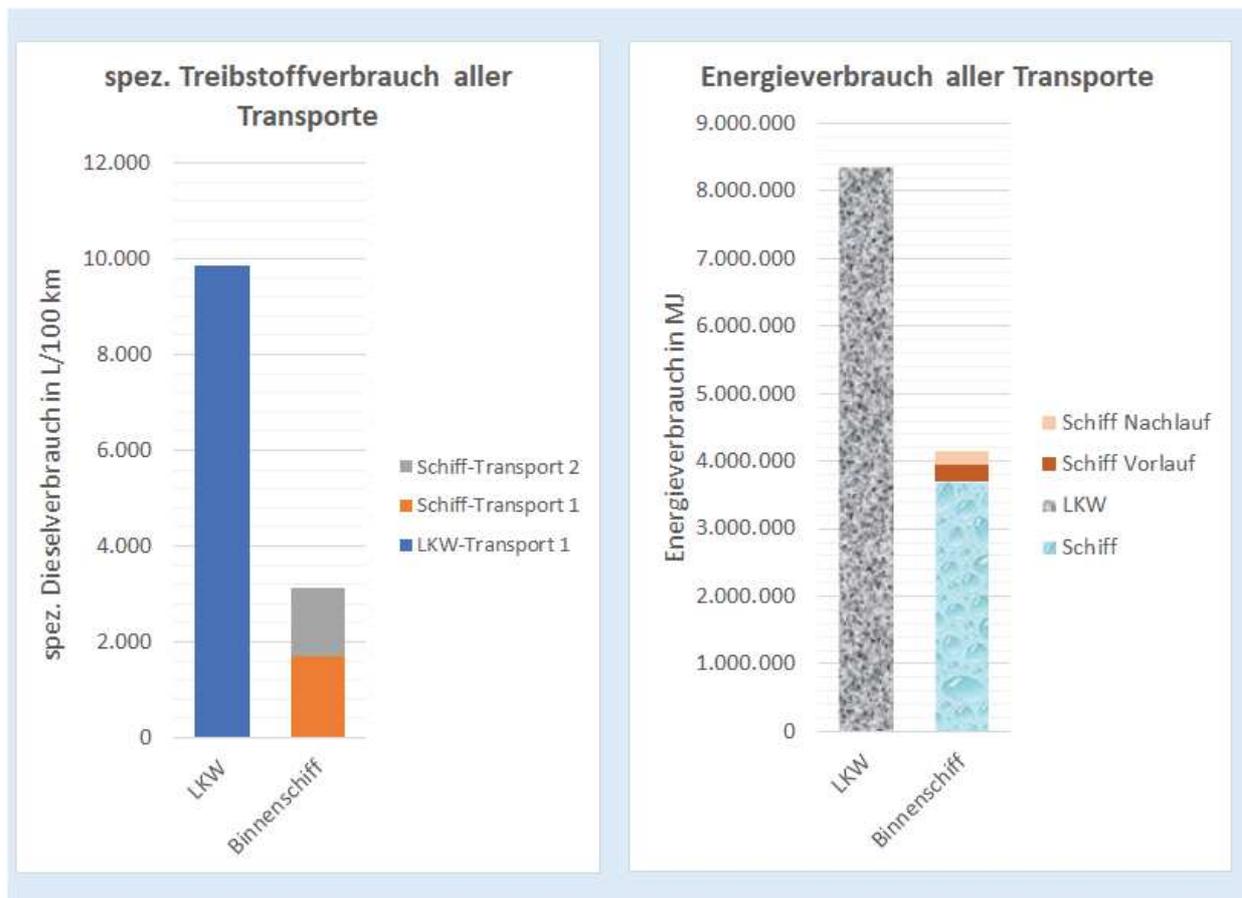


Abbildung 5.5: Kraftstoffverbrauch und Energieeinsatz des 3. Vergleichs von Transporten

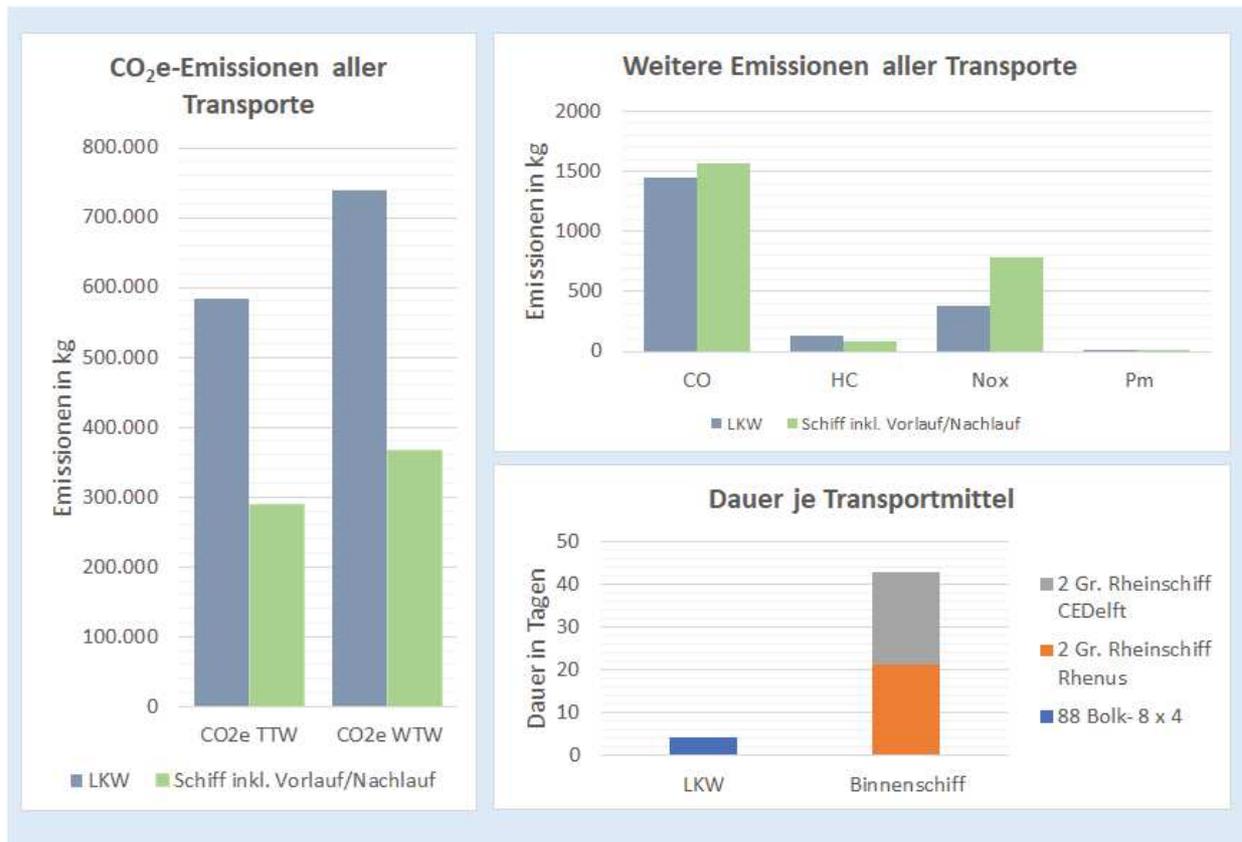


Abbildung 5.6: Emissionen und Dauer des 3. Vergleichs von Transporten

Ergebnisse LKW			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Transport	1		
Durchschnittswert betrachteter BOLK-LKW			
Anzahl der Güter	88	-	Windkraftkomponente
LKW-Typ Leermasse	13,01	t	Bolk- 8 x 4
Auflieger-Typ Leermasse	33,00	t	9-Achs-Semi
Anzahl der LKW	90	-	
Nutzlast pro LKW	79,00	t	Durchschnitt
Grundfläche pro LKW	28	m ²	Durchschnitt
Strecke	2378	km	
Strecke Leerkilometer	357	km	
Bolk-Verbrauch leer	1,00	L/(100 km t)	
Bolk-Verbrauch Nutzlast	0,75	L/(100 km t)	

Ergebnisse Schiff			
Bezeichnung	Ergebnis	Einheit	Erklärung
Anzahl der Güter	88	-	Windkraftkomponente
Strecke Ara-Kanäle	109	km	
Strecke Rhein	462	km	zu Berg
Strecke Main	384	km	zu Berg
Strecke Main-Donau-Kanal	171	km	
Strecke Kelheim-Passau	178	km	Donauabschn.
Strecke Donau	1933	km	zu Tal
Strecke Konstanza-Kanal	64	km	
Gesamtstrecke	3301	km	
Transport	1		Antwerpen-Konstanza
Rhenus Logistics: Großes Rheinschiff M8			
Anzahl der Schiff(e)	2	-	
Beladungsfaktor Schiff(e)	0,59	% t/tmax	
Transport	2		Antwerpen-Konstanza
CE DELFT 16: Großes Rheinschiff M8			
Anzahl der Schiff(e)	2	-	
Beladungsfaktor Schiff(e)	0,59	% t/tmax	

Tabelle 5.6: Zu den Ergebnissen zugehörige Eingabewerte des 3. Vergleichs von Transporten

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Vorab ist anzumerken, dass die gewählte Strecke per Binnenschiff mit 3.301 km deutlich länger ist, als die Strecke per Direkttransport mittels LKW mit 2378 km. Wird anschließend noch der Schiffsvorlauf mit 55 km und der Schiffsnachlauf mit 43 km zum Schiffstransport hinzugerechnet, so zeigt sich dass die LKW-Strecke um ca. 30 % geringer ist, als die Distanz des Schiffstransportes inklusive dem Vor- und Nachlauf. Dies liegt hauptsächlich daran, dass Wasserstraßen dem natürlichen Verlauf der Flüsse folgen, während Straßen bewusst effizient für den Transport gebaut werden.

5.5.1 Energieverbräuch

Bei der Ermittlung welche Güter betrachtet werden sollen, um eine möglichst große Spannweite der möglichen Ergebnisse darzustellen, wird zunächst das Verhältnis Masse je Gut zu Grundfläche je Gut gebildet, siehe Gleichung 5.2. Diese Relation repräsentiert die Packungsdichte. Am geringsten fällt sie bei Mähreschern mit $0,436 \text{ t/m}^2$ aus und am höchsten bei den Windkraftkomponenten mit $2,821 \text{ t/m}^2$. Die Packungsdichte der transportierten Windradtürme befindet sich im Mittelfeld aller in diesem Tool implementierten Güter mit $1,284 \text{ t/m}^2$. Im ersten Schritt kann daraus geschlossen werden, dass die Binnenschifffahrt mit steigender Packungsdichte effizienter wird. Diese Aussage trifft solange zu, als das Verhältnis zwischen zulässiger Masse und Beladungsfläche eines Schiffes größer ist, als die Packungsdichte der betrachteten Güter, siehe Gleichung 5.1. Denn sobald dies nicht mehr zutrifft, wird die massebezogene Kapazität des Schiffes erreicht bevor die Beladungsfläche des Schiffes voll ist und damit bleibt die Anzahl der transportierbaren Güter trotz steigender Packungsdichte in jenem Fall konstant.

Um drei möglichst repräsentative Vergleiche zu finden, wird wie folgt vorgegangen. Der 1. Vergleich von Transporten, siehe Abschnitt 5.2, betrachtet von allen in dieser Arbeit berücksichtigten Gütern, jene mit der geringsten Packungsdichte. Der 2. Vergleich, siehe Abschnitt 5.3, benötigt für die Transporte die größte Anzahl an LKW, im Verhältnis zur

Anzahl der erforderlichen Binnenschiffe, aufgrund der vielen Einzelteile. Im 3. Vergleich von Transporten, siehe Abschnitt 5.4, werden von allen in dieser Arbeit angeführten Güter, jene mit der größten Packungsdichte, transportiert.

$$D_{Schiff} = \frac{M_{Schiff}}{A_{Schiff} 1000} \quad (5.1)$$

$$D_{Gut} = \frac{M_{Gut}}{A_{Gut} 1000} \quad (5.2)$$

Beschreibung der Gleichung 5.2 :

D_{Gut}	= Packungsdichte des betrachteten Gutes in t/m ²
M_{Gut}	= Masse des zu transportierenden Gutes je Stück in kg
A_{Gut}	= Grundfläche des jeweiligen Gutes in m ²
D_{Schiff}	= Verhältnis der zul. Masse zur Ladefläche des betrachteten Schiffes in t/m ²
M_{Schiff}	= zulässige Masse des jeweiligen Schiffes in kg
A_{Schiff}	= Beladbare Grundfläche des jeweiligen Schiffes in m ²
$D_{Europaschiff}$	= 2,91 t/m ² , Tabelle 2.2
$D_{RHC-Schiff}$	= 3,31 t/m ² , Tabelle 2.3
$D_{gr.Rheinschiff}$	= 4,43 t/m ² , Tabelle 2.4
$D_{RoRo-Ponton}$	= 1,81 t/m ² , Tabelle 2.8
$D_{RoRo-Schiff}$	= 0,86 t/m ² , Tabelle 2.7

Bei gleicher Anzahl an Binnenschiffen werden im 1. Vergleich 1.107.040 kg, im 2. Vergleich 2.616.880 kg und im 3. Vergleich 6.952.000 kg transportiert. Dies widerspiegelt auch der Beladungsfaktor der Schiffe, in Tabelle 5.2, in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.6.

Die Binnenschifffahrt weißt im 3. Vergleich von Transporten, aufgrund der Packungsdichte der Güter, die höchste Effizienz auf. Für den Vergleich von Transporten kommt es aber auch darauf an, wie effizient die LKW-Transporte sind. Im 2. Vergleich werden 2 Windradtürme

transportiert, die aus je 91 Einzelteilen bestehen. Da es sich um eine hohe Anzahl an Gütern unter 20.000 kg handelt, müssen diese durch LKW mit einer zulässigen Gesamtmasse von 40.000 kg transportiert werden, siehe Abschnitt 2.3.1, in Absatz „Beschreibung der Tabellen 2.5 und 2.6“. Daraus folgt eine große Anzahl an erforderlichen LKW im Verhältnis zu den benötigten Binnenschiffen, siehe Abbildung 5.4. Je mehr LKW oder Binnenschiffe für Transporte benutzt werden, desto mehr zusätzliche Leermasse der Transportmittel muss vom Startpunkt zum Zielpunkt gebracht werden. Darum und obwohl die Packungsdichte der Windradtürme näher am Mähdrescher ist, als an den Windkraftkomponenten, siehe Abschnitt 5.5.1, hat die Binnenschiffahrt im 2. Vergleich einen deutlich niedrigeren Energieverbrauch als der Straßentransport, siehe Abbildung 5.3.

5.5.2 Emissionen

Bei der Betrachtung der klimarelevanten Emissionen ausgedrückt durch das CO₂-Äquivalent, wird sowohl beim Tank-to-Wheel- als auch beim Well-to-Wheel-Ausstoß (Absatz 2.6.1) durch den Transport deutlich, dass diese direkt proportional zum Treibstoffverbrauch sind und somit die Interpretation der drei Vergleiche zum gleichen Ergebnis wie in Absatz 5.5.1 führen. Im ersten Vergleich von Transporten emittieren die LKW weniger Treibhausgase als die Binnenschiffe, während beim zweiten und dritten Vergleich der Transporte, die Binnenschiffe weniger Treibhausgase ausstoßen als die LKW.

Da die im EU Stufe V Standard festgelegten Grenzwerte für Binnenschiffahrtsemissionen (Tabelle 2.21) höher ausfallen als die Beschränkungen für den LKW-Transport (Tabelle 2.22), stoßen die Binnenschiffe, nach der in dieser Arbeit angewandten Berechnung, in jedem Fall mehr CO und NO_x aus, als die LKW. Selbst wenn die Binnenschiffe, wie im 3. Vergleich für die Transporte weniger Energie benötigen als die LKW, bleiben die CO-Emissionen ca. 1,1 mal höher und die NO_x-Emissionen ca. 2 mal höher als beim LKW-Transport. Nur die Emissionen der Kohlenwasserstoffe HC und die Partikelemissionen PM₁₀ sind im 3. Vergleich, aufgrund des geringeren Treibstoffverbrauchs des Binnenschiffes, bei den LKW-Transporten höher, Abbildung 5.4.

5.5.3 Dauer der Transporte

Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 7-20 km/h (Tabelle 2.9) von Binnenschiffen auf zumeist längeren Strecken als beim LKW-Transport der mit 60-70 km/h (Tabelle 2.5) durchschnittlich fährt, lässt sich leicht schlussfolgern, dass der Transport der Wasserstraßen deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt als der Straßentransport.

Dies ist laut der Berechnung in dieser Arbeit, siehe in Abbildungen 5.2, 5.4 und 5.6 auch der Fall. Dies gilt obwohl das Schiff 14 h je Tag fahren kann, während LKW an die Lenkzeitgesetze, sowie das Wochenendfahrverbot gebunden sind, Tabelle 2.20. Weitere Details zur Interpretation der Ergebnisse der Zeitkalkulation sind in Absatz 3.5.7 angeführt.

5.6 Stärken und Schwächen des Tools

Bei der Entwicklung des Tools wurde auf die Anwendbarkeit in der Praxis besonders Wert gelegt. Eingaben für individuelle Transporte können sehr detailliert getätigt werden. Dies erfordert Fachexpertise im Bereich der Logistik.

Eine weitere Stärke des Tools ist, dass die komplette, strukturierte Datenbank mit zugehörigen Quellen und eventuellen Zusatzinformationen im gleichen Excel-Dokument enthalten ist und somit die Werte, die für die Berechnung verwendet werden, einfach nachgelesen werden können.

Eine mögliche Einschränkung könnte durch die Verwendung der graphischen Berechnungsoberfläche entstehen, da einige Gleichungen viele verschiedene Parameter aus unterschiedlichen Blättern zur Berechnung verwenden, sind diese nur mit hohem Aufwand nachvollziehbar. Dies kann eine mögliche Erweiterung des Programms erschweren.

Die Berechnungsmethode der Luftschadstoffe ausgenommen CO₂, erfolgte in dieser Arbeit durch eine Verwendung der Grenzwerte des Euro VI Standards für LKW und des EU Stufe V Standards für Binnenschiffe, siehe Tabelle 2.21 und Tabelle 2.22. Diese Emissionen sind zwar von der vom Motor geleisteten Arbeit abhängig, widerspiegeln aber keine realen Messwerte, sondern nur jene Werte, die emittiert würden, wenn alle Transportmittel genau

die Abgasgrenzwerte einhielten.

In diesem Tool ist es dem Benutzer möglich, sowohl Daten aus Statistiken als auch praktische Erfahrungswerte für die Berechnung zu verwenden. Dies ermöglicht unterschiedliche Betrachtungsweisen der einzelnen Transporte.

5.6.1 Vergleich mit EcoTransIT

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [17] angeführt:

“EcoTransIT,, ist ein kostenfrei zugängliches Online-Berechnungstool, erstellt von mehreren Forschungsinstituten, vgl. [35], zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Emissionen eines Transportsystems. Auch in diesem Programm können unterschiedliche Transportmittel miteinander verglichen werden. Dieses Online-Tool ist einfach zu bedienen und bei Bedarf kann die Dateneingabe von global bis detailliert gewählt werden. Es gibt eine große Vielfalt an Auswahl von Transportmitteln und neben der Masse kann auch die Packungsdichte des Gutes unterteilt in vier Kategorien Massengut, Durchschnittsgut, Volumengut, sowie Containertransport ausgewählt werden. Durchschnittliche Beladungsfaktoren des Transportmittels können eingetragen werden und die Streckenermittlung erfolgt auf einer implementierten Karte.

Der erhebliche Unterschied der Berechnung durch „EcoTransIT“ gegenüber dem in dieser Diplomarbeit entwickelten Berechnungstool, ist die Genauigkeit der Berechnung. Geht es darum Durchschnittswerte eines bestimmten Transportmittels zu berechnen, so ist “EcoTransIT,, bestens geeignet. Für individuelle Transporte, bei welchen die Transportmittel nicht durchschnittlich beladen sind, ermittelt dieses Online-Tool oft Ergebnisse weitab der Realität, vgl. [22]. Dies ist darauf zurückzuführen dass die MJ/tkm-Berechnungsmethode, siehe Abschnitt 3.7.1, angewandt wird und diese sich ausschließlich an Durchschnittswerten orientiert. Es werden weder Anzahl der erforderlichen Transportmittel berücksichtigt, noch sind Leerfahrten für sich alleine stehend berechenbar. Bei der Eingabe einer bestimmten Strecke und keiner Beladung ergibt dies automatisch keinen Verbrauch, obwohl in der Realität ein Energieaufwand vorhanden wäre, vgl. [20].

Das in dieser Arbeit präsentierte Berechnungstool kann unabhängig vom Beladungsfaktor

realitätsgetreue und genaue Ergebnisse für individuelle Transporte liefern, da sowohl die Nichtlinearität in der Verbrauchskurve der Binnenschiffe, als auch die Anzahl der Transportmittel berücksichtigt werden. Das heißt, wenn aufgrund der Flächenbegrenzung die Last von einem Schiff auf ein Weiteres verlagert wird, steigt trotz gleich bleibender Transportlast der Verbrauch. Des Weiteren können, wie oben bereits erwähnt, Leertransporte der Binnenschifffahrt berücksichtigt werden, siehe Absatz 4.4.1.

5.7 Validierung des Berechnungstools

Um das, im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelte Berechnungstool zu überprüfen, wurde dieses zusammen mit einem Experten aus der Binnenschifffahrt, vgl. [23] und einem Experten für LKW-Transport, vgl. [22] getestet.

Dafür wurde eine Teststrecke gewählt, für welche die Treibstoffverbräuche der Transportmittel, durch die beiden Experten, abschätzbar waren. Als Startort wurde Tiel und als Zielort Bratislava gewählt. Für den Transport wurden Windkraftkomponenten herangezogen, siehe 2.18, sowie weitere Güter, die als vertraulich gelten und nicht im Berechnungsprogramm implementiert sind.

Der vom Berechnungsprogramm ermittelte Verbrauch des LKW-Transports, wurde durch eine Abschätzung des Experten für LKW-Transport, als realistisch eingestuft, vgl. [22]. Der Treibstoffverbrauch des großen Rheinschiffs aus den Rhenusdaten, wurde vom Experten für Binnenschiffe ebenfalls als realistisch eingestuft, vgl. [23]. Bei der Betrachtung des RoRo-Schiffes allerdings, wurden die Ergebnisse des Treibstoffverbrauchs als nicht realistisch eingestuft. Aus diesem Grund wurde im Berechnungsprogramm die Ermittlung des Verbrauchs des RoRo-Schiffs, wie in Abschnitt 3.5.3 gezeigt angepasst.

Vor der Validierung wurde der Energieverbrauch des RoRo-Schiffs, gleich wie beim RoRo-Ponton mit Schubschiff, ermittelt. Anhand einer Strecke mit bekannter Beladung und bekanntem Treibstoffverbrauch, siehe Tabelle 2.7, wurde ein durchschnittlicher spezifischer Verbrauch ermittelt und anschließend das Verhältnis von Verbrauch über Beladung an die Kurve des großen Rheinschiffs von Rhenus angepasst, siehe Abschnitt 3.5.2.

Des Weiteren wurde aufgrund der Überprüfung der zuvor erwähnten Fachexperten, die Betriebsdauer der Binnenschiffe von 24 h pro Tag auf 14 h pro Tag umgestellt, siehe Tabelle 2.20.

5.8 Weiterentwicklungspotenzial

5.8.1 Erweiterung der implementierten Hafenliste

Das Berechnungstool wurde in den Makros so programmiert, dass die Liste der implementierten Häfen sehr einfach erweiterbar ist. Dafür muss im „Microsoft Excel“ File der Berechnung, das Blatt „Streckendetails“ ausgewählt werden und anschließend in der Tabelle „Streckendetails Schwarzes Meer bis ARA“ an der jeweils passenden Stelle der neue Hafen, der zugehörige Fluss und Flusskilometer eingetragen werden. Anschließend muss in der rechts davon stehenden Tabelle „Alle Häfen“ der neue Hafen an die alphabetisch sortiert, korrekte Stelle eingetragen werden.

5.8.2 Schüttgut berechnen

Das Berechnungstool wurde für Güter großer Abmessungen entwickelt, daher beruht die Berechnung auf der Anzahl, der Grundfläche und der Masse von Gütern. Da Schüttgut, wie zum Beispiel Kies oder Kohle, nicht in Stück angegeben werden kann, müsste in der Eingabeseite ein Stück ausgewählt werden und die Grundfläche für die zu transportierende Masse an Schüttgut geschätzt werden. Dabei wird allerdings nicht berücksichtigt, dass bei unterschiedlichen Schiffstypen, verschieden hoch aufgeschüttet werden kann. Dafür müsste in den Daten die Ladehöhe für Schüttgut je Schiff eingetragen werden und die Berechnung entsprechend angepasst werden, sodass bei Eingabe des Schiffstyps und der Masse, die benötigte Grundfläche automatisch ermittelt werden kann. Des Weiteren muss die Eingabeseite erweitert werden, sodass Schüttgut im Feld „Transportgut“ ausgewählt werden kann und dabei die Anzahl nicht eingegeben werden muss.

5.8.3 Aufteilung der Güter auf Binnenschiffe

Die Verteilung der Güter auf Schiffe und LKW ist so optimiert, dass alle zu transportierenden Güter gleichmäßig auf die Transportmittel aufgeteilt werden. Eine weitere Variante der optimalen Aufteilung der Güter, wäre jedes Transportmittel möglichst voll zu beladen. Wenn aus der Berechnung der benötigten Ladefläche, zum Beispiel zweieinhalb Schiffe für die betrachteten Güter erforderliche wären, so wären zwei Schiffe voll beladen und bei einem bleibt die Hälfte der Ladefläche frei. Die freie Fläche wird anschließend mit anderen Gütern aufgefüllt, die nicht in dieser Berechnung berücksichtigt sind. Dabei kann eine Allokation nach der Masse oder der Grundfläche der Güter erfolgen. Es wird also nicht der gesamte Treibstoffverbrauch des Transportes auf die betrachteten Güter bezogen, sondern nur die Hälfte des Verbrauches. Dies ist speziell für Binnenschiffe interessant, da diese möglichst voll beladen werden sollten, um hohe Effizienz zu gewährleisten.

Kapitel 6

Schlussfolgerung und Ausblick

Beim Vergleich des Land- und Flusstransportes von Gütern großer Abmessungen zeigt sich, dass hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Emissionen keine allgemeine Aussage getätigt werden kann, welches Transportmittel das Effizientere ist. Obwohl in vielen Forschungsberichten der Schifffahrt wie zum Beispiel von *via donau*, vgl. [34] oder vom Umweltbundesamt Deutschland, vgl. [31] dargestellt ist, dass die Binnenschifffahrt eine Tonne Beladung energieeffizienter als der LKW transportieren, zeigt die nähere Betrachtung, dass dies nicht allgemein gültig ist. Wie diese Diplomarbeit im Detail verdeutlicht, kann bei Gütern mit geringer Packungsdichte, trotz auf die Beladungsfläche bezogen voller Beladung eines Schiffes der Energieverbrauch des Binnenschiffes deutlich höher ausfallen als der bei einem LKW-Transport. Dies liegt zum einen daran, dass für die meisten Transporte Binnenschiffe eine deutlich längere Strecke zurücklegen müssen als LKW, um vom gleichen Startpunkt zum gleichen Zielpunkt zu gelangen, siehe Abschnitt 5.3. Zum anderen liegt es am geringen Beladungsfaktor von Binnenschiffen, denn Güter mit geringer Packungsdichte füllen die Beladungsfläche voll, während die auf die Masse bezogene Beladung nur einen Bruchteil der möglichen Kapazität des jeweiligen Schiffes ausmacht, siehe Abschnitt 5.2. Wird die Packungsdichte allerdings erhöht, oder handelt es sich um eine große Anzahl an leichteren Teilen, so ist die Binnenschifffahrt effizienter als der Straßentransport, siehe Abschnitt 5.3 und Abschnitt 5.4.

Um eine genaue Vergleichsanalyse durchführen zu können gilt, dass jeder Transportvergleich möglichst individuell analysiert werden muss und nicht nur verallgemeinert beurteilt werden kann. Für diese individuellen Vergleiche wurde im Zuge dieser Arbeit ein Berechnungstool entwickelt, das durch detaillierte Eingabe dabei unterstützen soll, möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu liefern.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch immer ein Experte bzw. eine Expertin des jeweiligen Fachgebietes heranzuziehen, um zu prüfen ob diese tatsächlich der Realität entsprechen können. Daten von individuellen Transporten können sowohl von, mit realen Messwerten verifizierten Daten aus statistischen Modellen, als auch von Durchschnittswerten aus der Erfahrung von Experten und Expertinnen deutlich abweichen.

6.1 Ausblick

Insgesamt zeigt sich, dass die Dokumentation von statistischen Daten, bei der Binnenschifffahrt und den LKW-Transporten unterschiedlich durchgeführt wird. Während für die LKW-Transporte kontinuierlich der spezifische Treibstoffverbrauch, Transportstrecken und Geschwindigkeiten digital erfasst werden, werden Transportdaten der Binnenschifffahrt zu meist händisch dokumentiert und nicht weiter aufbereitet. Beim Wassertransport, besteht in diesem Bereich noch Potenzial zur Digitalisierung und der statistischen Datenaufbereitung, um mit der Berechnung von Treibstoffverbrauch und Emissionen die Realität effizienter abbilden zu können.

Die Quelle des folgenden Absatzes ist in [44] angeführt:

Um die Treibhausgasemissionen durch Transportmittel in Zukunft zu reduzieren, muss in Betracht gezogen werden, auf alternative Treibstoffe, wie zum Beispiel Wasserstoff umzusteigen. Für die Binnenschifffahrt wurde von der „FOUNDATION ENERGY VALLEY“ das Forschungsprogramm „CLINSH“ ins Leben gerufen. CLINSH steht für „Clean Inland Shipping“. In Kooperation mit diversen Schifffahrtsunternehmen, werden Maßnahmen zur Reduzierung der negativen Umwelteinflüsse durch Binnenschiffstransporte durchgeführt, wie zum Beispiel der Einbau eines SCR-Katalysators, Umstieg auf LNG als Treibstoff, oder

die Vergrößerung der Ladefläche. Sowohl vor, als auch nach den Maßnahmen, werden je nach Maßnahme entsprechende Emissions- und Treibstoffverbrauchsmessungen durchgeführt und veröffentlicht.

Für die Speicherung von Wasserstoff ist ein Tankmaterial hoher Dichte erforderlich. Um die gleiche Energiemenge speichern zu können, wird der Wasserstofftank im Verhältnis zum herkömmlichen Dieseltank sehr schwer. Dies wirkt sich ungünstig auf den LKW-Transport aus. Bei Binnenschiffen ist die Leermasse des Schiffes von untergeordneter Bedeutung, aus diesem Grund hat das Binnenschiff im Bezug auf die Umstellung des Treibstoffs auf Wasserstoff einen bedeutenden Vorteil.

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN 1338, Formelschreibweise und Formelsatz, publisher =Beuth, year=2013.*
- [2] *AVV, Geschätzter Energieverbrauch von Binnenschiffen, Version 3.* Rotterdam: Beratungsdienst Verkehr und Transport, 2003.
- [3] *VERORDNUNG (EG) Nr. 561/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. März 2006 zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnungen (EWG) Nr. 3821/85 und (EG) Nr. 2135/98 des Rates sowie zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates, Artikel 6.* Amtsblatt der Europäischen Union, 2006.
- [4] *VERORDNUNG (EG) Nr. 595/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Juni 2009 über die Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG.* Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.
- [5] *Bottom-up-Berechnung des CO₂-Verbrauchs von Lastkraftwagen und Traktoren.* Den Haag: TNO, 2014.
- [6] *Brochure, DEUTZ-FAHR Mährescher Serie C7000.* DEUTZ-FAHR eine Marke von SDF, 2014.

- [7] *DIN EN 16258, Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN 16258:2012*. CEN, 2016.
- [8] *Dutch CO2 emission factors for road vehicles*. TNO, CE Delft, 2016.
- [9] *HÄFEN UND BINNENSCHIFFE*. Auszug aus dem „Handbuch der Donauschifffahrt“, via donau (2012) sowie aus „Donauschifffahrt in Österreich - Jahresbericht 2017“, REWWay, viadonau, 2017.
- [10] *Streckenatlas Main Teil II*. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Deutschland, 2017.
- [11] *Streckenatlas Main-Donau-Kanal*. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Deutschland, 2018.
- [12] *Brochure, DOOSAN Kettenbagger DX180LC-5*. Doosan Infracore Europe B.V., 2019.
- [13] *Brochure, DOOSAN Kettenbagger DX340LC-5*. Doosan Infracore Europe B.V., 2019.
- [14] *Brochure, DOOSAN Kettenbagger DX380LC-5*. Doosan Infracore Europe B.V., 2019.
- [15] *Brochure, DOOSAN Kettenbagger DX530LC-5*. Doosan Infracore Europe B.V., 2019.
- [16] *Bundeswasserstrassen klassifizierte binnenwasserstraßen*. Deutschland, WSV.de, 2019.
- [17] *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports Methodology and Data Update 2019*. ifeu Heidelberg, INFRAS Berne, IVE Hannover, 2019.
- [18] *Streckenatlas Main Teil I*. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Deutschland, 2019.
- [19] *Brochure, DOOSAN Kettenbagger DX235LCR-5*. Doosan Infracore Europe B.V., 2020.
- [20] Ecotransit World, Berechnung. <https://www.ecotransit.org/calculation.de.html>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.
- [21] *Expertenmeinung*. V., Experte für Binnenschifffahrt, Informationen über den Schriftverkehr erhalten, 2020.

- [22] *Expertenmeinung*. Bolk Transport GmbH, Vöcklabruck, Experte für LKW-Transport, Interview geführt durch S.Grimm, 2020.
- [23] *Expertenmeinung*. Bolk Transport GmbH, Vöcklabruck, Experte für Binnenschifffahrt, Interview geführt durch S.Grimm, 2020.
- [24] *Expertenmeinung*. I.S.W.B., Experte für Binnenschifffahrt, Interview geführt durch S.Grimm, 2020.
- [25] *Expertenmeinung*. Rh., Experte für Binnenschifffahrt, Informationen über den Schriftverkehr erhalten, 2020.
- [26] *Expertenmeinung*. v.d., Experte für Schiffstechnik, Informationen über den Schriftverkehr erhalten, 2020.
- [27] *Messwerte des Jahres 2019, MyTransics Bolk Datenbank*. Bolk Transport GmbH, 2020.
- [28] E. Boer, M. Otten, und H. Essen. *STREAM International freight: comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database*. CE Delft, 2011.
- [29] bussgeldkatalog.org. Abgas Standard Euro 6: Grenzwerte für NOx, Kohlenwasserstoffe und CO <https://www.bussgeldkatalog.org/euro-6-grenzwerte/>, abgefragt am 06.2020, durch S. Grimm.
- [30] About CE Delft. CE Delft, <https://www.cedelft.eu/en/about-ce-delft>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.
- [31] Umweltbundesamt Deutschland. Binnenschiffe. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/binnenschiffe#abgasgesetzgebung-fur-binnenschiffe>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.
- [32] DieselNet. Emission standards, eu: Nonroad engines. <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#vessel>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.
- [33] DieselNet. Emission test cycles, european emission standards for engines used in new non-road mobile machinery. <https://dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.

- [34] H. Hasenbichler. *Handbuch der Donauschifffahrt*. via donau, Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH, 2019.
- [35] IVE Hannover, ifer Heidelberg, INFRAS Berne. *EcoTransIT World, Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports, Methodology and Data update 2019*.
- [36] R. Karmineke. *RHEIN RADAR ATLAS*. ATLAS SCHIFFFAHRT VERLAG GMBH, 2004.
- [37] Shell Austria Gesellschaft m.b.H. B7 diesel mit bis zu 7% biodiesel; beimischungspflicht von biokraftstoffen. <https://www.shell.de/autofahrer/shell-kraftstoffe/shell-fuelsave-kraftstoffe/diesel-b7>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.
- [38] C. Michel. Navship boatrouting. <https://boatrouting.com/app/map.php?visit=true&binnen=true&sea=true>, abgefragt am 06.2020, durch S. Grimm..
- [39] M. Otten, M. Hoen, und L. Boer. *STREAM Freight Transport 2016: Emissions of Freight Transport Modes Version 2*. CE Delft, 2017.
- [40] Via Donau Österreichische Wasserstraßen-GmbH. danube-ports, danube logistics portal. <https://www.danube-logistics.info/danube-ports/search/#>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.
- [41] Via Donau Österreichische Wasserstraßen-GmbH. Schiffstypen. <http://www.viadonau.org/wirtschaft/transportachse-donau/schiffstypen>, abgefragt am 06.2020, durch S. Grimm.
- [42] S. Gores (Öko-Institut) Fabian Bergk Wolfram Knörr, Christoph Heidt. *Aktualisierung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035 (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014)*.
- [43] S. Gores (Öko-Institut) Fabian Bergk Wolfram Knörr, Christoph Heidt. *Danube Waterway Map, Wasserstraßenkarte Donau*, 2019.
- [44] CLINSH. FOUNDATION ENERGY VALLEY. <https://www.clinsh.eu/>, abgefragt am 07.2020, durch S. Grimm.